

Электроника

bhv®



Валерий Яценков

ТВОЙ ПЕРВЫЙ КВАДРОКОПТЕР: теория и практика



В. Яценков

ТВОЙ ПЕРВЫЙ КВАДРОКОПТЕР: теория и практика

bhv®

УДК 629.735.4+379.826
ББК 39.55я92
Я92

Яценков В. С.

Я92 Твой первый квадрокоптер: теория и практика. — СПб.: БХВ-Петербург, 2016. — 256 с.: ил. — (Электроника)

ISBN 978-5-9775-3586-1

Детально изложены практические аспекты самостоятельного изготовления и эксплуатации квадрокоптеров. Рассмотрены все этапы: от выбора конструкционных материалов и подбора компонентов с минимизацией финансовых затрат до настройки программного обеспечения и ремонта после аварии. Уделено внимание ошибкам, которые часто совершают начинающие авиамodelисты. В доступной форме даны теоретические основы полета мультироторных систем и базовые понятия работы со средой Arduino IDE. Приведено краткое описание устройства и принципа работы систем GPS и Глонасс, а также современных импульсных источников бортового питания и литий-полимерных батарей. Подробно изложен принцип работы и процесс настройки систем OSD, телеметрии, беспроводного канала Bluetooth и популярных навигационных модулей GPS Ublox. Рассказано об устройстве и принципах работы интегральных сенсоров и полетного контроллера. Даны рекомендации по подбору оборудования FPV начального уровня, приведен обзор программ для компьютеров и смартфонов, применяемых при настройке оборудования квадрокоптера.

*Для читателей,
интересующихся электроникой, робототехникой, авиамodelизмом*

УДК 629.735.4+379.826
ББК 39.55я92

Группа подготовки издания:

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зам. главного редактора	<i>Игорь Шишигин</i>
Зав. редакцией	<i>Екатерина Капалыгина</i>
Редактор	<i>Анна Кузьмина</i>
Компьютерная верстка	<i>Ольги Сергиенко</i>
Корректор	<i>Зинаида Дмитриева</i>
Дизайн обложки	<i>Марины Дамбиевой</i>

Подписано в печать 30.11.15
Формат 70×100^{1/16}. Печать офсетная. Усл. печ. л. 20,64.
Тираж 1500 экз. Заказ № 1232.
"БХВ-Петербург", 191036, Санкт-Петербург, Гончарная ул., 20
Первая Академическая типография "Наука"
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12/28

ISBN 978-5-9775-3586-1

© Яценков В. С., 2016
© Оформление, издательство "БХВ-Петербург", 2016

Оглавление

От автора	11
ЧАСТЬ I. ТЕОРИЯ	13
Глава 1. Принцип работы квадрокоптера	15
Глава 2. Обязательные компоненты квадрокоптера.....	19
Рама.....	19
Полетный контроллер	21
Принцип работы интегрального гироскопа.....	22
Принцип работы интегрального акселерометра	24
Принцип работы интегрального магнитометра (компаса).....	26
Устройство интегрального барометра	28
Устройство ультразвукового сонара	30
Аппаратура радиоуправления.....	33
Функция Failsafe.....	36
Модуляция сигнала PPM.....	37
Формат сигналов PCM	39
Совместимость аппаратуры стандартов DSM2/DSMX	40
Сопряжение приемника и передатчика (биндинг)	41
Импульсы PWM, триммеры и субтриммеры.....	41
Расходы и экспоненты.....	42
Конвертер PPM-SUM	44
Приемник-спутник.....	46
Встроенная телеметрия	46
Антенны.....	46
Ненаправленные антенны	49
Направленные антенны	52
Системы слежения за направлением	53
Диверсификация антенн.....	55
Двигатели	56
Воздушные винты.....	58
Регуляторы оборотов.....	60

Батарея и зарядное устройство	62
Обозначения параметров силовой литиевой батареи	63
Зарядка литиевых батарей	64
Особенности эксплуатации и хранения	67
Подготовка батарей к хранению	68
Источник бортового питания	68
Последовательный линейный стабилизатор	69
Импульсные стабилизаторы-преобразователи	70
Индикатор разряда батареи	72
Глава 3. Дополнительные компоненты квадрокоптера	74
Оборудование видеоканала FPV	74
Видеокамеры	75
Видеоконмутатор	75
Стабилизированный подвес	76
Видеопередатчик и видеоприемник	78
Видеомонитор и видеоочки	79
Приемники GPS	80
Принцип определения координат	81
Геометрический фактор	83
Альманах и эфемериды	83
"Холодный" старт	84
"Теплый" старт	84
"Горячий" старт	84
Технология A-GPS	85
Антенны GPS	85
Поток данных GPS, протокол NMEA	86
Протокол U-BLOX (UBX)	87
Адаптер Bluetooth	88
Телеметрия и OSD	89
Универсальный радиоканал (радиомодем)	94
Бустеры и репитеры	95
Жидкокристаллические и OLED-дисплеи	97
Средства поиска: биперы, маячки, GPS-трекеры	99
Сервомашинки	101
ЧАСТЬ II. ПРАКТИКА	105
Глава 4. Подготовка к изготовлению квадрокоптера	107
Подбор силовых компонентов	108
Расчеты и оптимизация	108
Стойкость конструкции к авариям	111
Конструкционные материалы	113
Виброзащита	118
Избыточное демпфирование	119
Демпфирование подвеса камеры	120
Фиксация резьбовых соединений	121
Крепление моторов и винтов	121
Магнитоизоляция	124

Глава 5. Сборка и настройка квадрокоптера	126
Изготовление рамы	126
Балансировка воздушных винтов	129
Балансировка моторов	131
Сборка квадрокоптера	133
Настройка опций и параметров прошивки	134
Подключение платы контроллера к компьютеру	135
Среда разработки Arduino IDE	136
Настройка базовых опций кода прошивки	138
Тип рамы	139
Минимальный рабочий газ	139
Максимальный рабочий газ	140
Минимальный газ при включении	140
Скорость шины I ² C	140
Тип стандартной платы	141
Независимые сенсоры	141
Активация моторов (арминг)	141
Модификации радиоприемника	141
Скорость портов	142
Фильтр гироскопа	143
Функция Failsafe	144
Мертвая зона и нейтральная зона	144
Магнитное склонение	145
Альтернативная прошивка MahoWii	146
Функциональные режимы контроллера	147
Конфигуратор MultiWiiConf	150
Калибровка акселерометра	150
Конфигуратор MultiWii WinGUI	154
Терминал для работы с COM-портами	156
Программы для мобильных устройств	157
EZ-GUI Ground Station	157
NAZE32 Configurator	158
MultiWii Configuration Tool	159
Калибровка регуляторов оборотов	159
Настройка канала радиоуправления	160
Первое включение и первый взлет	162
Триммирование акселерометров	164
Настройка PID	165
Базовая настройка параметра <i>P</i>	166
Настройка <i>I</i> и <i>D</i> для плавного стабильного полета	167
Настройка <i>I</i> и <i>D</i> для активного пилотирования и акро	167
Глава 6. Подключение и настройка внешних модулей	168
Подключение адаптера USB-COM	168
Подключение источника питания	169
Подключение звукоизлучателя	171
Подключение ультразвукового сонара	173
Подключение светодиодной подсветки	175
Подключение посадочных огней	179

Подключение приемника по шине S-BUS.....	180
Подключение и настройка адаптера Bluetooth.....	181
Настройка модулей HC-06 и HC-07	182
Настройка модулей HC-05	184
Установка связи модуля с компьютером	185
Подключение радиомодема	186
Подключение модемов к компьютеру, проверка и настройка.....	187
Подключение наземного модема к мобильным устройствам.....	190
Подключение бортового модема к полетному контроллеру.....	191
Подключение модема к порту SERIAL3 полетного контроллера	191
Подключение и настройка приемника GPS.....	192
Подключение приемника к компьютеру.....	193
Получение доступа к сервису AssistNow Online	195
Изменение текущих настроек	196
Подключение приемника к полетному контроллеру	199
Подключение приемника GPS с прошивкой MahoWii.....	200
Подключение дисплея	201
Монохромный OLED дисплей CRIUS CO-16	201
Настройка параметров через меню дисплея.....	202
Проблемы с подключением дисплеев CRIUS OLED и их решение	202
Самодельный цветной дисплей	204
Запись прошивки в контроллер дисплея.....	207
Настройка прошивки	208
Монтаж и подключение оборудования FPV.....	209
Видеокамера.....	210
Видеопередатчик и приемник.....	211
Видеоочки и монитор.....	215
Подключение подвеса к контроллеру	216
Настройка при помощи EZ-GUI Ground Station.....	217
Настройка подвеса при помощи конфигуратора MultiWiiConf.....	218
Настройка подвеса в прошивке MahoWii	219
Настройка модуля MinimOSD	219
Структура экрана KV_Team_OSD v.2.3.....	226
Служебное меню прошивки KV_Team_OSD	226
Подключение датчиков тока и напряжения к модулю OSD	229
Подключение датчиков тока и напряжения к контроллеру	232
Настройка аппаратного измерителя тока и потребленной энергии.....	233
Настройка программного измерителя потребленной энергии.....	234
Глава 7. Обслуживание и ремонт квадрокоптера	235
Предполетная проверка.....	235
Характерные неполадки.....	235
Ремонт квадрокоптера после аварии.....	237
Осмотр и поиск дефектов.....	237
Ремонт двигателей	238
Разборка двигателя	239
Проверка и замена вала	240
Проверка и замена подшипников	241
Чистка и смазка подшипников.....	242

ПРИЛОЖЕНИЯ	245
Приложение 1. Управление коптером со смартфона	246
Приложение 2. Сетка частот каналов видеотракта	249
Приложение 3. Команды управления и конфигурирования при помощи рукояток пульта.....	251
Приложение 4. Описание электронного архива.....	252
Предметный указатель	253

*Посвящаю эту книгу
самым дорогим для меня людям:
дочери Полине, супруге Ольге
и, конечно же, моей маме —
с любовью и благодарностью за поддержку*

От автора

Уважаемый читатель!

Автор не ставил перед собой задачу создать исчерпывающую энциклопедию или настольный справочник. Вы держите в руках руководство для новичков, назначение которого — помочь вам построить свой первый квадрокоптер, обойдясь без нелепых технических ошибок и чрезмерных денежных затрат. Интеллектуальная цена вхождения в это сложное хобби весьма высока. Автор постарался сберечь для вас главную ценность — время.

В книге плотно переплетаются теория и практика, иначе в авиамоделизме нельзя. Материал не обязательно читать по порядку. Обращайтесь к нужным главам и разделам по мере работы над своей конструкцией. Рекомендуем, прежде всего, ознакомиться с общими принципами работы квадрокоптера и определиться с набором компонентов, которые необходимо приобрести. Поскольку наиболее выгодный путь для покупки компонентов — это заказ в интернет-магазинах, то с момента заказа до получения может пройти несколько недель. Пока заказанные компоненты находятся в пути, вы можете более подробно изучить теорию и установить на компьютер необходимое программное обеспечение.

Это важно: автору пришлось пойти на сознательные упрощения и сокращения некоторых сегментов информации, чтобы сделать ее более доступной. Далее вы самостоятельно будете развиваться в наиболее интересном для вас направлении: видеосъемка, FPV, развлекательные полеты, маршрутные полеты по GPS и т. д. Все, о чем вы прочтете, проработано и проверено автором на практике.

Подбор компонентов и программного обеспечения для первого квадрокоптера основан на опыте тысяч ваших предшественников из разных стран и означает лишь, что собранный по нашим рекомендациям аппарат будет недорогим, надежным, простым в управлении и полетит сразу после окончания сборки. Зачастую выбор компонентов и программного обеспечения является поводом для ожесточенных "религиозных войн" на форумах. Пока воздержитесь от участия в них и не воспринимайте слишком серьезно противоречивые мнения сторон.



ЧАСТЬ I

ТЕОРИЯ

- Глава 1.** Принцип работы квадрокоптера
- Глава 2.** Обязательные компоненты квадрокоптера
- Глава 3.** Дополнительные компоненты квадрокоптера

ГЛАВА 1



Принцип работы квадрокоптера

Квадрокоптеры, которым посвящена эта книга, являются частным случаем *мультикоптеров* — многороторных устройств, которые держатся в воздухе, управляются и перемещаются только за счет несущих пропеллеров. В этом мультикоптеры схожи с вертолетами. Для простоты и краткости в обиходной речи мультикоптеры часто называют просто *коптерами*. Мы тоже будем использовать этот термин в случаях, когда количество роторов не играет роли.

Классический квадрокоптер представляет собой крестообразную раму, на концах которой вертикально закреплены моторы (рис. 1.1).

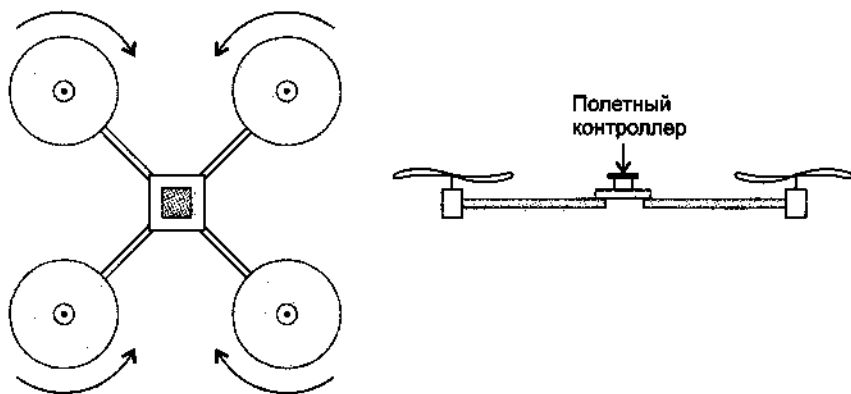


Рис. 1.1. Схема конструкции простейшего квадрокоптера

Воздушные винты, расположенные на диагональных лучах рамы, создают суммарную вертикальную тягу. Синхронно регулируя обороты моторов, можно заставить квадрокоптер подниматься вверх, зависать или опускаться. Если изменить обороты моторов неравномерно, то квадрокоптер отклонится от горизонтального положения и полетит в сторону отклонения. Например, при увеличении оборотов двух задних моторов его задняя часть приподнимется и квадрокоптер полетит вперед. За счет неравномерного изменения оборотов всех моторов квадрокоптер способен лететь в произвольном направлении.

Очевидно, что при наклоне рамы за счет появления горизонтальной составляющей вектора тяги V_x уменьшится вертикальная составляющая V_y и квадрокоптер начнет терять высоту. Это явление иногда называют "соскальзыванием", потому что коптер начинает двигаться вниз по диагональной траектории (рис. 1.2), словно скользя по склону. Поэтому для поддержания высоты при наклоне квадрокоптера обороты всех моторов должны возрасти на некую одинаковую компенсирующую величину.

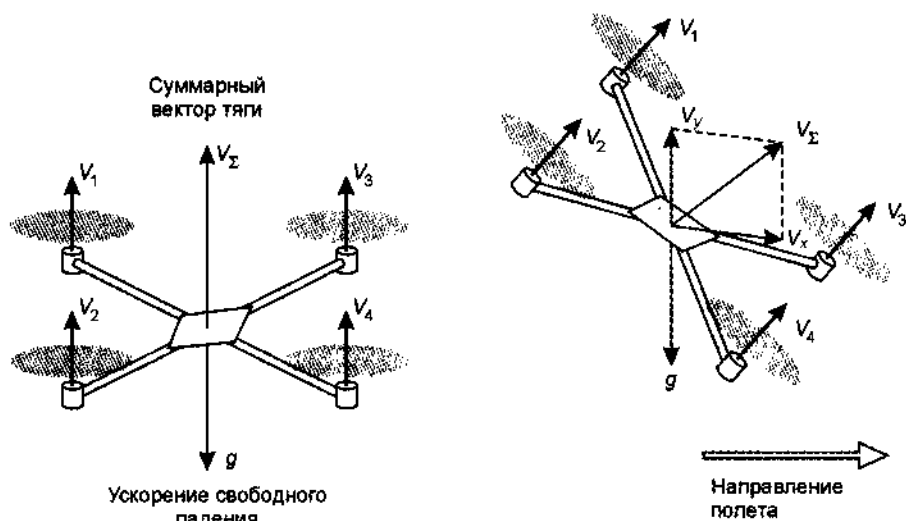


Рис. 1.2. Векторы тяги квадрокоптера

Вращающиеся винты создают реактивный крутящий момент, который старается развернуть квадрокоптер в сторону, противоположную вращению винта. Поэтому в квадрокоптере два винта вращаются по часовой стрелке и два против часовой стрелки, взаимно уравновешивая реактивные моменты. Если увеличить обороты моторов, вращающихся по часовой стрелке, и в равной мере уменьшить обороты у вращающихся против часовой стрелки, то суммарная вертикальная тяга не изменится, однако реактивный момент раскомпенсируется и рама начнет поворачиваться против часовой стрелки. Аналогично можно заставить квадрокоптер поворачиваться по часовой стрелке.

Угловые отклонения по осям следовало бы называть "тангаж", "крен" и "рыскание", но на практике прижились англоязычные термины, которые читателю следует запомнить: **Pitch** (наклон вперед-назад), **Roll** (наклон вправо-влево), **Yaw** (вращение в горизонтальной плоскости) и **Throttle** (общий газ) — рис. 1.3.

Оборотами моторов в режиме реального времени управляет специальная вычислительная система на основе достаточно быстродействующего микроконтроллера, так называемый *полетный контроллер*. Он постоянно опрашивает встроенные гироскопы, акселерометры, барометр, сигналы от приемника радиоуправления и на основе полученных данных рассчитывает управляющие сигналы для каждого мотора в отдельности.

Теперь, когда мы рассмотрели общие принципы работы квадрокоптера, можно проанализировать достоинства и недостатки этого типа летательных аппаратов.

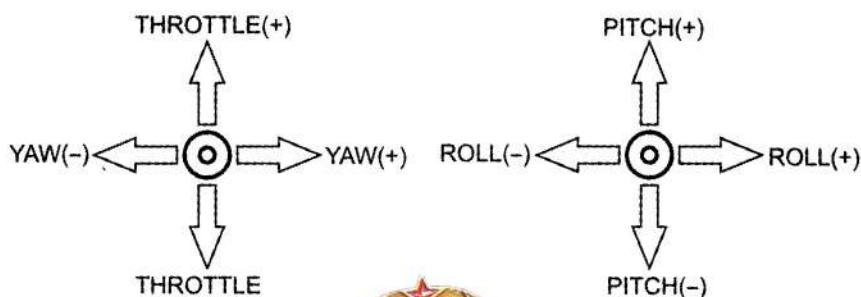


Рис. 1.3. Соответствие отклонений коптера рычагам на пульте

Достоинства.

□ Простота конструкции и низкая стоимость ущерба при аварии.

Как мы уже говорили, квадрокоптеры держатся в воздухе только за счет несущих пропеллеров и этим похожи на вертолет. Однако полноценная модель вертолета имеет весьма сложную и точную механическую часть — автомат перекоса, позволяющий управлять положением вертолета в пространстве. Кроме этого, вертолет оснащен механизмом отбора мощности на хвостовой винт и узлом переменного шага этого винта. Только простые и дешевые маленькие модели вертолетов не имеют автомата перекоса, но и управляются они намного хуже. По сравнению с вертолетом механическая часть даже у большого профессионального квадрокоптера предельно проста и не зависит от размеров модели. Это жестко закрепленные на лучах рамы моторы, на валы которых надеты воздушные винты.

Автомат перекоса вертолета требует сложной и длительной регулировки даже при наличии опыта. Каждая авария вертолета, даже незначительная, как правило, дорого обходится владельцу (автор убедился в этом на собственном опыте). Причем в запасе приходится держать широкий ассортимент различных запчастей. Самодельный квадрокоптер можно разбить почти полностью и восстановить за один выходной день, пользуясь в основном подручными материалами. В запасе достаточно иметь пару запасных валов и подшипников для моторов, один-два регулятора оборотов, десяток винтов правого и левого вращения и материал для изготовления лучей рамы.

□ Простота управления и обучения.

Несмотря на то, что квадрокоптер, как и вертолет, управляется за счет смещения вектора тяги, он более стабилен в воздухе (чем крупнее, тем стабильнее). Управление квадрокоптером интуитивно более понятно и легче осваивается. Кроме того, благодаря наличию полетного контроллера, правильно собранный и минимально настроенный квадрокоптер способен висеть в воздухе практически без участия пилота.

□ Простота самостоятельного изготовления.

Если заранее приобрести минимальный набор необходимых компонентов и иметь обычные инструменты, то изготовить простой, но качественный квадро-

коптер можно за один-два выходных дня. При создании рамы можно обойтись парой кусков фанеры и несколькими деревянными рейками, и это не ухудшит летные качества устройства.

□ Возможности для творчества.

К сожалению, в последнее время радиолюбителям все труднее найти прикладную область для своего хобби. Много из того, что можно было бы изготовить своими руками, проще и дешевле купить в готовом виде, с промышленным качеством. В схожей ситуации сейчас и программисты-любители. Писать любительские прикладные программы стало либо слишком сложно, либо незачем.

Квадрокоптеры придают новый смысл многим увлечениям. Можно участвовать в разработке открытого программного обеспечения или создавать свое; разрабатывать с нуля и изготавливать на самодельном станке с ЧПУ сложные детали конструкции; экспериментировать с аэровидеосъемкой или работать паяльником. Менять и развивать конструкцию самодельного квадрокоптера можно практически бесконечно.

Недостатки.

□ Полное отсутствие летучести.

Квадрокоптер хорошо летает, только пока полностью исправен. Стоит выйти из строя одному из моторов или полетному контроллеру, как летательный аппарат потеряет управление и рухнет, беспорядочно кувыркаясь. В аналогичной ситуации вертолет способен к авторотации, т. е. тормозит падение за счет вращения несущего винта набегающим потоком воздуха, а самолет способен планировать. Даже наличие шести или восьми несущих винтов не спасает мультикоптеры от крушения. Некоторым опытным пилотам удавалось спасти гекса- и октакоптеры при отказе одного из моторов, но это исключение из правила.

□ Высокий порог знаний.

Можно купить готовый квадрокоптер и запускать его, не задумываясь, как он работает. Но если вы решили сами строить квадрокоптер или модернизировать покупной, то придется хотя бы на начальном уровне научиться понимать радиосхемы, паять, прошивать микроконтроллеры, читать технические тексты на английском языке, разбираться в принципе работы GPS и т. д.

□ Низкая динамика и управляемость.

Обратная сторона стабильности квадрокоптеров — вялость и инерционность в управлении. Особенно вяло квадрокоптеры управляются по курсу (Yaw). Поэтому на квадрокоптере невозможно исполнить традиционные фигуры высшего пилотажа самолетов или инверсный полет, как на модели вертолета. Впрочем, при наличии опыта на коптере можно эффектно исполнить переворот или пролет по кругу с вращением вокруг оси. Но здесь надо понимать, что каждый летательный аппарат хорош для своих целей, и вялость в управлении вряд ли является недостатком, когда речь идет о полетах по камере, видеосъемке или развлечении в выходной день. Для динамичных полетов имеет смысл приобрести или построить модель спортивного самолета, у которой, кстати, тоже будут специфические недостатки.

ГЛАВА 2



Обязательные компоненты квадрокоптера

Компоненты квадрокоптера можно условно разделить на две группы: основные, без которых эксплуатация устройства невозможна или опасна, и дополнительные, наличие которых зависит от потребностей владельца. В этой главе мы рассмотрим основные компоненты.

Рама

На рис. 2.1 изображены основные варианты конструкции рамы. На практике возможны различные вариации и гибриды, но в любом случае рама состоит из лучей и, в большинстве случаев, центральной несущей части. Иногда встречаются рамы, состоящие только из трубчатых деталей, а также миниатюрные рамы, изготовленные из листового текстолита, одновременно являющегося печатной платой для электронных компонентов. Моторы всегда крепятся на концах лучей. Основным показателем размера квадрокоптера является расстояние между осями моторов по диагонали.

По расположению моторов относительно направления полета выделяют два основных типа рам: "+" и "X". Подвидом рамы типа "X" является рама типа "H".

Наиболее популярны рамы типа "X". Очевидное преимущество такой рамы — удобное расположение видеокамеры, когда лучи рамы не попадают в кадр. У рамы типа "X" более высокая устойчивость к мелким авариям. Наиболее частой аварией, особенно в период обучения, является цепляние земли при быстром наклонном пролете или "затуливании", либо падение под углом. В случае "+"-образной рамы весь удар чаще приходится на один луч, который сильно страдает, тогда как при распределении удара на два луча ущерб обычно ограничивается сломанными пропеллерами. Кроме того, большинству пилотов психологически комфортнее управлять именно типом "X". В свою очередь, квадрокоптер с рамой типа "+" несколько быстрее и острее реагирует на команды "вправо-влево" и "вперед-назад", поэтому больше подходит любителям динамичного пилотирования.

Рама типа "H" удобна при построении миниатюрных коптеров, а также полноразмерных конструкций из карбоновых трубок и часто используется при построении

специализированных коптеров для видеосъемки и полетов по GPS, т. к. предоставляет больше места для монтажа оборудования.

Необходимо подчеркнуть, что для полетных контроллеров, с точки зрения системы стабилизации полета, конструкция рамы вообще не имеет значения. Достаточно лишь указать в настройках тип рамы и угол, под которым смонтирована плата контроллера относительно направления полета.

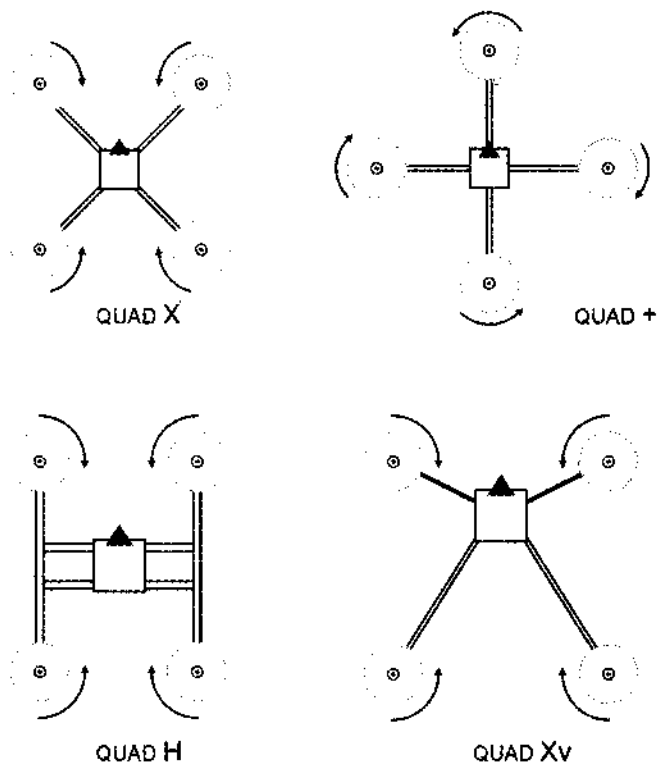


Рис. 2.1. Варианты конструкции рамы квадрокоптера

Рама, которую мы условно обозначили "Quad Xv", имеет несимметричные лучи. Такая рама часто используется при фото- и видеосъемке с воздуха. Дело в том, что для любого квадрокоптера должно соблюдаться условие *симметрии по весу*. Иначе говоря, *центр тяжести конструкции должен находиться в точке пересечения диагоналей квадрата, образованного осями моторов*. Если вы крепите в передней части рамы тяжелую фото- или видеокамеру, то удлиненные задние лучи играют роль противовеса. Однако и в этом случае моторы, как правило, расположены по диагоналям воображаемого квадрата.

Что будет, если центр тяжести смещен? Разумеется, полетный контроллер постарается поддерживать раму в строго горизонтальном положении за счет различия в оборотах моторов. Если дисбаланс невелик, то в статичном режиме, без внешних воздействий, квадрокоптер достаточно долго будет висеть ровно. Но при этом моторы будут работать в разных режимах нагрузки. У более нагруженных моторов

останется меньший динамический запас оборотов и мощности, чтобы отработать "команды" полетного контроллера на компенсацию порывов ветра или управляющие сигналы с пульта. В результате появится некомпенсированное отклонение от горизонтали и квадрокоптер начнет дрейфовать в сторону смещенного центра тяжести. Подготовленные пользователи могут применить специальные настройки программы контроллера для компенсации негативного эффекта от смещенного центра тяжести, но в общем случае асимметрии следует избегать.

Даже если рама полностью симметрична, у квадрокоптера всегда есть *условное направление "вперед"*, в котором он по умолчанию полетит при отклонении рукоятки пульта по оси Pitch вперед. Это направление привязано к полетному контроллеру, который монтируется на раме в строго определенном положении.

Рама может быть как со складными, так и с фиксированными лучами. На летные качества это не влияет, при выборе конструкции нужно исходить из соображений простоты изготовления, стоимости, удобства транспортировки, при условии соблюдения достаточной прочности. Рамы миниатюрных "наладонных" квадрокоптеров иногда представляют собой единое целое с печатной платой полетного контроллера и целиком изготавливаются из текстолита.

Поскольку в случае квадрокоптеров аэродинамика корпуса или рамы не имеет значения, на первый план выходят противоречивые требования минимального веса и максимальной прочности. Наиболее прочными и легкими являются цельноформованные пустотелые рамы из карбона, так называемые "скорлупки" или "корки", но они и самые дорогие. На втором месте рамы, детали которых изготовлены из листового карбона и карбоновых трубок. Далее идут рамы из всевозможных сочетаний различных материалов, включая сосновые рейки и фанеру. Обсуждению конструкционных материалов будет посвящен отдельный раздел, а сейчас настало время поговорить про "мозг" квадрокоптера.

Полетный контроллер

Зачем вообще нужен специальный полетный контроллер — вычислительная система, работающая в реальном времени по довольно сложным алгоритмам? Очевидно, что квадрокоптер необходимо непрерывно стабилизировать, парируя порывы ветра и неоднородность воздушных масс, а возможностей человеческого организма для этого недостаточно. Современный полетный контроллер оснащен набором миниатюрных интегральных сенсоров, непрерывно отслеживающих положение рамы в пространстве, воздействующие на нее угловые ускорения, атмосферное давление и направление силовых линий магнитного поля.

Классическим устройством для стабилизации объекта в пространстве либо измерения угловых ускорений является гироскоп. Все мы из школьных уроков физики знаем про механический гироскоп-волчок либо про вращающийся в свободном подвесе маховик. При попытке изменить угловое положение оси вращающегося маховика возникает противодействующая сила. В трехмерном пространстве произвольное изменение положения рамы квадрокоптера можно разложить на вращение

по трем взаимно ортогональным осям. Соответственно, возникают мгновенные угловые ускорения по каждой из этих осей. Эти ускорения могут быть измерены и использованы для выработки компенсирующей реакции в системе с обратной связью, которой в нашем случае является квадрокоптер, оснащенный полетным контроллером.

Современные датчики положения и ускорений представляют собой интегральные микросхемы размерами в несколько миллиметров. Внутри у них находится сложная электромеханическая структура из упругих подвесов, грузиков, пружин, конденсаторов и электронной части для усиления и обработки сигналов. Такие устройства принято обозначать аббревиатурой МЭМС (MEMS — MicroElectroMechanical System).

Принцип работы интегрального гироскопа

Чувствительным элементом интегрального гироскопа обычно являются два миниатюрных грузика, колеблющихся на упругом подвесе в противоположных направлениях (рис. 2.2). Источником колебаний грузиков являются гребенчатые электростатические двигатели. Грузики, вместе с электродами, расположенными на подложке, образуют конденсаторы, входящие в состав дифференциальной схемы, вырабатывающей сигнал, пропорциональный разности емкостей конденсаторов. Линейное ускорение одинаково воздействует на оба грузика и подложку, поэтому сигнал на выходе дифференциальной схемы не появляется. Когда возникает вращательное ускорение по оси ω , то на грузики начинает действовать сила Кориолиса F_C , отклоняя грузики в противоположных направлениях. Соответственно, емкость одного конденсатора увеличивается, а другого уменьшается, что порождает разностный сигнал, пропорциональный величине углового ускорения. Изначально, при включении, разностный сигнал на выходе гироскопа не нулевой, поэтому требуется процедура стартовой калибровки, когда микроконтроллер опрашивает показания гироскопов в состоянии покоя и принимает их за нулевые. Во время прохождения калибровки нельзя двигать коптер.

Но почему в конструкции квадрокоптера нельзя обойтись простейшей системой стабилизации на основе гироскопов, по одному на каждую ось вращения? Зачем

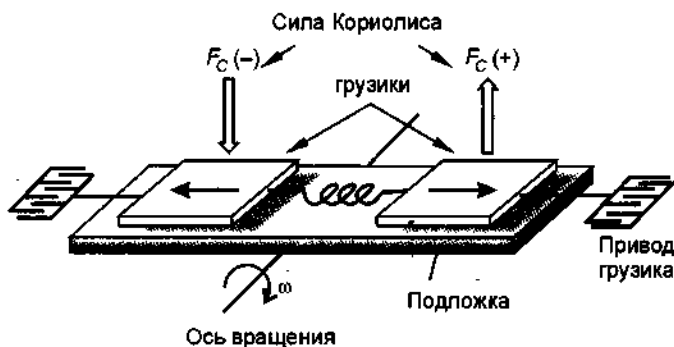


Рис. 2.2. Устройство интегрального гироскопа

нужны другие датчики и микроконтроллер со сложной программой? В реальных условиях квадрокоптер не отклоняется идеально лишь по одной оси. В общем случае отклонение комбинированное, с неким соотношением между осями. По этой причине необходимо устройство, которое будет обрабатывать сигналы от всех гироскопов и формировать управляющие сигналы для регуляторов оборотов моторов. Например, под влиянием случайного порыва ветра квадрокоптер отклонился по диагонали назад вправо. Значит, управляющая система должна увеличить обороты правого заднего мотора и уменьшить левого переднего, отклоняя раму вперед влево. Но моторы, регуляторы и пропеллеры не идеально одинаковые, и команду они отработают по-разному. Возникнет нескомпенсированный реактивный крутящий момент. Следовательно, одновременно с выравниванием квадрокоптера в горизонт полетный контроллер должен оперативно внести коррективы в обороты другой пары моторов, чтобы скомпенсировать вращение по курсу. И это самый простой пример, в котором мы не учитываем, что в то же самое время с пульта могут поступать сигналы управления. Впрочем, с вычислительной задачей для системы с тремя гироскопами способен справиться недорогой микроконтроллер начального уровня. Сейчас по такому принципу устроены простые игрушечные квадрокоптеры-"НЛО".

Такие игрушки неплохо летают в помещении, но для управления ими необходимо постоянно визуально контролировать, в каком положении находится квадрокоптер. Напомним, что интегральный гироскоп — это всего лишь датчик углового ускорения. Для него нет понятия "верх" или "низ", и ему безразлично, в каком *статическом* положении относительно горизонта он находится. Он лишь показывает мгновенное угловое ускорение относительно начального положения. Как только внешнее воздействие начнет поворачивать раму квадрокоптера вокруг одной из осей, то от соответствующего гироскопа немедленно поступит сигнал на процессор полетного контроллера. В ответ контроллер скорректирует обороты моторов так, чтобы скомпенсировать ускорение. Но как только внешнее воздействие прекратится, угловое ускорение станет равным нулю, и на основании сигналов одних лишь гироскопов контроллер не узнает, вернулся ли квадрокоптер в исходное положение. Это задача оператора, которую он может решать только при визуальном контроле.

А теперь представьте, что вы командой с пульта отклонили квадрокоптер на пять градусов вправо, а затем вернули рукоятку пульта в нейтральное положение. В соответствии с сигналом пульта контроллер сделает обороты всех моторов одинаковыми, но это вовсе не означает, что квадрокоптер вернется в горизонтальное положение. Гироскопам имеющийся *статический* наклон будет безразличен. Нет углового ускорения — на выходе гироскопа нулевое значение. Кроме того, гироскоп имеет ограниченную чувствительность: медленное вращение он просто не заметит. При гироскопической стабилизации оператор должен выравнивать коптер вручную.

На практике, квадрокоптер, оснащенный только гироскопами, не может стабильно висеть более минуты даже в помещении. Далее нужно вручную парировать его дрейф. Свое влияние на показания гироскопов оказывают изменение температуры корпуса и угловые ускорения, возникающие при вращении Земли.

Следовательно, для более продвинутой конструкции полетного контроллера необходим датчик, показывающий положение квадрокоптера относительно земной по-

верхности (если точнее, то относительно вектора ускорения свободного падения, который всегда направлен перпендикулярно земной поверхности, к центру Земли). Такой датчик есть в каждом современном смартфоне или планшете и называется *акселерометром*.

Принцип работы интегрального акселерометра

Акселерометр — это MEMS-устройство, которое измеряет линейные ускорения. В состав интегрального акселерометра входят чувствительный элемент и электронная часть, осуществляющая предварительную обработку сигнала.

В очень упрощенном виде чувствительный элемент представляет собой токопроводящий грузик на гибком подвесе, помещенный между двумя электродами (рис. 2.3).

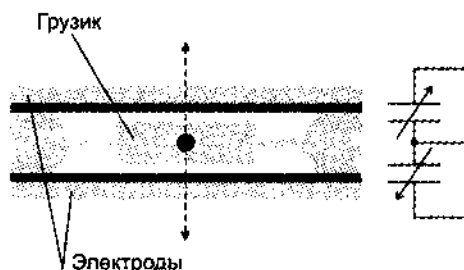


Рис. 2.3. Устройство чувствительного элемента акселерометра и его эквивалентная электрическая схема

Грузик и электроды образуют два конденсатора. При смещении грузика под действием ускорения емкость одного конденсатора уменьшается, а другого увеличивает. Так как заряд конденсаторов постоянен, то изменяется напряжение на выводах конденсаторов. Это изменение измеряется встроенной электронной схемой, результат измерения в цифровом виде выдается в ответ на запрос внешнего вычислительного устройства. Результат может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от направления вектора ускорения.

Реальный сенсор акселерометра устроен значительно сложнее, в нем детали конструкции выполняют несколько функций одновременно. Но для понимания принципа работы упрощенной схемы достаточно.

Все современные интегральные акселерометры, как правило, трехосевые. Три сенсора расположены внутри одного корпуса микросхемы перпендикулярно осям x , y и z . Вектор действующего на устройство ускорения вычисляется микроконтроллером через проекции вектора на три оси. Даже если устройство находится в покое, на него действует ускорение свободного падения g . Вектор \vec{g} направлен вертикально вниз, к центру Земли. Если корпус акселерометра расположен строго горизонтально, то вектор земного тяготения совпадает с осью z и ускорение действует только на один сенсор. Но стоит наклонить акселерометр, как появятся составляющие вектора \vec{g} по осям x и y , а составляющая по оси z пропорционально уменьшится. На основании величин проекций вектора земного тяготения на оси и их зна-

ка микроконтроллер вычисляет наклон квадрокоптера. Именно по такому принципу ваш смартфон или планшет определяет ориентацию экрана.

Поскольку датчики акселерометра не идеально одинаковые и печатная плата может быть смонтирована не идеально ровно, перед началом эксплуатации акселерометр необходимо откалибровать: поместить устройство строго горизонтально и сообщить бортовому контроллеру, что текущие показания акселерометра соответствуют горизонтали. Соответствующие корректировочные константы записываются во встроенную память микроконтроллера. В этом состоит различие между процедурами калибровки гироскопа и акселерометра: гироскоп калибруют после каждого включения питания, а также при длительном перерыве между взлетами, а акселерометр однократно, после окончания сборки коптера. После смены версии прошивки контроллера или изменения конструкции квадрокоптера акселерометр необходимо откалибровать заново!

Существенным недостатком MEMS-акселерометров является высокая чувствительность к вибрациям. Но вибрации — неизменный спутник винтокрылых аппаратов, поэтому необходимо принимать специальные меры по виброизоляции, а также балансировке воздушных винтов и моторов.

Именно появление доступных по цене трехосевых акселерометров определило взрывной рост популярности квадрокоптеров. Еще несколько лет назад акселерометры были, в основном, двухосевыми, а трехосевые стоили весьма дорого и были редкостью. С появлением игровой приставки Nintendo Wii и игровых манипуляторов WiiMotionPlus и Nunchuk ситуация кардинально изменилась. Малогабаритные трехосевые интегральные акселерометры и гироскопы стали доступны по вполне разумным ценам. Первые энтузиасты покупали платы манипуляторов Nintendo и подключали их к вычислителю на основе модуля Arduino. Затем к процессу подключились китайские производители, начавшие массовое производство полетных контроллеров с полным набором сенсоров "на борту". Отсюда исторически происходит название одной из самых популярных открытых прошивок MultiWii и платы контроллера MultiWii All-In-One (MWI AIOP).

Благодаря тому, что акселерометр определяет положение квадрокоптера относительно горизонтали, становится возможным автоматическое выравнивание устройства (автогоризонт). Как только ручки управления на пульте вернулись в нейтральное положение, полетный контроллер воспринимает это как команду выровнять квадрокоптер в горизонтальное положение, которое вы задали при калибровке. Есть и другие положительные моменты в использовании акселерометра. Предположим, командой с пульта мы наклонили квадрокоптер для полета вперед. Чтобы компенсировать уменьшение вертикальной тяги, необходимо равномерно увеличить обороты всех моторов пропорционально наклону. При отсутствии акселерометров можно приблизительно вычислить наклон квадрокоптера через угловое ускорение, его продолжительность и величину управляющего сигнала с пульта. Но проще и точнее угол наклона вычисляется по данным с акселерометров.

Разумеется, акселерометры измеряют не только ускорение свободного падения, но и *линейные* ускорения по любой из осей при движении квадрокоптера. В ряде случаев эта информация тоже бывает полезна.

С другой стороны, когда надо быстро определить скорость и знак *углового* ускорения, проще использовать гироскоп, который так же выдает эти данные более точно и в готовом виде. Таким образом, каждый сенсор хорош для своей задачи. В современных MEMS-микросхемах трехосевые гироскопы и трехосевые акселерометры часто объединяют в одном корпусе с размерами около $3 \times 3 \times 1$ мм. В этом же корпусе находится электронная схема для предварительной цифровой обработки данных, с внешним протоколом обмена SPI или I²C.

Чтобы определить курсовое направление рамы квадрокоптера, нужен еще один датчик — *интегральный компас*, или *магнитометр*. Квадрокоптер может лететь как угодно, вбок, назад, или по диагонали, поэтому "вперед" в нашем случае — это условное направление *рамы и контроллера*, относительно которого определяется фактическое направление полета. На плате контроллера направление "вперед" обычно обозначается стрелкой.

Принцип работы интегрального магнитометра (компаса)

В основе конструкции интегрального магнитометра (рис. 2.4) лежит анизотропный магниторезистивный эффект. Чувствительный элемент изготавливается из пермаллоевой пленки, способной изменять свое сопротивление в зависимости от направления протекающего через нее тока и направления вектора ее намагниченности. В свою очередь, вектор намагниченности пленки определяется направлением силовых линий магнитного поля, в котором находится чувствительный элемент.

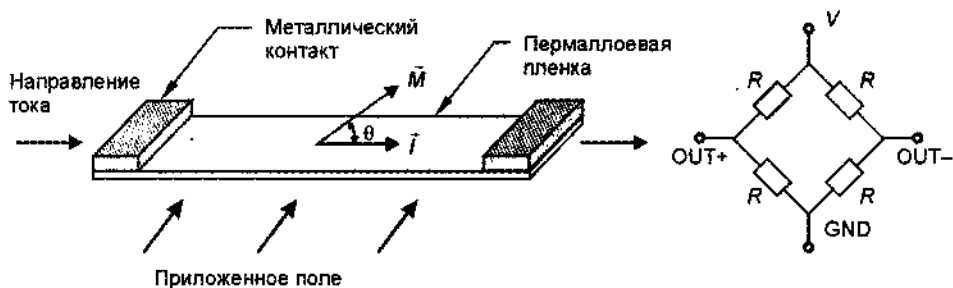


Рис. 2.4. Устройство интегрального магнитометра

Четыре пермаллоевых элемента соединяются в измерительный мост (см. рис. 2.4). При подаче постоянного напряжения на мост датчик начинает измерять интенсивность внешнего магнитного поля, направленного вдоль его чувствительной оси. Мостовой датчик имеет ось предпочтительного намагничивания, так называемую легкую ось, и наиболее чувствителен к полям, направленным перпендикулярно этой оси. В квадрокоптерах применяются трехосевые интегральные магнитометры, состоящие из трех независимых датчиков, ориентированных по трем ортогональным осям и электронной схемы. В спецификации магнитометра всегда указывают направление осей относительно корпуса (рис. 2.5).

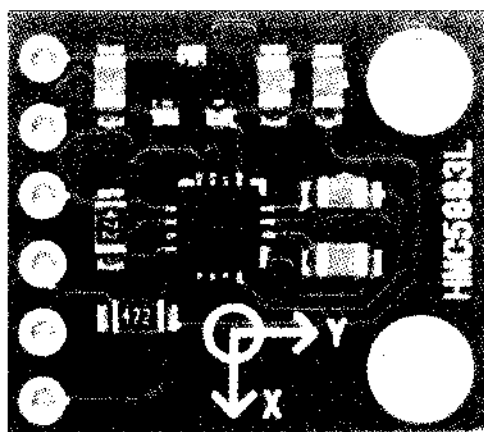


Рис. 2.5. Магнитометр HMC5883L на плате расширения

Магнитометры не подвержены вибрации, но на их показания влияют внешние близко расположенные металлические предметы. Помехи можно разделить на три основных класса.

- ❑ "Искажения твердого железа" (Hard Iron Distortion) — к магнитному полю земли добавляется постоянное магнитное поле от намагниченных предметов, например магнита звукоизлучателя. Намагниченными могут быть даже выводы радиодеталей, изготовленные из луженого железа. Эта постоянная составляющая может быть исключена при калибровке.
- ❑ "Искажения мягкого железа" (Soft Iron Distortion) — магнитное поле искажается посторонними предметами, не имеющими собственной намагниченности. Например, сплавы никеля, пермаллой искажают силовые линии поля. Такие искажения зависят от положения объекта в пространстве и труднее компенсируются. К счастью, в конструкции квадрокоптера обычно не бывает таких предметов. Детали из сплавов алюминия и меди не вносят искажения.
- ❑ Динамические или вихревые помехи. Это специфическая особенность электрических летательных аппаратов, особенно коптеров. Мощные токи, протекающие через проводники силовых цепей и батарею, порождают магнитные поля в окружающем пространстве. Причем напряженность этих полей постоянно меняется в зависимости от нагрузки на моторы.

Иногда магнитные помехи настолько сильны, что делают невозможным использование компаса и даже способны привести к аварии. К сожалению, переменные магнитные поля невозможно скомпенсировать программно и приходится применять специальные конструктивные меры. Для уменьшения наводок микросхему компаса стараются выносить с платы контроллера и поднимать вверх на 10–20 см над рамой. При укладке силовых проводов следует избегать образования петель, все провода должны иметь минимальную длину. Силовые провода рекомендуется перекручивать. Впрочем, в квадрокоптерах начального уровня вполне можно обходиться без компаса и при наличии магнитных помех просто отключать его в настройках.

Малогабаритные контроллеры, предназначенные для полетов внутри помещения, по очевидной причине компас не содержат.

Перед началом полетов магнитометр необходимо откалибровать, проведя процедуру вращения коптера по всем осям. Детали этой процедуры могут зависеть от применяемой прошивки контроллера.

Благодаря наличию компаса возможен интересный режим полета, именуемый Headfree. В этом режиме фиксируется курсовое положение квадрокоптера в момент активации моторов. Если в процессе полета развернуть раму квадрокоптера по Yaw, то условное направление "вперед", зафиксированное при взлете, не изменится. При наклоне правого стика пульта вперед квадрокоптер всегда будет лететь вперед, при наклоне вправо — всегда вправо и т. д., независимо от того, как в данный момент развернута рама. Считается, что этот режим удобен для начинающего пилота, а также при полетах на большом удалении, без видеоканала и средств телеметрии, когда визуальный контроль над положением рамы затруднен. Если пилот случайно развернул квадрокоптер, то это не отразится на управлении и поможет избежать аварии.

Используя компас, при настройке квадрокоптера не забудьте указать такой параметр, как *магнитное склонение* (не путайте с магнитным *наклоном*) для своей местности. *Магнитное склонение* — это угол между географическим и магнитным меридианами в точке земной поверхности. Магнитное склонение считается положительным, если северный конец магнитной стрелки компаса отклонен к востоку от географического меридиана, и отрицательным — если к западу. Значение магнитного склонения используется для определения истинного меридиана по показаниям магнитного компаса. Узнать значение магнитного склонения для своей местности можно на сайте www.magnetic-declination.com или <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/>. Обратите внимание, что сервисы дают значение в градусах и минутах, но при настройке компаса используется значение в градусах и десятичных долях градуса.

Остался еще один важный параметр полета — высота. Стабилизация высоты важна как для комфортного управления квадрокоптером, так и для безопасного полета, особенно в режиме автоматического возврата к точке старта по GPS. Для измерения высоты в квадрокоптерах используют либо интегральный барометр, либо внешний ультразвуковой сонар, либо оба устройства сразу. Поскольку они оба выполняют одинаковую задачу, мы немного забежим вперед и рассмотрим достоинства и недостатки ультразвукового сонара в этой главе, хоть сонар и является дополнительным оборудованием.

Устройство интегрального барометра

Измерение высоты полета барометрическим методом основано на зависимости атмосферного давления от высоты. Чем больше высота, тем ниже атмосферное давление. В миниатюрных интегральных барометрах применяется, как правило, тензорезисторный либо пьезорезонансный датчик. В первом случае чувствительным

элементом является тензорезистор (рис. 2.6), изменяющий свое сопротивление в зависимости от степени деформации под воздействием атмосферного давления. Во втором случае на пьезоэлемент подают переменное электрическое напряжение, заставляя его колебаться под действием обратного пьезоэффекта. Собственная резонансная частота элемента, при которой напряжение на электродах пьезоэлемента максимально, зависит от степени деформации элемента.

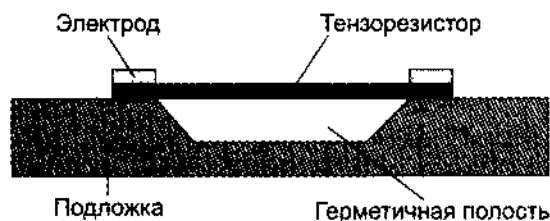


Рис. 2.6. Устройство тензорезисторного датчика атмосферного давления

Существенным недостатком этих датчиков является выраженная зависимость результатов измерения от температуры окружающей среды и большой разброс выходных данных между экземплярами. Для термокомпенсации внутрь корпуса встраивают терморезистор и при измерениях учитывают его сопротивление в качестве компенсирующего параметра. Для устранения конструктивной неоднородности каждый экземпляр интегрального барометра калибруют на заводе, записывая в его память калибровочные константы.

На выходе барометра мы получаем не абсолютное значение давления, а некое "сырое" значение, из которого давление рассчитывается путем вычислений с плавающей точкой, учитывая калибровочные константы и текущую температуру корпуса. Формулы для расчетов приводятся в спецификации микросхемы.

Применительно к квадрокоптерам, нас обычно интересует не высота над уровнем моря, а высота относительно точки взлета. Поэтому в момент активации моторов перед взлетом текущее давление воздуха принимается соответствующим нулевой высоте. К сожалению, даже в течение одного 10-минутного полета атмосферное давление может измениться настолько сильно, что это будет соответствовать перепаду высоты 2–3 м. Особенно это характерно для неустойчивой предгрозовой погоды.

Барометр следует защищать от воздействия прямых потоков воздуха. Обычно для этого используют кусочек крупнопористого поролона, которым прикрывают отверстие сенсора, или помещают полетный контроллер в защитный кожух. Также следует защищать барометр от попадания прямых солнечных лучей на сенсор через отверстие в корпусе. Теоретически современные интегральные барометры способны измерять высоту с точностью в несколько сантиметров, однако когда барометр смонтирован, на квадрокоптере и рядом с ним несущие винты прокачивают потоки воздуха, а на это накладываются флуктуации плотности воздушных масс разной температуры, такую точность реализовать практически невозможно. К вибрациям барометры не чувствительны.

Устройство ультразвукового сонара

Ультразвуковой сонар (датчик расстояния) состоит из генератора ультразвука, излучателя, приемника и усилителя-формирователя выходного сигнала (рис. 2.7).

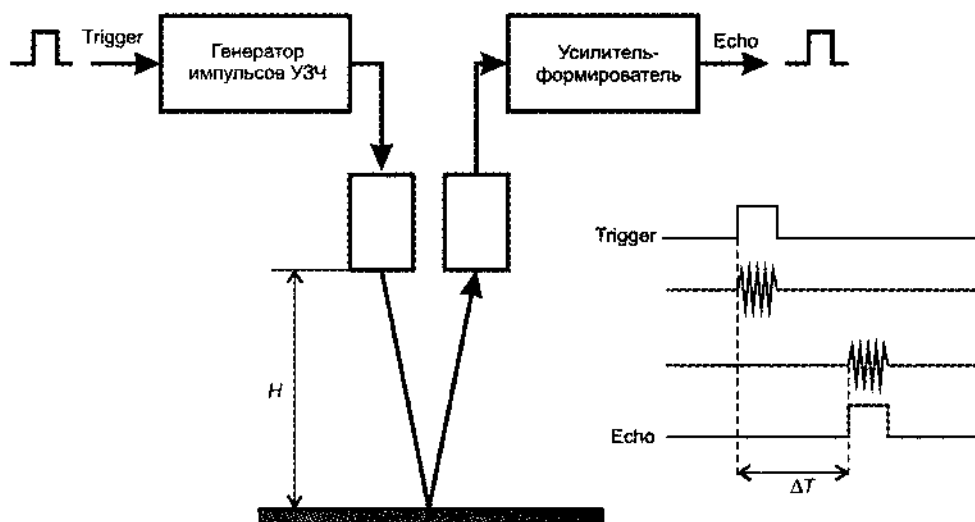


Рис. 2.7. Устройство ультразвукового сонара

Простейшие сонары не содержат собственный микроконтроллер и работают под управлением внешнего устройства. Когда на вход Trigger приходит пусковой импульс, электронная схема сонара генерирует короткий пакет колебаний ультразвуковой частоты, поступающий на излучатель. Отразившись от твердой поверхности, колебания поступают на приемник и далее на усилитель-формирователь, на выходе которого формируется импульс Echo (эхо) с логическим уровнем. Внешнее устройство вычисляет расстояние до поверхности через интервал времени между фронтами пускового импульса и эха по формуле

$$H = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta T}{v},$$

где v — скорость звука, ΔT — разность времени между фронтами пуска и эха. Поскольку звук дважды проходит расстояние H , мы берем $1/2$ вычисленного значения.

Более сложные сонары содержат встроенный контроллер, самостоятельно выполняют процесс измерения, производят фильтрацию и усреднение результатов измерения и выдают готовое значение расстояния по протоколу I²C или SPI.

Как барометр, так и сонар обладают специфическими недостатками. При полете на малой высоте квадрокоптер создает не только эффект воздушной подушки, но и зону завихрений и нестабильного давления вокруг себя. Чем крупнее квадрокоптер, тем заметнее этот эффект. Как показывает опыт, барометр квадрокоптера среднего размера начинает работать стабильно на высоте более пяти диагоналей рамы, т. е. более 2 м от земной поверхности.

Популярные ультразвуковые сонары измеряют дистанцию с точностью до одного-двух сантиметров, но работают на очень ограниченном расстоянии до отражающей поверхности, как правило, не более 3–4 м. Сонарам безразличны потоки воздуха, но они крайне чувствительны к качеству отражающей поверхности. Трава, вспаханная земля, снег, рябь на воде — такие поверхности рассеивают ультразвуковой импульс либо вносят большие искажения. Поэтому применение сонара оправдано при полетах в закрытых залах, где высота полета как раз соответствует рабочей дальности сонара, а пол хорошо отражает ультразвук. Нужно также учитывать, что сонар правильно показывает высоту при горизонтальном положении коптера. Как только рама наклоняется и импульс ультразвука отражается в сторону под углом к полу, сонар становится бесполезен.

В настоящее время даже в открытых прошивках решена проблема стабильного удержания высоты при помощи комбинации барометра и акселерометра. При удержании высоты логично предположить, что если показания барометра изменились, но акселерометр не показывает вертикальное ускорение, то наверняка это флуктуация показаний барометра. На самом деле, алгоритм достаточно сложен, надо учитывать конечную чувствительность акселерометра и барометра, продолжительность и скорость изменения показаний сенсоров, правильно задать весовые коэффициенты влияния этих сенсоров при расчетах и т. д. Рассуждения на эту тему выходят за рамки книги, ограничимся лишь констатацией факта, что использование барометра позволяет в безветренную погоду "подвесить" правильно настроенный квадрокоптер, и он будет стабильно висеть без участия пилота, дрейфуя по высоте максимум ± 20 см.

Использование сонара оправдано для автоматического включения посадочных огней при заходе на посадку. Обычно нужно, чтобы подсветка посадочной площадки включалась на высоте около 2–3 м. Барометр на этой высоте будет иметь большую погрешность, особенно если во время полета изменилось атмосферное давление, а точности сонара вполне достаточно для включения огней.

В качестве примера использования полного набора сенсоров рассмотрим плату популярного полетного контроллера CRIUS All-In-One Pro (AIOP) версия 2 (рис. 2.8).

Микроконтроллер (1) выполняет обработку управляющих сигналов от радиоаппаратуры и показаний сенсоров и формирует управляющие сигналы для регуляторов оборотов моторов. Наиболее часто применяются микроконтроллеры Atmel, достаточно быстродействующие, недорогие и с низким энергопотреблением. Однако в последнее время, с совершенствованием и усложнением вычислительных алгоритмов, разработчики все чаще упираются в ограничения быстродействия процессора и объема программной памяти. Существуют более мощные решения, например на ARM-контроллерах от ST Microelectronics, и даже экзотические конструкции на базе микрокомпьютера Raspberry Pi.

Встроенный стабилизатор напряжения 3,3 В (7) необходим для питания микроконтроллера и сенсоров. Как правило, источник бортового питания имеет напряжение 5 В, потому что именно это напряжение требуется для питания радиоприемника и различных дополнительных модулей.

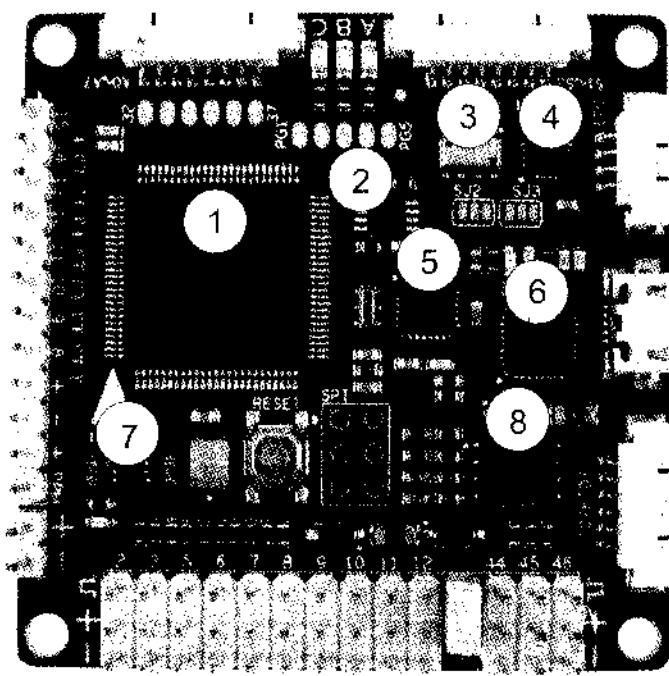


Рис. 2.8. Популярный полетный контроллер MultiWii AIOP v.2:

- 1 — микроконтроллер ATMEGA2560; 2 — конвертер логических уровней шины I²C PCA9306DP1;
 3 — барометр MS5611; 4 — магнитометр HMC5883L; 5 — гироскоп + акселерометр MPU6050;
 6 — адаптер USB/UART FT232RQ; 7 — стабилизатор +3,3 В; 8 — флеш-память 16Mbit AT45DB161D

Конвертер уровней шины I2C (2) используется для согласования логических уровней микроконтроллера и внешних устройств, подключенных к шине. Микроконтроллер питается напряжением 3,3 В и поддерживает соответствующие низковольтные логические уровни на шине. Но некоторые внешние устройства, такие как модули GPS, выносные компасы, дисплеи, могут питаться напряжением 5 В. Разница логических уровней между трех- и пятивольтовыми схемами может вывести из строя микроконтроллер.

Встроенный конвертер USB-UART (6) не нужен в процессе полета, но он позволяет подключить полетный контроллер непосредственно к разъему USB стационарного компьютера или ноутбука для записи прошивки или настройки. Микроконтроллер обменивается данными с компьютером через протокол последовательной передачи данных UART, а компьютерный COM-порт — это одна из реализаций протокола UART, называемая RS-232. Но даже если в вашем компьютере еще остался аппаратный COM-порт, то напрямую подключать к нему выводы микроконтроллера нельзя! Электрические параметры порта RS-232 существенно отличаются от уровней стандартной трех- или пятивольтовой TTL-логики. В протоколе RS-232 логический ноль лежит в диапазоне от +3 до +12 В, а единица — от -3 до -12 В. Промежуток от -3 до +3 В считается зоной неопределенности. Бытовые ноутбуки вообще не содержат стандартные физические COM-порты. Общепринятым и наиболее удобным решением является использование специальных микросхем-кон-

вертеров. При подключении такой микросхемы к порту USB операционная система компьютера создает *виртуальный* COM-порт, который с точки зрения прикладных программ ничем не отличается от физического. Через этот порт вы можете записывать прошивку в микроконтроллер или настраивать различные параметры.

Использовать конвертер, встроенный на плату, удобнее, чем постоянно подключать внешний. Но есть важный нюанс: как показал опыт множества пользователей, если забыть отключить от контроллера провод USB, то можно легко вырвать с платы разъем microUSB. Это не означает необратимую поломку платы, в крайнем случае можно будет использовать внешний адаптер. Но все равно, будьте аккуратны и внимательны.

Встроенная флеш-память для ведения логов (8) есть не на каждом полетном контроллере и для обычных полетов также не требуется. Но ее наличие удобно в более сложных случаях, когда надо проанализировать в динамике бортовое напряжение питания, маршрут и параметры полета или отладить прошивку.

На плату контроллера могут быть также встроены приемник радиуправления, приемник GPS, передатчики видеосигнала и/или телеметрии, LCD-дисплеи и т. д., но это уже комбинированные устройства. Мы рассмотрим дополнительные модули в отдельной главе.

Аппаратура радиуправления

Комплект аппаратуры радиуправления — это, зачастую, самый дорогой компонент радиоуправляемой системы. Но экономить на нем крайне нежелательно. В радиоаппаратуру обязательно должна быть заложена возможность развития конструкции вашего квадрокоптера, в противном случае сиюминутная экономия может обернуться дополнительными расходами спустя один-два года. Причем управление квадрокоптером высоко поднимает планку минимальных требований по сравнению с самолетами и даже вертолетами.

В общем случае аппаратура радиуправления состоит из пульта радиуправления (передатчика) и приемника. Основными параметрами являются протокол кодирования сигнала и количество каналов передачи команд. Рабочую частоту мы не рассматриваем, т. к. в настоящее время практически вся аппаратура работает на частоте 2,4 ГГц, и другие варианты скорее относятся к экзотическим явлениям, хотя при дальних полетах по FPV применяется и аппаратура с рабочими частотами 40 и 72 МГц, сигналы которых меньше подвержены затуханию и интерференции на сложных рельефах. Протокол кодирования сигнала означает способ, которым команды, полученные с органов управления пульта, "упакованы" в поток данных, проходящий через радиоканал. При разработке протоколов руководствуются помехоустойчивостью и плотностью потока информации. Существуют как проприетарные протоколы, которые использует только один производитель аппаратуры, так и более массовые. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки.

Подробный разбор и анализ протоколов вряд ли уместен в книге для начинающих. На первом этапе протокол, как таковой, вообще не будет иметь значения. Заострим

ваше внимание лишь на том, что *протокол передатчика и протокол приемника должны быть одинаковыми*. Это кажется очевидным, но по невнимательности вполне можно купить неподходящий приемник. Например, если ваш передатчик работает с протоколами DSM2/DSMX, нужно искать приемник именно для этих протоколов. Существуют передатчики со сменными передающими модулями, а также поддерживающие разные протоколы. Это особенно удобно, когда надо приобрести передатчик, совместимый с уже имеющимся квадрокоптером заводского изготовления или разными приемниками.

Параметр, который принципиально важен, — количество каналов. Для управления квадрокоптером их нужно как минимум четыре:

- общий газ (Throttle);
- тангаж (вперед-назад, Pitch);
- крен (вправо-влево, Roll);
- рыскание (вращение в плоскости полета, Yaw).

На самом деле, этого *очень* мало и хватит вам лишь для пробного взлета. Во-первых, нужны каналы для управления включением сенсоров и режимов полетного контроллера. Например, удержание высоты по барометру, включение/выключение компаса, удержание позиции или возврат домой по GPS. Во-вторых, могут понадобиться каналы для управления бортовой видеокамерой, бортовыми огнями или включения системы поиска упавшего аппарата. Комфортное управление квадрокоптером начинается при восьми и более каналах. Благо, сейчас даже недорогие передатчики и приемники способны поддерживать до 14 каналов. Количество каналов приемника и передатчика не обязательно должно совпадать. Если передатчик поддерживает двенадцать каналов, а приемник восемь, значит в вашем распоряжении только восемь каналов, остальные будут недоступны.

Итак, пульт радиоуправления состоит из аналоговых (стики) и дискретных (переключатели и тумблеры) органов управления, микроконтроллера, который оцифровывает и кодирует сигналы органов управления, радиопередающей части, дисплея и батареи питания. В качестве дополнительных модулей могут присутствовать приемник-декодер сигналов телеметрии и дисплей для отображения данных телеметрии и сигнала с бортовой видеокамеры. Благодаря наличию микроконтроллера, большинство пультов поддерживает гибкие настройки, позволяющие произвольно устанавливать связь между каналом и органом управления, инвертировать сигнал и устанавливать коэффициент пропорциональности между отклонением стика и изменением сигнала, а также менять количество каналов и прочие параметры потока данных.

В зависимости от расположения стиков управления различают передатчики типа Mode 1 и Mode 2. У передатчиков первого типа слева расположен стик Pitch-Roll, а справа Throttle-Yaw. У передатчиков второго типа, соответственно, наоборот. Более массовыми являются передатчики типа Mode 2, потому что большинству пользователей-правшей психологически удобнее интенсивно управлять положением летательного аппарата правой рукой, а левой периодически регулировать газ. Это во-

прос сугубо личного комфорта и привычки. На рис. 1.3 изображено расположение стиков для режима Mode 2.

К выбору расположения стиков при покупке следует отнестись очень ответственно, т. к. недостаточно изменить назначение стиков в меню или переключить провода в пульте. Узлы правого и левого стиков имеют разную конструкцию. Стик Pitch-Roll подпружинен по двум направлениям и при отпускании возвращается в центральную позицию. Стик Throttle-Yaw подпружинен только по оси Yaw, а газ при отпускании стика не уходит в центр. Поэтому для переделки Mode 1 в Mode 2 или наоборот необходимо поменять местами узлы стиков или переставить детали этих узлов. Не для каждого пульта это возможно. Предварительно ознакомьтесь с отзывами на тематических форумах или задайте вопрос продавцу.

Важно, чтобы фабричное качество пульта соответствовало вашим потребностям на перспективу. Дешевым пультам китайских производителей присущи люфты механической части, малая износостойкость и низкое качество переменных резисторов узла стиков, высокая погрешность оцифровки положения стиков. Вследствие низкого качества пульта могут возникнуть отрицательные явления.

- **Джиттер** — "дрожание" значения управляющего сигнала при неподвижном стике. Джиттер возникает как *сумма погрешностей* оцифровки, кодирования в передатчике и обратного раскодирования в приемнике.
- **Температурный дрейф** — значения управляющих сигналов сдвигаются вверх или вниз на некую величину при изменении температуры пульта. Соответственно, в нейтральном положении стиков управляющие сигналы перестают быть нейтральными. В дешевой аппаратуре дрейф иногда бывает настолько сильным, что мешает переключать режимы и управлять квадрокоптером в зимнее время. Экземпляры одной и той же марки из разных партий могут быть по-разному подвержены дрейфу. Для проверки рекомендуется охладить пульт в холодильнике до $-10...-15$ градусов и проверить параметры сигнала. Это можно сделать при помощи специальных программ для компьютера или смартфона, о которых мы расскажем далее.
- **Дискретность** — значения управляющих сигналов при смещении стика изменяются не плавно, а скачками. Это мешает точному пилотированию хорошо настроенного аппарата. Разумеется, цифровой сигнал по определению меняется дискретно, однако в качественной аппаратуре с высокой разрядностью дискретизации шаг изменения небольшой и не мешает точному пилотированию. Величина дискретности также влияет на джиттер.

Для управления мультикоптерами начального и среднего уровня не требуются какие-либо специальные приемники. Подойдет любой, совместимый с имеющимся пультом, приемник с числом каналов от шести и более. Четырехканальный приемник подойдет только для первого включения и пробных взлетов, далее количества каналов быстро станет недостаточно.

Функция Failsafe

При внезапном пропадании управляющего сигнала вследствие достижения предельной дальности, эфирной помехи или поломки аппаратуры система радиоуправления должна отработать один из вариантов поведения:

- либо сохранить *последние принятые* значения управляющих сигналов;
- либо установить значения управляющих сигналов в некие *заранее заданные* значения.

Первый вариант довольно опасен для длительной защиты: если в момент потери управления аппарат перемещался с большой скоростью или набирал высоту, то он продолжит это делать и может улететь очень далеко и безнадежно потеряться или причинить ущерб окружающим. Поэтому такой вариант защиты встроено в логику работы цифрового приемника и автоматически срабатывает при кратковременном выпадении нескольких пакетов данных.

Второй вариант более безопасен, лучше подходит при длительном пропадании сигнала и позволяет реализовать различные алгоритмы для минимизации ущерба. Применительно к квадрокоптеру реализация зависит от комплектации.

- **Без GPS-навигации.** Сигнал газа выставляется в положение, соответствующее достаточно быстрому, но безопасному снижению, чтобы коптер не унесло далеко ветром, а ущерб от падения был минимальным. Сигналы управления положением выставляются в среднее положение (горизонталь), включается режим автостабилизации горизонта. Режим удержания высоты по барометру отключается, либо включается режим удержания минимальной высоты, когда коптер зависает не ниже заданного значения. Рекомендуется также задать медленное вращение по Yaw, чтобы положение приемной антенны менялось в пространстве. Это дает шанс в каком-то положении принять неустойчивый сигнал и вернуть управление. Если есть поисковый маячок, то включить его. В итоге при срабатывании Failsafe коптер должен остановиться, выровняться и относительно безопасно приземлиться.
- **При наличии GPS-навигации.** Сигнал газа выставляется в положение, соответствующее висению. Сигналы управления положением выставляются в среднее положение (горизонталь), включается режим автостабилизации горизонта. Включается функция "возврат домой". Включается барометр, в прошивке контроллера должно быть задано значение высоты, на которой происходит возврат к точке старта, и высоты, на которой квадрокоптер зависает после возвращения. Например, если полет может происходить над лесом, то квадрокоптер должен возвращаться, гарантированно пролетая выше самых высоких деревьев. В итоге при срабатывании Failsafe квадрокоптер должен сам вернуться к месту старта и зависнуть на заданной высоте.

Даже если вы не планируете автоматические полеты по заданному маршруту, наличие приемника GPS очень полезно с точки зрения сохранности квадрокоптера. А если вы собираетесь использовать дорожную видеокамеру в комплекте с бесколлекторным гиropодвесом и качественным видеопередатчиком, то приемник GPS

является обязательным устройством, поскольку именно он вернет вам оборудование общей стоимостью более тысячи долларов в случае потери управления.

Функция Failsafe может быть реализована как приемником, так и полетным контроллером. Что лучше? Лучше не лениться и настроить оба варианта. Вероятность внезапного и полного отказа приемника во время полета невелика, но не равна нулю. В случае полного отказа приемника функцию Failsafe реализует полетный контроллер. *Некоторые приемники не имеют встроенной защиты от потери связи*, в этом случае вся надежда только на контроллер.

Модуляция сигнала PPM

Обычный многоканальный приемник получает по радиоканалу кодированный последовательный сигнал управления, декодирует его и "раскладывает" по отдельным выходам приемника для каждого канала. Параметры сигнала на выходе индивидуального канала определяются единым общепризнанным стандартом и не зависят от типа кодирования в передатчике или марки производителя. Статьи на тему популярных стандартов кодирования в аппаратуре радиоуправления писали или переводили все, кому не лень. В том числе и люди, далекие от радиотехники, что породило изрядную смысловую и терминологическую путаницу. Давайте разберемся по порядку.

Стандарт кодирования PPM (Pulse Position Modulation — фазово-импульсная модуляция) очень старый и популярный, поскольку может формироваться и обрабатываться без использования микроконтроллеров, при помощи обычных интегральных счетчиков и таймеров. Сейчас нечасто можно встретить передатчик с классической модуляцией сигнала PPM, разве что в китайских игрушках с инфракрасным пультом, но мы разберем этот стандарт подробно. Ведь каким бы способом сейчас не передавали информацию по радиоканалу, на выходе декодера обычного приемника мы имеем импульсы радиоуправления со строго определенными параметрами, которые исторически происходят от PPM и не меняются для обеспечения совместимости между оконечным (управляемым) оборудованием и массовой радиоаппаратурой разных производителей.

Итак, обратимся к рис. 2.9, на котором схематично изображен стандартный сигнал PPM для четырех каналов.

Сигнал PPM состоит из фреймов (frame) длительностью 20 мс. В свою очередь, фрейм состоит из стробирующих импульсов, которые разделяют каналы, и синхропаузы, благодаря наличию которой приемник начинает ожидать следующий кадр. Как видно из диаграммы, расстояние t_x между фронтами соседних синхроимпульсов соответствует длительности импульса в канале приемника. То есть, можно сказать, что *в сигнале PPM информация канала содержится в положении (position) стробирующего импульса относительно начала фрейма или предыдущего строба*. Длительность стробирующих импульсов лежит в диапазоне 100–400 мкс.

При помощи синхропаузы приемник опознает начало следующего фрейма, затем, опираясь на стробирующие импульсы, распределяет импульсы управления по ка-

налам. Для надежного разделения фреймов длительность синхروпаузы должна быть не менее 2500 мкс. В противном случае приемник может не опознать начало следующего фрейма и отправить на выходы каналов непредсказуемые импульсы.

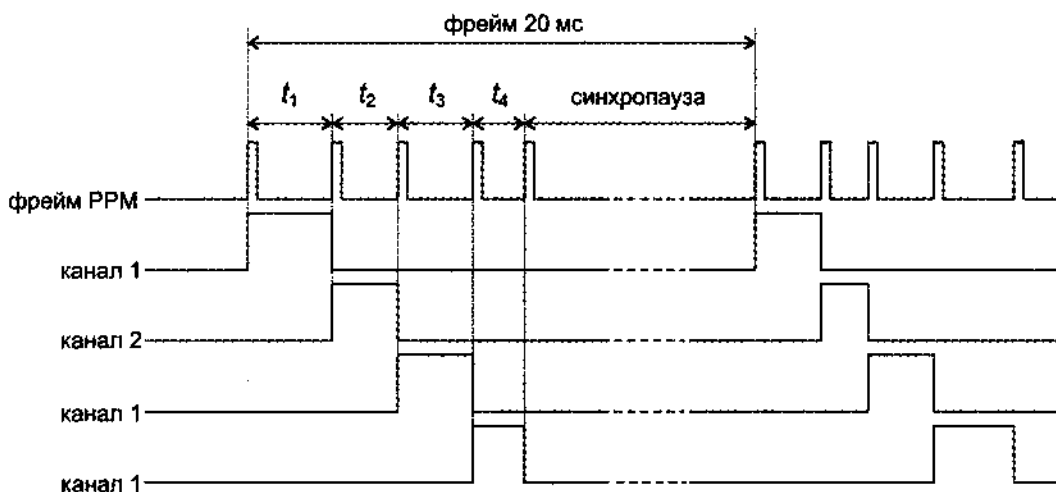


Рис. 2.9. Сигнал PPM и его раскладка по каналам управления

В свою очередь, импульсы на выходе отдельного канала следуют с периодом в 20 мс (т. е. с частотой 50 Гц), и меняется их ширина. Такое кодирование информации называют PWM (Pulse Width Modulation) или ШИМ (широтно-импульсная модуляция). Иными словами, в приемнике сигнал PPM превращается в разделенные по каналам сигналы PWM. Именно эти импульсы PWM мы до сих пор получаем на канальных выходах приемников, даже самых современных. Исключение составляют приемники с последовательным выходным каналом, но об этом позже.

Поскольку именно длительность импульса в канале несет в себе информацию, параметры этого импульса стандартизованы: минимальная — 1000 мкс, средняя — 1500 мкс, максимальная — 2000 мкс. Обязательно запомните диапазон этих значений, они фигурируют в настройках квадрокоптера и пригодятся вам в дальнейшем. Производители аппаратуры позволяют задать в настройках более широкий диапазон значений, порядка 800–2200 мкс, но в квадрокоптерах такие значения обычно не применяются.

В стандартный сигнал PPM с фреймом длительностью 20 мс можно упаковать не более восьми каналов (обычно шесть-семь). Проблема в ограничении минимальной длительности синхروпаузы. Давайте посчитаем вместе. Представьте ситуацию, когда по восьми каналам надо передать импульсы максимальной длительности $t_1 \dots t_8 = 2000$ мкс. Тогда суммарная длительность канальных импульсов составит $8 \cdot 2000 = 16\,000$ мкс, а для синхروпаузы останется $20\,000 - 16\,000 = 4000$ мкс. Этого более чем достаточно для надежной работы приемника. Но если добавить девятый канал, то на долю синхропаузы останется $20\,000 - 9 \cdot 2000 = 2000$ мкс. С такой синхропаузой декодер стандартного приемника не сможет опознавать начало фрейма и разделять каналы. Если же передатчик формирует канальные импульсы

с максимальной длительностью 2200 мкс, то в стандартный фрейм не поместятся даже восемь каналов.

Поэтому производители аппаратуры идут на ухищрения и увеличивают длину фрейма. Таким способом удается уместить в сигнал PPM до 14 каналов. Благо, в большинстве современных пультов можно настраивать длину фрейма, длину строба и количество каналов. Чтобы приемник распознавал такой, не вполне стандартный, сигнал, его приходится прошивать соответствующей прошивкой. Недостатком этого подхода является проблема совместимости приемников и передатчиков.

Существенным недостатком формата PPM является отсутствие контроля над качеством принимаемых данных. Если помеха исказила импульсы внутри фрейма, то они в искаженном виде попадут на выход приемника. Некоторые современные приемники PPM, оснащенные микроконтроллерами, могут отфильтровывать заведомо ошибочные импульсы в каждом канале управления по отдельности. Алгоритм фильтрации частично похож на алгоритм цифрового подавления помех в звуке или изображении. Приемник сохраняет в памяти параметры импульсов в каждом канале и сравнивает их с вновь поступившими. Считается, что в нормальной ситуации длительности импульсов от фрейма к фрейму могут измениться лишь в определенных разумных пределах. Если приемник обнаруживает аномально изменившиеся импульсы, он считает их недостоверными и заменяет их длительность значениями из предыдущего фрейма. Таким образом происходит обработка укороченной функции Failsafe по каждому каналу в отдельности. Попутно приемник копит информацию о количестве "испорченных" импульсов, и когда оно превышает критический порог в единицу времени, приемник уходит в глубокий Failsafe, как описано в предыдущем разделе.

Формат сигналов PCM

Импульсно-кодовая модуляция PCM (Pulse Code Modulation) применяется для повышения помехоустойчивости канала управления. Единого стандарта PCM не существует, производители используют собственные несовместимые протоколы. В итоге аппаратура PCM разных производителей взаимно несовместима, а соревнование протоколов по сути сводится к борьбе за кошельки покупателей, которых каждый производитель привязывает к своему оборудованию.

В протоколах PCM данные также передаются стандартными блоками, или пакетами. Пакет состоит из цифровых значений для каждого канала управления, служебной информации, контрольной суммы и синхроблока. Избыточность данных не предусмотрена. Если контрольная сумма не сходится, пакет отбрасывается, а на выходах приемника сохраняется предыдущее состояние (быстрый Failsafe). При накоплении количества ошибок выше критического предела или при полном пропадании пакетов включается глубокий Failsafe.

Количество импульсов в пакете PCM существенно больше, чем во фрейме PPM. Но импульсы нельзя чрезмерно укорачивать, т. к. при этом увеличивается ширина спектра излучаемого радиосигнала, жестко ограниченная нормами. Поэтому в общем случае пакет данных PCM получается длиннее, а скорость по протоколу PCM

ниже. Применяя оптимизацию протокола, удается сократить длительность пакета до 20 мс и меньше. Например, в каждом пакете можно передавать информацию только о быстро меняющихся каналах или чередовать каналы, для которых передается информация.

В массовой современной аппаратуре применяется широкополосный сигнал и импульсно-кодовая модуляция. Иными словами, с переходом на аппаратуру диапазона 2,4 ГГц рядовому потребителю следует больше беспокоиться о совместимости приемников и передатчиков разных производителей, а также о соотношении цены и качества аппаратуры, чем о тонкостях кодирования сигнала в радиотракте, поскольку на выходе любого приемника все равно будут одни и те же сигналы, подаваемые на полетный контроллер или исполнительные устройства.

Совместимость аппаратуры стандартов DSM2/DSMX

О совместимости оборудования, использующего протоколы модуляции эфирного сигнала DSM2 и DSMX, следует поговорить особо, т. к. эти протоколы чрезвычайно популярны у производителей аппаратуры среднего и низкого ценового сегмента. И, соответственно, пользуются широким спросом у авиамodelистов.

Протоколы DSM2 и DSMX — это фирменные протоколы, разработанные компанией Horizon Hobby, которые используются не только во всех ее моделях, но и в пультах JR и Spectrum нижнего ценового диапазона, а также в приемниках OrangeRx, которые стоят несколько долларов, но при этом работают без нареканий.

Передатчики и приемники DSM2/DSMX работают в диапазоне 2,4 ГГц, разбитом на отдельные каналы. Спецификация современных протоколов определяет не только формат цифровой импульсной модуляции радиосигнала, но и алгоритм работы с набором каналов. В протоколе DSM2 для связи используются два канала, а в протоколе DSMX передатчик перебирает их по своему уникальному алгоритму. При этом вероятность наткнуться на помеху статистически выше, но воздействие этой помехи продлится меньшее время, что в целом повышает помехоустойчивость системы. Поэтому DSMX позиционируется, как протокол для работы в сложных городских условиях.

Протокол DSMX более новый. Аппаратура стандарта DSMX, как правило, может работать и по протоколу DSM2, что обеспечивает аппаратную совместимость сверху вниз. Например, если у вас есть старый приемник стандарта DSM2, то новый передатчик стандарта DSMX можно переключить в режим DSM2. И наоборот, приемник стандарта DSMX может принимать сигналы от передатчика DSM2. Иными словами, если один из компонентов радиоканала работает в старом стандарте DSM2, то вся система переключается на этот стандарт. Особенно приятно, что эти два стандарта совместимы на уровне "железа": если приемник или передатчик DSM2 прошить новой прошивкой, то он начнет поддерживать протокол DSMX.

Впрочем, соблюдать осторожность в вопросах совместимости все-таки надо. Китайские производители иногда огорчают нас неприятными сюрпризами в виде внезапной отмены совместимости того или иного оборудования. В сомнительных случаях лучше посоветоваться с продавцом или на профильных форумах.

Сопряжение приемника и передатчика (биндинг)

Прежде чем начать эксплуатацию радиоаппаратуры, необходимо провести специальную процедуру привязки приемника к передатчику (биндинг, binding). После привязки приемник запоминает уникальный кодовый номер передатчика, рабочие каналы или алгоритм перебора каналов и работает только с этим передатчиком.

Нюансы процедуры биндинга зависят от оборудования, но в целом процедура очень проста. В специальный разъем приемника, помеченный надписью "BIND", вставляется перемычка и подается питание на приемник. Приемник переходит в режим сопряжения, показывая это миганием светодиода. Затем включают пульт, держа нажатой специальную кнопку на передающем модуле, в течение нескольких секунд происходит обмен информацией, и процедура завершается. Можно отключить питание, удалить перемычку из приемника и приступить к полетам.

Большинство современных приемников на самом деле являются приемопередатчиками. Только передают они слабый сигнал на расстоянии в несколько метров и лишь для обмена служебной информацией с передатчиком в момент привязки. В свою очередь, в модуле передатчика есть еще и приемник.

В процессе привязки приемник сообщает передатчику, сигналы каких стандартов он может принимать, и передатчик автоматически выбирает для работы подходящий. Но не все приемники поддерживают двусторонний обмен и автовыбор стандарта. Будьте готовы к тому, что придется вручную при помощи переключателя на радиомодуле или в меню настроек передатчика выбрать стандарт передачи, соответствующий приемнику.

Некоторые приемники, например в миниатюрных комнатных моделях, имеют функцию автобиндинга. При включении они всегда переходят в режим привязки и ждут сигнал от передатчика примерно в течение 10–15 с. Если за это время они принимают сигнал от "своего" передатчика, то сразу переходят в штатный режим. Если же во время ожидания поступает сигнал привязки от нового передатчика, то приемник запоминает уникальный код нового передатчика и затем переходит в штатный режим.

Во время биндинга может также происходить настройка функции Failsafe. Обычно приемник запоминает для режима Failsafe положение органов управления в момент привязки. Благодаря этой опции можно обеспечить относительно мягкую посадку квадрокоптера или автоматический возврат по GPS к точке старта. Процедура настройки у разных приемников может отличаться. Некоторые приемники вообще не имеют такой функции. Точные инструкции по настройке Failsafe и привязке в целом смотрите в документации производителя.

Импульсы PWM, триммеры и субтриммеры

Как мы уже говорили, независимо от протокола передачи информации и способа декодирования, у любого приемника с отдельными выходами каналов на каждом из выходов присутствуют стандартные импульсы PWM, длительность которых является управляющим параметром для исполнительных устройств.

Напомним, что стандартные длительности импульсов PWM таковы: минимальная — 1000 мкс, средняя — 1500 мкс, максимальная — 2000 мкс. Эти значения соответствуют минимальному, среднему и максимальному положению рукоятки управления пульта. Но это идеальные базовые значения. На практике они могут быть иными. Для примера рассмотрим простейшую ситуацию: в среднем положении рукоятки пульта вал сервомашинки слегка отклонен от среднего положения. Возможно, это погрешность сервомашинки, а может, погрешность пульта, который в среднем положении не обеспечивает 1500 мкс. Но сервомашинка не регулируется, поэтому в любом случае надо настраивать пульт. Для этого существуют *субтриммеры* и *триммеры*. Важно понимать разницу между ними.

Субтриммер симметрично смещает в ту или иную сторону *весь рабочий диапазон* длительностей. Например, при смещении вверх на 100 мкс рабочий диапазон будет составлять 1100–2100 мкс со средней точкой 1600 мкс. Таким образом, сохраняется симметрия диапазона, но происходит некоторый выход за его стандартные пределы.

Триммер смещает текущую рабочую точку *внутри действующего диапазона*. Но при этом выход за пределы диапазона при максимальных отклонениях не происходит. Например, если мы триммером сместили рабочую точку относительно физического положения рукоятки на 50 мкс вверх, то при среднем положении рукоятки длительность импульса составит 1550 мкс, но границы диапазона останутся прежними — 1000–2000 мкс.

Как видите, триммер вносит асимметрию в канал управления: максимальный рабочий ход вверх и вниз получается разным. Поэтому для *центровки каналов* используют *субтриммеры*, доступные в меню настроек передатчика. Триммеры же применяют в тех случаях, когда необходимо сделать оперативную корректировку и целенаправленно привнести асимметрию в канал. Например, модель самолета имеет слегка несимметричное крыло и заваливается влево. В этом случае асимметрия за счет триммирования канала элеронов скомпенсирует асимметрию крыла. Такие регулировки обычно выполняют в процессе полета, поэтому рычажки или кнопки триммеров вынесены на переднюю панель пульта и действуют без обращения к меню.

Квадрокоптер не обладает собственными аэродинамическими качествами, симметрия его поведения в полете и управления по осям достигается автоматически, за счет полетного контроллера. Поэтому *в случае с квадрокоптерами особенно важно соблюдать симметрию параметров управляющих импульсов. Категорически не рекомендуется при настройке пультов под квадрокоптер использовать триммеры! Центральные значения сигналов управления, которые должны максимально точно соответствовать 1500 мкс, достигаются только при помощи субтриммеров.*

Расходы и экспоненты

Часто бывает так, что выход за пределы стандартного рабочего диапазона недопустим (например, рычаг сервомашинки упирается во что-то) или желательно ограничить рабочий ход исполнительных механизмов для более мягкого и безопасного

управления. Рабочий ход в ту или иную сторону от центрального положения называется *расходом* и бывает положительным или отрицательным в зависимости от направления отклонения.

Расходы аппаратуры измеряются в процентах от стандартного отклонения и настраиваются через меню пульта. Можно установить расходы как больше, так и меньше 100%. Например, если установить расходы вверх и вниз по 90%, то минимальная длительность импульса составит $1500 - 500 \cdot 90\% = 1050$ мкс, а максимальная $1500 + 500 \cdot 90\% = 1950$ мкс. Обычно рекомендуется "зажимать" расходы аппаратуры для новичков, т. к. им свойственно от волнения двигать стики пульта слишком сильно и резко.

Обычно положительный и отрицательный расход канала можно регулировать по отдельности. Но, как мы уже говорили, для квадрокоптеров принципиально важна симметрия рабочего хода, поэтому и расходы следует подстраивать только симметрично. При настройке квадрокоптера расходами подгоняют минимальное и максимальное значение длительности импульса под необходимые для контроллера. А остроту реакции коптера на управление задают при помощи специального коэффициента *Rate* в настройках полетного контроллера.

Еще одним параметром, существенно влияющим на качество и комфорт пилотирования, является экспонента — степень нелинейности отклика системы на изменение управляющего сигнала. Строго говоря, эта зависимость получила такое название по причине визуальной схожести на график экспоненты $y = e^x$. На самом деле механизм формирования нелинейного отклика несколько сложнее. Чтобы не загружать микроконтроллер пульта вычислениями степенной функции в режиме реального времени, в память микроконтроллера записывается готовая таблица значений некой степенной функции вида

$$\exp(x) = \frac{e^{kx} - 1}{e^k - 1},$$

где x — это значение отклонения рукоятки; k — коэффициент пропорциональности. Во время работы пульта значения из этой таблицы накладываются на линейную зависимость по формуле

$$Y = N \cdot \exp(X) + (1 - N) \cdot X,$$

где N — это процент экспоненты в настройках пульта. Проще говоря, чем больше процент экспоненты N , тем сильнее "искривляется" линейная зависимость в соответствии со значениями из таблицы (рис. 2.10).

Наличие экспоненты позволяет мягко и комфортно управлять моделью в районе небольших отклонений рукояток, но в то же время при необходимости резко воздействовать на модель, парируя порыв ветра или выполняя вираж. Глубину экспоненты каждый пилот настраивает под себя и для каждой модели в отдельности. В общем случае рекомендуется увеличивать экспоненту для начинающих пилотов, склонных к нервным и суетным подергиваниям рукояток пульта, и уменьшать вплоть до полной линейности отклика для воздушной акробатики.

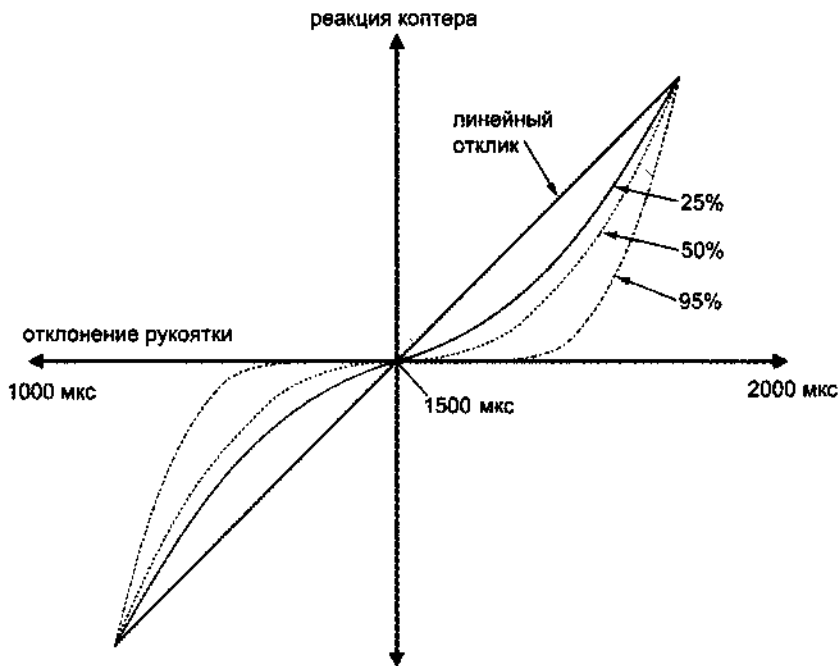


Рис. 2.10. Экспонента сигнала управления

ПРИМЕЧАНИЕ

Применительно к мультикоптерам, глубина экспоненты задается в настройках контроллера, а в настройках пульта экспоненты быть не должно. Экспоненты пульта и контроллера не должны накладываться на сигнал одновременно.

Как вы уже поняли, общая концепция радиуправления коптером такова: пульт должен передать максимально точные и стандартные "сырые" сигналы управления, а всю дальнейшую обработку будет выполнять полетный контроллер на основе своих настроек.

Конвертер PPM-SUM

У многоканальной системы с раздачей широтно-модулированных импульсов по отдельным выходным каналам есть принципиально неустранимые недостатки. Во-первых, отдельный сигнальный провод для каждого канала. Это особенно актуально для 12- или 14-канальных систем. В этом случае миниатюрный приемник соединяется с полетным контроллером и прочими бортовыми устройствами толстым жгутом проводов, неэстетичным и весящим больше, чем сам приемник. Однако полетный контроллер может и сам декодировать "сырой" PPM-сигнал, при условии, что он выведен на отдельный выход приемника.

Во-вторых, низкая стабильность и точность управляющего сигнала, обусловленная необходимостью лишних преобразований из одного типа сигнала в другой. Было бы логично передать цифровое значение, соответствующее положению ручки

пульта, по радиоканалу и затем из приемника переслать в исполнительное устройство без лишних преобразований. Однако для обработки цифрового сигнала исполнительное устройство должно обладать собственными вычислительными ресурсами. Но возможность выпускать такие устройства массово и недорого возникла лишь относительно недавно, с появлением дешевых и миниатюрных микроконтроллеров. Поэтому в традиционной системе приемник в любом случае преобразует цифровой сигнал в импульсы определенной длительности на выходе канала. Несмотря на то, что импульс представлен двоичными уровнями сигнала "0" и "1", физическая длительность импульса — это аналоговый параметр. То есть, на этапе передачи-приема мы имеем преобразование из аналогового сигнала в цифровой и обратно в аналоговый.

Если выход приемника подключен к обычной сервомашинке (принцип ее работы мы рассмотрим далее), то она использует непосредственно длительность импульса в качестве управляющего параметра. Если же мы подаем широтно-модулированный импульсный сигнал на вход полетного контроллера, то он должен измерить длительность импульса при помощи таймера и перевести ее в цифровое значение. В итоге мы получаем в тракте управления цепочку преобразований, каждое из которых вносит свою погрешность и задержку.

Итак, очевидные недостатки традиционной системы радиоуправления — ограниченная пропускная способность, искажения и задержки сигналов управления, толстый пучок проводов от приемника к исполнительным устройствам. Чтобы избавиться от пучка проводов, используют специальное устройство — кодер-конвертер PPM. С точки зрения инженерной логики это довольно забавное устройство. Оно подключается к выходам каналов приемника и преобразует отдельные командные импульсы обратно в последовательность пакетов импульсов. С выхода конвертера сигнал PPM поступает на специальный вход полетного контроллера. Такой вход обычно обозначают PPM-SUM, т. к. на него подается суммарный сигнал PPM. Приемник только что успешно "разложил" сигнал по каналам, а конвертер снова собирает их в последовательность, внося дополнительную погрешность и задержку. Пожалуй, основная польза от такого устройства — избавление от пучка проводов.

Вполне логично, что появились приемники, оснащенные выходом последовательного сигнала. Это может быть как все тот же универсальный сигнал PPM-SUM, так и особый проприетарный последовательный сигнал S-BUS фирмы Futaba, похожий на протокол UART. Разные производители могут кодировать выходной сигнал по-разному. Последовательный протокол позволяет подключать все управляемые исполнительные устройства к одной общей шине. Каждое устройство, получив синхроимпульс, считывает с шины "свой" пакет цифровых данных и декодирует его.

Поскольку пакеты данных в последовательном канале следуют в определенном порядке, *цифровое* исполнительное устройство (сервомашинка, регулятор оборотов, радиоключ) должно быть предварительно запрограммировано на определенный номер канала, т. е. на извлечение "своего" блока данных из последовательного потока. Для этого применяются специальные программаторы. Если последовательный сигнал подается на специальный вход полетного контроллера, то дальнейшую об-

работку выполняет контроллер, а порядок следования каналов настраивается в прошивке контроллера или в приемнике. В любом случае порядок следования каналов в передатчике и контроллере должен совпадать.

Приемник-спутник

Надежность работы радиоканала можно повысить при помощи специального приемника-спутника. Он представляет собой обычный приемник, у которого отсутствует узел обработки принятого сигнала. Вместо этого на выход спутника идет последовательный "сырой" поток. Этот поток поступает на специальный вход основного приемника. Некоторые приемники допускают подключение двух спутников. Приемники монтируют так, чтобы антенны базового приемника и спутника находились на максимальном расстоянии друг от друга. Антенны могут иметь разную конструкцию и ориентацию в пространстве. Если одна из приемных частей теряет сигнал, ее подстраховывает вторая часть.

Поскольку полетный контроллер может самостоятельно обрабатывать последовательный управляющий сигнал, можно подключить маленький и легкий спутник непосредственно к контроллеру и обойтись без основного приемника, уменьшив вес и энергопотребление. Такое решение популярно при разработке миниатюрных конструкций, которые обычно не улетают из зоны устойчивой связи.

Встроенная телеметрия

Поскольку почти все современные пульты управления, даже недорогие, оснащены матричным графическим дисплеем, вполне логично использовать этот дисплей для отображения данных телеметрии. Для этого можно заменить прошивку пульта версией, поддерживающей вывод телеметрии, и внести изменения в конструкцию пульта, подключив к нему внешний приемник. Но проще приобрести готовый комплект модулей, например FrSky. Модуль, подключаемый к пульта, содержит не только передатчик радиоуправления, но и приемник сигналов телеметрии. Существуют также дорогие и сложные комплекты аппаратуры радиоуправления со встроенной функцией телеметрии и даже с отдельным специальным дисплеем на пульте.

Антенны

Конструкции и типы антенн, применяемых в радиоуправлении, зависят от назначения устройства. Чтобы понимать эту зависимость, необходимо иметь хотя бы общее представление об основных параметрах антенны. Эти параметры тесно взаимосвязаны, и рассматривать их следует в комплексе.

Диаграмма направленности — это графически выраженная зависимость *коэффициента усиления* антенны в зависимости от направления в заданной плоскости. Упрощенно говоря, это зависимость эффективности работы антенны от направления в пространстве. Примером всенаправленной антенны является вертикальный штырь. Его диаграмма направленности в горизонтальной плоскости представляет

собой круг, т. е. направление излучения или приема не имеет значения. У направленной антенны всплески коэффициента усиления на диаграмме называют лепестками.

На рис. 2.11 показан пример диаграммы для узконаправленной антенны. На диаграмме видны три характерные области — 1, 2 и 3. Область 1, которой соответствует наибольший уровень принятого сигнала, называют основным, или главным лепестком диаграммы направленности. Области 2 и 3, находящиеся со стороны рефлектора антенны, называются задними и боковыми лепестками. Наличие этих лепестков свидетельствует о том, что антенна принимает радиоволны не только спереди (в рабочем направлении), но и сзади (со стороны рефлектора), что снижает помехоустойчивость приема. Аналогично, при передаче наличие побочных лепестков снижает эффективность излучения в рабочем направлении. В связи с этим при разработке и настройке антенны стремятся уменьшить число и уровень задних и боковых лепестков.

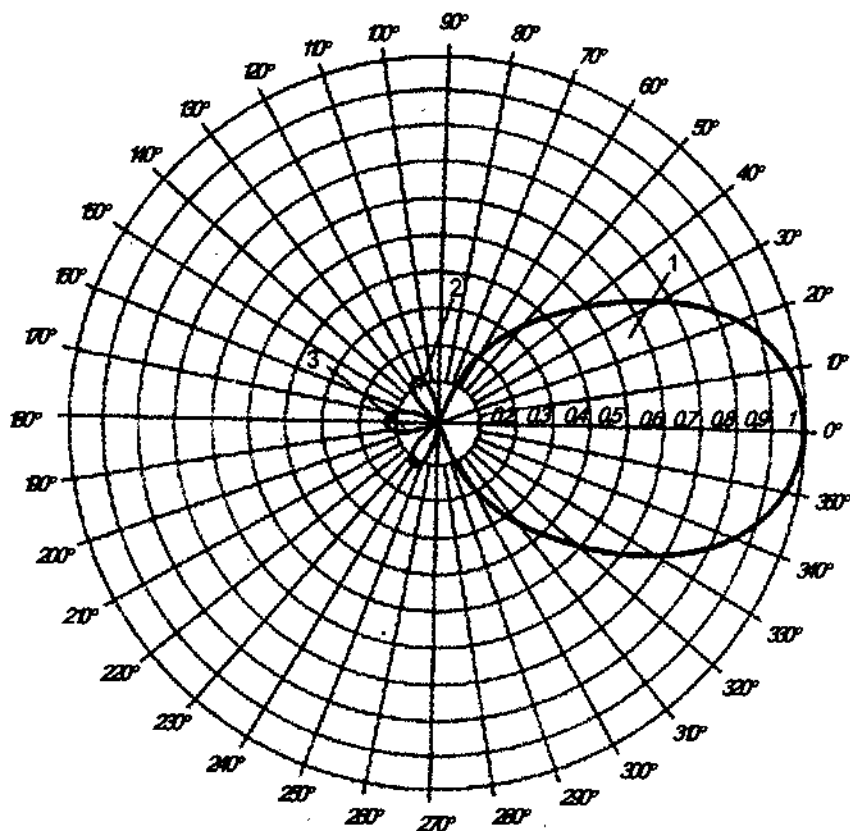


Рис. 2.11. Пример диаграммы направленности антенны

Поскольку в радиоуправлении мы имеем дело с объектом, свободно перемещающимся в пространстве, необходимо принимать во внимание *объемную диаграмму направленности*. Например, для штыревой антенны это "бублик" с максимумом

в направлениях, перпендикулярных штырю. В продольном направлении штыревая антенна не излучает и не принимает сигнал.

Коэффициент усиления показывает, во сколько раз нужно изменить сигнал на входе антенны относительно сигнала на входе идеальной всенаправленной антенны, чтобы в точке приема напряженность электромагнитного поля не изменилась. Коэффициент усиления, выраженный в децибелах (дБ, dBi), может быть как положительным, так и отрицательным. Отрицательное значение присуще антеннам с низким КПД (коэффициентом полезного действия): укороченным, малогабаритным, широкополосным. Низкий КПД не означает низкую направленность антенны. Например, антенна с узкой диаграммой направленности может иметь низкий КПД и "плохо" излучать или принимать сигнал вследствие затуханий сигнала в элементах конструкции.

Рабочая частота (полоса частот) — это частотный диапазон, в котором антенна реализует не менее 90% от своего максимального КПД. Рабочая частота жестко связана с геометрическими размерами и конструкцией антенны. Чем больше длина волны, тем крупнее антенна. Поэтому увеличение рабочей частоты до 2,4 ГГц существенно снизило габариты и вес антенн.

Поляризация — это направленность вектора электрической составляющей электромагнитной волны в пространстве. Различают вертикальную, горизонтальную и круговую поляризацию. Этот параметр важен для учета взаимной ориентации антенн в пространстве. Например, если штыревая антенна передатчика расположена вертикально, то и штыревая антенна приемника должна быть расположена вертикально, иначе уровень принимаемого сигнала может существенно снизиться. Кроме того, радиосигнал может изменить поляризацию при прохождении через неоднородности воздушных масс ("воздушные линзы"). Поэтому приемники авиамodelей часто снабжают дополнительными антеннами с разной ориентацией в пространстве.

Рабочая мощность — параметр, важный для передающей антенны. Превышение подводимой к антенне мощности может привести к выходу из строя не только антенны, но и передатчика. Причем второе даже более вероятно.

Принцип обратимости антенн гласит, что свойства антенны (диаграмма направленности, коэффициент усиления, рабочая частота) не зависят от того, работает ли антенна на передачу или на прием.

Существуют и другие параметры антенн, но для начинающего моделиста они не имеют принципиального значения. Что касается самостоятельной разработки антенн, то это очень сложный процесс, требующий глубоких профессиональных знаний, а также наличия специального измерительного оборудования для тестирования и настройки. Если вы этим набором не обладаете, то лучше не терять время зря и приобретать готовые антенны, либо изготавливать несложные и многократно проверенные конструкции.

Рассмотрим основные типы антенн, применяемых в аппаратуре радиоуправления диапазона 2,4 ГГц и каналах видео- и телеметрии.

Ненаправленные антенны

Наиболее распространенными ненаправленными антеннами являются штыревая и коллинеарная. В стандартной поставке передатчик радиуправления комплектуется простейшей штыревой антенной, похожей на те, которые используются в недорогих Wi-Fi-роутерах. Антеннами такой же конструкции, но на диапазон 5,8 ГГц могут быть оснащены передатчики и приемники видеоканала.

Антенна этой конструкции является полуволновым вибратором, запитанным в середине (рис. 2.12). Одна часть вибратора состоит из четвертьволновой трубочки, через которую проходит кабель. Оплетка кабеля припаяна к концу этой трубочки. Второй частью вибратора является четвертьволновая центральная жила кабеля, свободная от оплетки экрана.

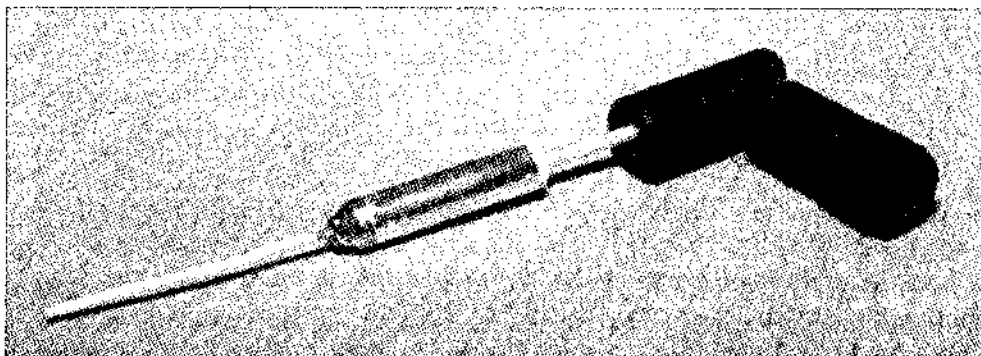


Рис. 2.12. Штыревая антенна передатчика и ее внутреннее устройство

Иногда в оборудовании применяются так называемые *коллинеарные антенны*, состоящие из нескольких излучающих элементов, последовательно соединенных через фазовращатели. В этом случае антенна занимает всю длину кожуха (рис. 2.13). Поэтому надо быть аккуратным при замене сломанной антенны и предварительно проверить внутреннее устройство заменяемой антенны, чтобы обеспечить полноценную замену.

ПРИМЕЧАНИЕ

Несмотря на то, что стандартные антенны от оборудования Wi-Fi визуально совпадают с антеннами для передатчиков радиуправления, у них может различаться сопрягаемая часть разъема. Различие показано на рис. 2.14. Однако даже в оборудовании Wi-Fi одного производителя могут применяться как прямые, так и обратные пары "штырь — гнездо" в антеннах! Например, в оборудовании Zухel WiMAX MAX-206 антенны со штыревой частью, совместимые с модулями передатчика Orange Tx, а в некоторых моделях Zухel Keenetic разъемы инверсные. Поэтому, собираясь заменить сломанную антенну передатчика визуально похожей, убедитесь в совместимости разъемов.

ПРИМЕЧАНИЕ

Недобросовестные китайские поставщики зачастую злоупотребляют внешней схожестью антенн для роутеров и антенн для аппаратуры радиуправления. Более того, иногда в такой же корпус помещают спиральные антенны диапазона 433 МГц для мо-

дулей телеметрии. Нельзя приобретать стандартные штыревые антенны, руководствуясь только внешним видом. Лучше лишний раз спросить продавца о рабочем диапазоне. Однако и это не застрахует вас от недобросовестных китайских продавцов, которые стараются продать любую внешне похожую антенну из имеющихся в наличии и уверяют, что это нужный вариант.

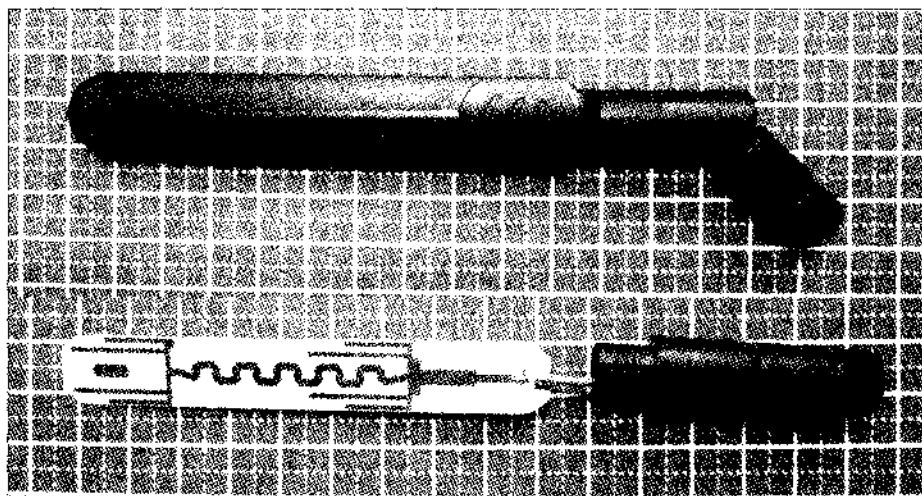


Рис. 2.13. Двухдиапазонная ненаправленная коллинеарная антенна и ее внутреннее устройство

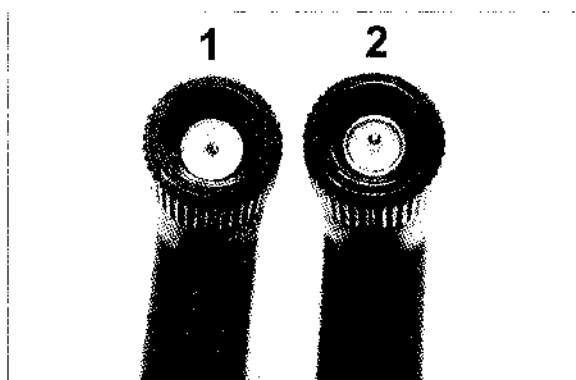


Рис. 2.14. Разъемы типа SMA антенны с гнездовой (1) и штыревой частью (2)

Чтобы определить рабочий диапазон без применения специального оборудования, можно аккуратно разобрать антенну и измерить длину четвертьволнового вибратора: для диапазона 2,4 ГГц — $1/4\lambda = 31$ мм; для диапазона 5,8 ГГц — $1/4\lambda = 13$ мм.

В бортовых приемниках радиуправления для экономии веса обычно используются штыревые антенны в виде кусочка провода длиной 31 мм ($1/4$ длины волны 2,4 ГГц) или в виде центральной жилы экранированного провода, очищенной от экрана на эту же длину.

Малогобаритные антенны на диапазон 433 МГц обычно представляют собой спираль, подключенную к центральной жиле кабеля, и не содержат встроенного противовеса (рис. 2.15).

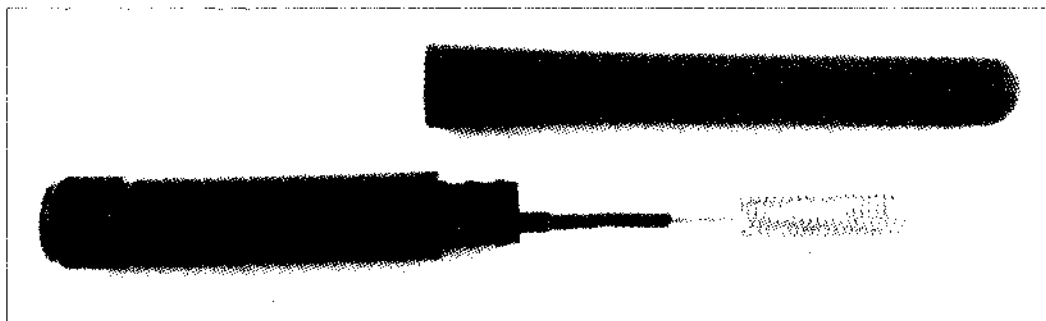


Рис. 2.15. Внутреннее устройство антенны на частоту 433 МГц

При построении видеоканала часто применяют антенны типа "клевер" (рис. 2.16). Они сочетают в себе *круговую поляризацию излучения* и почти шарообразную объемную диаграмму направленности. Это означает, что взаимное положение передающей и приемной антенны почти не будет влиять на качество сигнала. Количество лепестков антенны определяет равномерность диаграммы направленности. Чем больше лепестков, тем больше диаграмма похожа на ровный шар. Однако четырехлепестковая антенна тяжелее, поэтому ее ставят на наземное оборудование. Практический опыт множества моделистов также говорит о том, что применение четырехлепестковой антенны на земле более эффективно. Иногда встречается ошибочное мнение, что от количества лепестков зависит волновое сопротивление антенны, но это не так.

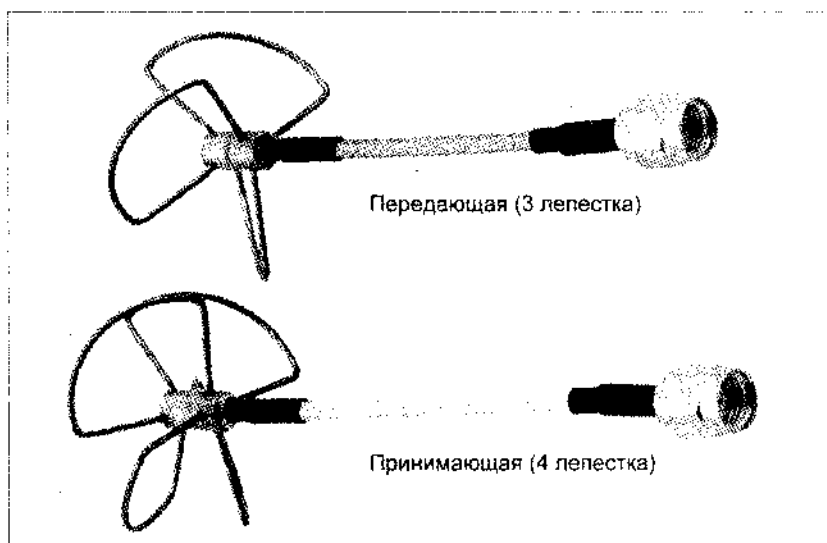


Рис. 2.16. Передающая и принимающая антенны типа "клевер"

Направленные антенны

Вариантов конструкции антенн направленного действия намного больше (рис. 2.17 и 2.18), чем ненаправленного. Причем, не всегда для создания направленной диаграммы применяется рефлектор. Эффект направленности может быть образован за счет формирования фазовых сдвигов напряженности электромагнитного поля в элементах конструкции и/или в пространстве вокруг антенны.

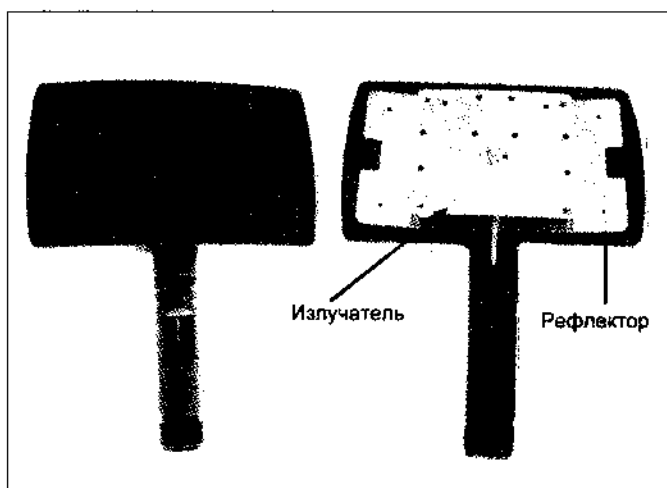


Рис. 2.17. Направленная портативная антенна диапазона 2,4 ГГц

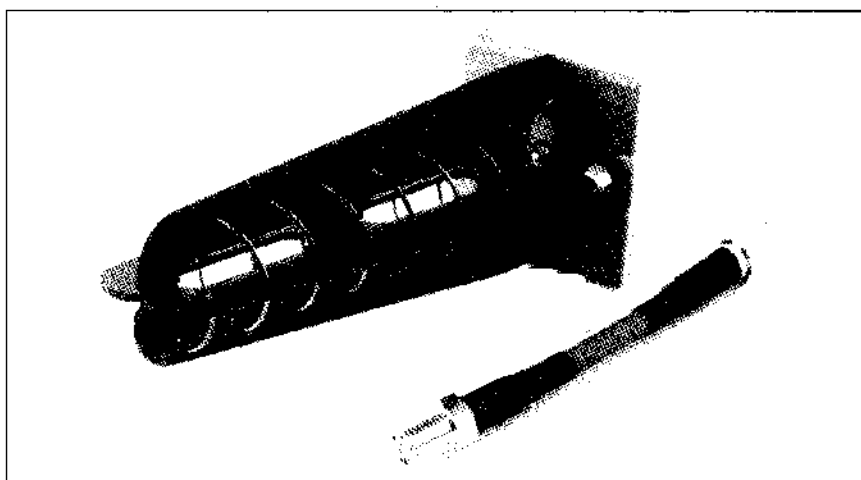


Рис. 2.18. Спиральная направленная антенна Helix для приемника видеоканала 5,8 ГГц

При использовании антенн с круговой поляризацией крайне важно совпадение направления вращения вектора поляризации у передающей и принимающей антенны. Например, у спиральных антенн должно совпадать направление навивки спирали. В противном случае произойдет резкое снижение уровня принимаемого сигнала

даже при идеальной взаимной ориентации антенн. Особенно легко ошибиться с вектором поляризации при использовании антенн разного типа. Распространенной ошибкой является использование в видеоканале передающей бортовой антенны типа "клевер" и принимающей спиральной без учета направления вектора поляризации.

С другой стороны, при отражении от препятствий (земная поверхность, стены зданий) сигнал с круговой поляризацией становится линейно поляризованным и эффективно подавляется принимающей антенной. Благодаря этому существенно снижается уровень помех на изображении в виде двоющегося изображения и шумов.

Системы слежения за направлением

Использование направленной антенны существенно повышает дальность радиоканала, но возникает проблема удержания направления на движущийся объект. Если направленная антенна смонтирована на пульте или видеоочках, то проблема решается за счет перемещения оператора. В остальных случаях требуется помощь ассистента или специальная *автоматическая система слежения за направлением* (трекер). Трекеры используются в наземных антеннах приема видеосигнала и телеметрии. Надо иметь в виду, что из-за неоднородностей окружающего пространства может происходить отражение и интерференция сигнала, и оптимальная ориентация антенны может слегка отличаться от фактического направления на объект.

Для трекинга применяются два основных метода: координатный и сигнальный. В первом методе координаты модели, определенные по GPS, по каналу телеметрии или по каналу звука поступают на наземный трекер. Контроллер трекера на основании собственных координат и координат объекта вычисляет направление. Преимуществом метода является простота радиоприемной части, в которой используется только один приемник, устойчивость к захвату ложных источников сигнала. Недостатки: необходимость точно позиционировать приемную станцию по координатам и азимуту, а для этого она должна иметь собственный компас и приемник GPS или возможность ручного ввода координат. Сложение погрешностей GPS при определении координат двух точек снижает точность наведения. Не учитывается возможность случайных пространственных искажений при распространении сигнала, из-за чего наведение по координатам не всегда оптимально. При потере связи теряются также и данные о координатах объекта, что усугубляет ситуацию.

В сигнальном методе используется непрерывное измерение уровня принимаемого сигнала. В простых самодельных трекерах применяют 2–3 независимых приемника с антеннами, направленными под слегка различающимися углами. Контроллер трекера сравнивает уровни сигналов с приемников и поворачивает турель в сторону антенны с наилучшим сигналом (рис. 2.19).

Достоинством системы является правильная ориентация в направлении наилучшего приема. Очевидный недостаток — использование нескольких приемников и антенн. В более простом, сканирующем, варианте используется один приемник и антенна. Контроллер непрерывно измеряет уровень сигнала с выхода RSSI приемника и при его снижении отклоняет антенну на несколько градусов в различных направлениях,

сканируя зону слежения и "отлавливая" новое оптимальное направление. Поскольку слежение происходит непрерывно, после нескольких циклов корректировки/отслеживания контроллер начинает более-менее точно предсказывать направление движения объекта.

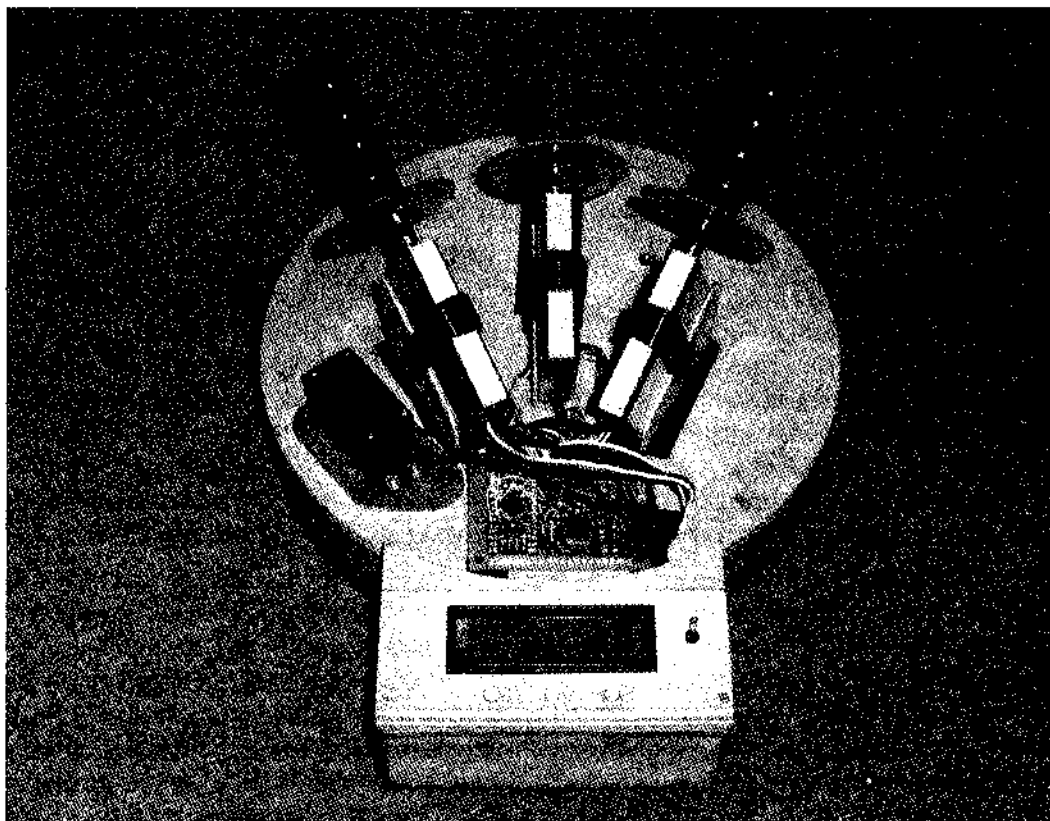


Рис. 2.19. Самодельный трекер сигнального типа с тремя приемниками (<http://fpvlab.com/forums/showthread.php?8331>)

В дорогих профессиональных системах может применяться антенна с синтезированной апертурой и измерение сдвига фаз несущей частоты для уточнения направления на объект.

Очевидным недостатком трекеров, использующих слежение по уровню сигнала, является возможность ложного захвата постороннего источника более мощного сигнала, случайно работающего на этой же частоте. Но, к счастью, в открытом поле вероятность такого события невысока.

Самой простой и недорогой альтернативой автоматическому трекеру является ручное управление антенной. Некоторые комплекты аппаратуры радиоуправления позволяют привязать к передатчику несколько приемников. В этом случае недорогой приемник ставят на трекер, подключают к нему сервомашинку трекера и управляют поворотом антенны, вращая потенциометр на пульте.

Диверсификация антенн

Летающие модели интенсивно меняют свое положение в пространстве. Поэтому важно обеспечить устойчивый радиоканал при любом взаимном положении антенн. В приемниках радиуправления иногда используют две антенны, расположенные под углом 90° , или дополнительные приемники-спутники, у которых тоже располагают антенны в разных местах модели и под разными углами. Этот прием называется *пространственной диверсификацией* антенн.

Иногда возникает потребность в *диверсификации по типу антенны* (рис. 2.20). Например, антенны для приема видеосигнала могут обладать очень острой диаграммой направленности. Такое свойство существенно повышает эффективную даль-

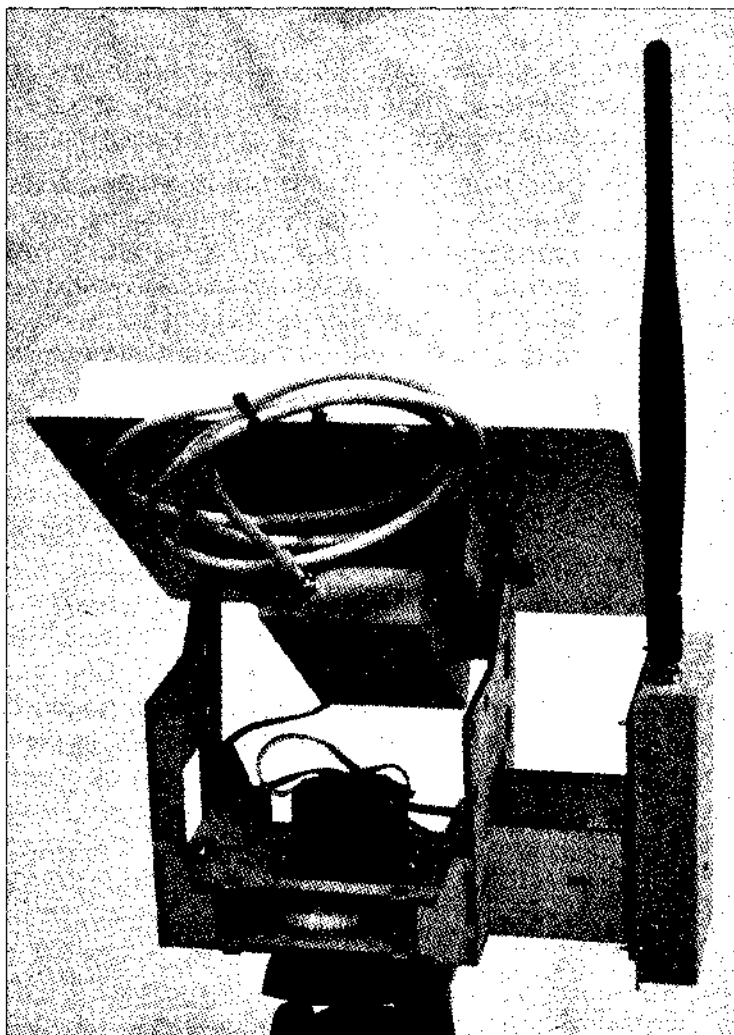


Рис. 2.20. Антенная система со следящей основной антенной и диверсификацией за счет штыревой всенаправленной антенны (<http://www.readymaderc.com>)

ность приема и помехоустойчивость, но стоит отклонить антенну на несколько градусов в сторону от направления на модель, и сигнал может резко и внезапно пропасть. Поэтому в сочетании с остронаправленной антенной иногда применяют вторую антенну, имеющую более широкую или вообще круговую диаграмму направленности. При потере сигнала с основной антенны качество сигнала с дублирующей может быть заметно хуже, но в большинстве случаев оператору его будет достаточно, чтобы не потерять управление.

Диверсификация по частотному диапазону (дублирование канала) в любительской практике применяется редко, т. к. требует наличия двойного комплекта приемопередающего оборудования на разные диапазоны.

Двигатели

Двигатели, применяемые в авиамоделях, делятся на два больших семейства: коллекторные и бесколлекторные. Устройство коллекторного двигателя вы должны знать из школьного курса физики. Для тех, кто забыл, очень кратко напомним.

Коллекторный двигатель состоит из неподвижных магнитов, прикрепленных к корпусу (*статор*) с чередованием полюсов и нескольких катушек, смонтированных на валу (*ротор*). Напряжение на катушки ротора поступает через скользящие контакты (*коллектор* и *щетки*). При подаче напряжения на катушку ротора, вокруг нее формируется магнитное поле. Катушка отталкивается от полюса одного из магнитов статора и притягивается к другому. В этот момент происходит переключение полярности питания за счет вращательного смещения контактов коллектора относительно щеток и катушка начинает притягиваться к следующему магниту. Коллекторный двигатель — это классический пример самоуправляемой системы, он сам себе переключает полярность катушек в нужный момент во время вращения. Направление вращения зависит от полярности питающего напряжения, а частота вращения от величины напряжения.

В **бесколлекторных двигателях** коммутация катушек происходит при помощи специальной электронной схемы — регулятора оборотов (Electronic Speed Controller, ESC). Независимо от количества катушек и схемы их внутренней коммутации бесколлекторный двигатель авиамодели всегда имеет три вывода, подключаемые к регулятору. Регулятор подает на эти выводы питающее напряжение со сдвигом по фазе. Поскольку выводы катушек подключены к регулятору неразрывно, то катушки смонтированы неподвижно и являются статором, а вращается ротор с прикрепленными к нему постоянными магнитами. Направление вращения зависит от подключения выводов двигателя к регулятору. Для изменения направления вращения достаточно поменять местами два любых вывода. Существуют более сложные конструкции двигателей, оснащенные датчиком оборотов и подключаемые к специальным регуляторам. В этом случае для изменения направления вращения необходимо перепрограммировать регулятор.

Если магниты расположены снаружи относительно катушек, такие двигатели называют аутраннерами (*outrunner*); если катушки расположены снаружи, а внутри вра-

щается намагниченный ротор — инраннерами (inrunner). В квадрокоптерах и большинстве авиамоделей применяют аутраннеры. Удельная мощность и КПД бесколлекторного двигателя существенно зависит от мощности постоянных магнитов ротора, поэтому обычно используются неодимовые магниты. Они приклеены на внутреннюю сторону ротора. Если двигатель уронить на твердую поверхность, от удара магниты могут отклеиться или треснуть.

ВНИМАНИЕ!

Трещина может быть незаметна глазу, но приведет к снижению мощности двигателя и может вызвать пропуски фазы и даже заклинивание двигателя отвалившимся осколком магнита прямо во время полета.

Коллекторные двигатели имеют низкие КПД, удельную мощность и моторесурс. Но их конструкция проще, они дешевле и не требуют сложного регулятора для работы. В свою очередь бесколлекторные двигатели практически не изнашиваются, если не считать выхода из строя дешевых китайских подшипников. При помощи регулятора оборотов можно организовать различные режимы: плавный разгон, торможение, ограничение по току, защиту от включения заблокированного двигателя.

Относительно недавно главным недостатком бесколлекторных двигателей была высокая цена, на 40–70% больше, чем у коллекторных двигателей аналогичной мощности, и моделисты были вынуждены изготавливать их самостоятельно, перематывая двигатели от приводов CD и видеомagneтофонов. Сейчас появились недорогие бесколлекторные двигатели в широчайшем ассортименте, поэтому выбор между коллекторными и бесколлекторными двигателями зависит от области применения.

Коллекторные двигатели по-прежнему широко применяются в миниатюрных моделях, в том числе и в квадрокоптерах "наладонного" размера. В ситуации, когда идет борьба за каждый грамм веса, в миниатюрных коллекторных двигателях используют бескаркасные (coreless) катушки ротора. Отсутствие отдельного регулятора оборотов также существенно снижает общий вес, поскольку для управления оборотами коллекторного двигателя достаточно одного транзистора, управляемого сигналом с полетного контроллера. Ограниченный ресурс примитивного коллекторно-щеточного узла компенсируется дешевизной двигателя. Бесколлекторные двигатели для миниатюрных квадрокоптеров существуют, но дефицитны и стоят очень дорого, поскольку столь ювелирную конструкцию сложно изготавливать серийно.

С увеличением мощности двигателя возрастают коммутлируемые токи в обмотках. Например, для двигателя квадрокоптера пиковые рабочие токи величиной 20–40 А — это обычное явление. Щеточный узел для таких токов должен иметь графитовые щетки и мощный коллектор с большим пятном контакта, что существенно усложняет и утяжеляет конструкцию, сводя на нет выгоды бесколлекторного двигателя. Более того, сильнейшие помехи от искрящих щеточных узлов четырех моторов могут не только забить сигналы управления и GPS, но и вызвать сбой в работе бортовой электроники. Поэтому в квадрокоптерах, начиная с диагонали 160 мм, коллекторные двигатели обычно не применяются.

Важным параметром бесколлекторного двигателя является его паспортная скорость вращения, измеряемая в *оборотах на вольт* питающего напряжения (обозначается как kV). В квадрокоптерах применяются низкооборотистые, по модельным меркам, двигатели с $kV = 400-1200$. Здесь мы плавно переходим к разговору о воздушных винтах, потому что двигатель и винт образуют единую *винтомоторную пару*, и правильнее будет рассуждать об оптимальном сочетании двух составляющих этой пары.

Воздушные винты

Не углубляясь в основы аэродинамики, рассмотрим общие принципы подбора винтомоторной пары. Основными параметрами винта являются диаметр, шаг и количество лопастей. Диаметр измеряется, как диаметр круга, образуемого при вращении винта. Шаг винта — это расстояние, пройденное винтом за один оборот при "ввинчивании" в условную твердую среду. Увеличение шага винта повышает тягу при малых оборотах. Все винты, кроме совсем миниатюрных, имеют переменный шаг и профиль лопасти. Внимательно рассмотрев винт, вы увидите, что ближе к законцовке угол атаки лопасти уменьшается, а ее профиль становится более плоским. Зачем так делают? При движении точек по окружности с одинаковой *угловой* скоростью, чем дальше от центра вращения, тем выше *линейная* скорость точки. Концевая часть лопасти движется со значительно большей линейной скоростью, чем корневая. Поэтому, чтобы сделать нагрузку на лопасть равномерной по всей длине (а точнее, дать больше нагрузки на прочную корневую часть), используют переменный профиль. В противном случае лопасти начнут выгибаться во время вращения даже при небольшой тяге, а также начнется срыв воздушного потока ближе к концам лопастей.

При вращении винт создает подвижный воздушный поток, движущийся в направлении, противоположном направлению вектора тяги. Поскольку квадрокоптеры очень медленно перемещаются по вертикали, обычно применяется сочетание двигателей с низкими оборотами и винтов с большим шагом.

Почему не рекомендуется использовать для квадрокоптеров моторы с высокими оборотами в паре с винтами малого шага? Для достижения максимального КПД скорость потока, создаваемого винтом, должна быть соотносима со скоростью перемещения модели. В статическом состоянии, когда квадрокоптер висит, мощность "быстрой" винтомоторной пары расходуется крайне непродуктивно по причине возникающих завихрений и срывов потока в плоскости вращения винта. Упрощенно говоря, при неподвижной или медленно движущейся модели "быстрый" винт вхолостую перемальвает воздух, находясь в неблагоприятной турбулентной среде. При этом резко возрастает потребляемый ток и возможен перегрев двигателя.

На начальном этапе надо запомнить два простых интуитивных правила:

- рабочие обороты двигателя и шаг винта находятся во взаимно обратной зависимости;
- чем больше диаметр винта, тем меньше должны быть рабочие обороты двигателя.

Второе правило также нетрудно обосновать практическими соображениями. Маленький винт даже при большом шаге не может создать достаточную удельную тягу, если обороты невелики. Если рассматривать квадрокоптер как единую массо-энергетическую систему, то чем крупнее квадрокоптер, тем выше КПД системы в целом. В маленьких "наладонниках" очень велика доля веса немасштабируемых или плохо масштабируемых элементов конструкции (микросхемы, провода, батарейка и т. д.) относительно развиваемой тяги. Кроме того, КПД малогабаритных винтов тоже невелик, т. к. плотность воздуха есть величина постоянная и при масштабировании винта не меняется. В силу этих причин наладонные нанокоптеры, как правило, могут нести в воздухе лишь самих себя, и то недолго. В то же время крупные коптеры могут летать существенно дольше и нести большую нагрузку.

Одной из основных характеристик бесколлекторного двигателя является количество оборотов на один вольт питающего напряжения (kV). Для квадрокоптеров с диагональю 450–600 мм, как правило, оптимальными являются двигатели с kV 800–1200 и винты размера 8–11" с шагом около 4,7". В каждом конкретном случае потребуется произвести экспериментальный подбор оптимальных винтов под двигатель и нагрузку, т. к. винты даже одного размера, но от разных производителей, могут существенно различаться по динамическим характеристикам. Кроме того, производители двигателей, особенно недорогих, зачастую грешат недостоверностью характеристик.

Подбор оптимальной винтомоторной пары — это, по сути, параметрическая оптимизация системы, где в качестве параметров участвуют также полетный вес системы в сборе, максимальная токоотдача, вес батареи и т. д. Для удобства оптимизации разработаны специальные программы и онлайн-приложения, о которых мы поговорим позднее.

При подборе винтов следует учитывать не только развиваемую тягу, но и способность лопастей винта эту тягу удерживать не деформируясь. Лопастей дешевых пластиковых винтов выгибаются под нагрузкой, теряя оптимальный профиль и КПД. Поэтому многие моделисты предпочитают использовать более дорогие, но прочные и легкие карбоновые винты. Кроме того, пластиковые винты склонны к *флаттеру* — самовозбуждающимся колебаниям лопастей винта, которые происходят за счет энергии воздушного потока. Внешне флаттер выражается в появлении характерного "грязного" жужжащего звука при вращении винта и визуальном размытии краев плоскости вращения, если смотреть на вращающийся винт сбоку. Однако нужно уметь отличать флаттер от вибрации несбалансированной винтомоторной пары. Методы балансировки мы обсудим в *части II* книги.

Надо особо отметить, что звук работающей винтомоторной пары для моделиста очень важен и информативен. Опытному моделисту он без приборов говорит о многом: обороты, нагрузка на двигатель, качество балансировки, появление флаттера на определенных оборотах, сбой в работе регулятора оборотов. Поэтому многие пилоты, практикующие полеты по видеокамере (FPV), не ограничиваются каналом видео и добавляют канал звука, чтобы слышать двигатели в работе.

Регуляторы оборотов

Как мы уже говорили ранее, регуляторы оборотов бесколлекторного двигателя представляют собой самостоятельное устройство на основе микроконтроллера. Несмотря на внешнюю простоту решаемой задачи — коммутировать ток в обмотках бесколлекторного двигателя — микроконтроллер регулятора работает по весьма сложному алгоритму. Современный регулятор должен:

- автоматически определять величину напряжения силовой батареи;
- иметь защиту от перегрузки по току;
- иметь защиту от запуска при механически заблокированном двигателе;
- автоматически подстраиваться под количество полюсов конкретного двигателя;
- иметь защиту от срыва синхронизации фазы.

Последние два пункта, пожалуй, следует раскрыть подробнее. В зависимости от конструкции, двигатель может содержать различное количество полюсов катушек статора и магнитов ротора. Коммутация тока в обмотках должна происходить синхронно (в фазе) с перемещением магнитов ротора, как бы "подгоняя" их. Если алгоритм коммутации не соответствует числу полюсов или регулятор пытается придать двигателю ускорение, которое двигатель не может развить по причине слабых магнитов или неудачной конструкции, происходит срыв синхронизации, "проскок" фазы коммутации обмоток статора относительно реального положения магнитов ротора. При срыве синхронизации равномерный высокочастотный свист работающего двигателя нарушается щелчками или хрипением, иногда можно визуально наблюдать рывки во вращении пропеллера. Срыв синхронизации может произойти также при просадке силового питающего напряжения в момент пиковой нагрузки.

Кроме вышеупомянутых опций, *регуляторы для квадрокоптеров должны обеспечивать особо острый отклик моторов на изменения управляющих сигналов*, поступающих с контроллера. От этого напрямую зависит стабильность и управляемость мультикоптера. С другой стороны, квадрокоптеру не нужны самолетные режимы плавного разгона и торможения пропеллера. Напротив, такие режимы вредны. Поэтому для использования на квадрокоптерах разработаны специальные регуляторы. Точнее, разработаны специальные прошивки для микроконтроллера в регуляторе. Из открытых проектов прошивок наиболее популярны **SimonK** и **BLHeli**. При желании и наличии опыта можно самостоятельно прошить подходящие регуляторы, однако в настоящее время можно без труда приобрести готовые, прошитые нужной прошивкой контроллеры (рис. 2.21). Это существенно сэкономит ваше время, а в случае неудачной прошивки и деньги.

Регуляторы обычно крепят снаружи на лучи рамы, обеспечивая им хороший обдув.

Отдельно следует упомянуть специальные комбо-регуляторы для квадрокоптеров, когда четыре регулятора и источник питания бортовой электроники смонтированы в одном корпусе (рис. 2.22). По сути, это четыре одинаковых независимых регулятора, которые объединены лишь общей печатной платой. Достоинствами такой конструкции являются отсутствие разветвителя силового питания и короткие сило-

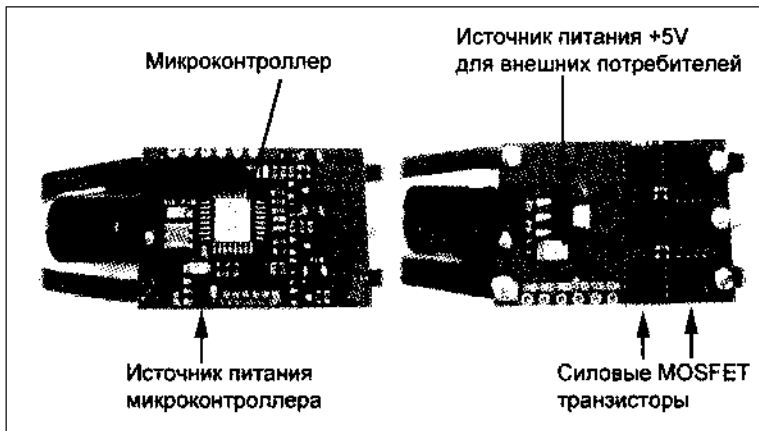


Рис. 2.21. Регулятор оборотов бесколлекторного двигателя

вые провода, что уменьшает магнитные наводки на компас, а также простота и эстетичность монтажа. Но есть и очень серьезный недостаток, перечеркивающий достоинства: невозможность замены сгоревшего регулятора. При аварии с замыканием проводки в цепи мотора регулятор зачастую перегорает, и для быстрого ремонта достаточно иметь запасной регулятор, а перегоревший впоследствии можно не спеша наладить или приобрести еще один. В случае комбо-регулятора придется либо ремонтировать неисправный канал, что далеко не всегда осуществимо, либо покупать новый комбо-регулятор целиком.

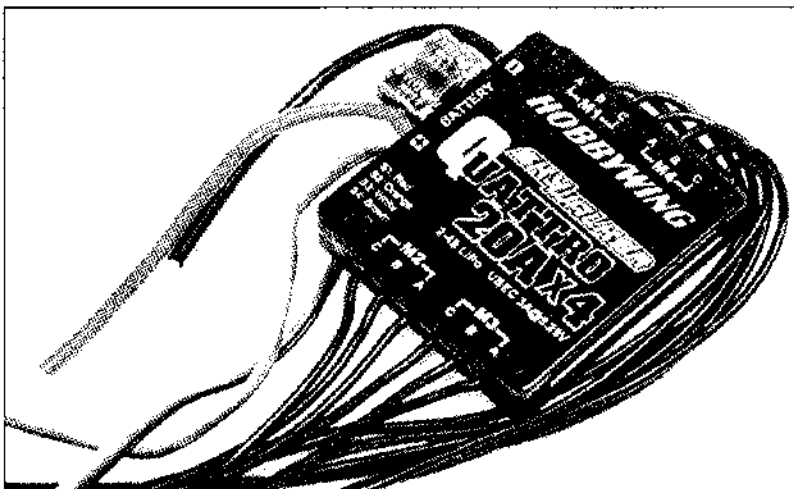


Рис. 2.22. Комбинированный четырехканальный регулятор

Батарея и зарядное устройство

Суммарный *пиковый* ток, потребляемый моторами даже среднего мультикоптера, может достигать 70 А. Но при этом батарея должна быть как можно легче и иметь емкость, достаточную для полета как минимум 10 минут. Этим противоречивым требованиям лучше всего соответствуют литиевые аккумуляторы.

Существуют две основные модификации литиевых аккумуляторов: литий-ионные (Li-Ion) и литий-полимерные (LiPo, Li-Pol), отличающиеся типом электролита. В литий-ионном аккумуляторе используется гелевый электролит, а в литий-полимерном — специальный полимер, насыщенный литийсодержащим раствором. В моделизме используются именно литий-полимерные батареи, т. к. они способны отдавать большой рабочий ток, что в нашем случае критически важно. Другим весомым преимуществом литий-полимерных батарей является отсутствие жидкого электролита и возможность изготавливать более прочные плоские аккумуляторы произвольного размера. В мобильных телефонах, планшетах, фотоаппаратах и прочей бытовой электронике также используются литий-полимерные батареи, но они не рассчитаны на большой рабочий ток, поэтому от идеи использовать их в моделизме следует сразу отказаться. В остальном принципы работы, свойства и правила эксплуатации различных версий литиевых аккумуляторов не различаются.

Литий-полимерные батареи собирают из отдельных аккумуляторных ячеек, которые в обиходе традиционно называют "банками" (рис. 2.23). Ячейка представляет собой герметичный плоский пакет из очень прочного металлизированного пластика, внутрь которого помещена слоеная структура из электродов, и сепараторов, пропитанных гелевым полимерным электролитом. Благодаря такой конструкции утечка электролита исключена, а сама батарея может иметь произвольную форму.

Рабочее напряжение одной ячейки — 3,7 В. В зависимости от уровня заряда батареи напряжение может быть немного меньше или больше. Миниатюрные модели

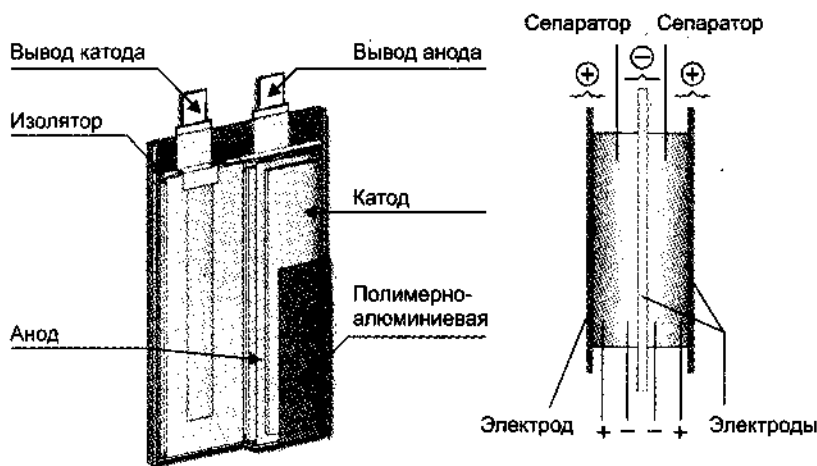


Рис. 2.23. Устройство литий-полимерной батареи

могут питаться от одной ячейки, наиболее распространенные батареи состоят из двух или трех последовательно соединенных ячеек. В особых случаях используют до восьми последовательных ячеек. Ячейки могут также соединяться параллельно для увеличения отдаваемого тока.

Обозначения параметров силовой литиевой батареи

- **Емкость батареи** (Capacity) выражается в миллиампер-часах (mAh) либо в ампер-часах (Ah), например "3300" или "3.3", и сокращенно обозначается буквой C.
- **Предельный разрядный ток** в амперах принято обозначать величиной, кратной емкости C. Например, маркировка 20C при емкости 3300 mAh означает, что разрядный ток не должен превышать $20 \cdot 3,3 = 66$ А. Также иногда применяется маркировка Hi Discharge, обозначающая батарею с повышенным разрядным током. При выборе батареи следует внимательно читать ее спецификацию. Производители и продавцы высокого класса в описании батареи зачастую указывают два параметра: *предельный длительный ток* (continuous discharge), отдаваемый несколько минут подряд, и *предельный пиковый ток* (peak discharge) продолжительностью не более 1–2 с. Значение предельного пикового тока может быть на 15–20% больше, чем непрерывного. Разумеется, предельных пиковых нагрузок надо избегать, но несколько пиковых нагрузок за время эксплуатации не приведут к разрушению батареи или пожару. Однако китайские производители и продавцы иногда слегка лукавят и указывают на этикетке батареи предельный пиковый ток. Поэтому, если вы не уверены, какой параметр указан на батарее и нигде это дополнительно не расшифровано, следует считать, что предельный длительный ток примерно на 20% меньше указанного на упаковке.
- **Предельный зарядный ток** в амперах обычно ограничивается значением 1C. Например, батарею емкостью 3300 mAh можно заряжать током не более 3,3 А. Сейчас появились батареи с ускоренным зарядом (fast charge), которые можно заряжать током до 5C, что существенно сокращает время заряда, однако не следует злоупотреблять этим режимом. При использовании ускоренного заряда рекомендуется особенно внимательно следить за поддержанием баланса напряжения ячеек.
- **Схема соединения ячеек** обозначается буквой S (serial) при последовательном соединении и буквой P (parallel) при параллельном соединении. Например, маркировка 3S обозначает три последовательно соединенные ячейки, что дает рабочее напряжение $3,7 \cdot 3 = 11,1$ В. Маркировка 3S2P означает, что ячейки соединены параллельно по две для увеличения емкости и рабочего тока, затем три таких пары соединены последовательно. С появлением мощных силовых батарей параллельное соединение стало применяться реже.

Литий-полимерные аккумуляторы имеют ограниченный срок службы. Причем даже новый, ни разу не заряжавшийся аккумулятор теряет емкость при хранении. За 2 года хранения нового аккумулятора теряется примерно 20% емкости. После первого цикла заряда-разряда необратимые химические процессы старения резко уско-

ряются, и, как правило, за три календарных года аккумулятор теряет 40–60% емкости, даже если редко эксплуатируется. Силовые батареи с повышенной токоотдачей подвержены старению особенно сильно. Поэтому нет никакого смысла "экономить" литий-полимерную батарею после покупки. Наоборот, надо стараться сполна исчерпать ее возможности, пока она еще новая. Также нежелательно покупать старые батареи. Кроме естественного старения, батарея теряет емкость и токоотдачу с каждым циклом заряда. Стандартный срок службы современного литий-полимерного аккумулятора составляет 600 циклов заряда-разряда. Но, как правило, у силовых батарей существенное снижение емкости и возрастание внутреннего сопротивления происходит значительно раньше, что делает дальнейшую эксплуатацию батареи нецелесообразной.

Визуальным признаком деградации батареи является вздутие ячеек. Попытка выпустить газ через прокол оболочки, с последующей герметизацией липкой лентой, пользу не принесет, поскольку газ — это лишь следствие необратимых процессов химической деградации. Разгерметизация пакета приводит к ускорению окислительных процессов внутри ячейки. Объективными признаками износа батареи являются:

- резкое падение емкости, батарея быстро заряжается и разряжается;
- возрастание внутреннего сопротивления, из-за чего батарея сильнее нагревается и отдает меньший ток в нагрузку.

Характерной особенностью литиевых батарей является разброс характеристик отдельных ячеек, из которых она составлена. Производители качественных батарей осуществляют при сборке стендовый подбор и отбраковку ячеек, тогда как китайские фирмы могут собрать батарею не только из ячеек из разных фабричных партий, но даже с разных фабрик. Часто бывает так, что лишь одна из последовательно включенных ячеек существенно состарилась, тогда как остальные могут послужить еще сезон. Поэтому полезно приобретать как минимум две одинаковые батареи, чтобы впоследствии иметь возможность собрать из двух батарей одну. Иметь запас полезно и на случай аварии, когда одна из ячеек может быть пробита. Чтобы выявить потенциально дефектную ячейку, достаточно регулярно измерять напряжение каждой ячейки на балансирном разъеме после полетов. Сниженное относительно других ячеек напряжение укажет на "слабое звено".

Зарядка литиевых батарей

У литиевых батарей отсутствует так называемый "эффект памяти", поэтому их можно подзаряжать после частичной разрядки, и сколь угодно часто. Для них это будет даже полезно, тогда как хранение в разряженном состоянии, напротив, вредно для батареи. Однако *категорически запрещено повторно ставить на зарядку уже заряженную батарею!* Это может привести к избыточному заряду с быстрым выходом батареи из строя или даже к пожару.

Литий-полимерные батареи можно заряжать только при помощи специального зарядного устройства. Такое устройство может быть как специализированным, например, в комплекте с покупной моделью, так и универсальным, способным ра-

ботать с разными типами батарей. Наиболее простую конструкцию имеет зарядное устройство для миниатюрных батареек, состоящих из одной ячейки. Такие батарейки используются в микрокоптерах наладонного размера и могут заряжаться от разъема USB. Универсальные зарядные устройства построены на основе микроконтроллера (рис. 2.24 и 2.25) и позволяют настроить параметры заряда (напряжение и максимальный зарядный ток) под конкретную батарею, а также видеть на дисплее зарядного устройства количество энергии, "закачанной" в батарею, и продолжительность заряда. Более продвинутые устройства также позволяют использовать термосенсор для контроля температуры (батарей). Зарядные устройства, управляемые микроконтроллером, иногда называют интеллектуальными (Intelligent Charger).

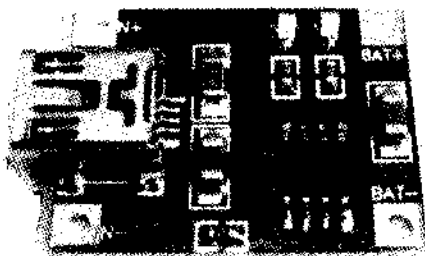


Рис. 2.24. Зарядное устройство для миниатюрных аккумуляторов на основе интегрального контроллера заряда

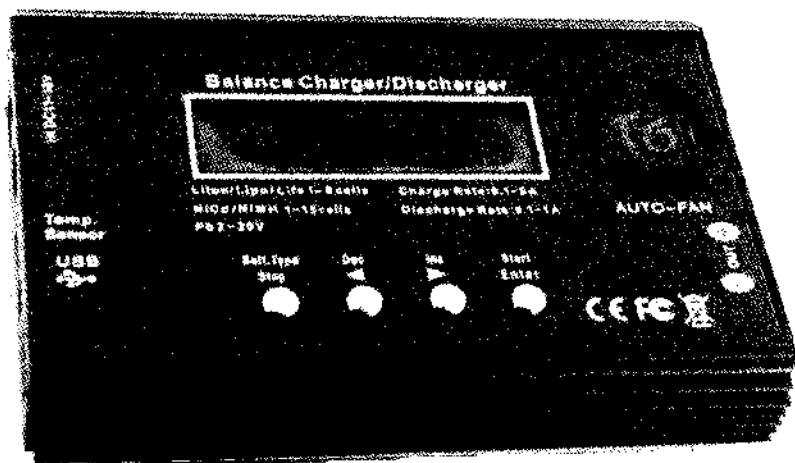


Рис. 2.25. Универсальное зарядное устройство на основе микроконтроллера

Как мы уже говорили, ячейкам, из которых состоит батарея, присущ разброс параметров. Обычно после разрядки напряжение на ячейках слегка различается. Но в процессе зарядки напряжение на ячейках необходимо уравнивать с точностью не менее 0,01 В. Если при каждом цикле заряда просто подавать зарядное напряжение на батарею, она, конечно же, зарядится до нужного напряжения, но при этом какие-то

ячейки останутся слегка недозаряженными, а какие-то будут регулярно испытывать перезаряд — возникнет так называемая разбалансировка батареи, приводящая к ускоренному выходу некоторых ячеек из строя. Для выравнивания напряжения на ячейках батареи оснащают отдельным балансирующим разъемом, на который выведены провода от контактов всех ячеек. Этот разъем подключают к специальному электронному устройству — балансиру (рис. 2.26), который в процессе заряда перераспределяет зарядный ток между ячейками, выравнивая их заряд. Большинство современных зарядных устройств оснащено встроенным балансиром.

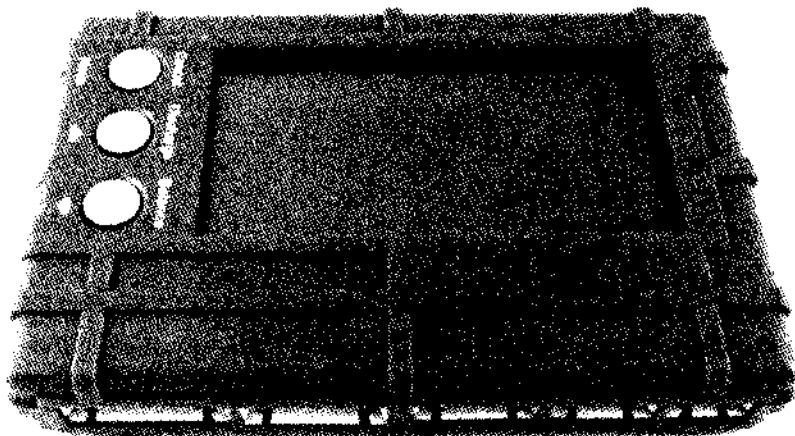


Рис. 2.26. Специальный балансирующее/разрядное/тестовое устройство для литиевых батарей

Нет острой нужды использовать балансирующее устройство при каждой зарядке, особенно если батарея качественная. Но контроль напряжения ячеек необходимо вести постоянно. *Категорически запрещается ставить на зарядку батарею, у которой напряжение между ячейками различается более, чем на 20%! Это чревато перезарядом тех ячеек, у которых напряжение выше, перегревом с разгерметизацией и пожаром.* Если вы хотите попытаться реанимировать батарею с большим разбросом напряжений на ячейках, необходимо сначала через балансирующее устройство отдельно подзарядить самую разряженную ячейку (ячейки).

Зарядка силовых литий-полимерных батарей производится фиксированным напряжением из расчета 4,20 В на ячейку и заданным для данной батареи током. В процессе заряда батареи напряжение на ее клеммах постепенно повышается, а зарядное устройство не позволяет зарядному току превысить заданное значение. Этот режим называется режимом стабилизации тока. Через некоторое время напряжение на батарее достигает значения 4,20 В на ячейку и далее не нарастает. Этот режим называется режимом стабилизации напряжения. К моменту перехода в режим стабилизации напряжения батарея набирает примерно 70–80% емкости и потребляемый батареей зарядный ток начинает снижаться. При снижении зарядного тока до 0,1–0,2С процесс заряда завершается. *Длительный заряд малыми токами не применяется и, в отличие от никель-кадмиевых аккумуляторов, для литиевых аккумуляторов вреден и грозит избыточным зарядом.*

ПРИМЕЧАНИЕ

При отрицательных температурах литиевые аккумуляторы вообще не заряжаются, а положительная температура не должна превышать 50 °С.

Особенности эксплуатации и хранения

Литиевые аккумуляторы чрезвычайно капризны и требуют очень аккуратного обращения. Глубокий разряд ячейки до напряжения 2,7–2,9 В приводит к быстрому снижению ресурса. При разряде до 2,5 В или ниже ячейка полностью выходит из строя в течение 20–30 минут. Если испорченная батарея состоит из нескольких ячеек, следует проверить напряжение на каждой ячейке в отдельности. Зачастую выходит из строя только одна ячейка и оставшиеся можно будет использовать в качестве запасных или собрать из них батарею на меньшее напряжение.

ПРИМЕЧАНИЕ

Избыточный заряд до напряжения выше 4,20 В приводит не только к выходу ячейки из строя. Возможно вздутие ячеек, перегрев, разгерметизация и пожар.

При температуре ниже –5 °С батарея стремительно теряет накопленный заряд даже без нагрузки. Как показывает практика, при температуре батареи –5...–10 °С время полета сокращается вдвое. Вспомните, кстати, как быстро разряжаются на морозе смартфоны и прочие гаджеты, питаемые от литий-ионных батареек. Для защиты литиевых батарей от холода применяются специальные подогреваемые чехлы с термостатом (рис. 2.27). Важно сохранить батарею в тепле до начала полета, а под нагрузкой она будет частично подогревать сама себя.

Нагрев до температуры около 60 °С приводит к быстрой деградации батареи. При нагреве до 70 °С вследствие перегрузки или короткого замыкания начинается цеп-

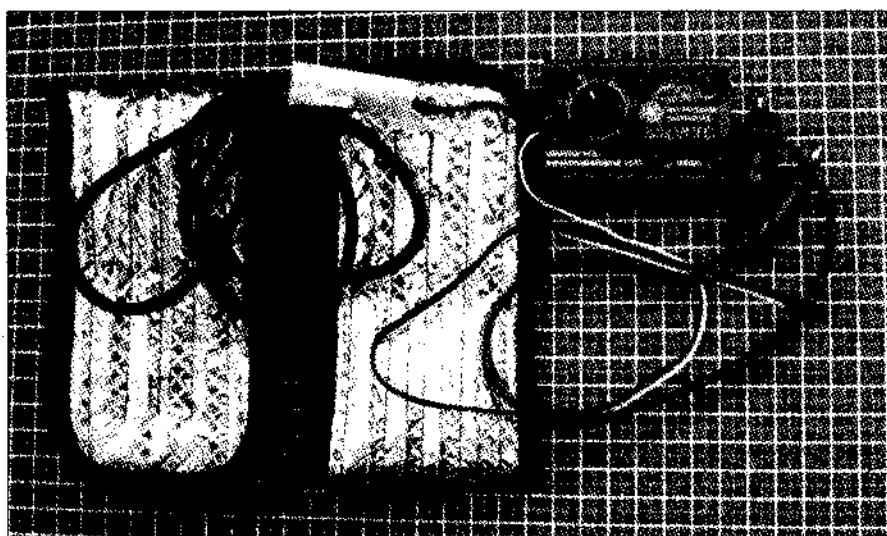


Рис. 2.27. Подогреваемый чехол с термостатом для предполетной транспортировки литиевых батарей

ная реакция саморазогрева за счет накопленной энергии и последующий пожар. Разряженный аккумулятор при замыкании не загорится, а тихо выйдет из строя.

Подготовка батарей к хранению

По поводу хранения данные несколько противоречивы. С одной стороны, в регламенте обслуживания и хранения литиевых аккумуляторов предписано хранение с зарядом 75% от номинала. С другой стороны, экспериментальные данные показывают, что силовые батареи лучше всего сохраняют свои параметры при хранении с зарядом 45–50% от номинального заряда и температуре около +10 °С. Вероятно, истина в том, что с фабрики новые батареи поступают заряженными на 75%, а после начала эксплуатации их лучше хранить при заряде 50%. В любом случае, хранение полностью заряженных аккумуляторов приводит к быстрой потере емкости. Например, по опыту автора, хранение полностью заряженных батарей при комнатной температуре с ноября по март привело к сокращению полетного времени на 35%. При этом емкость батарей, измеряемая зарядным устройством, уменьшилась лишь на 15%. Но резко возросло внутреннее сопротивление батарей, и существенная часть энергии стала расходоваться на их нагрев.

Под длительным хранением мы подразумеваем перерыв в использовании батарей на срок более трех месяцев. Поэтому, если перерыв в полетах составит две-три недели, специально готовить батарею к хранению не надо. Но при подготовке к длительному хранению все же лучше воспользоваться специальным балансиром-разрядником или интеллектуальным зарядным устройством, тщательно отбалансировать ячейки и разрядить батарею приблизительно до 50% емкости.

Если вы используете несколько одинаковых батарей, то рекомендуется наклеить на них липкие этикетки или кусочки малярного скотча и условными значками отмечать каждый цикл "разряд/заряд", а также подозрительные ячейки. Это позволит распределить нагрузку между батареями и более качественно их обслуживать.

Источник бортового питания

От качества источника бортового питания (BEC, Battery Elimination Circuit) напрямую зависит безопасность полетов, поскольку *проблемы с источником могут стать причиной непонятных эпизодических сбоев в работе бортовой электроники, вплоть до внезапной перезагрузки полетного контроллера в воздухе*. Поэтому источники бортового питания заслуживают отдельного развернутого обсуждения.

Некоторые дополнительные электронные модули, такие как видекамера, видеопередатчик или передатчик сигнала телеметрии, могут питаться от напряжения +12 В и допускают прямое подключение к литий-полимерной батарее с напряжением 3S. В большинстве случаев для питания бортового оборудования коптера (полетный контроллер, радиоприемник, навигация и т. д.) требуется напряжение +5 В. Это исторически сложившееся напряжение питания еще с тех времен, когда стандартная цифровая электроника широкого применения была пятивольтовой.

Многие современные интегральные компоненты работают при напряжении питания 3,3 В. В этом случае на плате устройства, как правило, присутствует дополнительная микросхема интегрального стабилизатора, преобразующего 5 В в 3,3 В.

ВНИМАНИЕ!

Надо быть особенно аккуратным и внимательным при использовании в своих разработках миниатюрных модулей GPS, Bluetooth или мини-видеокамер. Зачастую эти модули не содержат встроенный источник 3,3 В и должны быть смонтированы на материнской плате, где такой источник установлен. Подача напряжения 5 В почти наверняка выведет низковольтный модуль из строя. И наоборот, при питании пятивольтового модуля от источника 3,3 В он будет либо работать очень нестабильно, либо не будет работать вовсе. Причем иногда модули выпускаются в двух вариантах питания, а недобросовестные китайские продавцы не обращают на это внимание. Поэтому перед первым подключением питания тщательно убедитесь в том, на какое рабочее напряжение рассчитан модуль. Допускается напрямую питать 3,3-вольтовые устройства от одноячеечной литий-полимерной батареи с рабочим напряжением 3,60–3,72 В.

Источники бортового питания представляют собой стабилизатор напряжения и бывают двух видов: *последовательные линейные* и *импульсные*.

Последовательный линейный стабилизатор

Последовательный линейный стабилизатор включается в разрыв питающей цепи (рис. 2.28). Падение напряжения происходит за счет внутреннего омического сопротивления стабилизатора, поэтому значительная часть драгоценной электрической энергии батареи превращается в тепло и рассеивается в окружающем пространстве. По сути, линейный стабилизатор представляет собой управляемое сопротивление с обратной связью, реагирующее на колебания напряжения на входе и нагрузке. В соответствии с формулой $WR = UI$, чем больше падение напряжения на сопротивлении и ток в цепи нагрузки, тем больше тепла выделяется на сопротивлении. Очевидно, что при питании пятивольтовой нагрузки от батареи напряжением 12 В на регуляторе падает 7 В, т. е. больше половины. Соответственно, больше половины потребляемой энергии будет напрасно рассеиваться на стабилизаторе в виде тепла. В этом и состоит главный недостаток линейных стабилизаторов — низкий КПД.

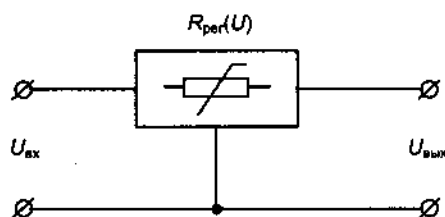


Рис. 2.28. Схема включения линейного стабилизатора

Достоинствами линейного стабилизатора являются простота конструкции (в большинстве случаев это микросхема с тремя выводами), малый вес и габариты, дешевизна, универсальность, отсутствие внешних компонентов схемы. Большинство

современных микросхем стабилизаторов оснащены встроенной защитой от короткого замыкания и перегрева, иногда от переплюсовки. Поэтому линейные интегральные стабилизаторы по-прежнему широко применяются и во многих случаях незаменимы, поскольку для миниатюрных и маломощных устройств использование более сложных стабилизаторов технически и экономически нецелесообразно. Однако с ростом потребляемого тока или разности входного и выходного напряжений эффективность линейных стабилизаторов катастрофически снижается.

Традиционно принято встраивать интегральные линейные стабилизаторы на плату регулятора оборотов бесколлекторного двигателя. Эта традиция пошла от самолетной практики, для упрощения конструкции и экономии места. В большинстве регуляторов оборотов для мультикоптеров их также продолжают встраивать, в результате мы по умолчанию имеем на борту четыре одинаковых источника +5 В, по одному от каждого из регуляторов.

К сожалению, использование этих источников для питания бортовой аппаратуры не всегда приемлемо. Во-первых, регулятор оборотов мотора является источником импульсных помех, проникающих за источник питания. И если для питания полетного контроллера это не критично, то при питании видеокамеры или видеопередатчика эти помехи могут быть заметны на изображении и в канале звука. Во-вторых, регуляторы оборотов и без того нагреваются в полете, иногда довольно сильно. И если нагрузить до предела один из встроенных стабилизаторов, то соответствующий регулятор может перегреться.

Допускается соединять выходы всех встроенных стабилизаторов +5 В параллельно, тем самым равномерно распределяя нагрузку между ними. Это допустимо, если нужно питать только полетный контроллер и приемник. Видеокамеру и аппаратуру видео- и аудиоканала все-таки лучше питать от независимого стабилизатора напряжения, даже если он подключен к той же самой силовой батарее.

ПРИМЕЧАНИЕ

Еще один важный нюанс: некоторые полетные контроллеры требуют повышенного напряжения питания, не ниже 5,25 В (но не выше 5,6 В) из-за того, что напряжение питания падает на последовательно включенных защитных диодах схемы контроллера. Но на выходе ВЕС, встроенных в регуляторы оборотов, под нагрузкой чаще всего получается 4,85–4,90 В. При таком напряжении питания, например, полетные контроллеры MultiWii AIOB v.2 начинают непредсказуемо сбивать и зависать. Некоторые производители специализированных мультикоптерных регуляторов оборотов учли эту проблему и выпускают регуляторы с повышенным выходным напряжением встроенного ВЕС. Если у ваших регуляторов оборотов заниженное напряжение источников +5 В, питайте от них сервомашинки, подсветку и т. д., а для питания контроллера используйте отдельный источник.

Импульсные стабилизаторы-преобразователи

В импульсных стабилизаторах постоянное входное напряжение при помощи встроенного генератора и силового ключа преобразуется в импульсы высокой частоты с регулируемой длительностью при неизменной частоте. Отношение периода по-

вторения электрических импульсов к их длительности называется скважностью S , а обратная величина $1/S$ — коэффициентом заполнения. Чем выше коэффициент заполнения, тем больше количество энергии, передаваемой со входа стабилизатора на выход, и тем выше напряжение на выходном каскаде.

Поскольку напряжение регулируется только за счет длительности активных импульсов, а все остальное время ток через силовой ключ регулятора не протекает, то потери энергии минимальны и КПД импульсного регулятора значительно выше, до 95%.

В отличие от линейного стабилизатора, работающего только с понижением напряжения, импульсные стабилизаторы могут быть как понижающие (Step-Down), так и повышающие (Step-Up), а по типу схемы бестрансформаторные (Switched BEC) и трансформаторные (UBEC). Чаще используются *бестрансформаторные понижающие* преобразователи на ключевом элементе. Структурная схема такого преобразователя показана на рис. 2.29.

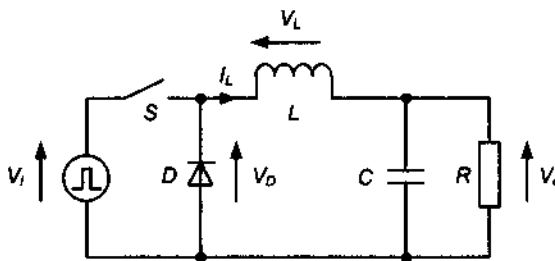


Рис. 2.29. Структурная схема понижающего преобразователя

Управляемый напряжением генератор V_i вырабатывает импульсы переменной скважности, которые управляют ключом S . В качестве ключа обычно используются MOSFET-транзисторы с низким проходным сопротивлением канала, что снижает потери энергии на нагрев. Когда ключ замкнут, ток начинает протекать через накопительную цепь из дросселя L и конденсатора C , заряжая конденсатор. Напряжение на нагрузке R равно разности напряжения источника питания и ЭДС самоиндукции дросселя, ток через дроссель растет, как и напряжение на конденсаторе и нагрузке. При размыкании ключа ток самоиндукции дросселя продолжает протекать через нагрузку в том же направлении через диод D , а также через нагрузку протекает ток разряда конденсатора. Далее цикл повторяется. Чем выше коэффициент заполнения импульсов, тем выше напряжение на конденсаторе и нагрузке. Генераторы импульсных преобразователей работают на высоких частотах, от сотен килогерц до единиц мегагерц, что позволяет снизить габариты накопительного дросселя и конденсатора.

Встроенная цепь обратной связи генератора отслеживает выходное напряжение и при падении напряжения на нагрузке увеличивает длительность импульсов, и наоборот. Преобразователь может быть как регулируемым, так и настроенным на заданное выходное напряжение.

Достоинства импульсных преобразователей:

- высокий КПД;
- широкий диапазон входных и выходных напряжений;
- возможность плавной регулировки напряжения.

Недостатки импульсных преобразователей надо обязательно иметь в виду.

- При пробое ключа в схеме преобразователя напряжение первичного источника оказывается полностью приложенным к нагрузке и, как правило, выводит ее из строя. Это, пожалуй, самый неприятный и опасный недостаток.
- Импульсные помехи для чувствительного оборудования. Но, как показала практика, рабочие частоты и их гармоники даже у самых дешевых преобразователей не мешают радиоприему и телеметрии на частоте 2,4 ГГц, а также работе GPS/ГЛОНАСС и незаметны на картинке видеокамеры. Низкочастотные каналы связи диапазона 40–70 МГц могут испытывать помехи от преобразователя.
- Более сложная конструкция, больше вес и габариты по сравнению с интегральным линейным стабилизатором.

Индикатор разряда батареи

Вы уже знаете, что регуляторы оборотов имеют функцию плавного отключения при разряде батареи ниже аварийного уровня. Эта функция спасает батарею от глубокого разряда, но способна погубить квадрокоптер, поскольку от начала плавного снижения тяги до полной ее потери проходит не более 40 с. Этого достаточно, чтобы плавно посадить коптер, находящийся рядом, но вернуть его с дистанции в несколько сотен метров вы уже не успеете. *Поэтому наличие индикатора разряда батареи критически важно для безопасных полетов.*

Индикаторы разряда бывают двух видов: телеметричный и звуковой. В варианте с телеметрией напряжение силовой батареи измеряется полетным контроллером или модулем телеметрии, и далее либо передается в общем потоке данных на приемную станцию для отображения на мониторе, либо накладывается на видеоизображение, принимаемое с бортовой камеры. Достоинствами такого метода является точность индикации, обычно до десятых долей вольта, и большая дальность действия, а также возможность приблизительно оценить оставшееся полетное время.

Но телеметрия используется не всегда. При полетах в пределах прямой видимости, когда сохраняется достаточная слышимость, можно (точнее, обязательно нужно!) использовать звуковой индикатор разряда батареи. При достижении порогового значения, но раньше, чем срабатывает отсечка регуляторов, индикатор подает прерывистый звуковой сигнал. Как правило, после этого в распоряжении оператора остается 1–2 минуты полетного времени, чтобы вернуть и посадить коптер.

На индикаторе лучше не экономить и приобрести такой вариант, который подключается к балансирному разъему и контролирует каждую ячейку в отдельности, а также миганием светодиода показывает, какая из ячеек разрядилась раньше

(рис. 2.30). Это поможет избежать ситуации, когда одна из ячеек раньше других разрядилась до критического значения, тогда как напряжение батареи в целом остается в пределах нормы. Индикатор лучше всего монтировать в задней части рамы, излучателем в сторону оператора. Желательно выбирать индикатор со специальным громким излучателем.

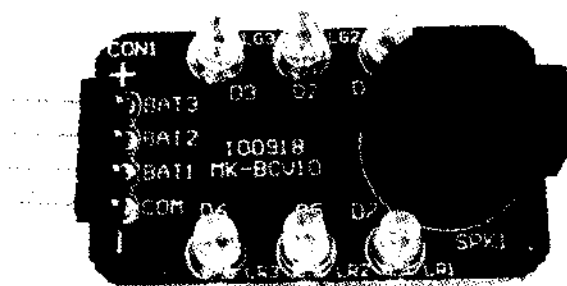


Рис. 2.30. Индикатор разряда батареи с отдельным контролем ячеек



ГЛАВА 3

Дополнительные компоненты квадрокоптера

Оборудование видеоканала FPV

Многие владельцы квадрокоптеров не согласятся с тем, что видеоборудование квадрокоптера отнесено ко вторичным аксессуарам, поскольку приобретают или строят коптеры именно ради полетов по видеокамере и/или высотной фотовидеосъемки. Простые полеты в пределах визуального контроля быстро наскучивают, зато полеты с видом "своими глазами" по FPV (Flight Per Video или First Person View) с высоты птичьего полета дают неповторимые ощущения. Оборудование для таких полетов можно дорабатывать почти бесконечно, что само по себе очень интересно.

Видеоборудование коптера в общем случае состоит из следующих компонентов:

- видеокамеры, курсовая и основная;
- видеоконмутатор;
- стабилизированный подвес камеры;
- модуль наложения информации на изображение (OSD);
- видеопередатчик;
- всенаправленная антенна.
- источник питания видеоборудования.

Наземная часть видеоканала также состоит из нескольких компонентов:

- видеоприемник;
- антенны, всенаправленная и направленная;
- система управления положением антенны (трекер);
- видеоочки и/или монитор;
- видеорекордер;
- источник питания.

Видеокамеры

Для полетов по FPV в сочетании с видовой или репортажной съемкой удобнее использовать две камеры, *курсовую* и *основную*. Курсовая камера легкая, несложная и дает изображение среднего качества. Она монтируется на раме коптера в фиксированном положении, удобном для оператора и направляется слегка под углом к земле. Такая камера имитирует вид из кабины пилота и дает ясное представление о том, куда и под каким углом летит коптер, и есть ли препятствия на пути. На изображение с этой камеры, как правило, накладывается телеметричная информация.

Основная камера имеет высокое разрешение, обычно FullHD, хорошую оптику и слот карты памяти для записи изображения. На крупных мультикоптерах часто устанавливают фотокамеры профессионального уровня — Canon, Kodak, Sony — способные вести качественную видеосъемку. Для таких камер выпускаются специальные переходники, которые подключаются к разъему управления камеры и приемнику, позволяя управлять режимом камеры дистанционно, с пульта.

Основная камера крепится на стабилизированном подвесе, который сохраняет неизменное положение камеры при кренах коптера, а также позволяет вращать камеру по двум осям, обеспечивая почти полусферический обзор.

Удобство использования двух камер объясняется тем, что эффектную видовую съемку часто приходится вести не под тем ракурсом, который соответствует курсовому положению рамы коптера. В этом случае оператор может легко утратить контроль над пространственным положением коптера и столкнуться с препятствием или неверно оценить направление облета. При профессиональной съемке иногда работают два человека, пилот и видеооператор, а коптер оснащают двумя независимыми видеоканалами и двумя каналами радиоуправления, один из которых предназначен только для управления подвесом и режимами главной видеокамеры.

Видеоконмутатор

Если пилот-оператор один и нуждается в том, чтобы поочередно использовать курсовую и обзорную камеры, то для переключения между камерами применяется видеоконмутатор (рис. 3.1). К двум или трем видеовходам конмутатора подключаются различные источники видеосигнала, а вход управления соединяется с одним



Рис. 3.1. Трехканальный видеоконмутатор

из каналов приемника. В зависимости от длительности импульсов радиуправления выбирается соответствующий видеовход, а с выхода сигнал поступает непосредственно на передатчик или модуль OSD.

В простых любительских системах FPV часто используется только одна камера, смонтированная на управляемом по двум осям стабилизированном подвесе.

Стабилизированный подвес

Стабилизированный (динамический) подвес (рис. 3.2) удерживает неизменное угловое положение камеры в пространстве при небольших колебаниях рамы коптера (крены и повороты). Конструктивно подвес камеры представляет собой карданный узел с двумя осями вращения и в простейшем случае может не иметь системы стабилизации, а управляться напрямую с выходов приемника сигналов радиуправления. Но при этом малейший крен или поворот рамы коптера будет приводить к смещению изображения в кадре, что крайне нежелательно при видеосъемке и часто бывает неудобно при обычном пилотировании по FPV.

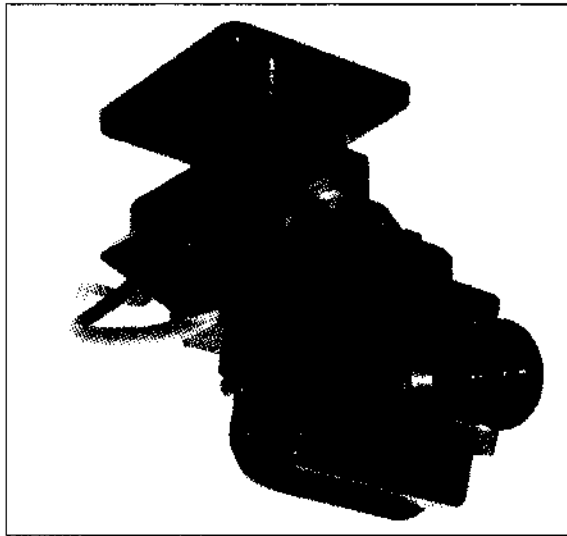


Рис. 3.2. Простой двухосевой подвес на сервомашинках

Для стабилизации подвеса по горизонту обычно применяются не гироскопы, которым свойственно накопление ошибки, а трехосевые акселерометры. Для отслеживания поворота по азимуту приходится использовать либо гироскоп, либо комплексный сигнал гироскопа и компаса, поскольку на поворот по курсу акселерометр не реагирует. В простых системах флуктуации по курсу вообще не компенсируются.

При построении системы стабилизации используют один из двух возможных источников данных о положении в пространстве:

- полетный контроллер отслеживает изменения углового положения коптера и вычисляет компенсирующий сигнал для подвеса таким образом, чтобы угловое

положение камеры относительно горизонта не изменялось при колебаниях рамы;

- подвес оснащен независимым контроллером с акселерометрами и гироскопами, который отслеживает угловое положение камеры и компенсирует малейшие отклонения.

Первый вариант наиболее очевиден и экономичен, поскольку полетный контроллер уже оснащен необходимыми датчиками ускорений. При таком способе стабилизации отсутствует положительная обратная связь, возникающая вследствие избыточного отклика системы (раскачка). Но, с другой стороны, отсутствие обратной связи порождает высокие погрешности, особенно при быстрых и значительных отклонениях рамы. Быстродействие системы также невысоко, потому что полетный контроллер кроме расчета стабилизации решает множество других задач. Этот вариант системы стабилизации по умолчанию заложен в прошивки популярных полетных контроллеров.

Во втором случае контроллер подвеса по сложности и цене сопоставим с полетным контроллером и требует отдельной настройки параметров отклика под конкретную камеру. Но динамическая стабилизация камеры во втором случае заметно выше.

В качестве исполнительного механизма, вращающего привод, в простейшем случае используются сервомашинки, у которых также много недостатков: высокая погрешность, низкое время отклика, низкий крутящий момент, хрупкий редуктор, ограниченный угол поворота. Сервомашинки обычно применяются в первом варианте системы и подключаются непосредственно к выводам полетного контроллера.

В последнее время для вращения подвеса применяют бесколлекторные двигатели специальной конструкции (по сути, шаговые двигатели) — рис. 3.3. Они стоят за-

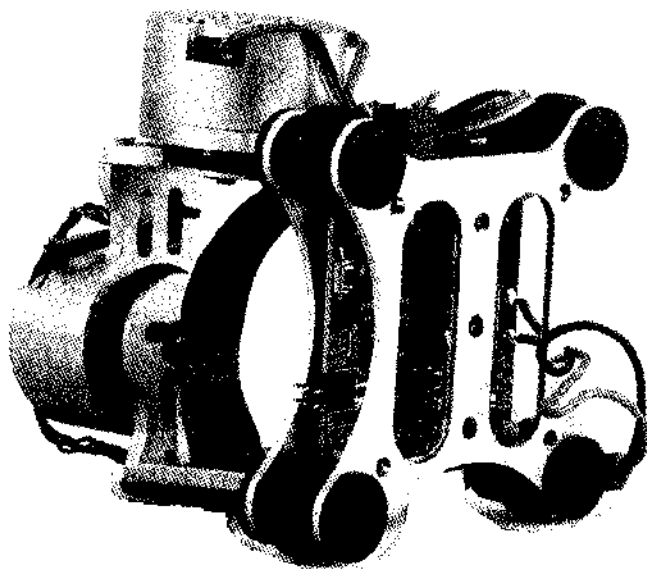


Рис. 3.3. Двухосевой подвес с собственным контроллером и бесколлекторным приводом

метно дороже обычных сервомашинок, хотя по цене совместимы с хорошими сервомашинками с металлическим редуктором. Некоторые владельцы коптеров изготавливают их самостоятельно, переделывая обычные бесколлекторные двигатели. Бесколлекторные приводы нельзя подключать к выходам обычного полетного контроллера. Их используют в комплекте с независимым контроллером стабилизации подвеса или подключают к полетному контроллеру через специальный адаптер на основе микроконтроллера. Дополнительная сложность использования бесколлекторных приводов заключается в необходимости отслеживать действительный угол поворота камеры и иметь защиту от избыточного отклонения.

Видеопередатчик и видеоприемник

Передача видеосигнала в любительской практике обычно происходит в разрешенных диапазонах 2,4 и 5,8 ГГц. В последнее время оборудование видеоканала на 5,8 ГГц получает все большее распространение по причине малых габаритов и веса передающих модулей и антенн, а также снижения стоимости. Но сигнал на этой частоте сильнее подвержен затуханиям и отражениям. Как следствие, дальность надежной работы видеоканала на частоте 5,8 ГГц меньше и применяется он преимущественно на небольших коптерах и ближних дистанциях полетов (рис. 3.4). В более сложных случаях используется оборудование диапазона 2,4 ГГц и даже 900 МГц.

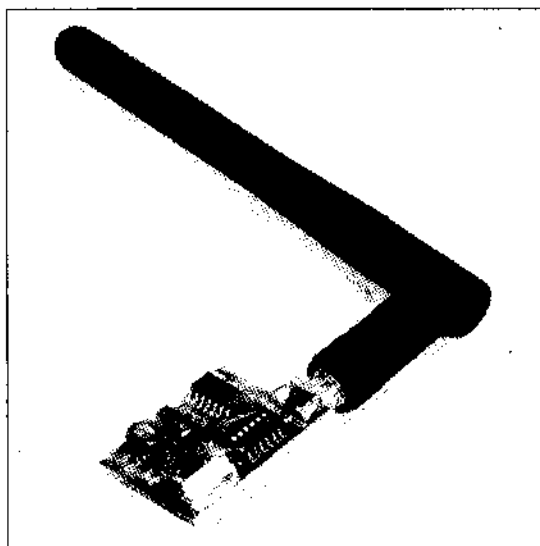


Рис. 3.4. Миниатюрный бортовой передатчик диапазона 5,8 ГГц

Видеопередатчик, как правило, поддерживает лишь несколько каналов (обычно восемь) в одном из частотных поддиапазонов (группе каналов). Рабочий канал устанавливается переключателем или переключателем. Приемник в простейшем случае представляет собой готовый модуль, также работающий на одном из восьми каналов. Но рекомендуется сразу приобрести более сложный приемник, работающий на

всех частотных поддиапазонах. Это обеспечит совместимость с передатчиками различных производителей. Таблица частот каналов приведена в *приложении 2*.

Антенна бортового передатчика всенаправленная, обычно типа "клевер" или штыревая. В миниатюрных коптерах используются четвертьволновые штыревые антенны в виде отрезка провода. Наземный приемник может быть оснащен направленной или диверсифицированной антенной и системой слежения за источником сигнала (см. разд. "Антенны" главы 2).

Если бортовая камера не оснащена функцией видеозаписи, то для записи изображения может использоваться наземный видеорекордер, подключаемый к выходу видеоприемника.

Видеомонитор и видеоочки

К мониторам, используемым для полетов по FPV, предъявляются особые требования. Очевидно, что такой монитор должен быть достаточно ярким, контрастным и с широкими углами обзора, чтобы обеспечить качественное изображение в солнечный день. Но, кроме того, *монитор не должен переключаться в дежурный режим "синий экран" при кратковременной потере сигнала или срыве синхронизации*. Он должен продолжать отображать помехи, полосы, "снег" — но ни в коем случае не отключаться. Дело в том, что видеосигнал подвержен кратковременным пропадающим при воздействии случайной помехи или неудачной взаимной ориентации антенн. Если при этом монитор уходит в режим ожидания, то для обратного включения ему требуется дополнительно 1–3 с, в течение которых оператор не видит изображение. Это очень некомфортно, а в сложной ситуации такая задержка может стать критической. Поэтому монитор для FPV не должен отключаться при пропадании или сильном ухудшении видеосигнала. В описании таких мониторов обычно особо подчеркивается: *"no blue screen"*. Обратите на это внимание при покупке.

Видеоочки при помощи двух маленьких ЖК-дисплеев и оптической системы имитируют просмотр большого монитора с расстояния полутора-двух метров. При этом оператор визуально изолирован от окружающей среды, ему не мешает солнечное освещение и окружающая обстановка, а "эффект полета" наиболее ощутим.

В простых системах используется внешний видеоприемник и недорогие бытовые видеоочки, предназначенные для просмотра фильмов и видеоигр. Этим их функциональность и ограничивается. Специализированные очки для FPV обычно содержат встроенный видеоприемник, батарею питания, антенну, слот для карты памяти и работают автономно. Дорогие модели видеоочков содержат трекер положения головы пилота (head tracking system). Сигнал с трекера подается на пульт радиоуправления, в каналы управления положением камеры. При наклоне или повороте головы соответствующим образом меняется положение камеры.

К встроенному в очки приемнику обычно подключается простая штыревая антенна. Для увеличения дальности приема приходится использовать выносной приемник с более сложной антенной системой и подавать видеосигнал на очки по кабелю.

На сегодняшний день наиболее недорогим решением являются видеоочки Quatum, представляющие собой пенопластовый корпус, в который вмонтирован один жид-

кокристаллический дисплей формата 16:9, а перед ним размещается линза Френеля, позволяющая смотреть на дисплей с расстояния в несколько сантиметров. Перемещая линзу, можно настроить очки под свою остроту зрения. В таких очках используются внешний приемник и батарея питания.

Приемники GPS

Приемник спутниковой навигации в оборудовании квадрокоптера нужен для того, чтобы:

- выполнять автоматический полет по заранее заданному маршруту;
- при полетах по FPV определять текущее расстояние до точки взлета, скорость и высоту полета;
- при потере сигнала управления обеспечить автоматический возврат к точке взлета.

Приемник GPS следует приобрести даже ради одной лишь функции автовозврата, которая спасает коптер при потере сигнала управления.

Аббревиатура GPS (Global Positioning System) стала нарицательной и в быту обозначает как любые пользовательские приемники сигналов, так и американскую навигационную систему, которая официально называется NAVSTAR. Соответственно, российская навигационная система называется ГЛОНАСС (глобальная навигационная спутниковая система), объединенная европейская система — GALILEO, китайская — КОМПАС и т. д. Иными словами, сокращение GPS относится к любой из существующих систем спутниковой навигации, хотя среди специалистов популярна также обобщающая аббревиатура GNSS (Global Navigation Satellite System — глобальная система спутниковой навигации). Поэтому наименование "двухсистемный приемник GPS/ГЛОНАСС", строго говоря, неправильное. На самом деле это "двухсистемный приемник NAVSTAR/ГЛОНАСС". Впрочем, американцы собственную навигационную систему уже давно называют просто GPS, так же, как Библию называют просто "Книга". И всем понятно, о чем речь. Мы далее тоже будем именовать американскую систему просто GPS.

Развертывание американской системы было завершено в 1996 году. Российская система по причине известных внутренних проблем тех лет существенно отстала в развитии, вследствие чего GPS NAVSTAR стала почти монополистом и мировым лидером. Но сейчас развитию российской системы уделяется большое внимание, ее орбитальная группировка и наземная инфраструктура близки к завершению. Поэтому в продаже все чаще появляются двухсистемные приемники. Остальные системы существенно отстают в глобальном охвате и находят применение в отдельных государствах и специфических областях типа судовождения, управления полетами гражданской авиации, геодезии и т. д.

Описанию принципов работы GPS посвящено большое количество подробных и познавательных статей и книг, поэтому мы рассмотрим лишь общие понятия, а также базовые различия между GPS и ГЛОНАСС. Система спутниковой навигации

состоит из орбитальной группировки (спутники), наземного (центры управления и слежения) и абонентского (приемники потребителей) сегментов.

Изначально планировалось, что спутниковая группировка GPS будет состоять из 24 спутников, распределенных по 4 на шести орбитах. Однако этого оказалось недостаточно для надежного покрытия критически важных регионов Земли. Кроме того, надо иметь спутники в резерве. Поэтому общее количество спутников увеличено до 32, и на некоторых орбитах вращается до 6 спутников. Спутники движутся на высоте около 20 000 км со скоростью 3000 м/с и совершают два оборота вокруг Земли за сутки.

Спутники ГЛОНАСС располагаются на трех орбитальных плоскостях, по 8 спутников в каждой, и теоретически орбитальная структура ГЛОНАСС обеспечивает более полное и надежное покрытие. К сожалению, на момент написания книги формирование орбитальной группировки ГЛОНАСС не было завершено и на орбите находилось 25 спутников, не все из которых введены в эксплуатацию. К тому же, четыре новых спутника были утрачены при неудачном запуске ракеты-носителя. Но работы по завершению группировки ведутся очень интенсивно, и есть надежда, что в ближайшие два-три года система будет полностью развернута.

GPS NAVSTAR использует кодовое разделение каналов с вещанием кодированных сигналов на нескольких частотах, а ГЛОНАСС — частотное. Но суммарная ширина спектра сигналов ГЛОНАСС даже меньше, чем у GPS, поэтому один и тот же радиочастотный тракт приемника может принимать сигналы обеих систем. Дальнейшее разделение сигналов спутников и выделение полезной информации производится методами цифровой обработки сигнала внутри абонентского приемника. Использование мультисистемных приемников существенно повышает качество навигации, особенно в сложной обстановке (городская застройка, лес, горы).

Принцип определения координат

Определение координат объекта производится путем измерения дальностей до спутников. Рассмотрим пример с тремя навигационными передатчиками A , B и C на плоскости (рис. 3.5). Измерение расстояний RA и RB до передатчиков A и B дает нам две *окружности положения* с соответствующими радиусами. Объект может находиться как в точке O , так и в точке O' . Добавление третьего передатчика ликвидирует эту неоднозначность на плоскости.

Аналогично происходит определение местоположения в трехмерном пространстве, только вместо окружностей мы имеем пересекающиеся сферы местоположения, которые сложно изобразить на книжной иллюстрации. Постарайтесь представить картину мысленно. Пересечением двух сфер является окружность, на любой точке которой может находиться наш объект. Пересечение трех сфер дает нам *пересечение трех окружностей положения в трехмерном пространстве*, что порождает неоднозначность в виде *двух* точек положения. В ряде случаев одну из точек навигационный приемник может сразу исключить, если воспользоваться дополнительной информацией о положении: привязка к наземной станции навигации или сотовой связи, к точке доступа Wi-Fi, ранее сохраненные данные и т. д. Также очевидно, что объект заведомо не может находиться, например, на глубине 300 м под

землей. Однако это частности, а в общем случае для определения координат объекта в трехмерном пространстве (ширина–долгота–высота) необходимы как минимум четыре спутника.

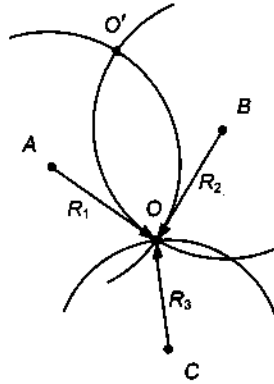


Рис. 3.5. Определение координат на плоскости дальномерным методом

Пространственные координаты спутника известны с большой точностью. Чтобы вы оценили точность позиционирования спутников на орбите, отметим, что учитывается давление солнечного света на оболочку спутника, истечение газов наружу из материала оболочки, влияние гравитационного поля Луны и неоднородность гравитационного поля Земли.

Расстояние от спутника до объекта вычисляется умножением скорости света на время прохождения сигнала от спутника до приемника. Но скорость света в вакууме и атмосфере различается. Кроме того, при прохождении через тропосферу и ионосферу радиосигнал испытывает переменные задержки, величина которых зависит от текущего физического состояния верхних слоев атмосферы. Для компенсации переменных задержек применяется передача копии спутникового сигнала на второй частоте. Зависимость задержки от частоты хорошо изучена и точно известна. Но двухчастотные приемники очень дороги, сигнал на второй частоте зашифрован и доступ к его использованию лицензируется. Поэтому в гражданской практике *двухчастотные* приемники (не путайте с двухсистемными) практически не используются. Кроме атмосферных задержек на определение дальности влияют инструментальные задержки сигнала в цепях передатчика и приемника, ошибки часов спутника и приемника, а также релятивистский эффект, возникающий при движении спутника по орбите. Поэтому фактически приемник работает не с дальностями, а с *псевдодальностями* до спутников.

Для определения времени прохождения сигнала от спутника часы приемника должны быть очень точно синхронизированы с часами спутника, т. к. расхождение порядка $0,3 \cdot 10^{-6}$ с дает погрешность 100 м. В общем случае вычислитель приемника решает систему уравнений, в которой четыре неизвестных: три пространственных координаты X, Y, Z и время t . Как известно, для нахождения однозначного решения системы уравнений, их должно быть на одно больше, чем неизвестных. Поэтому для точной синхронизации шкал времени нужны уже пять спутников, а не

четыре. Разумеется, задача устранения погрешностей, связанных с переменными задержками, может решаться путем накопления измерений и статистической обработки на основе сигнала от четырех спутников. Но такой подход менее точен и требует существенно большего времени для накопления измерений.

Еще одной серьезной проблемой является прием отраженных сигналов в условиях городской застройки или сильно пересеченного рельефа местности. В некоторых случаях приемник может получать только отраженный сигнал. Наличие отражений приводит к ошибочному определению координат. Для выявления и отбраковки отраженных сигналов желательно, чтобы приемник принимал одновременно сигналы от шести спутников.

Итак, современные модули GPS, применяемые в квадрокоптерах, *одновременно* обрабатывают сигналы не более чем от шести спутников. Дальнейшее увеличение числа одновременно обрабатываемых спутников существенно усложняет и удорожает приемник, но не дает заметного увеличения точности. Даже если в зоне видимости находятся десять и более спутников, приемник в определенный момент времени будет работать только с шестью. Но наличие "запасных" спутников позволяет приемнику отвергать сигналы, которые он счел отраженными и недостоверными, а также динамически переключаться на сигнал спутников, имеющих более выгодное для навигации геометрическое расположение на орбите в текущий момент. Следовательно, наличие большого количества видимых спутников может улучшить качество услуги позиционирования, хотя и косвенным образом.

Геометрический фактор

Скорость и точность определения местоположения зависят от расположения спутников в пространстве относительно приемника. Наихудшим вариантом является расположение нескольких видимых спутников приблизительно на одной воображаемой линии с приемником. В этом случае погрешность и время определения возрастают до максимума. Поэтому наличие четырех-шести видимых спутников не всегда означает качественное позиционирование даже на открытой местности. Наилучшим вариантом является равномерное распределение нескольких спутников по полушарию над приемником. Применительно к геометрическому фактору, орбитальная структура ГЛОНАСС является более удачной, чем GPS NAVSTAR.

Альманах и эфемериды

Навигационные сообщения спутников несут два типа данных: альманах и эфемериды. Альманах содержит параметры орбит всех спутников, при помощи которых приемник может предсказать расположение спутников с достаточно большой погрешностью и не тратить время на попытки приема сигнала со спутников, которые заведомо не видны. Данные альманаха, передаваемые спутниками, обновляются каждые 30 суток. При хранении в памяти выключенного приемника они действительны не более 2–3 месяцев, далее погрешность в расчетах орбит становится недопустимой.

Эфемериды содержат корректирующие поправки, которые вычисляются наземными станциями слежения и регулярно загружаются в бортовой вычислитель спутника. В отличие от альманаха, каждый спутник передает только собственные эфемериды, обновляемые каждые 30 минут. При хранении в приемнике срок действия эфемерид не более 4–6 часов.

Информация передается со спутника с низкой скоростью, всего 50 бод. Пакет данных содержит контрольную сумму для проверки правильности приема. Также в пакет данных входит флажок "здоровья" спутника (health status). Если спутник неисправен или находится на обслуживании, он продолжает излучать навигационный сигнал для нужд станций слежения, но его сигнал помечается как недостоверный и отвергается приемником.

Время старта приемника, необходимое для перехода в режим определения позиции (GPS Fix или режим захвата спутников), зависит от имеющейся в памяти приемника информации о спутниках.

"Холодный" старт

При "холодном" старте ожидаемая позиция, время, альманах и эфемериды неизвестны. Приемник сканирует все каналы и весь диапазон возможных значений временных задержек навигационных сигналов. После того, как навигационный сигнал хотя бы от одного спутника получен и разобран, приемник обладает информацией о текущем альманахе всей спутниковой группировки и переходит к "теплому" старту.

Время "холодного" старта на открытой местности для современных модулей составляет порядка 30–35 с. При плохих метеоусловиях или мешающих кронах деревьев продолжительность старта может увеличиться до 60–70 с. Таким образом, при использовании приемных модулей на открытой местности можно обходиться без хранения альманаха в памяти и заново стартовать при каждом включении бортового питания. Но в городских условиях время "холодного" старта существенно возрастает, иногда до 10–15 минут.

"Теплый" старт

При "теплом" старте приемник, включенный после 6 и более часов бездействия, начнет сканировать сигналы спутников, используя данные хранящегося в памяти альманаха и время собственных часов. При этом будет осуществляться поиск только тех спутников, которые теоретически, по данным альманаха, должны находиться в видимом полушарии на момент старта. Это существенно сокращает время старта (порядка 10 с), поскольку приемнику достаточно лишь получить текущие эфемериды от заранее известных спутников.

"Горячий" старт

При "горячем" старте в памяти приемника хранится вся актуальная информация, включая действующие эфемериды, поэтому приемник переходит к определению позиции спустя 1–3 с после включения. Если же к моменту включения приемника

видимыми являются менее трех спутников со "свежими" эфемеридами, то приемнику потребуется дополнительное время, чтобы собрать эфемериды с остальных спутников по алгоритму "теплого" старта.

При перемещении выключенного приемника на расстояние более 300 км хранящийся в его памяти альманах теряет актуальность, поэтому при включении на новом месте будет отработан "холодный" старт.

Технология A-GPS

Для ускорения "холодного" старта применяется загрузка в приемник альманахов, ориентировочных координат и времени, полученных по альтернативным каналам. Эта технология называется A-GPS (Assisted GPS). Обычно сначала по ближайшим сотовым станциям и точкам доступа Wi-Fi определяются приблизительные координаты с точностью 200–500 м, затем из Интернета скачивается актуальный альманах для этой местности и загружается в память приемника. Этот метод требует наличия беспроводного доступа в Интернет и используется в современных телефонах, но малоприменим для оборудования квадрокоптеров.

Переход приемника в режим захвата спутников (GPS Fix) означает лишь, что приемник загрузил альманах и эфемериды и "видит" достаточное для работы созвездие спутников. Для достижения приемлемой точности позиционирования потребуется дополнительное время, пока приемник накапливает данные для снижения погрешностей статистическими методами.

Некоторые модули GPS с устаревшими прошивками при неудачном расположении спутников зависали и вообще не могли стартовать по процедуре "холодного" старта, пока в них с компьютера не выгружали альманах. В современных модулях такая проблема не встречается.

Для хранения информации в модуле приемника GPS используется энергозависимая память с резервным источником питания. Обычно это миниатюрный литиевый аккумулятор или ионистор. Иногда спрашивают, почему в приемниках не используется обычная память EEPROM, которая не теряет информацию при отключении питания? Дело в том, что при работе приемника информация о текущих координатах и эфемеридах непрерывно перезаписывается, а энергонезависимая память имеет довольно ограниченный ресурс циклов перезаписи.

Антенны GPS

Антенны портативных GPS-модулей имеют специфическую конструкцию. Обычно это керамический блок с нанесенными на него электрохимическим методом металлическими элементами (рис. 3.6). После изготовления антенну обычно подстраивают на заводе, подрезая уголки вибратора наждаком или лазером. Иногда применяются активные антенны, когда непосредственно на антенном модуле смонтирован маломощный усилитель. Такие антенны более эффективны в сложных условиях, но на открытом пространстве, когда сигналы от спутников и без того хо-

роши, они не дают заметного выигрыша. Недостатками керамической антенны являются большой вес и хрупкость, из-за чего антенны часто трескаются при аварии. Иногда трещина антенны не видна невооруженным глазом, но существенно снижает чувствительность приемника.

В последнее время, с появлением миниатюрных приемников GPS и массовым распространением смартфонов, получили широкое распространение миниатюрные керамические чип-антенны размером в несколько миллиметров и весом в доли грамма. Такие антенны производятся по технологии, схожей с изготовлением микросхем и подстраиваются лазером в момент изготовления.

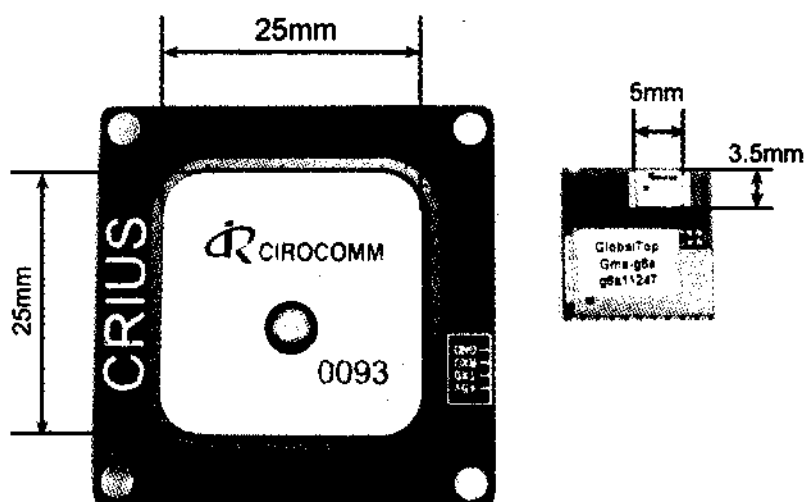


Рис. 3.6. Обычная керамическая антенна GPS и миниатюрная чип-антенна

Несмотря на миниатюрные размеры, чип-антенна в сочетании с современными микросхемами приемника практически не уступает по параметрам обычным антеннам, но стоит несколько дороже и, как правило, применяется в составе готовых миниатюрных модулей GPS.

Поток данных GPS, протокол NMEA

Навигационный модуль передает поток данных в полетный контроллер по последовательному интерфейсу UART (COM) или I²C. В любом случае структура и содержание этих данных соответствуют протоколу NMEA 0183 (National Marine Electronics Association). Это стандарт текстового обмена данными и командами посредством ASCII-символов, созданный для морского навигационного оборудования. В настоящее время внедряется стандарт NMEA 2000.

Модуль GPS передает строковые сообщения, содержащие различный набор данных: широта, долгота, скорость, курс, системное время, количество спутников и т. д. Сообщения делятся на несколько видов, формат которых содержит в своих полях строго определенную информацию.

Владельцу коптера, как правило, не приходится работать с "сырыми" данными GPS, но для общей эрудиции полезно знать их структуру. В общем случае строковое сообщение приемника имеет такой вид:

```
$GPRMC,hhmmss.sss,A,GGMM.MM,P,gggmm.mmm,J,v.v,b.b,ddmmyy,x.x,n,m*hh<CR><LF>
```

\$ — с этого символа начинается каждое сообщение

GPRMC — первые две буквы — это идентификатор системы, остальные три — это идентификатор формата сообщения, от которого зависит содержимое остальной строки. В нашем случае GP — GPS (GL — ГЛОНАСС, GA — GALILEO и т. д.)

RMC — рекомендованный минимум навигационных данных. Содержит данные о широте, долготе, дате, времени и скорости. Эти данные приемный модуль передает по умолчанию после старта. По запросу контроллера также передаются данные типа GGA и GSA об активных и наблюдаемых спутниках, а при движении по заданному маршруту некоторые контроллеры могут запрашивать строки типа GPW, WOD и RMB, содержащие параметры заданных точек и рекомендуемый минимум навигационных данных для достижения заданной точки. Полный список форматов достаточно велик, и с ним можно ознакомиться в спецификации NMEA. Некоторые изготовители добавляют в перечень форматов собственные строки, несущие информацию о состоянии приемника, версии прошивки, напряжении питания и т. д.

Далее следует набор навигационной информации, подробное описание которой также можно прочесть в спецификации.

ВНИМАНИЕ!

Дробные значения широты и долготы в "сыром" потоке данных NMEA представлены *десятичной дробью минут*, а не секундами! Если эти значения ввести в строку поиска Google Maps, то местоположение на карте будет на несколько километров отличаться от истинного. Необходимо поделить дробные части широты и долготы на 60, чтобы получить значения секунд. Программы для работы с GPS не нуждаются в такой подготовке данных и отображают координаты правильно.

Протокол U-BLOX (UBX)

Протокол U-BLOX (binary UBX) — это проприетарный бинарный протокол, разработанный и применяемый швейцарской компанией u-blox AG, известным производителем модулей и программного обеспечения для навигационного и коммуникационного оборудования.

Поскольку навигационные приемники на основе модулей U-BLOX NEO 6 и U-BLOX NEO 7 получили широкое, почти монопольное распространение в авиамоделизме, прошивки полетных контроллеров поддерживают как протокол UBX, так и NMEA.

В целом, спецификация приемников U-BLOX предоставляет разработчику очень широкий диапазон возможностей для обмена данными между приемником и потребителем. Например, реализован протокол DDC (Display Data Channel), совместимый со стандартом I²C. Это позволяет подключать приемник к контроллеру по ши-

не I²C в случае нехватки свободных COM-портов. Также протокол DDC допускает выборочное чтение регистров приемника и запись в них.

Но если говорить о любительском применении в квадрокоптерах, то дополнительные возможности протокола UBX не используются, поскольку полетный контроллер использует лишь минимальный набор стандартных данных GPS. Подключение по шине I²C может создать проблемы даже достаточно опытному пользователю. Поэтому, по мнению автора, в данном случае разнообразие протоколов скорее зло, чем благо. Кроме того, модули U-BLOX даже версии 7 не поддерживают *одновременную* работу с системами GPS и ГЛОНАСС, режимы необходимо переключать программно.

В *части II* книги мы подробно рассмотрим пример настройки и подключения приемника U-BLOX NEO 6.

Адаптер Bluetooth

Адаптер Bluetooth — это простой и недорогой способ подключить к полетному контроллеру смартфон, планшет или нетбук, чтобы воспользоваться утилитами для настройки и телеметрии. Разумеется, ноутбук или обычный компьютер также можно подключать по беспроводному соединению. Этот вариант даже более предпочтителен, чем соединение проводом по USB. Если забыть отключить от контроллера провод после окончания работы, то можно получить вырванный с дорожками платы контроллера разъем mini-USB и серьезные трудности с последующим подключением.

В любительской практике обычно применяются очень дешевые и широко распространенные адаптеры версий HC-05, HC-06 (рис. 3.7), HC-07. Они представляют собой плату, на которой смонтированы одна или две микросхемы и печатная антенна. В свою очередь, эта плата припаяна на плату расширения, содержащую источник 3,3 В, светодиоды и разъем. Иногда в продаже попадаются "голые" платы модулей, но в этом случае вам придется самостоятельно подключать питание, светодиоды и разъем.

К сожалению, обычные адаптеры Bluetooth не поддерживают процесс программирования контроллера, потому что не могут генерировать сигнал сброса контролле-

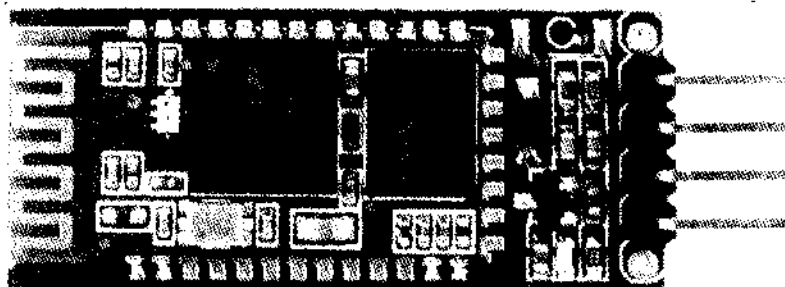


Рис. 3.7. Стандартный адаптер Bluetooth HC-06

ра, необходимый для запуска процесса. В продаже можно встретить специальный вариант адаптера, позволяющий прошивать контроллер через беспроводное соединение, но в несколько раз дороже обычного адаптера. Поэтому для записи прошивки все же лучше использовать проводное подключение USB.

При покупке следует обратить внимание на версию адаптера. Наиболее популярными, проверенными и простыми в эксплуатации являются адаптеры HC-06, но можно приобрести и другую версию. Адаптер должен работать в режиме ведомого (Slave), но иногда встречаются адаптеры, на фабрике жестко прошитые в режим ведущего (Master). Эти адаптеры содержат в названии букву "М", например HC-06M. Вы не сможете использовать такой адаптер без перепрошивки, что достаточно сложно для неподготовленного любителя. Существуют адаптеры, у которых режим Master/Slave можно переключить внешней командой конфигурации. Это, например, адаптеры HC-05.

Телеметрия и OSD

Система телеметрии предназначена для передачи с борта важной технической информации в режиме реального времени, а также, при необходимости, записи этой информации в лог для последующего изучения. Состав этой информации зависит от назначения системы и потребностей оператора. В простейшем случае, когда полет происходит на небольшом удалении и коптер контролируется визуально, достаточно следить только за напряжением силовых батарей. При полете с управлением по видеокамере уже, как правило, необходимо контролировать дальность полета и уровень радиосигнала, чтобы не потерять связь, а также следить за напряжением батареи видеоканала.

На практике набор телеметричной информации намного шире, и в него стараются включить максимум параметров. Разумеется, набор этих параметров определяется оборудованием квадрокоптера:

- напряжение батарей;
- потребляемый ток;
- температура батарей;
- режим работы полетного контроллера;
- время полета;
- высота;
- линейная скорость;
- вертикальное ускорение;
- показания акселерометров (крен);
- показания компаса;
- обороты двигателей;
- текущие координаты GPS;

- количество доступных спутников;
- дальность до "дома" и направление "домой".

Данные имеют разную практическую ценность. Например, обороты двигателей в режиме реального времени нужны только для отладки и настройки. Если один или два мотора работают с большей нагрузкой в тот момент, когда коптер висит горизонтально и неподвижно, это может означать дисбаланс коптера — смещение его физического центра масс в сторону.

Формировать поток данных для телеметрии может не только полетный контроллер. Большинство современных телеметрических систем способно автономно обрабатывать показания датчиков тока, напряжения и температуры, и даже поток данных GPS. Нет принципиальной разницы в том, куда подключать датчики, но иногда бывает конструктивно удобнее и безопаснее подключить их непосредственно к модулю телеметрии. С другой стороны, нет нужды приобретать очень дорогой модуль логирования и телеметрии, оснащенный собственным барометром, компасом, акселерометрами, поскольку эти датчики все равно есть на плате полетного контроллера.

В общем виде система телеметрии коптера состоит из следующих компонентов: набор датчиков и прочих источников информации; бортовой модуль телеметрии, который обрабатывает исходные данные и "упаковывает" их в непрерывный поток данных; радиоканал для передачи данных на землю; устройство для приема и отображения данных; устройство записи данных в лог.

В практической реализации телеметрии возможны различные варианты. В классической и самой простой схеме сбор и обработку данных осуществляет полетный контроллер. Далее, через последовательный порт он передает поток данных на специальный модуль OSD (On-Screen Data — будет рассмотрен далее), который накладывает цифробуквенные и графические элементы на изображение бортовой видеокамеры, которое на земле отображается в видеочках оператора или на дисплее. Иногда датчики тока и напряжения и приемник GPS подключают непосредственно к модулю OSD.

Запись лога данных может вестись во встроенную память полетного контроллера, в память модуля телеметрии, в специальный логгер, в наземный компьютер либо путем записи полетного видео. Лог бывает полезен при анализе максимального потребляемого тока, поиске просадок питающего напряжения, выявлении сбоев канала управления и т. д.

Телеметрическая информация может передаваться непосредственно с полетного контроллера при помощи специального радиомодема — оборудования, обеспечивающего двустороннюю связь по протоколу UART через радиоканал.

И, наконец, телеметрия может передаваться на землю при помощи аппаратуры радиуправления двустороннего действия, с отображением данных на дисплее пульта управления. Это вариант удобный, но не самый дешевый, особенно если учесть, что для полетов по видеокамере все равно понадобится еще и телеметрия на экране. Окончательный выбор варианта и практическая реализация зависят только от по-

требностей и возможностей владельца коптера, поэтому нельзя однозначно сказать, что лучше.

Теперь разберемся подробнее, что является источником данных для телеметрии.

Датчик напряжения представляет собой простейший делитель напряжения из двух постоянных резисторов. Напряжение с выхода делителя поступает на аналоговый вход микроконтроллера, который при помощи встроенного АЦП измеряет напряжение. *Делитель необходим, т. к. на вход микроконтроллера категорически нельзя подавать напряжение батареи напрямую. Это приведет к выходу микроконтроллера из строя. Как минимум, будет испорчен этот аналоговый вход.*

Датчик тока устроен несколько сложнее. Это либо низкоомный шунт — мощный резистор с очень низким сопротивлением, включенный последовательно в разрыв силовой цепи, либо датчик Холла, реагирующий на напряженность магнитного поля, возникающего вокруг силового провода. В том и другом случае требуется дополнительная схема, операционный усилитель, усиливающий слабый сигнал датчика.

Существуют готовые измерительные модули. Пример такого модуля изображен на рис. 3.8. Этот модуль кроме резистивного делителя напряжения и токового шунта содержит импульсный источник с выходным напряжением 5,25 В и током 3 А для питания бортовой электроники.

Датчики тока и напряжения имеют погрешности, вызванные разбросом параметров элементов, поэтому их показания корректируют программно, при помощи калибровочных констант, которые необходимо один раз подобрать при настройке коптера.

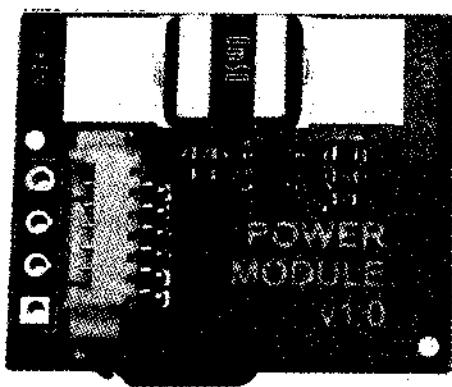


Рис. 3.8. Модуль для измерения напряжения и тока силовой батареи

На основании текущей продолжительности полета, напряжения и тока система телеметрии может рассчитать количество потребленной от батареи энергии в миллиампер-часах. Иногда этот параметр более информативен, чем просто текущее напряжение батареи, потому что позволяет знать, сколько батарея "отдает" на самом деле, в отличие от надписи на этикетке, и приблизительно оценить оставшееся время полета.

Датчик температуры применяется нечасто, в основном в мощных квадрокоптерах с большим энергопотреблением, когда силовая батарея может работать в критических режимах. В качестве датчика может использоваться терморезистор или термодиод, меняющие сопротивление в зависимости от температуры, а также интегральный термометр, подключаемый к модулю телеметрии по шине I²C или 1-Wire.

Барометр, акселерометр и компас, как правило, используются штатные, установленные на плату полетного контроллера. Полетный контроллер транслирует полученные и обработанные данные в модуль телеметрии.

Модуль GPS обычно тоже подключается к полетному контроллеру, который обрабатывает поток протокола NMEA, выделяет из него координаты и на их основании вычисляет количество спутников, линейную скорость и дистанцию до точки взлета для включения в поток данных телеметрии. Современные прошивки позволяют подключить модуль GPS непосредственно к модулю телеметрии, но в случае с квадрокоптером это не имеет практического смысла — данные GPS нужны в первую очередь полетному контроллеру.

Радиоприемник генерирует сигнал RSSI (Received Signal Strength Indication — индикация уровня принимаемого сигнала) для оценки уровня радиосигнала, поступающего на антенный вход приемника. Сигнал RSSI может присутствовать на выходе приемника в виде постоянного напряжения, пропорционального уровню принимаемого сигнала, или передаваться в стандартной форме через один из выходных каналов управления PPM или SBUS. В первом случае модулю телеметрии достаточно измерить напряжение, во втором нужно распознавать сигнал радиуправления, что требует несколько больших ресурсов. К сожалению, дешевые популярные приемники редко оснащены выходом RSSI, хотя их чипсет имеет такую возможность. Некоторые приемники можно прошить альтернативной прошивкой, которая выводит сигнал RSSI в качестве отдельного канала. Также приемник является источником данных о положении рукояток управления, но эти данные обрабатывает и выводит в поток телеметрии полетный контроллер.

Полетный контроллер также является источником собственных данных: режим полета, обороты двигателей, наличие ошибок в шине данных I²C, время полета.

Изображенный на рис. 3.9 вариант реализации телеметрии с использованием OSD наиболее популярен, особенно среди начинающих пилотов. Более того, он просто необходим при полетах по камере, иначе полет с большой вероятностью закончится разряженной батареей или потерей ориентации и утратой коптера. Поэтому мы рассматриваем модуль OSD как часть системы телеметрии.

Внешние данные в модуль OSD (рис. 3.10) могут поступать с полетного контроллера через последовательный интерфейс, непосредственно от внешних датчиков, либо одновременно из разных источников. Собственный микроконтроллер модуля (MCU) обрабатывает данные и загружает их в специальную микросхему — видеомиксер (V-MIX), который накладывает цифробуквенную и графическую информацию на изображение. Существует несколько пользовательских прошивок для модулей OSD, позволяющих подбирать и настраивать отображение данных под свои

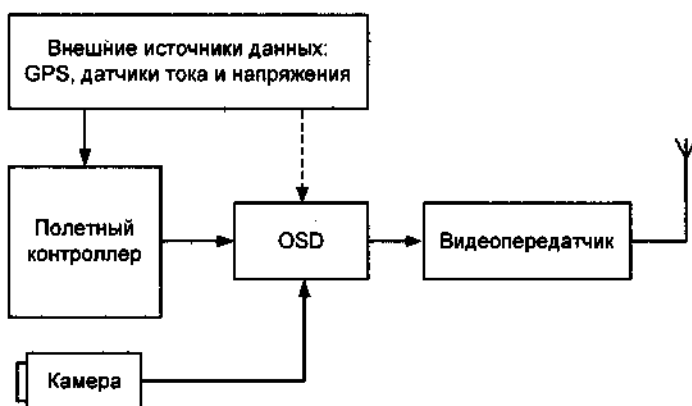


Рис. 3.9. Стандартная система телеметрии с применением OSD

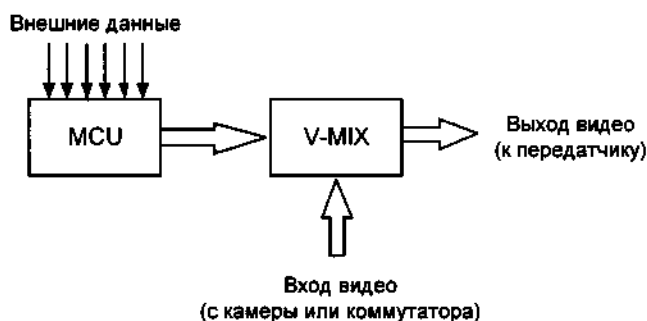


Рис. 3.10. Структурная схема модуля OSD

нужды. Для настройки обычно применяется интерфейсная программа на компьютере с подключением через USB-адаптер последовательного порта.

Достоинством телеметрии с применением OSD является наглядность и удобство отображения информации, а также то, что для телеметрии используется уже имеющийся канал. Однако иногда требуется принимать, отображать и/или записывать в лог более специфическую информацию типа оборотов двигателей, показаний акселерометров и т. д. В этом случае можно приобрести, в зависимости от ситуации и финансовых возможностей, либо комплект сменных модулей приемника/передатчика, типа FrSky, создающих двунаправленный радиоканал для передачи управления на борт и приема телеметрии с борта, либо фирменное оборудование со встроенным каналом телеметрии.

Можно также ничего не менять в имеющейся аппаратуре управления, а приобрести недорогой комплект из двух модулей для передачи потока информации с последовательного порта — так называемый радиомодем. Автор предпочитает именно это недорогое и универсальное решение.

Универсальный радиоканал (радиомодем)

В большинстве случаев полный поток данных телеметрии выводится на один из последовательных портов полетного контроллера. Причем на этот порт выводится не только стандартная телеметрия, но и внутренняя служебная информация контроллера (время исполнения цикла программы, наличие ошибок на шине I²C, положение рукояток пульта и т. д.) Также через этот порт можно "на лету" настраивать контроллер, меняя различные параметры. Более того, у многих полетных контроллеров через этот же порт можно управлять коптером со смартфона или компьютера, минуя аппаратуру радиоуправления.

На земле к последовательному порту контроллера через проводной адаптер USB-COM можно подключить стационарный компьютер или ноутбук, а через адаптер OTG легко подключаются планшет или смартфон с операционной системой Android. Разумеется, стационарный компьютер, ноутбук или смартфон можно подключить через Bluetooth. Но увы, *дальность действия стандартного оборудования Bluetooth не превышает 100 м на открытой местности, а для надежной работы желательно не превышать дистанцию 30 м.*

Для увеличения дальности *беспроводного* соединения через последовательный порт контроллера применяют специальное оборудование — радиомодем. Последовательный порт одного из приемопередатчиков радиомодема соединяется с портом полетного контроллера, а к порту второго приемопередатчика подключается наземное оборудование. Радиоканал абсолютно *прозрачный*, т. е. с точки зрения наземного оборудования это выглядит так, будто оно подключено напрямую к последовательному порту контроллера, хотя на самом деле квадрокоптер может находиться на расстоянии нескольких километров от оператора. Единственное ограничение состоит в снижении максимальной скорости порта, и чем больше предполагаемая дистанция полета, тем меньшая скорость обмена должна быть задана в настройках.

Как показывает опыт, скорости 19 200 бод достаточно для комфортного обмена данными. Даже скорость 9600 бод допустима для приема потока расширенной телеметрии и дистанционного изменения настроек. При этом современные недорогие радиомодемы обеспечивают стандартную скорость 57 600 бод на расстоянии около 1 км. В настоящее время скорость и дальность действия радиомодемов не является проблемой для любительских коптеров.

Типичный современный модуль радиоканала состоит из специализированной микросхемы, оснащенной интерфейсом последовательного порта UART/RS232 и радиочастотным выходом. Модули повышенной мощности имеют также антенный усилитель мощности излучаемого радиосигнала. Существуют модули со встроенным адаптером USB-COM для подключения непосредственно к USB-порту компьютера.

Большинство модулей промышленного класса работает в диапазоне 433 МГц с разделением на несколько фиксированных частотных каналов. Этот диапазон специально предназначен для систем телекоммуникации и беспроводного сбора инфор-

мации. В последнее время появляется все больше модулей, особенно любительского и бытового назначения, работающих в диапазоне 2,4 ГГц. У этих двух частотных вариантов есть свои достоинства и недостатки. Диапазон 433 МГц специально предназначен для систем сигнализации и дистанционного сбора информации. На открытой местности он обеспечивает большую дальность при малой мощности, меньше подвержен интерференции, отражениям и затуханию на складках местности, в листве деревьев и т. д. Однако в этом диапазоне работают радиоканалы большинства автомобильных сигнализаций, что в городских условиях может служить источником сильных помех.

Оборудование на частоте 2,4 ГГц имеет меньшие габариты и массу. Благодаря более высокой несущей частоте теоретический лимит скорости выше. При сопоставимой дальности действия комплект оборудования 2,4 ГГц стоит дороже, но обеспечивает более помехоустойчивый и быстрый канал. С другой стороны, радиоканал на основе недорогого маломощного гигагерцевого оборудования обеспечивает меньшую дальность и более критичен к размещению и конструкции антенны, а также к климатическим условиям (туман, дождь) и рельефу местности. Кроме того, использование еще одного оборудования, работающего на частоте 2,4 ГГц, создает лишний риск взаимной интерференции с сигналами радиоуправления и видеоканала.

Если нет конструктивной возможности или желания соединять наземный модуль с ноутбуком или смартфоном проводом USB, то наземный модуль подключается к обычному адаптеру Bluetooth, а уже с ним соединяется смартфон, планшет или ноутбук. С точки зрения программного обеспечения это равносильно подключению к полетному контроллеру по Bluetooth, но при этом смартфон может находиться в кармане пилота, а коптер на расстоянии в километр от него.

Как и в случае с радиоуправлением, производители предпочитают использовать проприетарные протоколы передачи данных по радиоканалу, а также частотные сетки, несовместимые с модулями других производителей. Более того, даже у одного производителя бывают разные, взаимно не совместимые серии оборудования. Поэтому настоятельно рекомендуется для построения радиоканала телеметрии приобретать модули одного производителя и одной серии.

Бустеры и репитеры

Бустеры и репитеры применяются для увеличения дальности действия и помехоустойчивости каналов радиоуправления и телеметрии на расстояние до десяти километров и более. В основном такая дальность требуется при полетах по видеоканале.

Бустер (booster) — это усилитель мощности радиосигнала. Вход бустера подключается к антенному выходу передатчика, а к выходу бустера подключается антенна. Наиболее популярны бустеры на диапазон 2,4 ГГц с выходной мощностью 1–2 Вт (рис. 3.11), но для сверхдальних полетов иногда применяются бустеры диапазонов 27, 40 или 72 МГц с выходной мощностью более 10 Вт.

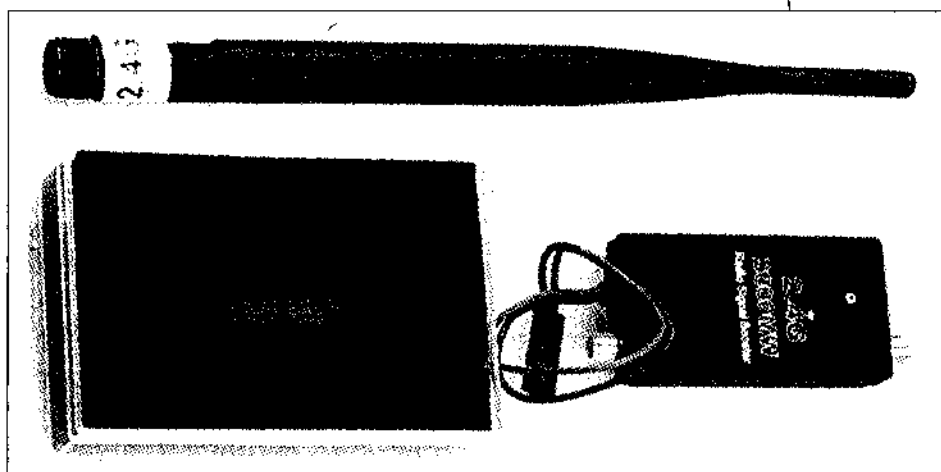


Рис. 3.11. Усилитель радиосигнала на диапазон 2,4 ГГц

Обычный недорогой бустер усиливает сигнал в одном направлении — от устройства к антенне. Это не создает проблем в случае односторонней передачи, например для пульта радиуправления или видеопередатчика. Но в случае двустороннего канала телеметрии бустер блокирует принимаемый сигнал, т. к. прохождение сигнала в обратном направлении, от антенны к устройству, не предусмотрено схемой усилителя. Поэтому с простыми бустерами не работают радиомодемы, а также модули телеметрии типа FrSky для пультов радиуправления.

Существуют более дорогие и сложные двунаправленные бустеры (2-Way Booster). Они содержат автоматически работающий коммутатор сигнала, который при наличии излучения на выходе радиомодема выводит сигнал через усилитель мощности в антенну, а все остальное время в режиме приема направляет принимаемый сигнал с антенны в обход цепей усилителя мощности на антенный вход модема. Обычно входной сигнал также подвергается усилению при помощи малошумящего усилителя, что существенно повышает дальность действия канала. Двунаправленные бустеры на 2,4 ГГц обычно продаются в качестве оборудования Wi-Fi, но подходят и для нужд телеметрии.

Репитер (repeater) — это повторитель сигнала. Он принимает сигнал передатчика и переизлучает его. Излучаемая мощность репитера может не превышать мощность передатчика радиуправления или даже быть меньше, но за счет того, что репитер физически располагается на линии между передатчиком и приемником, дальность действия почти удваивается.

Некоторые бытовые Wi-Fi-роутеры удается заставить работать в качестве репитеров сигнала радиуправления путем перепрошивки.

Иногда для сверхдальних полетов применяют ретрансляторы. Например, ретранслятор может принимать сигнал обычного пульта на частоте 2,4 ГГц, перекодировать его и излучать на частоте 72 МГц с мощностью 15–20 Вт. Такое устройство обычно стараются установить на возвышенности и питают от автомобильного аккумулятора. С точки зрения удобства эксплуатации, для дальних полетов ретранс-

лятор с усилителем мощности более предпочтителен, т. к. его можно установить недалеко от оператора (например, на крыше автомобиля), и действовать он может одинаково для всех направлений полета.

Жидкокристаллические и OLED-дисплеи

Когда есть возможность использовать в качестве дисплея смартфон или планшет с операционной системой Android, подключенные к полетному контроллеру по Bluetooth, наличие дополнительного дисплея в составе конструкции может казаться лишним. Но зачастую использование аппаратного дисплея, смонтированного на коптере, оказывается удобнее и безопаснее. Если нужно быстро проверить количество доступных спутников GPS, напряжение батареи или суммарное время полета, удобнее посмотреть это на бортовом дисплее, а не подключать мобильный гаджет.

Управление отображаемыми данными, переключение режимов полетного контроллера и изменение параметров в ручном режиме производится при помощи перемещения рукояток пульта в определенные крайние положения. В дежурном режиме на дисплее отображаются данные телеметрии (напряжение, ток, обороты двигателей, время работы и т. д.).

В самодельных коптерах применяют один из двух типов дисплеев: жидкокристаллический (LCD, Liquid Crystall Display) или на органических светоэлементах (OLED, Organic Light Emitting Device). Обе разновидности по умолчанию поддерживаются большинством популярных версий прошивок. Для настройки и тестирования предусмотрено использование так называемых виртуальных дисплеев. В этом случае в роли дисплея выступает запущенная на компьютере программа PuTTY, Hercules, Termite или любой другой программный терминал последовательного порта, а выход последовательного порта контроллера подключается к компьютеру через адаптер USB-COM.

Жидкокристаллический дисплей. Обычно это двух- или четырехстрочный дисплей с фиксированными знаками, подключаемый по протоколу I²C или UART (рис. 3.12). Знакогенератор прошит в памяти дисплея, поэтому набор отображаемых символов ограничен стандартным набором ASCII.

OLED-дисплей. Это относительно новое для любительской практики устройство. Дисплей графический, изображение формируется из миниатюрных пикселов-светодиодов, поэтому могут отображаться не только цифробуквенные символы, но и графические изображения. Прошивка MultiWii по умолчанию поддерживает монохромный дисплей CRFUS OLED C-16 с разрешением 128×64 точек, подключаемый по протоколу I²C (рис. 3.13).

Преимущества графического OLED-дисплея:

- небольшие габариты и вес;
- большой объем отображаемой текстовой информации;
- возможность отображать графику.

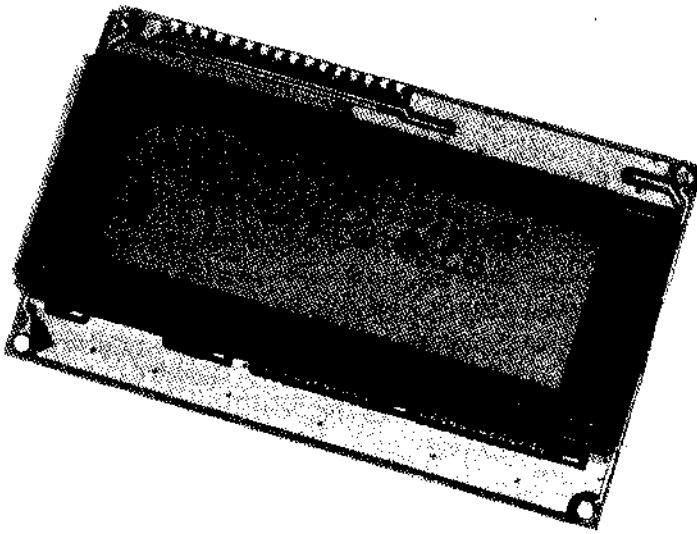


Рис. 3.12. Дисплей 4 строки 16 знакомест LCD03

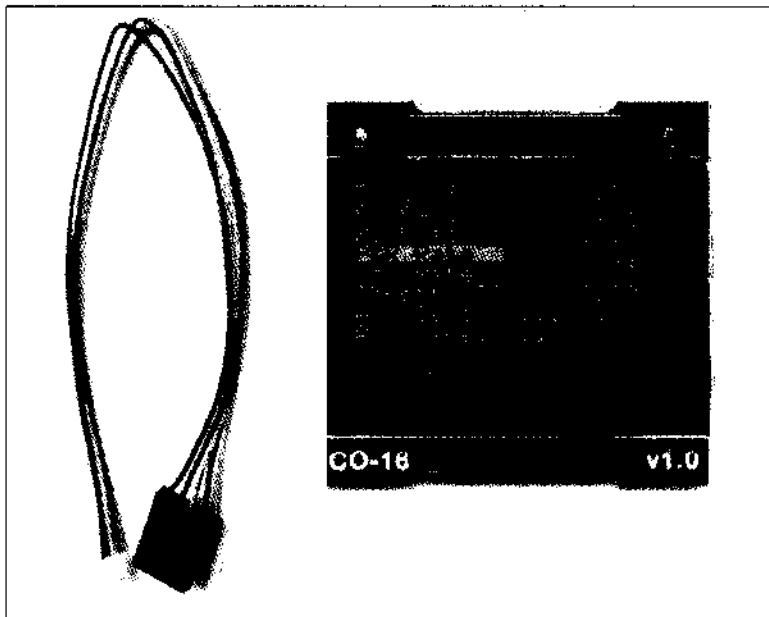


Рис. 3.13. Графический дисплей CRIUS OLED

Недостатки:

- большой объем программного кода в прошивке контроллера для формирования знакогенератора и графических символов;
- более высокая цена;
- на ярком солнце изображение почти не видно;

□ дисплей CRIUS CO-16 "из коробки" работает нестабильно и требует доработки, что, впрочем, не гарантирует безупречную дальнейшую работу.

В свою очередь ЖК-дисплей стоит существенно дешевле, его обслуживание занимает меньший объем памяти, работает без сбоев, изображение лучше видно на ярком солнце. Но при этом он больше весит и отображает небольшой объем информации.

Цветной графический LCD-дисплей (рис. 3.14). Графическая матрица устроена аналогично компьютерному монитору и позволяет отображать минимум 262 000 цветов. Недорогие дисплеи подходящего размера обычно подключаются к источнику данных по протоколу SPI. В прошивке MultiWii не реализована поддержка цветных дисплеев с протоколом SPI, поэтому автором разработана собственная конструкция автономного модуля дисплея на основе микроконтроллера Atmega328.

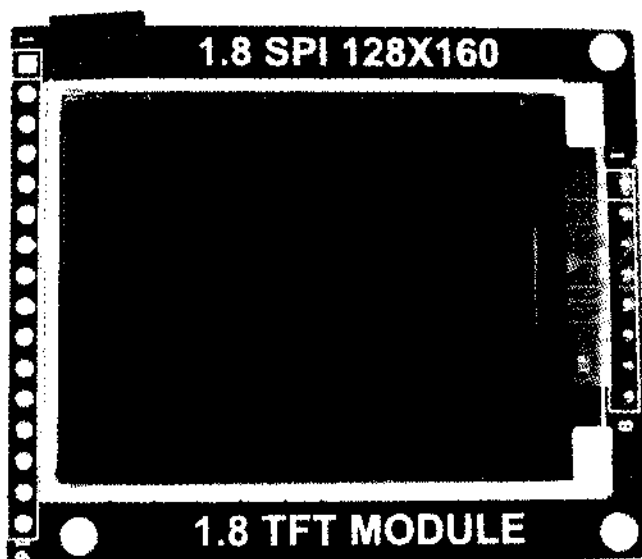


Рис. 3.14. Цветной графический дисплей

Средства поиска: биперы, маячки, GPS-трекеры

Даже если полет происходит в пределах прямой видимости, после аварии поиск коптера в лесу, густом кустарнике или овражистой местности может быть очень затруднителен. Для облегчения поиска применяют специальные технические средства.

Самое простое устройство для поиска — это звуковой сигнализатор (бипер). Обычно в нем используется излучатель, аналогичный индикатору разряда батареи. Излучатель активируется сигналом на одном из выводов полетного контроллера, по команде с пульта. Такому решению присущи очевидные недостатки: для срабаты-

вания бипера необходимо, чтобы питание и электроника коптера остались исправными после краша и продолжали принимать сигналы управления, а это случается далеко не всегда. Слышимость бипера также зависит от того, насколько удачно упал коптер. Можно применить более сложный бипер с автономной батареей питания и датчиком удара, но радиус действия все равно существенно ограничивается слышимостью звукового сигнала на местности.

На рис. 3.15 изображен простейший универсальный бипер, который состоит из транзисторного ключа и активного звукоизлучателя, питается напряжением 5 В и управляется стандартным логическим уровнем с вывода контроллера. В зависимости от настройки прошивки контроллера, бипер может короткими звуковыми сигналами индицировать переключение режимов, а по команде с пульта включаться в постоянном режиме.



Рис. 3.15. Простейший звуковой излучатель

Попытки авиамодельного сообщества использовать для поиска моделей радиомаячки, с последующей пеленгацией их специальным приемником, пока реализуются с переменным успехом. Радиус действия и точность ориентации на источник у радиомаячка заметно выше, но к упомянутой ранее зависимости от исправности бортовой аппаратуры добавляется необходимость использовать пеленгующий приемник с антенной узконаправленного действия. Кроме того, передатчик маячка должен иметь собственную передающую антенну, и эффективность ее работы очень сильно зависит от расположения после падения. Маячки могут иметь автономный источник питания и датчик удара. В качестве приемника обычно используют недорогие китайские портативные радиостанции.

Наиболее сложным, дорогостоящим и эффективным устройством является GPS-трекер. Это устройство состоит из приемника GPS, модуля сотовой связи GSM и автономного источника питания. Во время всего полета приемник GPS непрерывно отслеживает координаты летательного аппарата и с интервалом в несколько секунд передает их при помощи модуля сотовой связи. Координаты могут передаваться как по каналу GPRS на сервер одного из сервисов по отслеживанию объектов, так и в виде обычных SMS на телефон владельца. В первом случае можно воспользоваться одним из бесплатных или условно-бесплатных сервисов, которые не только ведут лог координат, но и накладывают их на карту местности. Во втором случае частота передачи SMS зависит от их стоимости и ограничений сотового оператора.

Поэтому обычно SMS во время полета следуют с интервалом не менее 10 с, а после аварии оператор отправляет SMS с командой на трекер и в ответ получает координаты упавшего коптера с точностью 6–12 м.

В настоящее время широко применяются готовые миниатюрные GPS-трекеры (рис. 316) китайского производства, которые крепятся на ошейники собак, а также трекеры для контроля за перемещением пожилых людей или детей. Все эти трекеры имеют автономную батарею, которой хватает на несколько часов, и неплохо подходят для использования на квадрокоптерах. Трекеры для детей и пожилых людей обычно оснащены тревожной кнопкой и каналом голосовой связи, но для использования в коптерах это излишние опции, к тому же повышающие вес и стоимость.

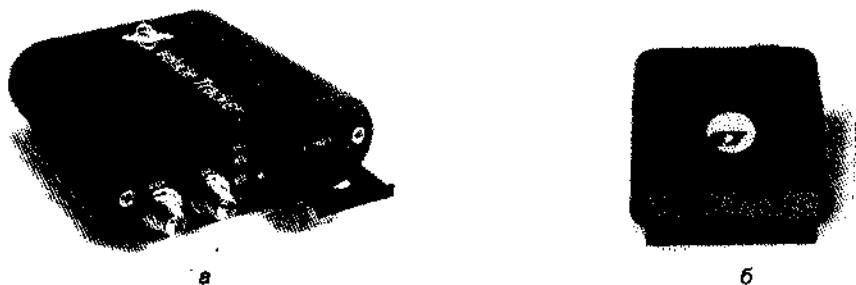


Рис. 3.16. Автомобильный (а) и бытовой (б) GPS-трекеры

Главным недостатком GPS-трекеров является необходимость находиться в зоне действия сотовой связи. Это не слишком критично для европейских стран, но может оказаться проблемой на бескрайних российских просторах. Но даже при наличии сотовой связи она может прерваться после падения коптера в овраг или водоем. То же самое относится и к приему сигнала GPS. Благодаря постоянному слежению за координатами и скоростью полета можно по логам с достаточной точностью предсказать направление полета и точку падения, существенно сузив зону поиска. Для окончательного поиска может оказаться полезен и упомянутый выше бипер.

Сервомашинки

Для квадрокоптера сервомашинки не являются обязательным компонентом. В базовой конструкции они не нужны, и даже в подвесах камеры все чаще используются специальные бесколлекторные двигатели. Но в любом случае устройство сервомашинки полезно знать для общей эрудиции.

Сервомашинка представляет собой классическое электромеханическое устройство с обратной связью (рис. 317). Она состоит из электромотора, редуктора, потенциометра обратной связи и платы управления. Сервомашинки разделяются на аналоговые и цифровые в зависимости от устройства узла управления. В цифровых сервомашинках применяется встроенный микроконтроллер.

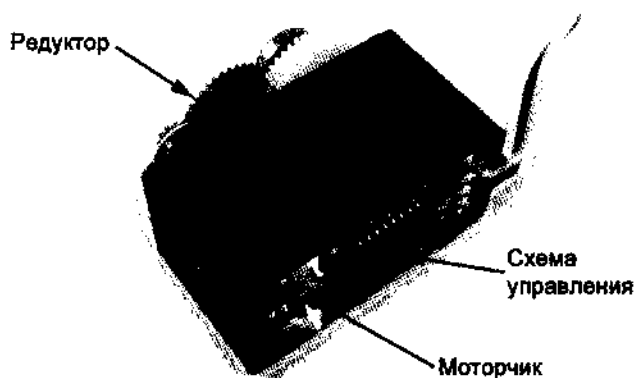


Рис. 3.17. Устройство обычной сервомашинки

Потенциометр обратной связи механически напрямую связан с выходным валом сервомашинки, и положение бегунка потенциометра отражает для схемы управления положение вала. На схему управления сервомашинкой с одного из каналов приемника или с выхода полетного контроллера поступают стандартные импульсы радиоуправления, структуру и параметры которых мы уже рассмотрели ранее. Каждый входящий импульс радиоуправления запускает встроенный генератор однократного опорного импульса внутри сервомашинки. Длительность внутреннего опорного импульса зависит от положения бегунка потенциометра. Электронная схема управления сравнивает длительности входящего и опорного импульсов. Если они совпадают, то ничего не происходит. Если же длительности различаются, то вырабатывается разностный сигнал с положительным или отрицательным знаком. Этот сигнал поступает на схему управления мотором, который начинает вращаться в сторону уменьшения разности импульсов, поворачивая через редуктор выходной вал и движок потенциометра. Как только длительности управляющего и опорного импульсов совпадают, мотор останавливается.

Таким образом, угловое положение вала сервомашинки всегда соответствует положению ручек управления на пульте либо управляющему сигналу полетного контроллера. Если же к валу сервомашинки прикладывается внешнее усилие, то малейшее смещение вала относительно заданного положения приводит к появлению сигнала рассогласования, и сервомашинка возвращает вал в заданное положение.

Но так идеально машинка работает только в теории. На практике механическая часть обладает инерцией, и даже после отключения питания мотора он поворачивается немного больше, чем нужно — вал проскакивает заданное положение. Электроника отработывает возврат, и механика вновь проскакивает немного больше, чем нужно, но уже в обратную сторону, и все повторяется. В итоге возникает циклическое автоколебательное дрожание вала, так называемый джиттер. Чтобы подавить джиттер, вводят так называемую "мертвую зону", внутри которой электроника не обращает внимания на разностный сигнал, полагая, что он равен нулю и вал точно стоит в заданном положении. Но слишком большая "мертвая зона" снижает точность управления. Подавления джиттера при узкой мертвой зоне добиваются, используя прецизионные шестеренки редуктора и высокоточные потенциометры

обратной связи, а также оптимизируя сервомашинки под определенное напряжение питания.

Если на вход сервомашинки приходит сигнал нестандартной длительности, например, в результате воздействия помехи, то вал сервомашинки резко проворачивается в крайнее положение и там упирается в ограничитель. К поломке сервомашинки это не приводит, но резко возрастает ее потребляемый ток, а внезапный уход в крайнее положение может привести к порче внешних механических компонентов модели или к аварии. Этому недостатка лишены цифровые сервомашинки. Микроконтроллер игнорирует заведомо ошибочный входной сигнал, не меняя положение вала.

Кроме того, в цифровых сервомашинках естественным образом реализуется последовательный протокол S.Bus/S.Bus2 или аналогичный. Благодаря этому можно каждой сервомашинке присвоить свой уникальный адрес и соединить их все одной последовательной сигнальной шиной. Также к достоинствам цифровых сервомашинки можно отнести высокое быстродействие и точность, т. к. аналоговая схема считывает положение вала потенциометра и управляет двигателем только по приходу управляющего импульса, а цифровая схема делает это намного чаще. Недостатками цифровых сервомашинки являются более высокая цена и необходимость программировать их при помощи специального программатора.

Важно иметь в виду, что цифровые сервомашинки питаются от более высокого напряжения, чем аналоговые: 6 или 7,4 В вместо 5 В. Попытка включить обычную машинку вместо цифровой приведет к выходу аналоговой машинки из строя.

Потенциометр сервомашинки подвержен механическому износу, истиранию резистивного слоя в районе центрального положения, поэтому по мере эксплуатации возрастает погрешность сервомашинки и джиттер. Но это становится заметно по прошествии минимум десяти часов непрерывной эксплуатации. Как правило, раньше происходит разрушение пластикового редуктора машинки вследствие аварии. Сервомашинки, рассчитанные на повышенные механические нагрузки, делают с металлическими редукторами.



ЧАСТЬ II

ПРАКТИКА

- Глава 4.** Подготовка к изготовлению квадрокоптера
- Глава 5.** Сборка и настройка квадрокоптера
- Глава 6.** Подключение и настройка внешних модулей
- Глава 7.** Обслуживание и ремонт квадрокоптера

ГЛАВА 4



Подготовка к изготовлению квадрокоптера

Прежде всего, необходимо определиться с размером конструкции, который принято выражать в расстоянии между осями моторов по диагонали. При изготовлении самого первого коптера лучше избегать крайних проявлений — наладонных нанокоптеров или конструкций с диагональю более 700 мм и весом более 2 кг. Размер диагонали рамы самых распространенных коптеров для обычного любительского применения лежит в пределах от 250 до 600 мм.

Типоразмер 450 мм оптимален с точки зрения экономичности компонентов и простоты изготовления. В свою очередь, коптеры размером 600 мм более стабильны в полете, способны нести больше полезной нагрузки и дают больше возможностей для развития конструкции в перспективе, ими легче управлять визуально, потому что они крупнее. Рамы размером менее 450 мм нежелательно использовать для обучения пилотированию "с нуля", т. к. неопытному пилоту сложно визуально определить положение небольшого коптера в пространстве.

Важным фактором в подборе компонентов коптера являются финансовые возможности пилота, поэтому дать универсальный рецепт невозможно. Мы будем исходить из скромных возможностей школьника или студента, а читатель может масштабировать меру своих затрат самостоятельно.

ПРИМЕЧАНИЕ

С точки зрения экономии средств и времени обычно выгоднее покупать узлы и компоненты в виде целевых наборов: набор для сборки рамы, набор моторов и регуляторов, набор из передатчика и приемника и т. д. Как правило, наборы стоят на 20–30% дешевле, чем при покупке компонентов по отдельности.

На основе опыта автора и обсуждений на тематических форумах можно предложить следующий экономичный алгоритм построения и развития конструкции в условиях ограниченных средств.

1. Если нет возможности за один сезон закупить полный комплект дополнительного оборудования — видеокамеры, видеоканал, OSD, GPS, то имеет смысл приобрести с прицелом на будущее качественный полетный контроллер, хорошие регуляторы оборотов на рабочий ток не менее 30 А, комплект аппаратуры ра-

диоуправления не менее, чем на 8 каналов (лучше на 12) и построить первую раму размером 450 мм. Оснастить эту раму недорогими двигателями и пропеллерами.

- После успешного обучения, к следующему сезону приобрести более мощные двигатели, пропеллеры и батареи, построить раму размером 600 мм и переставить на нее уже имеющиеся контроллер, регуляторы и приемник радиоуправления. Если будет возможность, то оснастить эту раму приемником GPS и видеоборудованием.

Подбор силовых компонентов

К силовым компонентам конструкции относятся все узлы и детали, непосредственно участвующие в создании тяги, позволяющей коптеру оторваться от земли: двигатели и пропеллеры (винтомоторная группа, ВМГ), регуляторы оборотов, силовая батарея. Они требуют тщательной *взаимной* оптимизации параметров, не допуская при этом выхода за рамки допустимых значений тока и температуры.

ПРИМЕЧАНИЕ

Общепринятым и универсальным критерием оценки качества подбора компонентов является время полета коптера. Если использовать силовые компоненты среднего ценового сегмента, применяемые в большинстве любительских конструкций, то обычное время комбинированного полета — движение + висение — составляет 14–18 минут.

Резкие акробатические эволюции и ускорения сокращают время полета. Также уменьшается время полета в ветреную погоду, когда квадрокоптер вынужден непрерывно компенсировать порывы ветра скачками оборотов двигателей.

Расчеты и оптимизация

Для оптимизации конструкции можно использовать популярный онлайн-сервис www.ecalc.ch, позволяющий производить расчет и оптимизацию параметров самолетов, вертолетов, квадрокоптеров и импеллерных моделей. По отношению к компьютерной оптимизации авиамоделисты делятся на три категории:

- те, кто тщательно обсчитывают всевозможные сочетания параметров и безусловно доверяют результату;
- те, кто не признают компьютерную оптимизацию вообще;
- те, кто используют компьютерные расчеты для оценки и проверки, не выходя ли эксплуатационные параметры за пределы допустимых значений, с последующей проверкой и доводкой в ходе испытаний.

Автор склоняется к третьему варианту.

В качестве примера выполним расчеты для двух реальных наборов компонентов, которые автор успешно использует на своих коптерах несколько лет, и сравним реальные показатели нагрузок и времени полета с расчетными. Без регистрации

сайт предоставляет только демоверсию расчетов со сниженной точностью и ограниченным выбором компонентов, поэтому лучше сразу зарегистрироваться.

Набор 1 — рама 450 мм:

- двигателя Turnigy Aerodrive 2213, 1050kV, 56 г, 16 А пиковый ток;
- батарея Turnigy nano-tech, 2200 mAh, 201 г;
- регулятор четырехканальный Skywalker Quattro, 20 А;
- пропеллеры безымянные 10×4,7 дюйма.

Набор 2 — рама 600 мм:

- двигателя AX-2810Q, 750kV, 70 г, 30 А пиковый ток;
- батарея Turnigy nano-tech, 3300 mAh, 317 г;
- регуляторы Afro, 30 А;
- пропеллеры Gemfan 11×4,7 дюйма.

Введем в форму на сайте данные для первого набора компонентов. Вес модели (включая ВМГ) зададим 950 г, потому что именно столько весит полностью снаряженный коптер автора, включая дополнительное оборудование. Если рамы у вас еще нет и оценить полный вес не получается, то можно оставить вес 850 г, предложенный по умолчанию. Вес снаряженного коптера влияет на расчет потребляемого тока и температуры двигателей.

В списке аккумуляторов выберем наиболее близкий по характеристикам вариант: **LiPo 2100mAh 30/45C**. База данных сайта хранит и отображает вес аккумулятора из расчета на одну банку. Во время расчета этот вес будет автоматически умножен на количество банок.

В списке регуляторов выберем опцию **max 20A**.

Нужный мотор Turnigy найдем в самом конце списка: **2213-20T (1050)**. Его вес на сайте слегка занижен относительно реального.

Нужного нам производителя пропеллеров в списке нет, поэтому можно выбрать один из похожих, APC Electric E или GWS EP размера 10×4,7. Надо особо отметить, что *при одинаковом паспортном размере пропеллера на практике тяга и экономичность ВМГ может различаться на 10–15% в зависимости от производителя и качества пропеллеров и двигателей*. Поэтому вам в любом случае впоследствии придется покупать пропеллеры разных производителей и экспериментировать с ними. Автор провел серию измерений тяги различных недорогих пропеллеров размером от 9×5 до 11×4,7 в сочетании с популярным двигателем из набора 1 и установил, что наиболее эффективными оказались пропеллеры 10×4,7 безымянного производителя, которые продаются практически везде по самой низкой цене. К сожалению, среди этих пропеллеров весьма высок процент брака в виде "бабочки" лопастей, поэтому они требуют тщательной балансировки и даже устранения "бабочки" при помощи фена, но распространенность, чрезвычайно низкая цена и высокая эффективность искупают эти недостатки в коптерах для начинающих.

Ввод данных окончен, нажимаем кнопку **Рассчитать** и проверяем результаты. Сразу можно отметить, что полетное время сильно занижено. В реальности среднее полетное время квадрокоптера #1 при наличии новой полностью заряженной батареи составляет 12–14 минут, при спокойном висении — до 17 минут. Зато прочие параметры, такие как потребляемый ток, температура двигателей и т. д., весьма близки к реальным. Мы видим, что ни один из параметров не выходит за рамки допустимого, а регуляторы можно покупать на ток 15 А.

Теперь рассчитаем второй вариант комплектации. Зададим реальный вес снаряженной рамы 1200 г, включая дополнительное оборудование. Если вы еще не знаете вес готовой рамы, можете для оценочного расчета ограничиться весом 1000 г.

Далее выбираем: батарея LiPo 3300mAh - 35/50С, регулятор **max 30A**, двигатель **AX-2810Q-750**, пропеллеры **APC Electric E 11*4,7**. Запускаем расчет и анализируем результат. Расчетное время полета вновь занижено. В реальности среднее время смешанного полета этого коптера на свежей батарее 3300 mAh составляет 13–15 минут. Но главное, что мы видим — большой, почти двукратный запас по току для регуляторов, моторов и батареи. Расчетные значения тока и температуры весьма точно соответствуют реальным. О недогруженности моторов говорят и графики внизу страницы. В данном случае автор этого и хотел, приобретая компоненты "на вырост", для более крупной рамы и большей полезной нагрузки.

Обратимся к столбцу **Коптер** в результатах расчета. При общем весе ВМГ 788 г расчетная полезная нагрузка составила 955 г, т. е. максимальный расчетный полетный вес, при котором ток и температура не выходят за пределы допустимых, составляет $788 + 955 = 1743$ г. Полетный вес имеющегося коптера 1200 г, значит, мы можем добавить еще 543 г полезной нагрузки. Надо полагать, что если полетный вес коптера будет соответствовать предельному, мы как раз получим расчетное укороченное время полета.

Теперь проведем эксперимент. Увеличим размер пропеллера до 12×4,7. Мы видим, что потребляемый от батареи ток несколько увеличился, но при этом время полета возросло. Это говорит о том, что повысилась эффективность работы ВМГ. И действительно, для двигателя AX-2810Q с $kV = 750$ пропеллер 11×4,7 слишком мал и не позволяет развить оптимальную тягу. Полевые испытания с пропеллерами 12×4,5 полностью подтвердили расчеты. Среднее время смешанного полета увеличилось примерно на 3 минуты.

Дальнейшее увеличение размера пропеллера до 14×4,7 приводит к возрастанию времени висения, но снижает время активного полета. Это связано с большой инерцией вращения винтов. Стабилизация коптера, как вы знаете, происходит за счет быстрого и точного управления оборотами двигателей. С увеличением размера быстро нарастают пиковые токи через двигатели и регуляторы, которые вынуждены резко разгонять и тормозить тяжелые "маховики" пропеллеров. Это увеличивает расход энергии при активном пилотировании. Увеличивается гироскопический эффект пропеллеров. В целом коптер становится более плавным и вялым в управлении. Поэтому пропеллеры большого диаметра применяются в основном для аэровидеосъемки при стабильном и плавном полете.

ПРИМЕЧАНИЕ

Когда работа над книгой подходила к завершению, возобновил свою работу сайт российского калькулятора www.rc-calc.com. Интерфейс этого сайта проще и понятнее для новичков; сайт позволяет авторизоваться через аккаунты в соцсетях или Google, хранить данные своих коптеров и обмениваться ссылками на результаты расчетов. К тому моменту, когда вы будете читать эту книгу, сайт наверняка будет наполнен достаточным количеством исходных данных для расчетов.

Теперь, когда вы поняли основные принципы подбора компонентов, поэкспериментируйте с различными пропеллерами, моторами и батареями. Обратите особое внимание на то, в каких случаях нагрузки выходят за пределы допустимого. Постепенно вы начнете интуитивно чувствовать оптимальное сочетание компонентов и без программы расчета. Простое увеличение емкости батареи не обязательно увеличит время полета, т. к. возрастет вес батареи. Соответственно, для новой батареи может понадобиться изменить ВМГ.

Стойкость конструкции к авариям

Выбор конструкционных материалов во многом зависит от разумно заданной стойкости к авариям. Мы исходим из того, что аварии случаются даже у опытных пилотов, а в период обучения без них не обойтись.

Стойкой к авариям является не та конструкция, которая вообще не ломается при падении — так не бывает, а та, у которой ущерб после падения минимален. Поэтому важной частью стойкой конструкции является наличие разрушаемых элементов. Эти элементы должны иметь минимальную стоимость и сложность изготовления. Разрушаясь, они поглощают энергию деформации и сохраняют в целости дорогие и важные узлы. В ряде случаев используются подпружиненные элементы.

Классическим примером поглощающего узла являются посадочные стойки. Их намеренно делают упругими и прочными ровно настолько, чтобы при сильном ударе о землю они поглотили максимум энергии, но не передали деформацию дальше, а в крайнем случае сломались сами. В общем случае, прочность элементов конструкции должна нарастать от периферии к центру. Сначала должны идти амортизирующие элементы, затем сминаемые и далее несущие и критически важные. Здесь просматривается аналогия с пассивной безопасностью автомобиля, у которого сначала идут амортизирующие бамперы, затем сминаемые зоны моторного отсека и багажника, а потом усиленный стальными трубами салон.

Примером неудачной, с точки зрения стойкости к авариям, конструкции квадрокоптера является сочетание прочных монолитных лучей и прослабленного чрезмерно большими прорезями и отверстиями центра рамы. При ударе лучом о землю вся энергия удара передается на центральную часть, ломая ее на куски. При этом могут пострадать и электронные узлы. После аварии потребуются долгий и сложный ремонт рамы, тогда как сломанный луч можно заменить даже в полевых условиях, а погнутый просто выправить. Ослабление центра рамы относительно лучей не дает заметного выигрыша по весу, но существенно снижает стойкость. Поэтому лучше сделать прочный центр рамы, а лучи облегчить фрезерованием или высвер-

ливанием. Сказанное не относится к рамам, у которых центр и лучи из карбона. Такие рамы почти неразрушаемы, но стоят достаточно дорого.

Еще одним разрушаемым элементом является *нейлоновый крепеж* — винты, гайки, стойки. Их нежелательно применять для крепления лучей и монтажа нагруженных элементов конструкции в тяжелых коптерах, но для крепления электронных узлов, антенн и небольших видеокамер они подходят хорошо. При аварии с деформацией рамы нейлоновые винты легко срезаются или срываются и плата или антенна просто отлетает в сторону, оставаясь целой. В случае использования прочного металлического крепежа можно получить плату полетного контроллера с отломленными углами или даже треснувшую по диагонали. Особенно сложны в диагностике визуально незаметные скрытые трещины платы с разрывом проводников. Применение нейлонового крепежа также дает экономию веса, которая очень важна для небольших коптеров.

Расцепляемые электрические разъемы тоже вносят свой вклад в безопасность. Кроме традиционных для авиамодельного оборудования штыревых рядных разъемов все чаще применяются миниатюрные разъемы типа MOLEX. Оба типа разъемов не разрушаются и не повреждают плату при разъединении рывком во время аварии, но обеспечивают надежный контакт во время эксплуатации. Поэтому *не следует дополнительно фиксировать разъемы в гнезде при помощи термоклея или металлических скобок*. Иначе вероятность после аварии получить вырванные с платы вместе с кусками дорожек гнезда разъемов будет существенно выше, чем вероятность пропадания контакта в полете.

Силовые провода от распределителя питания к регуляторам и от регуляторов к моторам следует соединять только пайкой (рис. 4.1). Несмотря на то, что эти провода следует делать как можно короче, желательно предусмотреть небольшой запас на вытягивание при деформации лучей или отламывании моторамы. Провода, выходящие из двигателя, необходимо прочно закрепить либо каплей эпоксидной смолы в окне двигателя, либо хомутом к мотораме, чтобы избежать отрыва провода от обмотки внутри двигателя при натяжении. На рис. 4.2 обратите внимание на фиксацию выводов двигателя эпоксидной смолой. Внутри луча уложен небольшой запас провода (~2 см) на случай отламывания моторамы.



Рис. 4.1. Пример монтажа двигателя с укладкой провода снаружи луча

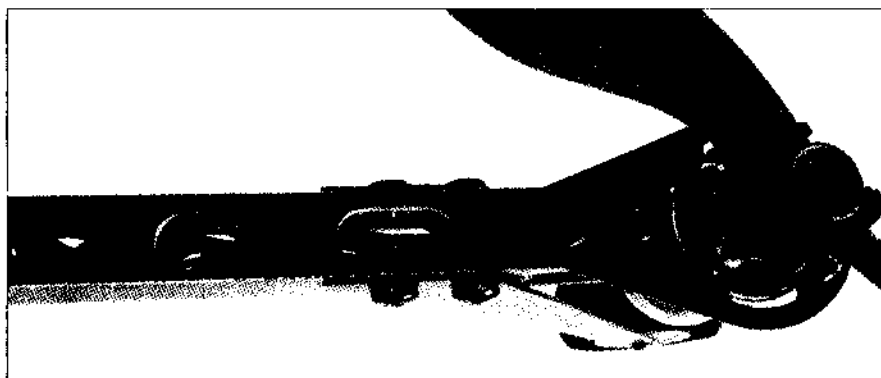


Рис. 4.2. Пример монтажа двигателя с укладкой провода внутри луча

На квадрокоптерах не применяются так называемые пропсейверы — крепление пропеллеров к втулке при помощи резинового кольца, как на легких электрических самолетах. Нагрузки на пропеллер слишком велики, поэтому пропеллеры крепятся жестко, при помощи гайки или нейлоновых стяжек и при аварии обычно ломаются. Защитные кольца вокруг пропеллеров хорошо защищают окружающих от травм, но мало помогают при падении.

ПРИМЕЧАНИЕ

Коптерам присуще захлестывание лопастей, т. е. удар лопастей вращающегося винта о луч даже при не очень сильном ударе о землю. Поэтому нельзя располагать регуляторы или другие компоненты на луче в зоне потенциальной досягаемости удара лопастью.

Для защиты силовых батарей от механических повреждений в продаже появились карбоновые чехлы, но применение чехлов или поролоновых оберток может привести к перегреву батареи, поэтому защиту батарей используйте с осторожностью.

Конструкционные материалы

Как мы уже говорили, в идеале механическая прочность конструкции должна нарастать от периферии к центру. В остальном конструкция коптера, особенно начального уровня, мало критична к конструкционным материалам.

Древесина, как ни странно, является одним из лучших материалов для изготовления рамы первого коптера размером до 450 мм, особенно его лучей. Дело в том, что лучи из древесных брусков плохо проводят вибрацию от моторов и не имеют выраженных собственных резонансов. Это очень благотворно влияет на стабильность работы акселерометров. Лучи из древесины мало весят и стоят недорого. Центральную часть рамы можно изготовить из качественной фанеры толщиной 3–4 мм. Иногда можно встретить объемные конструкции из фанеры, изготовленные лазерной резкой и собранные по принципу 3D-пазлов.

Но деталям из древесины присущи и недостатки. Это низкая механическая прочность и склонность к раскалыванию, что порождает проблемы при креплении мо-

торамы к лучам и самих лучей к центру рамы. Необходимо иметь определенный опыт работы с древесиной. Если вы обладаете навыками, инструментами и сырьем, то почти все детали рамы первого коптера вполне можно изготовить из брусков и фанеры. Исключение составят лишь моторамы и мелкие крепежные кронштейны для дополнительных устройств. Следует избегать сборки на клею — это существенно снижает ремонтпригодность.

Радиотехнический стеклотекстолит изготавливается из нескольких слоев стеклоткани, пропитанных эпоксидной смолой. На производстве листы зажимаются в пресс и подвергаются горячему отверждению. Материал прочный, достаточно легко сверлится, пилится и фрезеруется в домашних условиях, но почти не поддается лазерной резке. Обычно применяется для изготовления печатных плат, поэтому продается в радиомагазинах с покрытием медной фольгой с одной или двух сторон. Доступность и прочность сделали этот материал очень популярным. Серьезными недостатками стеклотекстолита являются большой удельный вес и склонность к расслаиванию при механических нагрузках.

ВНИМАНИЕ!

Не следует удалять фольгу с текстолита при помощи раскаленного утюга! В результате перегрева пластина текстолита необратимо деформируется, закручиваясь "винтом". Кроме того, перегретый текстолит склонен к расслаиванию.

Фольгу следует удалять химическим травлением при помощи хлорного железа или персульфата аммония. Эти реактивы можно приобрести в радиомагазине вместе с текстолитом. Процесс травления в свежем подогретом растворе хлорного железа занимает 15–20 минут. Раствор можно использовать многократно. Для экономии раствора лучше протравливать уже готовые детали. Протравленные поверхности можно красить, к ним хорошо прилипает эпоксидный клей.

ВНИМАНИЕ!

Будьте аккуратны при работе с хлорным железом! Раствор оставляет на окружающих предметах и одежде ничем не удаляемые бурые пятна, а также сильно окрашивает кожу рук.

Конструкционный текстолит по структуре аналогичен радиотехническому, но более прочен, меньше склонен к расслаиванию под нагрузкой. В отличие от радиотехнического обладает худшими изолирующими свойствами, но для изготовления механических деталей это не имеет значения. Сверлится, пилится и фрезеруется так же легко, как и радиотехнический. Не требует удаления фольги. Обычно окрашивается в черный, реже в коричневый или зеленый цвет. Иногда имеет текстурированную тиснением поверхность. К сожалению, этот материал редко встречается в продаже в России, хотя на производстве в Китае используется очень широко, как дешевый заменитель карбона. В России можно попробовать приобрести листовой "электротехнический текстолит G10", но его цена будет выше, чем у китайского конструкционного.

Карбон во всех его вариациях является почти идеальным материалом для летающих устройств. Наполняющим и силовым элементом материала являются карбон-

вые волокна, а связующим веществом — полиэфирные композиции горячего либо холодного отверждения. Карбоновым волокнам присуща чрезвычайно высокая удельная прочность при малом весе. Недостатком карбоновых деталей является хорошая проводимость вибрации и наличие выраженных собственных резонансов, что вредит виброзащите.

В авиамоделизме применяются следующие разновидности карбоновых материалов.

- **Карбоновая ткань** изготавливается из длинных волокон методом перекрестного плетения. В зависимости от технологии бывает из скрученных и прямых волокон, различается по плотности плетения. Применяется для формовки объемных изделий (каркасы, кожухи). Из карбоновой ткани методом вакуумной формовки изготавливают особо прочные и легкие пустотелые объемные рамы коптеров, так называемые "корки".
- **Листовой карбон** изготавливается из нескольких слоев карбоновой ткани, пропитанной полиэфирной композицией с последующим холодным или горячим отверждением под прессом. Очень легкий и прочен, почти не гнется, сверлится и фрезеруется труднее, чем стеклотекстолит. Стоит в несколько раз дороже стеклотекстолита.

ВНИМАНИЕ!

В силу своих электрических свойств и физической структуры листовой карбон в некоторых случаях способен полностью заблокировать работу приемника GPS, если его антенна расположена ближе, чем 2–2,5 см от поверхности карбона. При использовании карбоновых рам или деталей приемник GPS должен быть вынесен вверх на штанге или стойках высотой не менее 3 см.

- **Карбоновые трубки** изготавливаются либо накручиванием нескольких слоев карбоновой ткани на оправку с пропиткой смолой, либо экструзией полимерной массы с наполнителем из карбоновых волокон. Это очень хороший материал для изготовления лучей рамы либо сборной трубчатой рамы целиком. Но у него есть серьезный недостаток: карбоновым трубкам, особенно изготовленным из навитой ткани, присуща склонность к резко выраженным пикам резонанса на частотах вибрации.
- **Экструдированные профили** (pulltruded carbon) изготавливаются экструзией полимерной массы с наполнителем из карбоновых волокон через профильную фильеру. Это могут быть круглые, квадратные или прямоугольные прутки, трубчатые профили. Материал различается по длине и ориентации карбоновых волокон. Дешевые материалы изготавливаются с наполнителем из коротких, хаотично ориентированных, карбоновых волокон. Как правило, это профили относительно большого сечения. Более дорогие и прочные профили содержат длинные волокна, ориентированные вдоль профиля.

При изготовлении коптеров популярны трубчатые профили комбинированного сечения (рис. 4.3): квадратные снаружи, но с круглым отверстием внутри (square tube). Такие профили сочетают высокую удельную прочность круглой трубки и удобство монтажа квадратного профиля. Дело в том, что при изготовлении лучей из круглой трубки для крепления моторов и стыковки с рамой приходится

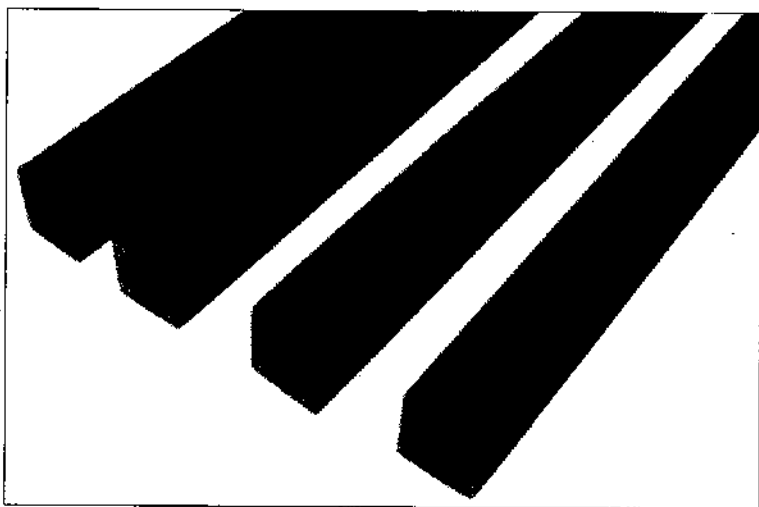


Рис. 4.3. Карбонный профиль комбинированного сечения

применять специальные хомуты и кронштейны, а для квадратного профиля они не нужны.

- **Карбоновые сэндвичи** состоят из двух наружных слоев карбоновой ткани, наклеенных полиэфирным клеем на тонкую листовую бальзу. Как правило, изготавливаются самостоятельно и применяются при строительстве малогабаритных сверхлегких конструкций. Обладают уникальным соотношением удельного веса и прочности.
- **Алюминиевые сэндвичи** — материал, применяемый в рекламном производстве и при облицовке фасадов зданий. Два слоя алюминиевой фольги, толщиной 0,3 мм каждый, наклеены на листовой пластик. Очень хорошо обрабатывается на станке с ЧПУ и вручную. Но обладает большим удельным весом и низким отношением прочности к весу. Поэтому не рекомендуется для изготовления летающих конструкций.
- **Смешанные материалы** — китайская новация, направленная на снижение себестоимости и цены материала. В производстве экструдированных профилей наполнитель может состоять из смеси карбоновых (~60–70%) и стеклянных (~40–30%) волокон. В производстве листовых материалов берется окрашенный в черный цвет технический текстолит G10 и с двух сторон облицовывается одинарным слоем карбоновой ткани. По внешнему виду для неопытного взгляда такой материал неотличим от чисто карбонового листа.

Как распознать поддельный карбон

Строго говоря, смешанные материалы нельзя считать подделкой, если производитель или продавец честно сообщает о составе материала и продает его по адекватной цене. Но, к сожалению, на практике комбинированные материалы очень часто продают под видом и по цене чистого карбона. Как можно распознать подделку?

При дистанционном заказе в интернет-магазине невозможно заранее опознать подделку, разве что по необычно низкой цене по сравнению с другими магазинами.

Экструдированные профили со смешанным наполнителем визуально почти невозможно отличить от чисто карбоновых. По цвету они практически не отличаются от профилей с чистым наполнителем, потому что цвет можно легко затемнить добавлением технической сажи. Сравнению поддается только удельный вес, но для этого надо иметь возможность взвешивать разные образцы.

Поддельный листовый карбон можно довольно легко распознать по срезу (рис. 4.4). Возьмите деталь со срезом после фрезы или слегка обработайте кромку листа наждачной бумагой. Затем протрите срез ваткой, смоченной спиртом, органическим растворителем 646 или ацетоном. Прежде всего, на ватке должны остаться только мелкие частицы материала, без следов красителя. Кустарно изготовленный "гаражный" карбон или облицованный карбоном черный текстолит может оставить следы краски. Обработанный растворителем срез карбона почти не матируется и демонстрирует отчетливо заметную слоистую структуру карбоновой ткани, на которой видно чередование укладки слоев. Срез текстолита после обработки становится светло-серым, матовым, слоистую структуру почти не заметно.

При сверлении или фрезеровании опилки от настоящего карбонового листа черные и пушистые, как тонкая пыль. При обработке стеклотекстолита опилки светло-серые и более грубые. В процессе обработки большинства разновидностей текстолита ощущается характерный резкий запах фенольных смол, входящих в его состав. Полиэфирные смолы карбоновых листов почти не издадут запах.

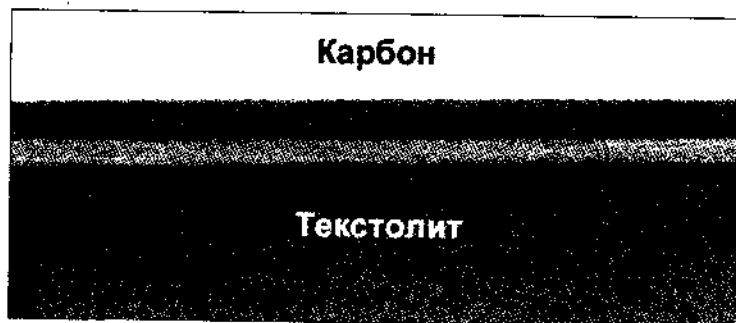


Рис. 4.4. Боковые срезы карбона и текстолита

Сплавы алюминия применяются в основном для изготовления трубчатых лучей рамы и мелких крепежных элементов. Стоимость таких лучей, в отличие от карбоновых, очень мала. После аварии незначительно погнутый луч можно выправить в полевых условиях. Листовой алюминий для изготовления центральной части рамы и моторам не применяется по причине излишнего веса и сложности обработки в домашних условиях. Более целесообразно применять листовый текстолит или карбон.

Пластик в последнее время набирает популярность листовый фиберпластик, обычно акрилат, армированный дисперсным стекловолокном (FRP, Fiberglass Reinforced Plastic). Он легче стеклотекстолита и без проблем обрабатывается в домашних условиях, с завода окрашен в различные яркие цвета. При этом он упруг и прочен, меньше подвержен изломам. Небольшая рама из фиберпластика получается прочной, красивой и легкой. К сожалению, его довольно сложно купить в небольшом количестве, и стоит он на российском рынке несуразно дорого. Будем надеяться, что со временем цена и предложение нормализуются.

Остальные материалы применяются в качестве вспомогательных, для изготовления чехлов, кронштейнов и т. д.

Виброзащита

Вибрация — это проклятие винтокрылых машин, и квадрокоптеры — не исключение. Источником вибрации являются винтомоторные группы, каждая из которых дает вибрацию на своей частоте, распространяющуюся по лучам к центральной части рамы и полетному контроллеру. При наложении нескольких высокочастотных колебаний возникают низкочастотные колебания с частотой, равной разности частот источников вибрации. Картину усугубляют собственные резонансы элементов конструкции.

ПРИМЕЧАНИЕ

Вибрация очень вредна для акселерометров и гироскопов, поскольку сбивает их показания. Внешне воздействие вибрации на контроллер проявляется в хаотичном подергивании коптера, его дрожании, внезапных рывках и кратковременной потере управления на определенных оборотах при резонансе конструкции. В особо экстремальных случаях возможен внезапный переворот коптера и авария.

Виброзащита включает в себя балансировку винтомоторной группы, которую мы рассмотрим в следующем разделе, а также виброизоляция — препятствование распространению вибрации при помощи вибропоглощающих и виброизолирующих материалов.

Современные алгоритмы программной фильтрации позволяют эффективно защищать полетный контроллер от вибрационного шума в показаниях акселерометров, поэтому задача виброзащиты существенно упростилась. Сейчас уже не имеет практического смысла виброизоляция креплений моторов, напрасно усложняющая конструкцию. Тщательной балансировки пропеллеров и моторов вполне достаточно.

Далее вибрация распространяется по лучам. Высверливание или фрезерование отверстий в алюминиевых лучах не только облегчает конструкцию, но также помогает подавить вибрацию и резонансы. Для подавления резонансов трубчатых карбоновых лучей их внутреннее пространство заполняют монтажной пеной или вставляют цилиндрики длиной около 2 см из плотной пористой резины. Цилиндрики должны вставляться туго и располагаться на разном расстоянии друг от друга. Среднее расстояние между вставками примерно 5–7 см.

ВНИМАНИЕ!

В стенках карбоновых лучей нельзя высверливать или фрезеровать окна, это значительно снизит их прочность.

К центральной части рамы лучи всегда крепятся жестко и прочно. Допускается складная конструкция, но виброизоляция в этой части конструкции никогда не применяется.

Благодаря современным алгоритмам фильтрации вибропомех полетный контроллер может быть жестко прикреплен к раме (рис. 4.5). Автор настоятельно советует по-

ступать именно так, а особое внимание уделить балансировке ВМГ. Но иногда, особенно при использовании дешевых некачественных моторов и пропеллеров, качественная балансировка не получается. В таком случае следует смонтировать контроллер на 1–2 слоях пенистого двустороннего скотча или на проставках из плотной резины. Избегайте избыточного демпфирования контроллера!

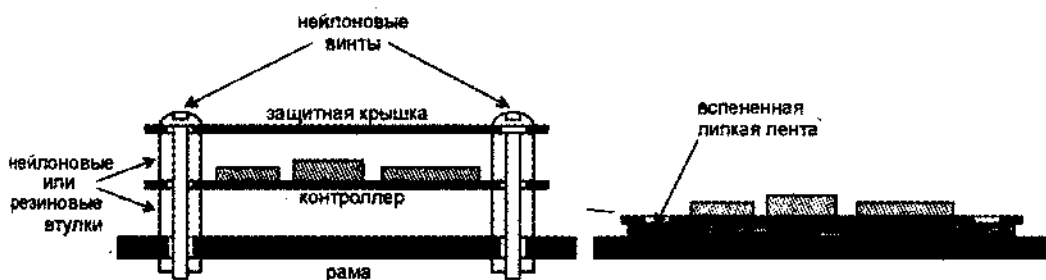


Рис. 4.5. Варианты крепления полетного контроллера к раме

Избыточное демпфирование

Избыточное демпфирование контроллера возникает при использовании слишком мягких демпферов, допускающих раскачивание. Ускорения при вибрации — линейные, и раскладываются на ортогональные векторы, поэтому не влияют на гироскопы, затрагивая только акселерометры. Но при слишком мягких демпферах появляется вращательная составляющая вибрации, как показано на рис. 4.6. Если центр тяжести платы смещен относительно геометрического центра точек опор, то линейные ускорения неравномерно смещают плату на упругом подвесе, отсюда и возникает вращательная составляющая.

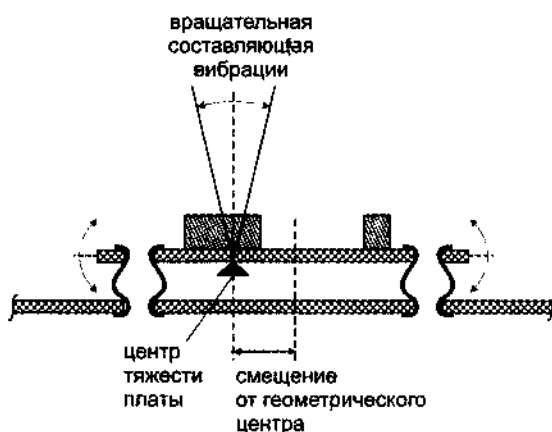


Рис. 4.6. Эффект избыточного демпфирования

Вращательная составляющая "сводит с ума" гироскопы, а поскольку гироскопы предназначены для *немедленной и острой реакции* на угловые отклонения, то вред от передемпфирования значительно превосходит вред от вибрации. Неопытные

владельцы коптеров склонны чрезмерно демпфировать полетный контроллер. Лучше начинать с монтажа контроллера вообще без демпферов, и смягчать крепление только при крайней необходимости, когда балансировка ВМГ и настройка параметров программной фильтрации не помогают.

Демпфирование подвеса камеры

Вибрация камеры проявляется на изображении в виде "эффекта желе", когда изображение полностью или в виде чередующихся широких полос колеблется, словно студень. Этот эффект возникает из-за биений между частотами вибрации и частотой смены кадров.

Камера не должна жестко отслеживать малейшее отклонение рамы, поэтому, в отличие от крепления контроллера, для подвеса камеры применяют мягкие демпферы. Обычно это специальные пустотелые амортизаторы-"грибки" из силикона. Амортизаторы различаются по размерам и жесткости. Чем тяжелее камера, тем жестче амортизаторы и тем большее их количество требуется. Приблизительная жесткость в виде максимальной нагрузки на один амортизатор указывается в его характеристиках, но для достижения наилучшего результата обычно требуется подбирать жесткость и количество амортизаторов экспериментально. Поэтому амортизаторы лучше сразу приобретать с запасом и различной жесткости.

Маленькую и легкую камеру можно подвесить на четырех амортизаторах малой или средней жесткости. При конструировании подвеса также следует избегать вращательно-раскачивающей составляющей, которая может сопровождать вибрацию. Для того чтобы избежать раскачивания подвеса, следует стараться поднять его центр тяжести как можно выше и разнести амортизаторы подвеса на максимальное расстояние, как показано на рис. 4.7.

Остальные электронные узлы, такие как приемники GPS, выносные магнетометры, приемники и т. д., виброизоляции не требуют.

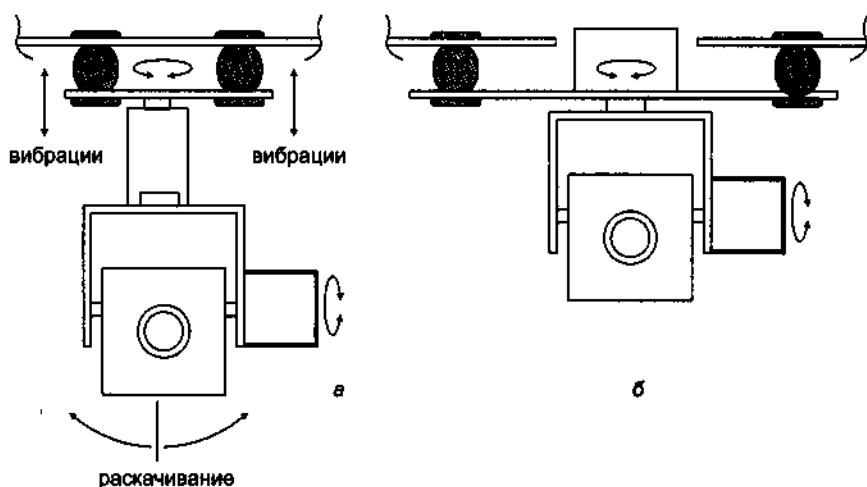


Рис. 4.7. Предотвращение раскачивания подвеса

Фиксация резьбовых соединений

Высокочастотная вибрация способствует саморазвинчиванию резьбовых соединений. Чтобы воспрепятствовать этому, применяются различные фиксаторы резьбы. Прежде всего, это гайки со специальными нейлоновыми вставками. Формально это одноразовые гайки, но на практике они выдерживают 3–4 цикла завинчивания-развинчивания, после чего нейлоновая вставка истирается резьбой и гайку нужно менять.

В случаях, когда гайки с фиксатором применить невозможно, например при креплении двигателя к мотораме, используют жидкие фиксаторы резьбы. В обиходе их часто называют "локтайт" по имени наиболее известного производителя Loctite. Небольшое количество жидкости наносят на резьбу винта непосредственно перед завинчиванием. После того как винт вкручен, жидкость полимеризуется от контакта с металлом, без присутствия воздуха. Поэтому такие фиксаторы называются анаэробными. Поскольку катализатором полимеризации являются ионы металла, винтовые соединения "пластик — пластик" такая жидкость не фиксирует.

Приобрести фиксатор резьбы можно в любом магазине автозапчастей и аксессуаров. По прочности фиксации жидкости делятся на три категории: сильная (красная), средняя (синяя) и слабая (зеленая). При сборке квадрокоптеров желательно использовать синюю или зеленую жидкость. Они размягчаются при нагревании. Для вывинчивания винта рекомендуется нагреть его, например, мощным паяльником. Соединения, зафиксированные качественной красной жидкостью, зачастую не удается расфиксировать даже при сильном нагреве.

После разборки обязательно следует очистить резьбы винта и гайки от остатков фиксатора при помощи метчика и плашки, а перед сборкой нанести новый слой фиксатора.

ПРИМЕЧАНИЕ

Не используйте фиксатор для разборных соединений типа "металл — пластик". Отвердевший фиксатор, прилипший к металлической резьбе, разрушит резьбу пластиковой детали при вывинчивании. Если деталь, в которую ввинчен стальной винт, алюминиевая, то старайтесь вывинчивать винт только при нагреве или использовать слабый фиксатор, иначе алюминиевая резьба может быть испорчена.

Для фиксации резьбы нейлонового крепежа можно использовать циакриновый клей. Это обычный "секундный" клей в маленьких тюбиках. Такой клей очень быстро и прочно фиксирует нейлоновую резьбу. Смоченный клеем винт следует завинчивать быстро и не останавливаясь. Соединение с клеем исключительно одноразовое, развинтить его не получится! Циакриновый клей не дает надежную фиксацию металлических резьб.

Крепление моторов и винтов

Конструкция квадрокоптера предусматривает только жесткое крепление винтов на валы моторов, и должно быть максимально надежным. Потеря пропеллера в полете означает немедленную и безусловную аварию коптера, а неправильное крепление значительно усиливает вибрацию.

Даже опытные владельцы коптеров допускают распространенную ошибку в монтаже моторов и винтов: чрезмерный вынос вверх относительно плоскости крепления. Обратимся к рис. 4.8, на котором схематически изображены два способа монтажа.

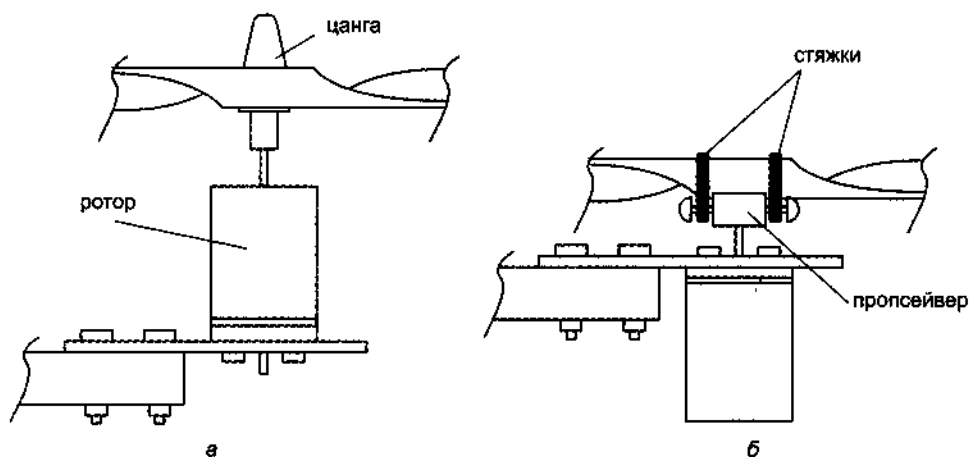


Рис. 4.8. Два способа монтажа моторов на мотораме

Способ (а) технически проще для монтажа мотора, особенно если у этого мотора длинный вал со стороны ротора, а также позволяет использовать для крепления винта стандартную цангу, которая идет в комплекте мотора. Очевидно, что малейший дисбаланс винта приведет к значительной маятниковой вибрации мотора на упругой мотораме. В свою очередь, такая вибрация приводит к "бабочке" вращения винта — движению лопастей в разных плоскостях — что существенно снижает эффективность ВМГ. Эта конструкция имеет четко выраженные резонансы вибрации при определенных оборотах мотора. Данный способ требует очень качественной балансировки винтов и моторов.

В способе (б) мотор находится под моторамой, а винт закреплен на штатном пропсэйвере или цанге как можно ближе к мотораме. В данном случае маятниковая вибрация минимальна. Недостатком второго варианта является возможность захлестывания лопастей об луч при жесткой посадке или аварии. Но, как правило, аварии происходят редко, и винты при этом все равно ломаются, а вибрация доставляет намного больше неприятностей.

Сказанное не относится к специальным моторам для квадрокоптеров, которые имеют уменьшенную высоту и готовый узел крепления винта, интегрированный с мотором. Такие моторы крепятся на мотораму только сверху.

Для крепления винтов в коптерах начального и среднего уровня очень удобно использовать штатный пропсэйвер из комплекта поставки мотора. Он представляет собой втулку с двумя выступающими винтами. В самолетной конструкции винт крепится на него при помощи колечка из жесткой резины. Во время аварии самолета пропеллер просто соскакивает вбок и не ломается. Но для квадрокоптера такой

способ совершенно неприемлем и приведет к потере винта в воздухе и аварии! Поэтому винт крепят к пропсейверу при помощи двух нейлоновых стяжек, как показано на рис. 4.9, а. Диаметр отверстия винта может не совпадать с диаметром пропсейвера, поэтому применяются либо переходные кольца из комплекта винта, либо рассверливание отверстия. *Осевой люфт винта недопустим!*

ПРИМЕЧАНИЕ

Чтобы надежно зафиксировать пропсейвер, рекомендуется при помощи алмазного надфиля сделать на валу мотора неглубокие фаски под зажимные винты.

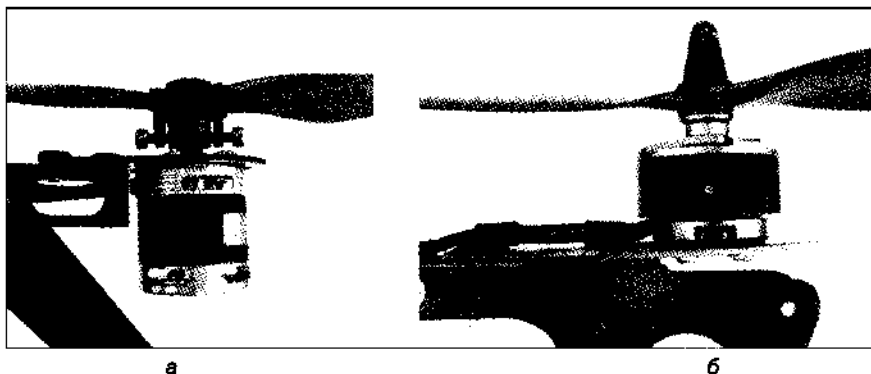


Рис. 4.9. Монтаж обычного (а) и специального укороченного (б) моторов

Для рассверливания воздушных винтов настоятельно советуем применять не сверло, а специальную шагово-коническую развертку (рис. 4.10), которую можно приобрести в магазине слесарных инструментов. Эту покупку следует сделать сразу, потому что первое время винты придется менять часто. В отличие от сверла, развертка самоцентрируется в отверстии, ее не надо вставлять в дрель, достаточно зажать в тисках и вращать винт от руки.



Рис. 4.10. Шагово-коническая развертка для воздушных винтов

Цанги-переходники, надеваемые на вал мотора, являются хоть и очевидным, но довольно неудачным способом крепления винта. Они зачастую имеют низкое качество, что приводит к нарушению центровки винта и появлению неустраняемой сильной вибрации. Под влиянием вибрации такие цанги часто соскакивают с вала во время полета, либо у них развинчивается гайка, что также приводит к утере винта. Сотни аварий коптеров произошли именно по этой причине. У специализированных моторов зажимной узел имеет насечки, препятствующие проворачиванию винта на валу и отвинчиванию гайки.

ПРИМЕЧАНИЕ

Некоторые специализированные моторы для коптеров имеют цанги с правой и левой резьбой, в зависимости от рабочего направления вращения. Такие моторы надо покупать парами и монтировать правильно, чтобы направление вращения способствовало затягиванию гайки на валу. Обычно такие моторы имеют маркировку "R" и "L", которая совпадает с маркировкой соответствующих винтов.

Магнитоизоляция

Большие токи, протекающие в силовых проводах питания, порождают магнитное поле вокруг проводников. Это магнитное поле сбивает показания магнетометра — электронного компаса на плате полетного контроллера. Если компас не используется, то магнитными наводками можно пренебречь. Но в большинстве случаев компас необходим при полетах по FPV для указания направления возврата домой, для автовозврата по GPS и для полета по заданным точкам. Компас также необходим в режиме Headfree, когда контроллер автоматически отслеживает по компасу курсовое положение рамы и вычисляет условное направление "вперед".

Если компас будет подвержен наводкам, то алгоритм контроллера все равно отработает прибытие в заданную точку по координатам GPS, но скорость и траектория полета будут далеки от оптимальных. Ситуацию усугубляет то, что магнитные помехи не постоянны, а пропорциональны оборотам несущих винтов.

Для компенсации мощных магнитных наводок самым эффективным решением является вынос микросхемы магнетометра на штанге длиной около 15 см вверх над рамой. Существуют готовые модули, которые состоят из антенны GPS и магнетометра на одной плате, и модули, которые содержат только магнетометр. При наличии радиолюбительского опыта можно отпаять магнетометр с платы контроллера и поместить его на выносную плату. Магнетометр соединяется с контроллером по шине I²C, поэтому при использовании внешнего контроллера потребуется настроить адрес магнетометра на шине I²C и в некоторых случаях перерезать проводник, идущий к микросхеме на плате. Это зависит от версии платы и прошивки.

При сборке коптера особое внимание следует уделить правильной укладке силовых проводников. Их длина должна быть минимально возможной; при этом длина положительной и отрицательной шин питания должна быть одинаковой и пролегать они должны параллельно и только рядом, для максимальной взаимной компенсации магнитных полей. Скручивание силовых проводов между собой незначительно уменьшает наводки.

ВНИМАНИЕ!

Категорически запрещается укладывать монтажный запас силовых проводов кольцом (рис. 4.11)!

Некоторые звукоизлучатели в индикаторах разряда батареи или поисковых маячках содержат очень мощные магниты. Поэтому звукоизлучатели следует монтировать как можно дальше от платы контроллера.

Решение, следует ли выносить магнетометр на штангу, зависит от величины магнитных помех в собранном коптере. В разделе, посвященном интерфейсу настрой-

ки коптера, будет рассказано, как проверить величину помех исходя из показаний компаса. Если при пиковом увеличении рабочего тока компас отклоняется не более, чем на 3–5 градусов, то это нормально, и можно больше ничего не предпринимать.

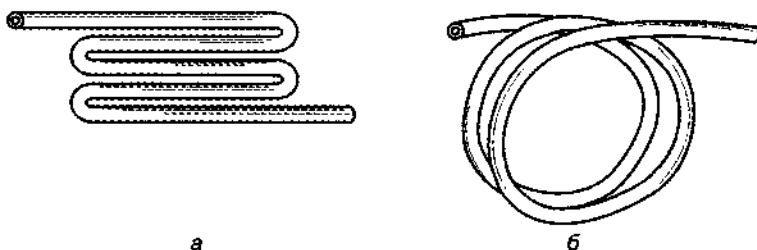


Рис. 4.11. Правильная (а) и неправильная (б) укладка излишка силового провода

Поскольку через силовую батарею протекает суммарный ток от всех моторов, она тоже является проводником, порождающим магнитное поле вокруг себя. Иногда изменение расположения батареи относительно платы контроллера существенно снижает магнитные наводки.



ГЛАВА 5

Сборка и настройка квадрокоптера

Изготовление рамы

Прежде всего, вы должны определиться, имеет ли для вас смысл изготовление самодельной рамы. Готовый набор, состоящий из центральной текстолитовой части, четырех моторам, металлических лучей и необходимого крепежа, можно заказать в Китае по цене 18–20 долларов с бесплатной доставкой. Покупка материалов для самодельной рамы вряд ли обойдется дешевле. Плюс потраченное на работу время, пыль, шум и прочие бытовые неудобства. Но если вам работа с конструкторскими программами, станком ЧПУ и слесарными инструментами доставляет удовольствие — тогда запасайтесь материалами и приступайте к изготовлению. Пока по почте доставляют ранее выбранные вами моторы, регуляторы, полетный контроллер и прочие компоненты, работа над рамой будет завершена.

При изготовлении первой рамы рекомендуем воздержаться от ненужного "изобретательства" и "рационализаторства", а также от излишней замысловатости технических решений. Поверьте, в конструкции начального уровня все уже придумано и испытано до вас. Все возможные ошибки уже совершены, обсуждены и учтены тысячами энтузиастов-любителей. Стандартная базовая конструкция такова, потому что она действительно оптимальная. Она недорогая, простая, как топор, прочная и ремонтпригодная.

Пример популярной конструкции стандартной рамы схематически показан на рис. 5.1. Векторные чертежи, пригодные для масштабирования и резки на станке с ЧПУ, можно скачать на сайте издательства. По этим чертежам можно заказать резку на станке, например в рекламной фирме, или изготовить детали вручную. Центральная часть и моторамы изготавливаются из радиотехнического стеклотекстолита толщиной 2–2,5 мм. Фольга стравливается с текстолита в растворе хлорного железа. Рекомендуется стравливать фольгу *после изготовления деталей*. Это поможет сэкономить хлорное железо. Кроме того, по фольге легче кернить или расчерчивать стальной иглой разметку под вырезку и сверление.

Центральная часть рамы состоит из двух пластин, верхней и нижней, между которыми зажаты лучи из квадратного алюминиевого профиля с шириной стенки около

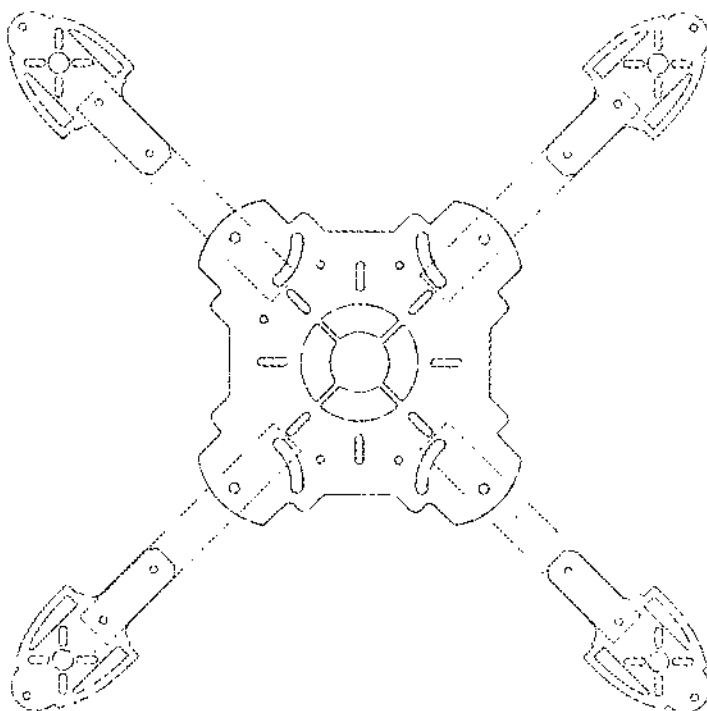


Рис. 5.1. Пример конструкции стандартной рамы

10–12 мм. Предусмотрены дуговые пазы под крепежные винты, благодаря чему раму можно складывать для транспортировки. Если складывание не планируется, дуговые пазы следует заменить обычными отверстиями. В исходном состоянии чертежи деталей рассчитаны на диагональ 550–600 мм и соответствующие двигатели, но могут быть легко смасштабированы в любой программе, работающей с векторными рисунками.

Мы сознательно не приводим здесь чертежи подвеса камеры, посадочных шасси с повышенным просветом, батарейного отсека, поскольку эти части конструкции в значительной мере зависят от навесного оборудования, которое будете использовать именно вы. Кроме того, множество различных чертежей защитных кожухов, кронштейнов и прочих частей конструкции можно без труда найти в свободном доступе в Интернете. Рассматривайте приведенную здесь конструкцию, как основу и не бойтесь самостоятельно добавлять нужные узлы в соответствии со своими потребностями.

ПРИМЕЧАНИЕ

Стравливание фольги не дает ощутимой экономии веса, но заметно повышает эстетическую составляющую. Окисленная медная фольга имеет неприглядный вид, а краска на нее ложится очень плохо. Кроме того, при соприкосновении меди с алюминиевыми деталями образуются гальванические пары, которые со временем могут стать источником электрических помех в полете. Такие помехи очень трудно распознать.

Для переноса чертежа на листовую заготовку распечатайте его на обычной бумаге. Рекомендуется использовать струйный принтер, потому что тонер лазерного прин-

тера осыпается с бумаги при работе. Приклейте бумагу к заготовке при помощи канцелярского клея-карандаша. После окончания работы достаточно слегка смочить бумагу для удаления. Можно также распечатать чертеж на листе специальной самоклеящейся бумаги. Такая бумага очень прочно прилипает к заготовке, но для удаления придется отмачивать ее спиртом, растворителем 646 или специальным аэрозолем Label-Off для удаления этикеток.

Внутренние контуры ("окна" в деталях) предварительно обесверливаются сверлом диаметром 2–2,5 мм. Перемычки между отверстиями перекусывают кусачками, затем обрабатывают кромки плоским и круглым напильниками или бормашиной. Можно выпилить окна при помощи лобзика, но потребуются качественные и прочные полотна, желательно с мелким зубом.

ВНИМАНИЕ!

При обработке текстолита и карбона бормашиной образуется облако чрезвычайно вредной для здоровья мелкой волокнистой пыли, обладающей выраженным раздражающим эффектом! Используйте при работе качественный респиратор и прилегающие защитные очки или организуйте непрерывный отсос пыли.

Лучи изготавливаются из квадратного тонкостенного алюминиевого профиля 10×10 мм, который продается в магазинах строительных и хозяйственных товаров. Если не удалось найти такой профиль, то в магазине мебельной фурнитуры можно приобрести четыре мебельные ручки из аналогичного профиля. Для коптеров размера 460 мм можно использовать профили 12×12 мм.

Для облегчения лучей в них можно рассверлить или выфрезеровать отверстия. Отверстия на прилегающих сторонах должны быть взаимно смещены, как показано на рис. 5.2.

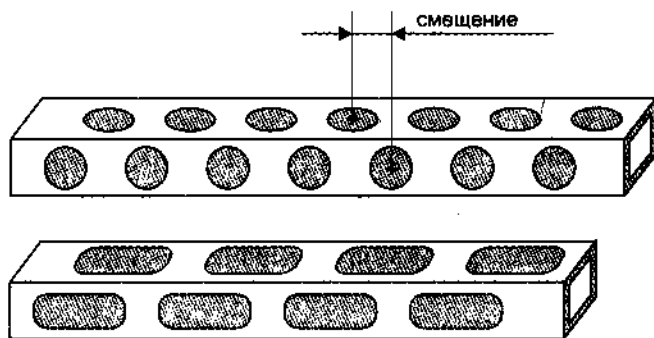


Рис. 5.2. Расположение облегчающих отверстий луча

Когда детали рамы готовы, покрасьте их нитрокраской в контрастные цвета, чтобы облегчить распознавание положения рамы в пространстве. Традиционно принято два передних луча красить в красный или оранжевый цвет, два задних в черный, а центр рамы делать черным или флуоресцентно-желтым. Впрочем, это вопрос личного комфорта и вкуса. Цвет пропеллеров обычно выбирают соответствующим цветом лучей. Для окраски рамы можно приобрести в автомагазине так называемую

эмаль для колесных дисков или, что еще лучше, эмаль для тормозных суппортов. Такие эмали имеют едко-яркие красный и желто-оранжевый цвета, хорошо ложатся на металл с первого слоя, быстро сохнут и дают прочное глянцевое покрытие. Цена автомобильной тюнинговой эмали на 40–50% больше, чем у обычного баллончика из магазина хозяйственных товаров, но результат того стоит.

Для облегчения распознавания пространственного положения рамы ее можно оснастить дополнительными визуальными маркерами: ярко-желтым пенопластовым или поролоновым "поплачком", смонтированным на карбоновом прутке между задними лучами, светодиодными лентами разного цвета или яркими шариками на посадочных стойках.

После покраски собираем раму, используя металлические винты и самофиксирующиеся гайки с нейлоновой вставкой. Такие гайки следует приобрести с запасом, т. к. после двух-трех отвинчиваний они теряют свойство самофиксации. Крепежные винты двигателей и пропеллеров зафиксируйте анаэробным фиксатором резьбы синего или зеленого цвета.

Балансировка воздушных винтов

Даже самые качественные карбоновые воздушные винты требуют как минимум проверки балансировки, а обычные пластиковые винты следует балансировать обязательно. Также нужно проверить их геометрию. Винты могут быть деформированы в процессе складирования и перевозки, а также из-за неравномерного высыхания пластика при хранении, особенно при воздействии высоких температур. Кстати, по этой причине *винты следует хранить в темном прохладном месте.*

Для балансировки винтов вам понадобится балансир, баллончик бытового антистатика, скальпель или острый нож со скругленным лезвием и кусочек мелкой наждачной бумаги.

Самое простое устройство для балансировки можно изготовить самостоятельно. Оно представляет собой гладкую стальную ось, например, направляющую от привода CD-ROM, которая помещается на самодельную подставку в виде перевернутой буквы П и свободно катается по рельсам, сделанным из половинок лезвия от канцелярского ножа или бритвенных лезвий (рис. 5.3).

Более точным и надежным является магнитный балансир. В нем ось удерживается в воздухе за счет мощных магнитов и практически не испытывает трение о магниты (рис. 5.4).

Прежде чем приступать к балансировке, следует проверить геометрию винта. Положите винт плашмя на плоскую ровную поверхность, плотно прижмите бобышку винта и тщательно измерьте расстояния от кончиков лопастей до поверхности. Эти расстояния должны совпадать как можно точнее. У некачественных или деформированных винтов расхождение расстояний может достигать 2–3 мм. Такие винты лучше сразу отбраковать или использовать только в крайнем аварийном случае. Незначительно деформированный винт можно попробовать выпрямить, осторожно прогревая основание лопасти возле бобышки при помощи фена паяльной станции

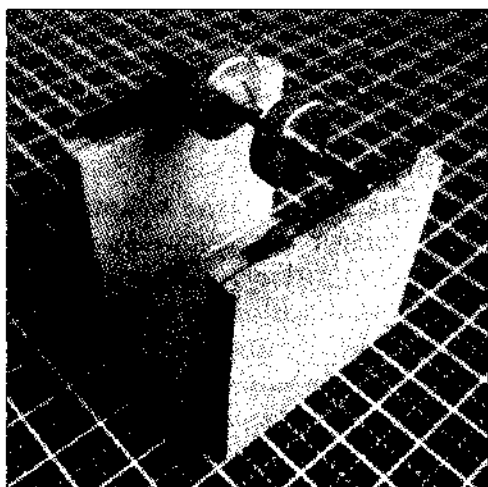


Рис. 5.3. Балансир
на самодельной опоре из лезвий

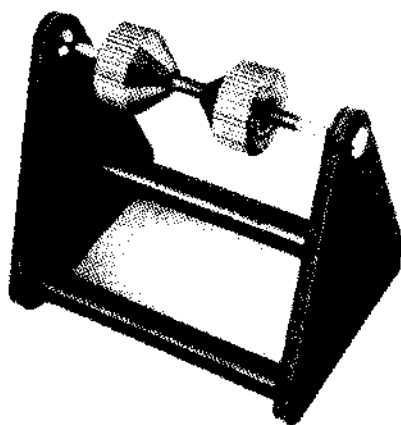


Рис. 5.4. Балансир с магнитным подвесом

при температуре 120–140 °С или струей кипящей воды и отклоня лопасть в нужную сторону.

После проверки геометрии винтов следует, при необходимости, удалить заусенцы по краям лопастей и на бобышке, рассверлить отверстия до нужного диаметра и/или вставить переходные кольца по диаметру вала или втулки пропсейвера и только после этого начинать балансировку.

Балансир, даже самодельный — это очень чувствительное устройство. Подвешенный на балансире винт будет реагировать на малейшее движение воздушных масс вокруг. Поэтому следует выбирать помещение с полным отсутствием сквозняков и не делать резких движений во время балансировки. По этой же причине надо нанести тонкий слой антистатика на всю поверхность винта, а если столешница пластиковая или из лакированной древесины, то и на столешницу тоже. В противном случае пластиковые лопасти винта будут непредсказуемо притягиваться к рукам и столешнице.

После высыхания антистатика подвесьте винт на балансире и засеките, какая лопасть тяжелее. Обратите внимание, с какой скоростью она опускается — при достижении некоторого опыта это подскажет вам, сколько пластика нужно будет удалить с тяжелой лопасти.

Затем лезвием скальпеля или остро заточенного ножа начинайте осторожно соскабливать *очень тонкий* слой пластмассы со внутренней поверхности лопасти. Снимайте слой равномерно со всей поверхности, начиная от бобышки и далее примерно на 2/3 длины лопасти, или немного дальше. Ближе к законцовке лопасть и без того тонкая. Если дисбаланс небольшой, то, возможно, придется снять слой только с части лопасти. В процессе обработки периодически помещайте винт на балансир для проверки. Помните, что можно очень легко перестараться и тогда придется облегчать другую лопасть.

Соскабливание надо завершить в тот момент, когда обрабатываемая лопасть будет чуть-чуть тяжелее, чем нужно. После этого осторожно заполируйте поверхность лопасти мелкой наждачной бумагой, также периодически контролируя баланс. Даже полировочной шкуркой можно снять лишний слой.

Описание процесса балансировки кажется долгим, но на самом деле опыт приходит уже после второго винта, и дальше процесс балансировки занимает не более 5–6 минут даже в сложных случаях. Важно не спешить и делать все аккуратно.

Почему мы рекомендуем соскабливать тяжелую лопасть, а не наклеивать полоски скотча на легкую, как это любят делать начинающие моделисты? Во-первых, следует знать, что *существует статический и динамический баланс*. Уравновешивая лопасти в неподвижном состоянии при помощи локально расположенного грузика, мы добиваемся статического баланса. Но в динамике, когда разные участки лопасти движутся с разной линейной скоростью, очень важно, *где именно* расположен грузик, потому что от этого зависит порождаемое им центробежное ускорение. Поэтому при балансировке грузиком даже идеальный статический баланс не означает отсутствие дисбаланса при вращении. Ведь избыточный вес тяжелой лопасти обычно распределен более-менее равномерно по ее объему, поэтому и удалять его следует так же равномерно, чтобы при достижении баланса статического достигать так же и баланса динамического. Во-вторых, балансировка соскабливанием более точна, тогда как кусочек скотча обычно оказывается слегка тяжелее или легче, чем нужно. В-третьих, кусочки скотча неэстетичны и склонны постепенно отклеиваться.

Все вышесказанное относится к пластиковым лопастям. Карбоновые лопасти балансировать соскабливанием нельзя, но и существенным дисбалансом они обычно не обладают. В случае необходимости их балансируют все же при помощи скотча, либо осторожно подпиливая надфилем заднюю кромку лопасти по всей длине.

Балансировка моторов

Балансировка моторов обычно выполняется на заводе. Моторы от именитых производителей редко нуждаются в дополнительной балансировке. Что касается недорогих китайских моторов, то их балансировку необходимо обязательно проверять. Иногда попадаются совершенно неотбалансированные моторы, а также экземпляры с люфтом подшипников и даже с кривой посадкой ротора на вал. Такие моторы лучше сразу отбраковать или отремонтировать, иначе они станут постоянным источником проблем, связанных с неравномерной тягой и вибрацией.

В заводских условиях моторы балансируют, нанося на внутреннюю сторону ротора капельки быстросохнущего эпоксидного компаунда и подтачивая их бормашинной, либо аккуратно засверливая металл у основания ротора. Аналогичные способы иногда применяют и в домашних условиях, особенно для точной доводки качественных моторов. Для балансировки двигатель необходимо разобрать, оставив вал в роторе. Затем положить вал с ротором на рельсы из лезвий и определить сторону перевеса. На противоположную сторону осторожно наносят густой эпоксидный

компаунд (смесь эпоксидной смолы с инертным порошковым наполнителем) и постепенно добиваются равновесия, затем дожидаются отвердевания компаунда. При большом дисбалансе имеет смысл удалять металл ротора дрелью или бормашиной с более тяжелой стороны. Разумеется, ни в коем случае нельзя пытаться подтачивать магниты.

Но разборка двигателя — это трудоемкий процесс, сопряженный с возможностью повредить двигатель или потерять мелкие стопорные и упорные шайбы. Поэтому двигатель лучше разбирать только для ремонта.

Для балансировки двигателей коптера нам понадобится включать их поочередно в рабочем режиме. Если электроника коптера еще не полностью готова, то можно воспользоваться одиночным регулятором оборотов, поочередно подключая его к моторам. Управляющий сигнал на вход регулятора можно подавать как напрямую с канала газа (throttle) приемника, так и с выхода сервотестера. Главное — обеспечить вращение двигателя во всем рабочем диапазоне оборотов, чтобы выявить не только вибрацию, но и возможные резонансы на определенных оборотах. При использовании штатной электроники коптера моторы следует подключать по одному, чтобы другие моторы не мешали балансировке.

Для балансировки моторов можно сделать простейшее приспособление из кусочка зеркала и лазерной указки (рис. 5.5). Указка закрепляется на штативе, а зеркальце жестко крепится на луче коптера рядом с мотором. Нельзя приклеивать зеркальце на двусторонний пенистый скотч, он будет гасить вибрацию. Луч указки отражается от зеркальца и падает на белый экран, расположенный на расстоянии около 3 м. Малейшая вибрация зеркальца будет приводить к размыванию световой точки отраженного лазерного луча.

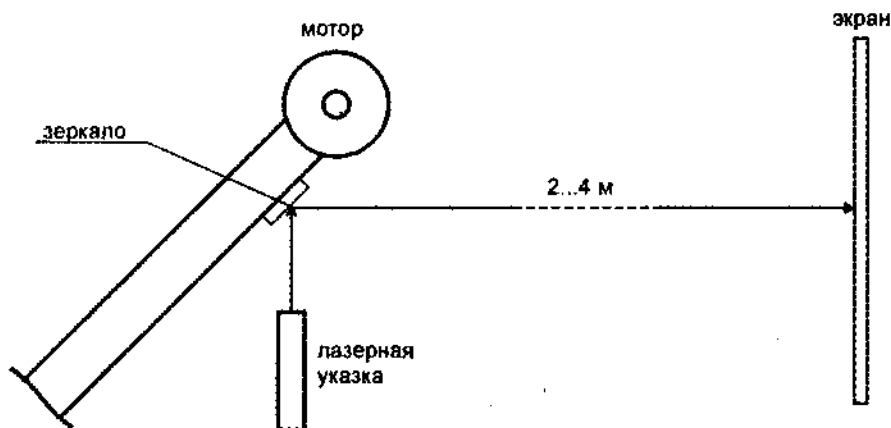


Рис. 5.5. Схема балансировки мотора при помощи лазерной указки

Балансировку двигателя мы будем производить при помощи скотча повышенной клейкости. Двигатель при работе нагревается, и некачественный скотч может отклеиться. Хорошо подходит армированный скотч серого цвета для ремонтных работ, именуемый в магазинах хозтоваров "сантехническим", а также клейкая алюминиевая лента, применяемая при монтаже систем вентиляции.

ВНИМАНИЕ!

Все работы по начальной балансировке моторов выполняются без пропеллеров.

Так же как и при балансировке пропеллеров, процесс по описанию может показаться долгим, но при достижении небольшого навыка занимает не более пяти минут на мотор. Приготовьте грузик из скотча размерами около 1×2 см. Включите мотор, прогоните его по всему диапазону оборотов, запомните величину размытия отраженного луча указки. Наклейте грузик на внешнюю сторону ротора в произвольном месте, но не слишком прочно. Включите мотор и проверьте результат. Если вибрация усилилась, переключите грузик на противоположную сторону. Когда заметите уменьшение вибрации, начинайте постепенно смещать грузик в одну и другую сторону в поисках наименьшей вибрации. Когда это положение найдено, отметьте его маркером и попробуйте варьировать размеры грузика в меньшую и большую сторону. Возможно, при этом понадобится подкорректировать положение грузика. Когда оптимальный грузик подобран, замените его постоянным такого же размера и приклейте прочно.

При наличии некоторого опыта и усердия можно вполне обходиться без лазерного приспособления, а уровень вибрации оценивать, держась подушечками пальцев за луч рамы возле мотора. Если применяются качественные винты и моторы с зажимной гайкой, то проведя предварительную отдельную балансировку моторов и винтов, можно попробовать добиться оптимальной балансировки винтомоторной пары в сборе. Но при этом следует соблюдать осторожность, чтобы не получить травму от вращающегося винта. Фиксируя винт на валу в разных положениях, можно найти такое, при котором общая вибрация винтомоторной пары будет минимальной.

Сборка квадрокоптера

Последовательность сборки рамы зависит от конструкции и обычно не несет в себе скрытых сложностей. Важно лишь соблюдать правильную последовательность монтажа электронных и силовых компонентов.

Обычно в первую очередь монтируются моторы и регуляторы. Мотор соединяется с регулятором тремя проводами и достоверно угадать правильную полярность невозможно. Даже если провода на выходе регулятора разноцветные, цвет ничего не означает. Поэтому сначала выполняется пробное подключение и проверяется направление вращения моторов. Разумеется, нужно делать это без пропеллеров! Вращение должно соответствовать указанному на схеме рис. 2.1. Если мотор вращается в противоположную сторону, достаточно поменять местами подключение *любых* двух выводов. После этого соединения нужно тщательно пропаять, изолировать термоусадочной трубкой и аккуратно уложить провода вдоль луча. Настоятельно рекомендуем именно *пропаивать* все силовые соединения и не использовать разъемы.

Для проверки вращения мотора можно поочередно подключать регуляторы к выходу сервотестера или канала газа приемника и питать их от силовой батареи. Если регуляторы не стартуют от сигнала приемника или сервотестера без предваритель-

ной калибровки, то временно отложите окончательное подключение моторов. После того как мы откалибруем регуляторы с помощью специального режима контроллера, можно будет проверить правильность соединения и окончательно припаять выводы моторов.

Далее на раму монтируется распределитель питания, к нему подключаются провода питания регуляторов и разъем для подключения силовой батареи. Не забудьте сразу подключить к распределителю питания гибкий двужильный провод — отвод питающего напряжения, которое будете использовать для питания бортового оборудования через преобразователь $12V \rightarrow 5V$. Напомним, что использовать для питания контроллера источники $+5V$, встроенные в регуляторы, нежелательно, т. к. контроллер следует питать слегка завышенным напряжением 5,2–5,6 В. Кроме того, с регуляторов, работающих в квадрокоптере на больших токах, поступает напряжение, загрязненное помехами и пригодное разве что для питания сервомашинки. Заранее продумайте, в каком месте будет смонтирована плата источника $+5V$, и выведите провод от распределителя в это место.

Когда рама собрана, регуляторы и моторы установлены и подключены, установите на свое место контроллер и приемник. Воздержитесь от соблазна сразу смонтировать приемник GPS, модуль Bluetooth и прочее дополнительное оборудование. Сначала убедитесь в правильном соединении приемника и контроллера, откалибруйте регуляторы, проверьте направление вращения моторов и настройте параметры радиоканала.

Пробное подключение и настройку базового комплекта, состоящего из источника питания, приемника, контроллера, регуляторов и моторов, можно выполнить на столе. В этом случае сразу наклейте бирочки из скотча или самоклеящейся бумаги на все провода и разъемы, чтобы в дальнейшем при монтаже или ремонте не терять время и не допустить ошибки.

Примите за правило подключать дополнительное оборудование пошагово. На каждом этапе полностью завершайте все необходимые настройки и проверяйте работу устройства в полете. Только после этого приступайте к подключению следующего модуля. Помните, что при неудачном сочетании взаимного расположения или неправильной разводке питания некоторые модули могут мешать друг другу. Например, следует максимально разносить в пространстве антенны передатчиков телеметрии и видеоканала и антенну приемника радиоуправления.

Настройка опций и параметров прошивки

Если вы изготавливаете квадрокоптер самостоятельно, а не запускаете покупной "из коробки", то вам придется настроить прошивку полетного контроллера под свои потребности. Настройка состоит из двух этапов: конфигурирование опций программного кода и настройка параметров прошитого контроллера.

Параметры прошивки делятся на две категории: постоянные и переменные. Постоянные параметры настраиваются один раз в самом начале. К таким параметрам относятся тип рамы, тип полетного контроллера и прочие, не требующие изменения

в процессе эксплуатации. Переменные параметры требуют уточнения и подстройки в процессе испытаний и отладки. Это настройки программного фильтра вибрации, параметры обратной связи PID и некоторые другие.

ПРИМЕЧАНИЕ

Не пытайтесь раз и навсегда настроить все параметры прошивки. Это невозможно, т. к. в процессе эксплуатации и развития конструкции все равно придется вносить коррективы. Если же в процессе настройки вы допустите несколько ошибок одновременно, то выявить их может быть трудно. Лучше начать с настройки базовых параметров и убедиться в надлежащей работе контроллера, после чего поэтапно настраивать прошивку под свои периферийные модули.

Исторически так сложилось, что в популярных прошивках используется Arduino-совместимый программный код. Напомним, что мы будем использовать полетный контроллер Crius All-In-One (AIO) и прошивку MultiWii v.2.30, которая достаточно стабильна и проверена на момент написания книги. Архив с прошивкой и утилитой конфигурирования доступен для скачивания по адресу <https://code.google.com/p/multiwii/>. В качестве настольного компьютера использовался компьютер с операционной системой Windows 7.

Подключение платы контроллера к компьютеру

Плата полетного контроллера подключается к порту USB компьютера через разъем mini-USB. Обратите внимание, что в этом случае плата питается от порта USB компьютера. Это налагает ряд ограничений.

- ❑ Используйте только качественный кабель, в противном случае плата будет работать со сбоями, либо соединение вообще не установится.
- ❑ Проверьте напряжение питания, поступающее с компьютера. Зачастую оно бывает занижено до 4,5–4,6 В. Контроллер не будет стабильно работать при таком напряжении питания. При необходимости приобретите либо дополнительный разветвитель USB с внешним источником питания, либо картридер формата 5,25" с разъемами USB и питанием напрямую от блока питания компьютера.
- ❑ Настоятельно не рекомендуется подключать иные источники питания к плате при подключении ее к разъему USB.

Соединение с компьютером происходит через встроенный на плату конвертер USB-COM на популярной микросхеме FTDI FT232. Если вы впервые подключаете устройство на основе этой микросхемы, то потребуется установка драйвера. Вы можете либо положиться на автоматическую установку драйвера средствами Windows, либо скачать установочный файл драйвера на сайте производителя <http://www.ftdichip.com/Drivers/VCP.htm>.

Когда драйвер установлен, при подключении контроллера в системе появляется виртуальный COM-порт. Откройте диспетчер устройств компьютера (рис. 5.6): **Панель управления | Диспетчер устройств | Порты (COM и LPT)**.

Запомните номер порта, который появляется при подключении контроллера. В вашей системе он может отличаться от номера на иллюстрации. Номер также может

измениться при включении в другое гнездо USB. Больше никакие действия по настройке подключения не требуются. Если драйвер установлен правильно, вы не должны вообще обращаться к настройкам порта, Windows все сделает автоматически.

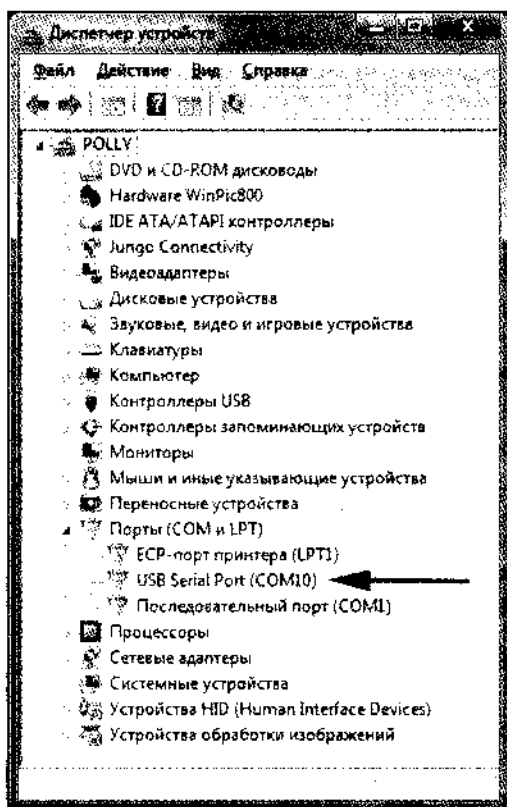


Рис. 5.6. Виртуальный COM-порт полетного контроллера

Среда разработки Arduino IDE

Прошивка распространяется в виде набора файлов исходных кодов, включая специальный файл конфигурации. В общем случае, в файл конфигурации необходимо внести поправки в соответствии со своими нуждами, а затем скомпилировать прошивку и записать ее в полетный контроллер. Это несложно, даже если раньше вы никогда не сталкивались с программированием микроконтроллеров.

Прежде всего, скачайте с сайта www.arduino.cc самую свежую версию среды разработки Arduino IDE. На момент написания книги это была версия 1.6.1. Если вы захотите использовать старую версию прошивки MultiWii v2.20, то для компиляции придется использовать архивную версию Arduino IDE 1.0.5, иначе при компиляции будут возникать ошибки. Для установки достаточно запустить инсталлятор и подтвердить запросы на установку по умолчанию. Обе версии Arduino IDE могут быть установлены на компьютер одновременно, но в разные папки.

После окончания установки подключите контроллер к компьютеру и запустите Arduino IDE. Откроется стартовое окно с пустым проектом. В терминах Arduino программа для микроконтроллера называется скетч. Теперь нужно настроить компилятор под нужный микроконтроллер и указать номер порта для связи. Выберите меню **Инструменты | Плата | Arduino Mega 2560**.

Затем выберите порт: **Инструменты | Порт** и задайте номер порта COM, который соответствует вашей плате. Если плата не подключена, то нужный порт в списке не появится.

ПРИМЕЧАНИЕ

Микроконтроллер ATmega2560 оснащен энергонезависимой памятью (EEPROM) емкостью 4096 байт. В этой памяти хранятся настроечные константы прошивки MultiWii. Перед загрузкой новой прошивки EEPROM необходимо очистить. В противном случае прошивка может работать неправильно, либо не заработает вообще.

Для очистки EEPROM загрузите специальный короткий скетч из папки готовых примеров Arduino: **Файл | Образцы | EEPROM | eeprom_clear**. Скетч откроется в новом окне, но настройки платы и порта останутся прежними.

ПРИМЕЧАНИЕ

Имейте в виду, что загрузка любой новой программы в память контроллера стирает записанную ранее. Если вы взяли чужой контроллер на время или не уверены, что хотите уничтожить имеющуюся прошивку, то не загружайте в память контроллера новые программы!

В строке

```
for (int i = 0; i < 512; i++)
```

исправьте значение 512 на 4096, чтобы очистить EEPROM полностью:

```
for (int i = 0; i < 4096; i++)
```

Теперь нажмите кнопку со стрелкой для загрузки программы в микроконтроллер. В течение нескольких секунд произойдет компиляция исходного текста программы в машинные коды, затем плата весело мигает светодиодами во время загрузки прошивки. Примерно через три секунды после загрузки светодиод А на плате начнет светиться постоянно. Это означает, что процесс очистки EEPROM завершен и контроллер готов к записи и настройке новой прошивки. Файлы примеров Arduino IDE защищены от записи, поэтому сохраните исправленный скетч очистки EEPROM в другое удобное место.

Память EEPROM нужно чистить, если:

- это первая загрузка прошивки в память контроллера, или предыдущая версия неизвестна;
- меняется версия прошивки;
- меняется тип коптера;
- меняется состав датчиков платы или их тип;
- после записи новой прошивки коптер стал вести себя неадекватно.

В остальных случаях, когда вы ограничиваетесь правкой настроечных параметров, стирать EEPROM перед повторной записью прошивки не надо.

Настройка базовых опций кода прошивки

Ранее вы скачали и разархивировали проект прошивки MultiWii. Проект состоит из нескольких файлов. Файлы скетчей имеют расширения `.ino` или `.cpp`; файлы так называемых заголовков имеют расширения `.h`. В среде Arduino имя папки проекта обязательно совпадает с именем главного файла проекта. Например, если папка носит имя `MultiWii_AIOP`, то главный файл в этой папке называется `MultiWii_AIOP.ino`.

Откройте главный файл двойным щелчком или через меню **Файл | Открыть**. При этом в среде Arduino IDE откроются все файлы проекта. Сейчас нас интересует только файл `config.h`. В нем подробно расписана конфигурация прошивки. Остальные файлы, если вы не имеете четкого понимания своих действий, лучше не трогать.

Механизм конфигурирования прошивки MultiWii, как, впрочем, и многих других программ для микроконтроллеров, основан на так называемых "дефайнах" — служебных директивах компилятора `#define` (определить). После этой директивы через пробел следуют имя параметра и его значение. В коде программы вместо конкретного значения указывают имя параметра. Во время обработки программного кода компилятор отыскивает имя параметра и автоматически подставляет вместо него соответствующее значение.

Например, если определен некий параметр

```
#define MY_PARAMETER 10
```

и он несколько раз используется в разных местах очень длинной программы, то впоследствии нам достаточно лишь один раз заменить его значение в определении, а остальные замены сделает компилятор. Для удобства настройки все необходимые определения вынесены в отдельный файл проекта и снабжены комментариями.

Наличие или отсутствие определений, указанных без значения, используется для того, чтобы иметь возможность скомпилировать разные варианты программы.

Например, имеются два определения

```
#define HELICOPTER
//#define AIRPLANE
```

при этом второе определение закрыто символом комментария `//` и невидимо для компилятора. Теперь, если в программе встретятся такие два фрагмента:

```
#ifdef HELICOPTER
    Фрагмент программы 1;
#endif
#ifdef AIRPLANE
    Фрагмент программы 2;
#endif
```

то компилятор обработает первый фрагмент кода и проигнорирует второй, потому что определение AIRPLANE закомментировано и не существует. И наоборот, если мы закомментируем определение HELICOPTER и раскомментируем AIRPLANE, то будет скомпилирован второй фрагмент кода.

Существуют и более сложные условные конструкции директив компилятора, но нам сейчас достаточно знать два метода, применяемые при пользовательском конфигурировании прошивки: задание численных значений и комментирование/раскомментирование имен параметров.

В группе однотипных параметров должна быть раскомментирована *только одна* строка. Если вы раскомментировали новую строку, не забудьте закрыть комментарием предыдущую. В противном случае возникнет неоднозначность, которая приведет к ошибке компиляции, либо неправильной работе прошивки.

Итак, щелчком на закладке в окне IDE откройте файл config.h. Сейчас мы сконфигурируем по порядку самые необходимые параметры. После этого нужно загрузить прошивку в контроллер и проверить, как он работает. По мере подключения внешних модулей (GPS, дисплей и т. д.) мы будем вновь обращаться к настройке прошивки.

Тип рамы

В секции 1 — BASIC SETUP найдите и раскомментируйте строку, которая обозначает X-образную раму:

```
#define QUADX
```

Минимальный рабочий газ

ВНИМАНИЕ!

Помните, что параметры сигналов, поступающих с приемника на контроллер, и сигналов, поступающих с выходов контроллера на моторы или сервомашинки, — это совершенно разные значения. Контроллер перерабатывает входные сигналы согласно своим алгоритмам. При настройке прошивки используются длительности как входных, так и выходных сигналов.

Минимальный рабочий газ означает *длительность выходных* импульсов, поступающих с контроллера на регуляторы в режиме ожидания, при минимальном положении рукоятки газа на пульте. Из соображений безопасности настоятельно рекомендуется задавать это значение таким, чтобы при активированных моторах (режим ARMED) пропеллеры вращались с минимальной скоростью, предупреждая об опасности.

```
##define MINTHROTTLE 1300 // for Turnigy Plush ESCs 10A
##define MINTHROTTLE 1120 // for Super Simple ESCs 10A
##define MINTHROTTLE 1064 // special ESC (simonk)
##define MINTHROTTLE 1050 // for brushed ESCs like ladybird
#define MINTHROTTLE 1150 // (*)
```

Вы можете либо выбрать один из готовых параметров, либо опытным путем подобрать под свои регуляторы такое минимальное значение, при котором моторы начинают вращаться на холостом ходу после активации. Если ваших регуляторов нет в списке значений, оставьте раскомментированной строку по умолчанию. Но при указанном значении 1150 моторы могут вращаться слишком быстро, исправьте на 1090. Впоследствии вы сможете скорректировать его, проверяя собранный коптер. Если же вы решили пренебречь требованиями безопасности, задайте такое значение, при котором моторы не вращаются при активации (режим ARMED). Обычно это значение немного больше 1000.

Максимальный рабочий газ

Это длительность *выходного* сигнала контроллера, при котором регулятор развивает максимальные обороты мотора. Параметр одинаковый для всех каналов. Также может потребовать подстройки опытным путем.

```
#define MAXTHROTTLE 1850
```

Если вы не знаете значение для своего регулятора, можете оставить значение по умолчанию. Не следует задавать значение большее, чем способны принять ваши регуляторы. Это чревато некорректным масштабированием управляющих сигналов контроллера, что приведет к не совсем адекватной реакции на резкие внешние воздействия. С другой стороны, слишком низкое значение сужает динамический диапазон оборотов для акробатического пилотирования. Впоследствии, разлив свои навыки пилотирования до акробатики, вы сможете проверить правильность настройки этого параметра при помощи тахометра. В графике оборотов мотора не должно быть горизонтальной площадки, когда вы увеличиваете газ на пульте, а фактические обороты мотора больше не растут.

Минимальный газ при включении

```
#define MINCOMMAND 1000
```

Это минимальное значение импульсов газа, которое подается на регуляторы, когда моторы не активированы. В регуляторы встраивается защита от включения, если газ при подаче питания не на "нуле", чтобы не нанести ущерб внезапным запуском пропеллера при подаче питания. Но у некоторых регуляторов защитный порог меньше 1000, поэтому может понадобиться уменьшить значение MINCOMMAND примерно до 900.

Скорость шины I²C

```
#define I2C_SPEED 100000L
//#define I2C_SPEED 400000L
```

Это скорость обмена данными между процессором и встроенными и/или внешними сенсорами и модулями. Начальную настройку и проверку работы платы желательно проводить на низкой скорости, стандартной для большинства плат контролле-

ров. Впоследствии можно проверить способность платы работать на высокой скорости, контролируя наличие ошибок шины через конфигуратор или на подключаемом дисплее.

Тип стандартной платы

Разработчики прошивки подготовили набор готовых конфигураций для множества популярных полетных контроллеров. В конфигурации описываются применяемые датчики и подпрограммы для работы с ними. Найдите и раскомментируйте нашу плату:

```
#define CRIUS_AIO_PRO_V1
```

Не обращайте внимание на версию платы. Прошивка подойдет и для второй версии.

Независимые сенсоры

Данная секция предназначена для опытных пользователей. Ничего не меняйте в этой секции без необходимости. Если вы используете самодельную или нестандартную плату, то можете закомментировать все наименования плат в предыдущей секции, а затем раскомментировать нужные датчики по отдельности в соответствии с компонентами своего полетного контроллера. В этой же секции можно указать положение микросхем акселерометра, гироскопа и компаса относительно положения рамы.

Активация моторов (арминг)

В секции 2, озаглавленной COPTER TYPE SPECIFIC OPTIONS, сейчас нам может понадобиться только параметр

```
#define ALLOW_ARM_DISARM_VIA_TX_YAW  
//#define ALLOW_ARM_DISARM_VIA_TX_ROLL
```

Первая строка обозначает активацию моторов перемещением рукоятки газа вниз вправо до упора (ARM) и деактивацию в позиции вниз влево (DISARM). Это стандартный способ активации. Если закрыть первую строку и раскрыть вторую, то будет работать активация двумя рукоятками.

Позже в этой же секции мы будем настраивать управление стабилизированным подвесом камеры.

Модификации радиоприемника

Если вы используете стандартное подключение отдельных каналов приемника, когда каждый выход приемника подключается к соответствующему входу контроллера, то эту секцию можно пропустить. По умолчанию в ней закрыты все параметры.

Если используется приемник, оснащенный только выходом PPM-SUM, раскомментируйте под него одну из строк

```
//#define SERIAL_SUM_PPM ...
```

соответствующую информации в тексте комментария, и подайте сигнал на вход PPM платы контроллера. Если раскомментировать строку

```
//#define PPM_ON_THROTTLE
```

то сигнал PPM-SUM подается на вход канала газа контроллера Crius AIOP.

При подключении приемника-спутника Spektrum раскомментируйте строку

```
//#define SPEKTRUM 1024
```

если используется приемник DSM2, и строку

```
//#define SPEKTRUM 2048
```

если используется приемник DSMX. Физически приемник подключается ко входу Rx одного из последовательных портов. По умолчанию это SERIAL1, но вы можете раскомментировать расположенную ниже строку

```
//#define SPEK_SERIAL_PORT 1
```

и указать нужный порт 0, 1 или 2. Убедитесь, что этот порт не будет занят другим устройством.

Для подключения Futaba S-BUS сигнал необходимо инвертировать при помощи простейшего самодельного инвертора. Мы рассмотрим этот вопрос в *разд. "Подключение приемника по шине S-BUS" главы 6.*

Есть ряд проблем с подключением приемников по шине S-BUS. Недорогие и популярные приемники Orange RX9 имеют выход S-BUS, якобы совместимый с оригинальным протоколом Futaba, но поддержка этой опции реализована в приемнике некорректно. Насколько известно автору, пока никому не удалось использовать этот выход приемников Orange для подключения к полетному контроллеру одним сигнальным проводом. В коде прошивки MultiWii v2.20 также некорректно работает часть кода, отвечающего за прием и декодирование сигнала S-BUS, но впоследствии в код были внесены поправки.

Скорость портов

Для связи с большинством внешних модулей, а также для подключения к компьютеру используются встроенные последовательные порты SERIAL0–SERIAL3. Максимальная допустимая скорость любого из портов 115 200 бит/с.

```
#define SERIAL0_COM_SPEED 115200
#define SERIAL1_COM_SPEED 115200
#define SERIAL2_COM_SPEED 115200
#define SERIAL3_COM_SPEED 115200
```

Порт SERIAL0 используется для подключения к компьютеру. Через этот порт происходит обмен информацией с программами настройки и управления. Также к это-

му порту подключается адаптер Bluetooth или радиомодем для беспроводного соединения с компьютером или смартфоном. К порту SERIAL1 подключают выход приемника S-BUS. Порт SERIAL2 используется для подключения приемника GPS. К порту SERIAL3 подключается модуль OSD и/или телеметрии.

При начальной настройке нет необходимости менять параметры по умолчанию. В дальнейшем скорость может быть установлена в соответствии с параметрами применяемого внешнего модуля. Если вы изменили скорость порта SERIAL0, то не забудьте указать новую скорость в настройках интерфейсной программы WinGUI на компьютере.

Фильтр гироскопа

Как мы уже говорили ранее, гироскопы и акселерометры очень болезненно реагируют на вибрацию, поэтому приходится применять программную фильтрацию потока данных с датчиков. По умолчанию программный фильтр для гироскопов имеет максимальную полосу пропускания. Предполагается, что вы достаточно хорошо отбалансировали винтомоторные пары. Если же балансировка не позволяет устранить негативное влияние вибрации на гироскопы, которое проявляется в хаотичном и внезапном подергивании коптера по крену и курсу, придется опытным путем подобрать нужный фильтр. Сначала определите, какой интегральный гироскоп используется, ITG3200/ITG3205 или MPU6050. На платах Cirus AIOP используется микросхема MPU6050. Далее выберите один из вариантов частоты среза фильтра:

```
//#define MPU6050_LPF_256HZ
//#define MPU6050_LPF_188HZ
//#define MPU6050_LPF_98HZ
//#define MPU6050_LPF_42HZ
//#define MPU6050_LPF_20HZ
//#define MPU6050_LPF_10HZ
//#define MPU6050_LPF_5HZ
```

Числовой параметр означает, что все колебания с частотой выше указанной будут подавлены цифровым фильтром прошивки. Первая строка используется по умолчанию и подходит только для микрокоптеров. Для коптера с диагональю около 450 мм и пропеллерами 10–11 дюймов следует начинать настройку с частоты 98 Гц. Большинство средних коптеров хорошо летают с фильтром на частоту среза 42 Гц.

К сожалению, не существует алгоритма быстрой настройки гироскопа. Это долгая и достаточно хлопотная процедура. Раскомментировав одну из строк, нужно попробовать полетать минут 10, внимательно следя за поведением коптера в разных режимах. Затем раскомментировать другую строку, закрыв предыдущую, и сравнить поведение коптера в воздухе. Для этого придется брать с собой в поле ноутбук и USB-провод, чтобы не возвращаться домой для перепрошивки. После того как вы окончательно остановились на одном из фильтров, понадобится заново настроить параметры PID через конфигуратор.

Функция Failsafe

Эта функция по умолчанию отключена в стандартной прошивке строкой

```
//#define FAILSAFE
```

но ее лучше включить, даже если ваш приемник оснащен неотключаемой функцией Failsafe. Абсолютная надежность работы приемника, особенно в непроверенной конструкции, не гарантирована. Например, питание приемника может внезапно пропасть из-за плохого контакта. Функция Failsafe контроллера активируется, если импульсы на одном из выходов приемника CH1–CH4 пропадают или делаются короче 985 мкс. Параметр в строке

```
#define FAILSAFE_DELAY 10
```

задает интервал времени с шагом 0,1 с, по истечении которого включается Failsafe после пропадания сигнала. При этом включается режим стабилизации горизонта, сигналы YAW, PITCH, ROLL выставляются в среднее положение и коптер начинает снижаться. Скорость снижения задается в строке

```
#define FAILSAFE_THROTTLE (MINTHROTTLE + 200)
```

Числовой параметр этой строки надо выбрать такой, чтобы скорость снижения составляла около 1 м/с. После настройки потребуется экспериментальная проверка. Если коптер снижается слишком быстро, увеличиваем значение.

По истечении интервала с шагом 0,1 с, указанного в строке

```
#define FAILSAFE_OFF_DELAY 200
```

моторы коптера отключатся.

Минимальная длительность импульсов для срабатывания Failsafe определяется в строке

```
#define FAILSAFE_DETECT_TRESHOLD 985
```

Мертвая зона и нейтральная зона

Предполагается, что коптер не должен реагировать на незначительные отклонения управляющих сигналов от центрального положения, потому что такие отклонения обусловлены скорее несовершенством аппаратуры, чем действиями пилота. По умолчанию задано значение ± 6 .

```
#define DEADBAND 6
```

Если у вас качественная аппаратура со стабильными отцентрованными значениями сигнала, можно уменьшить значение этого параметра или закомментировать его.

Значение нейтральной зоны задает интервал изменений положения рукоятки газа, внутри которого коптер не реагирует на газ в режиме удержания высоты. Если изменение газа выходит за пределы заданного интервала, удержание высоты временно игнорируется и коптер начинает подниматься или снижаться.

```
#define ALT_HOLD_THROTTLE_NEUTRAL_ZONE 50
```


Магнитное склонение

Магнитное склонение определяется в секции настроек GPS, но вписать его нужно сразу для правильной последующей калибровки компаса и работы функции Head Free. Определите магнитное склонение для своей местности на сайте www.magnetic-declination.com (рис. 5.7).

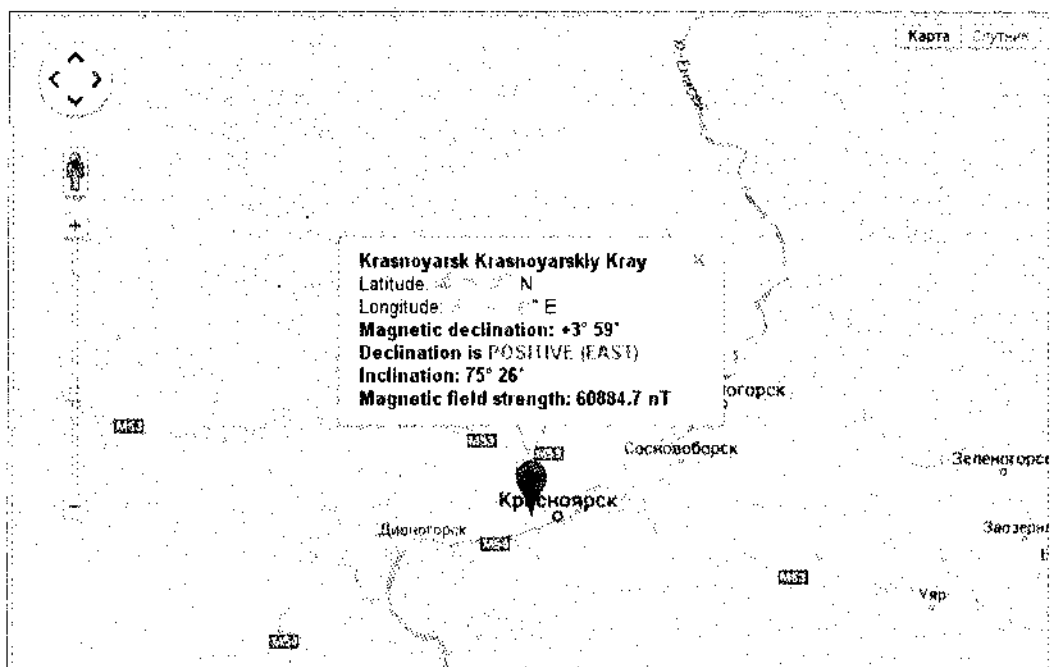


Рис. 5.7. Определение магнитного склонения

В примере на рисунке магнитное склонение положительное и составляет 3°59'. Но в прошивке используется значение с десятичными долями градуса. Для конвертации надо к целому значению градусов прибавить значение минут, деленное на 60:

$$3^{\circ}59' \rightarrow 3^{\circ} + 59'/60 = 3,98^{\circ}.$$

Впишите это значение в строку

```
#define MAG_DECLINATION 3.98f
```

В связи с дрейфом магнитных полюсов значение склонения нужно периодически проверять на сайте и обновлять в прошивке.

* * *

На этом базовая настройка прошивки завершена. Сохраните файлы, скомпилируйте прошивку и загрузите ее в контроллер. Перед этим память EEPROM контроллера должна быть очищена, как сказано в начале раздела. После завершения загрузки прошивки на плате контроллера должны быстро мигать светодиоды А и С. Это означает, что контроллер ожидает от вас команду калибровки акселерометров. В этом

состоянии контроллер еще не готов к полетам. Для дальнейшей настройки нам понадобится утилита конфигурации с визуальным интерфейсом, установленная на компьютер. Таких утилит две: упрощенная MultiWiiConf и более сложная MultiWii WinGU.

Альтернативная прошивка MaHoWii

Проекту MultiWii, как и многим другим открытым проектам, присуще наличие ответвлений — альтернативных вариантов, настроенных под специфические цели или имеющих дополнительные опции. Начинаящим владельцам мультикоптеров в качестве альтернативы настоятельно рекомендуем прошивку MaHoWii. Детальное описание опций прошивки можно прочесть в дневнике разработчика по адресу <http://forum.rcdesign.ru/blogs/83206/blog17033.html> и в комментариях к дневнику.

Прошивка MaHoWii особенно хороша для начинающих. Существует упрощенная и заранее настроенная версия RC2.1_base, которая "из коробки" обеспечивает стабильный полет практически любого коптера с минимальными коррективами настройки либо вообще без изменений. Но в базовой версии отсутствует режим удержания высоты и поддержка GPS. Для более опытных пилотов предназначена полная версия MaHoWii RC3.

Основными достоинствами этой прошивки для начинающего пилота являются следующие опции:

- эффективный режим удержания высоты;
- возможность задать минимальную "защитную" высоту полета, ниже которой коптер не опустится в случае ошибки пилотирования;
- эффективный фильтр вибропомех;
- динамическая автокоррекция высоты при пролетах, когда рама наклонена;
- поддержка ультразвукового сонара.

Кроме специфических параметров, описанных в дневнике разработчика, все остальные настройки соответствуют стандартной версии MultiWii. Прошивка MaHoWii спонсируемая, т. е. для получения актуальной версии прошивки необходимо сделать фиксированный взнос на поддержку проекта.

В дальнейшем, говоря про настройку прошивки, мы будем подразумевать стандартный вариант прошивки MultiWii, а особенности MaHoWii при необходимости отмечать отдельно.

Важно!

Для компиляции прошивки MaHoWii следует использовать старую версию Arduino IDE 1.0.5, т. к. при использовании версии 1.6.x будут появляться ошибки компиляции из-за смены версии компилятора GCC.

Функциональные режимы контроллера

Прежде чем приступить к использованию программ-конфигураторов, нужно разобраться с функциональными режимами контроллера, которые переключаются при помощи органов управления пульта. Некоторые из этих режимов для платы Cirus AIOР доступны всегда и в списке помечены звездочкой (*), остальные становятся доступными после настройки опций прошивки MultiWii. В других разновидностях прошивок многие опции имеют похожее или идентичное название и значение. Правила включения режимов настраиваются в конфигураторе, поэтому надо хорошо понимать, что мы будем настраивать.

ARM*: режим активации моторов. Управляется либо комбинацией положения рукояток пульта (см. приложение 3), либо тумблером одного из каналов AUX. Если моторы не активированы (disarmed), то регуляторы оборотов находятся в режиме ожидания, питание на моторы не подается. Коптер никак не реагирует на движение рукояток управления. Но в режиме ожидания контроллер ведет полноценный обмен информацией с периферийными модулями, ждет захват спутников GPS, передает телеметрию и т. д. После активации моторов (armed) моторы работают в минимальном режиме. Коптер реагирует на рукоятки управления и полностью готов к взлету. Это опасный режим, коптер следует активировать только непосредственно перед взлетом.

LEVEL (ANGLE)*: режим автоматической стабилизации положения коптера за счет гироскопов и акселерометров. Когда режим активен, при отклонении рукоятки крена Pitch-Roll контроллер "запоминает" углы текущего положения коптера в пространстве (level) и автоматически поддерживает это положение даже при возврате рукояток в нейтраль. Для выравнивания коптера в горизонталь нужно сместить рукоятку в противоположном направлении за нейтраль.

HORIZON*: режим автоматического выравнивания коптера в горизонтальное положение при возврате рукоятки Pitch-Roll в нейтраль. В остальном схож с режимом LEVEL и, по сути, представляет собой его модификацию. Чем сильнее рукоятка крена отклоняется от нейтральной, тем меньше удельный вес показаний акселерометра и тем больше вес показаний гироскопа в алгоритме стабилизации. Это помогает динамично управлять коптером. Но при возврате в нейтраль коптер автоматически возвращается в горизонтальное положение, соответствующее откалиброванному нулевому положению акселерометра. Режим особо рекомендуется начинающим пилотам, и при полетах по FPV достаточно просто отпустить рукоятку и правильно настроенный коптер сам выровняется и зависнет на месте (для стабилизации по высоте нужен еще и барометр).

Режимы LEVEL и HORIZON взаимоисключающие и не должны включаться одновременно. Рекомендуется присоединить их к одному каналу AUX, чтобы при одном положении тумблера включался режим LEVEL, а при другом HORIZON. Если оба режима отключены, работает стабилизация только за счет датчиков угловых ускорений — настоятельно НЕ рекомендуется так делать начинающим пилотам. Опытным вертолетчикам полет "на гироскопах" не составит особого труда.

BARO*: режим удержания высоты по барометру в положении газа, близком к точке висения. Доступен при наличии микросхемы интегрального барометра на плате. Работает независимо от других режимов. Режим начинает работать более-менее точно на высоте более 2–3 м. На меньшей высоте воздушная подушка и завихрения у земной поверхности, создаваемые винтами, вносят слишком большую погрешность в показания барометра. В некоторых версиях прошивки режим **BARO** может препятствовать полной посадке коптера и отключению моторов, поэтому его следует включать после взлета, на рабочей высоте, и отключать перед посадкой. В современных алгоритмах показания барометра учитываются совместно с показаниями акселерометра по вертикальной оси *z*, что позволяет гасить быстрые вертикальные флуктуации. Причем показаниям акселерометра при краткосрочных девиациях отдается предпочтение.

VARIO: модификация режима удержания высоты, когда скорость изменения высоты зависит от степени отклонения рукоятки газа от точки зависания. Чем сильнее отклонили рукоятку, тем быстрее меняется высота полета. При возврате газа в точку висения происходит фиксация новой высоты. Во многих современных вариантах прошивок режим **VARIO** не выделяется в отдельную опцию, а применяется некий универсальный алгоритм удержания высоты, который гибко реагирует на изменение положения рукоятки газа. Иногда носит название **ALTHOLD** или похожее.

MAG*: режим включения магнетометра. Доступен при наличии микросхемы интегрального магнетометра на плате. Используется для стабилизации коптера по курсу, поскольку стабилизации курса на основе одного гироскопа присуща нарастающая погрешность. Но зачастую включение магнетометра только вредит. При наличии магнитных наводок от силовых цепей могут происходить самопроизвольные повороты по курсу при увеличении и уменьшении газа. В этом случае режим **MAG** лучше отключить.

HEADFREE*: режим удержания условного направления "вперед" независимо от физического положения рамы. *Требует наличия качественного магнетометра, защищенного от помех.* В момент активации моторов (включение **ARM**) контроллер запоминает курс, на который указывает физическое направление "вперед" рамы. Обычно это направление вперед от оператора. При вращении рамы вокруг своей оси во время полета контроллер пересчитывает направление по показаниям магнетометра. Поэтому с точки зрения оператора направления полета "вправо-влево" и "вперед-назад" остаются постоянными, независимо от разворота рамы в воздухе. Считается, что этот режим удобен и безопасен для начинающих операторов, часто теряющих контроль над направлением полета при удалении коптера на достаточное расстояние. Также этот режим предпочитают некоторые операторы при полетах по FPV.

HEADADJ*: режим корректировки направления "вперед" *во время работы* режима **HEADFREE**. Если в результате девиаций магнетометра утрачено правильное условное направление "вперед" или его нужно сменить по желанию оператора, или нужно просто полетать в обычном режиме, то можно временно включить **HEADADJ**. После отключения **HEADADJ** контроллер запоминает текущее положение "вперед" рамы коптера и дальнейший курс вычисляет уже от него.

CAMSTAB: режим стабилизации двухосевого подвеса камеры. При наклонах рамы контроллер старается стабилизировать положение подвеса. Активируется по каналу AUX, но обычно, при наличии подвеса, этот режим делают включенным постоянно.

CAMTRIG: спуск затвора фотокамеры или запуск/остановка видеозаписи. К специальному выходу TRIG на плате контроллера может быть подключен как электронный адаптер для управления камерой, так и сервомашинка, механически действующая на кнопку спуска камеры.

GPS HOME: режим автоматического возврата "домой" по координатам GPS. При наличии приемника GPS в режиме захвата спутников в момент активации моторов происходит запоминание координат. Затем, при включении режима **GPS HOME** коптер автоматически возвращается к точке старта и зависает на высоте, заданной в настройках прошивки. Эта функция очень полезна в режиме Failsafe и позволяет автоматически вернуть коптер при потере канала управления. При возврате используется компас.

GPS HOLD: режим автоматического удержания позиции по координатам GPS. Для качественного удержания высоты должен быть также включен режим BARO. Если отклонить рукоятку управления от нейтральной, режим удержания временно отключится, и коптер будет реагировать на команды управления. При возврате рукоятки в нейтраль контроллер зафиксирует новую позицию.

ПРИМЕЧАНИЕ

Режимы **GPS HOME** и **GPS HOLD** взаимоисключающие и не должны включаться одновременно.

PASSTHRU: режим сквозного прохождения сигналов радиоуправления с приемника на управляемое устройство. В коптерах не применяется. Может использоваться, например, в самолетах, когда пилот хочет временно отключить стабилизацию и перейти к полностью ручному управлению. При этом стабилизация видеокамеры может продолжать работать.

BEEPER: включение звукового излучателя (beeper, buzzer), подключенного к специальному выходу контроллера. Если в прошивке включено обслуживание звуковых сигналов и активирован режим **BEEPER**, то контроллер будет реагировать звуком на переключение режимов, а также издавать сигнал "найди меня" при срабатывании функции Failsafe.

LEDMAX: включение подсветки рамы коптера в постоянном режиме. Если используется функция прошивки **LED_FLASHER**, заставляющая подсветку коптера мигать с заданной частотой, то при активации режима **LEDMAX** в нее передается максимальное значение 0xFF, при котором подсветка горит постоянно. Это необходимо при полетах в ночное время, когда быстро мерцающая подсветка может сильно раздражать зрение.

LEDLOW: принудительное отключение подсветки, когда используется функция прошивки **LED_FLASHER**. При активации режима **LEDLOW** в нее передается минимальное значение 0x00, при котором подсветка не горит.

LLIGHTS: включение посадочных огней (Landing Lights) для подсвечивания посадочной площадки в темное время суток. Посадочные огни также могут включаться автоматически, по показаниям сонара, при достижении заданной высоты. Эта функция включается в настройках прошивки.

CALIB: если в прошивке включена возможность калибровки акселерометра в полете, то по включению режима **CALIB** во время стабильного горизонтального висения текущее положение запоминается, как нулевое калибровочное положение для акселерометра. В предыдущих версиях прошивки для этого мог использоваться переключатель режима **PASSTHRU**.

OSD SW: включение/выключение вывода информации OSD в полете, если такая возможность активирована в прошивке. По умолчанию поток данных доступен через последовательный порт всегда.

Конфигуратор MultiWiiConf

Эту программу вы скачали в архиве вместе с прошивкой. Для работы приложения потребуется движок Java от Sun Microsystems. Если Java отсутствует на вашем компьютере, при первом запуске вам будет автоматически предложено скачать и установить оболочку Java. Впоследствии Java понадобится и для программы настройки модуля OSD.

Утилита настройки не требует инсталляции. В разархивированной ранее папке выберите нужную версию программы в соответствии с вашей операционной системой. Перед запуском программы контроллер должен быть подключен к компьютеру, иначе нужный COM-порт не появится в списке. После запуска выберите нужный порт в списке и нажмите кнопку **START**. На плате контроллера должны мерцать светодиоды Rx-Tx, а в окне приложения появиться графики потока данных от сенсоров (рис. 5.8).

Калибровка акселерометра

Расположите плату строго горизонтально и нажмите кнопку **CALIB_ACC**. Приблизительно в течение 10 с произойдет калибровка акселерометров. В это время плата должна быть неподвижной и не испытывать вибрации. По завершении калибровки светодиоды А и С перестанут мигать непрерывно и будут мигать только при наклоне платы больше 18° от горизонтали, что означает критический нескомпенсированный угол, при котором коптер может начать "соскальзывать", если нет достаточной вертикальной тяги.

Теперь попробуйте наклонять и поворачивать плату. Авиагоризонт и компас в правой части окна должны отображать текущее положение контроллера в пространстве. Расположите плату контроллера стрелкой вперед. При наклоне вправо авиагоризонт должен наклоняться влево, и наоборот. Соответственно, при наклоне вперед уровень горизонта должен подниматься.

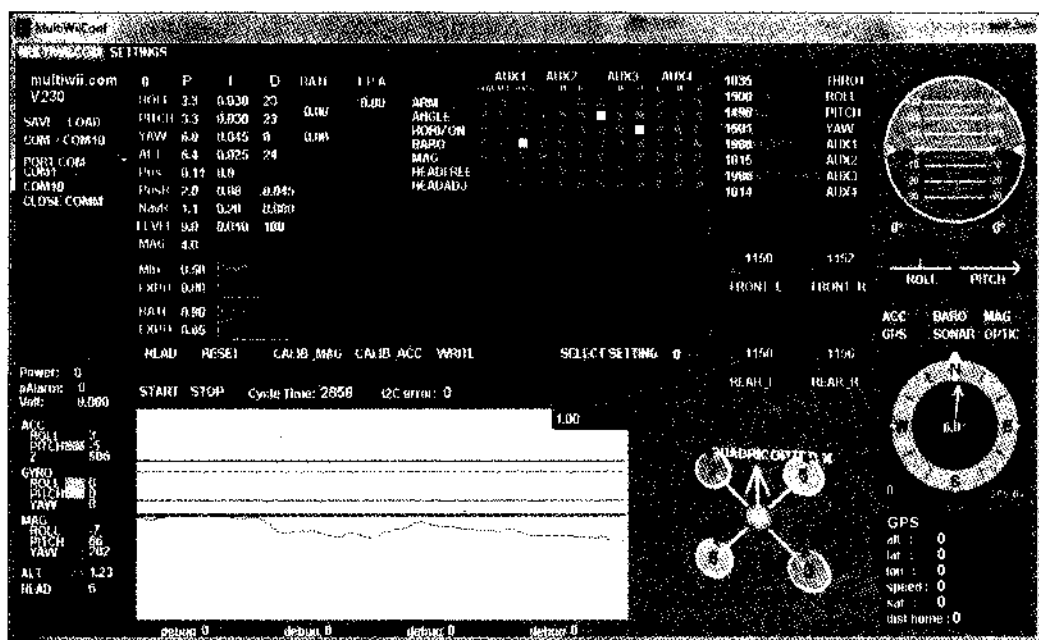


Рис. 5.8. Главное окно интерфейса MultiWiiConf

ПРИМЕЧАНИЕ

Распространенной ошибкой начинающих пилотов является неправильное понимание сути показаний авиагоризонта. Он показывает не абсолютное положение летательного аппарата относительно горизонтали, а вид линии горизонта глазами пилота, находящегося в кабине, как в компьютерной игре. Зеленый сегмент индикатора — это земля, голубой — небо.

Для редактирования числовых значений в данной Java-программе применяется довольно непривычный способ: щелкнуть мышью на числе и при зажатой левой кнопке мыши двигать мышью влево или вправо. Соответственно, число будет уменьшаться или увеличиваться. Затем нужно нажать кнопку **WRITE** для записи в память контроллера.

Значения по умолчанию, доступные для настройки через интерфейс, экспериментально подобраны разработчиками прошивки так, чтобы сделать максимально безопасным и комфортным первый полет усредненного коптера размером 450–500 мм весом до 1 кг, собранного из распространенных комплектующих. Вы можете быть уверены, что правильно и аккуратно собранный коптер достаточно хорошо полетит на параметрах по умолчанию. Но впоследствии некоторые параметры потребуют подстройки для более качественного управления именно вашим коптером.

Секция параметров **RATE** и **EXPO** характеризует отклик коптера на сигнал, поступающий с пульта. **RATE** — это коэффициент пропорциональности реакции коптера на изменение управляющего сигнала по кренам Pitch-Roll. Уменьшение коэффициента делает отклик более вялым и ограниченным по размаху. Параметр **EXPO** характеризует линейность отклика контроллера на угол отклонения рукояток. При

наличии экспоненты, при небольшом отклонении рукояток реакция невелика, при дальнейшем отклонении степень отклика нарастает нелинейно. Наличие экспоненты полезно для начинающих пилотов, которым присуще нервное дерганье рукояток пульта относительно нейтралы без необходимости. С другой стороны, резкий отклик при большом отклонении рукояток позволяет быстро парировать положение коптера в аварийной ситуации.

ПРИМЕЧАНИЕ

Экспоненты в настройках пульта и контроллера ни в коем случае не должны складываться! Настоятельно рекомендуется отключить (выставить в ноль) экспоненты в настройках всех каналов пульта управления и использовать только настройки контроллера, т. к. контроллер обрабатывает экспоненту более точно.

Секция параметров **MID** и **EXPO** относится к управлению газом. Параметр **MID** — это значение газа в процентах отклонения рукоятки, при котором коптер зависает в воздухе, не двигаясь по вертикали. Этот параметр используется, как опорный, в режиме удержания высоты по барометру и при расчете газа снижения после срабатывания Failsafe. Значение газа висения впоследствии обязательно надо уточнить экспериментально, засекая положение рукоятки газа для висения полностью снаряженного коптера при наполовину разряженной силовой батарее. Кривая экспоненты газа выглядит иначе, чем экспонента кренов. Она плоская в середине и дает более резкий отклик по обе стороны от средней точки. Для начинающего пилота лучше оставить линейную кривую газа с нулевой экспонентой. Обязательно убедитесь, что в пульте также установлена нулевая экспонента газа.

Секцию настройки параметров обратной связи **PID** пока не будем трогать и вернемся к ней после нескольких первых успешных полетов.

Секция параметров **AUX1**, **AUX2**, **AUX3**, **AUX4** должна быть настроена перед полетом. В ней определяется, каким образом полетные режимы контроллера переключаются при помощи дополнительных тумблеров или регуляторов пульта. В списке режимов появляются обязательные опции плюс дополнительные, которые на данный момент определены в прошивке и физически доступны. Например, на рис. 5.8 не видны режимы **GPS HOME** и **GPS HOLD**, потому что приемник GPS не подключен и в прошивку не поступает поток данных. Если в коде прошивки при помощи описаний `#define` активировать стабилизацию камеры или поисковый бипер, соответствующие строки также появятся в списке.

Параметр **TPA** (Throttle PID Attenuation) определяет степень ослабления влияния стабилизации при отклонении рукоятки газа от среднего положения. По умолчанию коэффициент равен нулю. Это означает, что система стабилизации коптера реагирует на внешние воздействия коптера одинаково при любом положении рукоятки газа.

Два поля значений **RATE** справа от секции **PID** также содержат коэффициенты уменьшения стабилизации, но при отклонении от нейтралы по осям Pitch-Roll и Yaw. Для спокойного стабильного пилотирования, полетов по FPV и висения нужно оставить нулевое значение. Чем ближе значения в этих полях к единице, тем меньше стабилизация коптера и тем быстрее и острее он реагирует на резкие от-

клонения рукояток. Для динамичного пилотирования нужно задать значения порядка 0,30; для агрессивной акробатики 0,65–0,70. При отпускании рукояток в нейтральное положение автоматическая стабилизация восстанавливается.

Для привязки режима к положению одного из переключателей AUX в нужной строке, напротив названия режима, включите белый квадратик щелчком мыши. Например, на иллюстрации показано, что режим удержания высоты **BARO** включится при максимальном значении канала AUX1. При минимальном значении канала AUX3 будет включен режим стабилизации **ANGLE**, а при максимальном значении этого канала — режим **HORIZON**. Установленные значения нужно обязательно записать в память, нажав кнопку **WRITE**. Если к контроллеру подключен приемник, можно сразу проверить правильность настройки, меняя положение тумблеров пульта.

Каналы AUX могут быть привязаны не только к тумблерам, но и к потенциометрам или трехпозиционным переключателям, чтобы задействовать среднее значение канала. Если нужно, чтобы какой-то режим (например, стабилизация камеры **CAM_STAB**) был включен всегда, поставьте галочки во все три значения любого канала AUX напротив нужного режима.

Контроллер может хранить в EEPROM три набора настроечных параметров. Это удобно, если надо быстро переключаться между разными стилями пилотирования или переставлять контроллер на разные платы.

В версии приложения 2.30 появилась вкладка окна **SETTINGS** (рис. 5.9). В этом окне можно изменить скорость порта для соединения с платой контроллера, а также

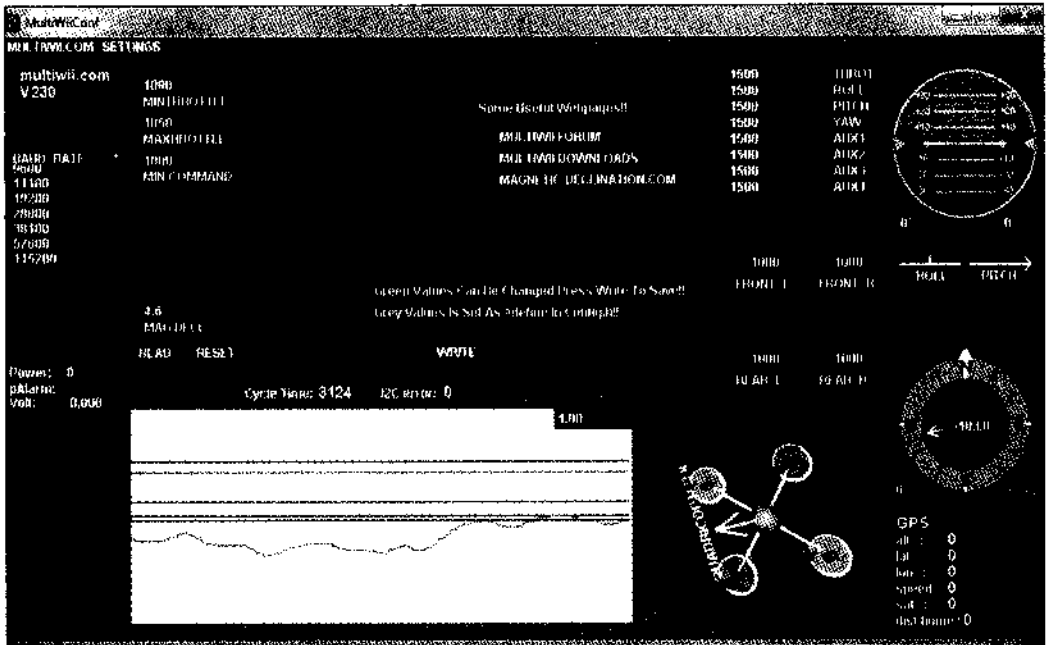


Рис. 5.9. Окно настроек MultiWiiConf

некоторые параметры прошивки без ее перезагрузки. Нажмите кнопку **READ**, чтобы прочитать все доступные для редактирования параметры. В данном случае без редактирования прошивки мы можем поменять параметры **MINTHROTTLE** (описание см. выше) и **MAG_DECL**.

Конфигуратор MultiWii WinGUI

Как следует из названия, это графический интерфейс (GUI) для настройки MultiWii в среде Windows. Конфигуратор оперирует тем же набором параметров, что и MultiWiiConf, но имеет более широкую функциональность. На момент написания книги был доступен для скачивания пререлиз бета #5 приложения WinGUI 2.30 — иными словами, приложение в состоянии разработки. Эта версия предназначена для работы с прошивкой MultiWii v2.30, имеет существенно переработанный дизайн интерфейса и, что самое главное, планировщик миссий для автоматических полетов по GPS.

Автору так и не удалось осуществить подключение новой версии к полетному контроллеру на компьютере под Windows 7. При попытке подключиться приложение выводило окно ошибки с сообщением о несоответствии параметров входного значения и отказывалось работать дальше. Будем надеяться, что к моменту выхода книги из печати будет доступен финальный или, хотя бы, более стабильный релиз.

К счастью, с прошивкой MultiWii 2.30 нормально работает WinGUI предыдущей версии 2.20 (рис. 5.10). Это стабильная, многократно проверенная и отлаженная версия, с которой легко и удобно работать. Скачайте архив и разверните его. Установка не требуется, достаточно запустить файл MultiWiiWinGUI.exe.

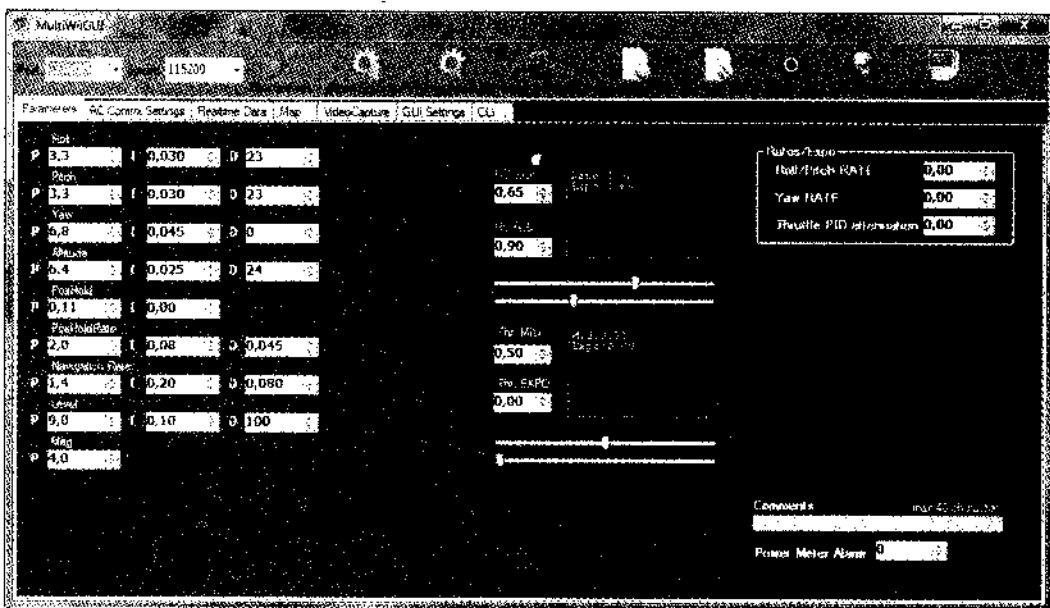


Рис. 5.10. Стартовый экран конфигуратора MultiWii WinGUI

К моменту запуска программы плата контроллера должна быть подключена к USB, иначе нужный порт не появится в списке. При работе с WinGUI никакое устройство не должно быть подключено к порту SERIAL0, иначе возникнет конфликт устройств. По умолчанию скорость обмена равна 115 200 бод. Если вы задали в настройках прошивки другую скорость порта SERIAL0, то не забудьте перед подключением выбрать эту скорость в меню. К некоторым экземплярам платы Crius AIOР подключение происходит не с первого раза. В этом случае нужно повторить попытку подключения или закрыть и снова запустить конфигуратор.

Прочие опции меню:

- Read Settings** — прочитать настройки из памяти контроллера;
- Write Settings** — записать настройки в память контроллера;
- Load Defaults** — восстановить в интерфейсе настройки по умолчанию. Затем нужно нажать кнопку **Write Settings**, чтобы перенести настройки в память контроллера;
- Load from File** — прочитать настройки из файла;
- Save to File** — сохранить настройки в файл;
- Start Log** — запись полетного лога (журнала) в файл;
- Start GPS Log** — запись лога данных GPS;
- Log Browser** — утилита просмотра записанных ранее логов с возможностью построения графиков.

Разумеется, пока контроллер лежит на вашем столе, в ведении логов нет необходимости. Для ведения логов в полевых условиях, во время полета, вам придется организовать радиоканал для передачи данных с борта коптера на ноутбук (радиолинк). Последующий анализ логов поможет выявить, например, в какой момент возникает сбой в работе коптера. Но, как правило, анализ логов нужен продвинутым пилотам, а для начала можно вполне обойтись без них.

Вкладка Parameters содержит секцию настроек PID, экспонент и коэффициентов. Назначение этих настроек рассмотрено выше, в описании конфигуратора MultiWiiConf. Разница лишь в более удобном способе ввода числовых значений.

Вкладка RC Control Settings содержит настройки зависимости режимов контроллера от состояния каналов AUX, которые также рассмотрены ранее. Не забывайте после изменения настроек записывать их в память контроллера, чтобы увидеть результат.

Вкладка Realtime Data отображает поток данных с сенсоров, радиоприемника и приемника GPS в режиме реального времени. Частоту обновления данных можно менять в диапазоне от 1 до 20 раз в секунду. Поскольку контроллер выдает эти данные по запросу конфигуратора, слишком частые запросы могут мешать контроллеру во время реального полета, когда скорость обмена данными невелика. На этой же вкладке можно запустить процедуры калибровки акселерометра и магнетометра.

Вкладка Map требует наличия работающего приемника GPS и доступа в Интернет для загрузки карты в соответствии с координатами, полученными с приемника. Провайдера карт можно выбрать в правом нижнем углу, в списке **Map Provider**.

Вкладка Video Capture предназначена для записи видео с любого источника видеосигнала, подключенного к компьютеру. Если говорить о записи видео с борта коптера, то компьютер должен быть оснащен либо устройством захвата видеосигнала, поступающего с выхода приемника FPV, либо видеоприемником, подключаемым по USB.

Вкладка GUI Settings содержит настройки путей для сохранения файлов логов и настроек. Также на этой вкладке можно задать набор данных, которые будут записаны в лог.

Вкладка CLI — это окно терминала (Command Line Interface). Обмен данными между контроллером и внешними программами происходит при помощи специального протокола MSP (MultiWii Serial Protocol). Внешняя программа посылает в контроллер команду запроса на чтение или запись данных, а контроллер обрабатывает эту команду, выгружая блок данных или записывая полученные данные в свою память. Когда открыта вкладка **CLI**, автоматический обмен данными с конфигуратором прекращается и система находится в ожидании ручного ввода команды. Ответ контроллера выводится в окне вкладки. Такой режим нужен только продвинутым пользователям, занимающимся модификацией и отладкой прошивки.

Терминал для работы с COM-портами

Некоторые дополнительные устройства, такие как модуль Bluetooth и радиомодемы, для настройки и проверки требуют отправки на них специальных текстовых команд и просмотра ответа на эти команды. Для этого на компьютере должна быть установлена программа терминала последовательного порта. Существует множество таких утилит, но на основании собственного опыта автор рекомендует использовать программу Termite 3.0. Программа очень простая и стабильная, ничего лишнего, но при этом имеются все необходимые настройки.

Архив с программой можно скачать на сайте разработчика: <http://www.compuphase.com/software/termite-3.1.zip>. Она не требует инсталляции, достаточно развернуть архив в удобное место. Вместе с программой рекомендуем скачать специальный шрифт GNU Unifont <http://www.compuphase.com/software/unifont-5.1.zip> и поместить его в одну папку с программой терминала. Шрифт отображает небуквенные служебные символы, если они встречаются в потоке данных. Эта опция может пригодиться в будущем.

При работе с дополнительными модулями потребуется проверить и изменить следующие настройки терминала.

- Номер последовательного порта. Это порт, который появляется в системе при подключении адаптера USB-COM. При подключении одного и того же устройства к разным разъемам USB номер порта может меняться.

- Скорость обмена с устройством. Для каждого устройства определена своя скорость по умолчанию, указанная в инструкции или описании.
- Присоединение символов конца строки и перевода каретки, <LF> и <CR>. Некоторые модули требуют наличия этих символов в конце команды, некоторые — нет.

Остальные настройки, как правило, менять не надо. Также не следует менять настройки соответствующего порта в системе Windows, т. к. при открытии программы терминала соответствующие параметры порта в системе будут установлены автоматически, на то время, пока открыт порт.

Программы для мобильных устройств

Программы для мобильных устройств позволяют настраивать коптер в полевых условиях, принимать и отображать телеметричную информацию, а также иногда управлять коптером вместо пульта радиоуправления. Для их взаимодействия с контроллером потребуется наличие беспроводного соединения по Bluetooth, а при больших дистанциях — радиомодема. Подключение модуля Bluetooth и радиомодема рассмотрено в *главе 6*. На момент написания книги для операционной системы Android были доступны три популярные утилиты конфигурации и телеметрии: NAZE32 Configurator, MultiWii Configuration Tool и EZ-GUI Ground Station. Их можно легко найти поиском в Google Play.

EZ-GUI Ground Station

Старое название этой программы — MultiWii EZ-GUI. Программа постоянно дорабатывается и модифицируется; разработчик активно участвует в общении на тематических форумах и аккуратно отвечает на вопросы и замечания пользователей. Программа не полностью бесплатная, доступ к полному пакету функций GPS и ведению логов полета необходимо купить. Но стоимость опции невысока, а функции очень полезные, поэтому рекомендуем приобрести их сразу после скачивания программы. *Ключ активации для платных опций хранится на карте памяти SD мобильного устройства, поэтому при активации и использовании программы карта памяти должна быть доступна.*

Интерфейс программы состоит из трех основных секций, которые прокручиваются поперечным движением. Перед началом работы программу нужно настроить. Войдите в меню **Конфигурации | Настройки**. Должен быть выбран тип связи Bluetooth. Далее нажмите кнопку **выбор Bluetooth**, чтобы выбрать модуль Bluetooth вашего коптера. Если модуля нет в списке спаренных устройств смартфона или планшета, нажмите кнопку **Поиск устройств** и проведите связывание Bluetooth с вашим мобильным устройством как обычно.

Далее, нажимая стрелку → в правом верхнем углу, последовательно пройдите остальные этапы настройки. Выберите версию прошивки, в нашем случае это MultiWii 2.3. Настройку голосовых уведомлений можно не менять. Уведомления голосом бывают полезны во время полета, но довольно навязчивы. Остальные два

экрана настроек пропустите. По завершении настройки программа перезапустится, и вы вновь окажетесь на главном экране. Щелкните по ссылке **Соединиться** в правом верхнем углу. Соединение устанавливается примерно 3–5 с. *Иногда, в зависимости от модели смартфона и модуля Bluetooth, соединение устанавливается со второй-третьей попытки.* Особенно это характерно для смартфонов Samsung. В отдельных случаях помогает перезагрузка смартфона.

Опции стартового экрана отображают основную полетную информацию. Для корректного отображения карты и координат в мобильном устройстве должен быть доступен мобильный Интернет и включен приемник GPS. Пока не поступают данные GPS с коптера, на карте отображается местоположение пилота (стартовая точка). Во время полета карта в режиме реального времени "следует" за положением коптера. Разумеется, для этого данные должны передаваться на достаточное расстояние при помощи удлинителя радиомодема.

На экране **Настройки** нам понадобятся вначале только кнопки **PID**, **AUX**, **КАЛИБРОВКА** и **ЛОГ**. По умолчанию включено автоматическое ведение логов (журналов) полета. На SD-карту телефона в режиме реального времени записываются координаты коптера, напряжение батареи, обороты моторов и т. д. После полета данные можно посмотреть на мобильном устройстве в виде графиков, а также конвертировать в формат KML для загрузки в сервис Google Earth, чтобы посмотреть 3D-траекторию полета на фоне спутниковой карты местности. Иногда это хорошо помогает при поиске потерянного коптера.

В расширенных настройках можно выбрать текущий профиль: 0, 1 или 2. MultiWii позволяет сохранять три разных профиля настроек и переключаться между ними. В свою очередь конфигуратор позволяет не только выбрать текущий профиль, но и записать в него временные настройки, а если не понравилось — вернуть исходные.

Использование остальных функций определяется вариантом прошивки, конфигурацией дополнительного оборудования коптера и потребностями пользователя, поэтому детальная расшифровка всех опций программы в данной книге не имеет смысла. Назначение настроек интуитивно понятно, вы без труда освоите их по мере приобретения опыта.

NAZE32 Configurator

Как следует из названия, программа разрабатывалась для конфигурирования полетного контроллера NAZE32, но совместима и с другими контроллерами, работающими на прошивке MultiWii. Для подключения требуется, чтобы Bluetooth квадрокоптера уже был связан с телефоном и присутствовал в списке доступных устройств. Связывание осуществляется стандартными средствами вашего мобильного устройства. В различных устройствах на базе Android эта процедура может незначительно различаться.

Применительно к плате CRIUS AIOP с прошивкой MultiWii v.2.3 эта программа имеет ограниченную функциональность, но позволяет оперативно настраивать параметры **PID**, **AUX (Switches)** и **RATE** с одного экрана.

ВНИМАНИЕ!

Функция триммирования акселерометра AccTrim работает только для платы NAZE32 на Baseflight.

Для плат с прошивкой MultiWii подстройка горизонта акселерометра производится при помощи стиков пульта, как описано в *главе 6*.

MultiWii Configuration Tool

Простая и удобная утилита, которая поддерживает все стандартные настройки и отображает поток данных MultiWii версии 2.3 несмотря на то, что формально заявлена версия 2.1, поскольку базовый протокол обмена данными не изменился.

В настройках программы есть удобная опция **Keep Screen On**, не позволяющая экрану смартфона отключаться в состоянии покоя.

Калибровка регуляторов оборотов

Как вы знаете, диапазон значений длительности импульсов в сигнале радиоуправления может слегка различаться в разной аппаратуре. Перед началом эксплуатации регуляторы должны быть откалиброваны, т. е. настроены под правильное "понимание" рабочего диапазона сигналов радиоуправления имеющегося оборудования. Некоторые регуляторы после покупки вообще не начинают работать без прохождения процедуры калибровки.

ПРИМЕЧАНИЕ

Распространенной ошибкой начинающих владельцев коптеров является попытка калибровать регуляторы отдельно от контроллера, при помощи специального программатора или подключая напрямую к приемнику. Впоследствии это приводит к необъяснимому поведению моторов коптера в воздухе. Контроллер не транслирует через себя сигналы с приемника. Он вырабатывает собственные сигналы управления оборотами. Поэтому калибровать регуляторы следует только при помощи специального режима контроллера, причем все регуляторы одновременно и желательно в окончательном варианте подключения каналов. Если вы меняете местами подключение регуляторов к каналам моторов, калибровку желательно повторить. Так же следует поступить и при замене одного из регуляторов при поломке.

Последовательность процедуры калибровки:

1. В тексте прошивки контроллера (см. файл config.h) найдите и раскомментируйте строку `#define ESC_CALIB_CANNOT_FLY`, расположенную в конце файла.
2. Запишите прошивку в контроллер.
3. Подключите моторы *без пропеллеров* к регуляторам. Направление вращения не имеет значения.
4. Спаяйте цепь питания регуляторов и контроллера, если монтаж временный.
5. Подключите входы регуляторов к соответствующим выходам контроллера и промаркируйте регуляторы.
6. Подайте питание на контроллер и регуляторы.

После запуска контроллера начнется калибровка. Моторы издадут серию мелодичных звуков, могут пищать и хаотично дергаться в процессе калибровки. Примерно через 20 с калибровка завершится. Моторы могут раз в секунду издавать короткий писк, это зависит от модели регулятора.

Отключите питание. Обязательно сразу же прокомментируйте строку

```
///#define ESC_CALIB_CANNOT_FLY
```

и заново загрузите прошивку. Теперь ваши регуляторы откалиброваны и готовы к полетам.

Настройка канала радиуправления

Сигналы управления, поступающие на контроллер с приемника, должны соответствовать определенным требованиям, более жестким, чем в случае самолетов и даже вертолетов. Существует множество моделей пультов управления; для некоторых из них предлагается несколько вариантов пользовательских прошивок. Поэтому в данной книге невозможно привести детальное руководство по настройке каких-либо пультов. Мы будем исходить из того, что вы руководствуетесь имеющейся у вас детальной инструкцией по использованию вашей модели пульта.

ПРИМЕЧАНИЕ

Прежде всего, запомните правило настройки пульта для квадрокоптера: никаких триммеров, смещающих среднюю точку сигнала, потому что для квадрокоптера рабочий диапазон канала должен быть строго симметричным! В нейтральном (среднем) положении длительность импульсов каждого канала должна как можно точнее соответствовать 1500. Минимальное значение сигнала — около 1000, максимальное — около 2000. Крайние значения менее критичны, главное, чтобы рабочий ход вниз и вверх от центра был одинаковым.

Среднее значение 1500 выставляется на пульте при помощи субтриммеров. Разница между триммером и субтриммером описана в *главе 2*. Нижнее и верхнее значения задаются регулятором расходов пульта. Обычно в меню настроек пульта этот пункт называется **Rates** или **Travel Adjust**. Например, можно выставить минимальные значения 1065 и максимальные 1935. В этом случае будет симметричное отклонение от центра ± 435 .

Для настройки подключите выходы приемника к контроллеру, а сам контроллер к USB-порту компьютера и запустите любой конфигуратор. Проверьте правильность подключения выходов приемника и настройки каналов AUX передатчика, двигая рукоятки и переключая тумблеры пульта. При необходимости переставьте местами разъемы каналов приемника или измените порядок каналов в настройках пульта. Убедитесь, что сигналы не инвертированы. При движении рукояток вправо и вверх сигналы нарастают, а при движении влево и вниз уменьшаются. После проверки рекомендуется наклеить бирки с удобными для вас метками на разъемы или провода, это значительно ускорит последующую сборку или ремонт коптера.

Наблюдая за показаниями каналов в окне конфигуратора, настройте пульт. Теперь настроим "мертвую зону" пульта. В идеале при отпуске рукоятки в среднее по-

ложение сигнал должен всегда принимать значение 1500, но на практике у любых пультов наблюдается небольшое случайное отклонение.

1. Отклоните рукоятку в крайнее положение и плавно верните в центр. Засеките величину отклонения от 1500. Например, $1500 - 1493 = 7$.
2. Прделайте эту процедуру для каналов ROLL, PITCH и YAW, отклоняя рукоятки в обе стороны. Запомните максимальное значение из всех получившихся отклонений от центра.
3. Повторите процедуру, по очереди резко отпуская рукоятки, чтобы они возвращались в центр под действием пружины.
4. К максимальному значению отклонения, найденному в результате всех манипуляций, прибавьте 3–4 единицы.
5. Откройте в Arduino IDE исходный код прошивки и в строке `#define DEADBAND xxx` укажите вычисленное вами значение мертвой зоны.
6. Запишите исправленную прошивку в память контроллера.

Теперь дрожание средней точки сигнала не будет влиять на поведение коптера.

Итак, на данном этапе вы предварительно сконфигурировали прошивку, настроили управление основными режимами по каналам AUX, откалибровали регуляторы, акселерометр и магнетометр, настроили сигналы пульта управления. Наверняка теперь вы захотите проверить работу контроллера, наблюдая за индикацией в окне конфигуратора.

Активируйте моторы, переместив рукоятку газа в положение "ARM", т. е. вправо вниз, примерно на одну секунду. Если параметры сигналов управления настроены правильно, на плате контроллера должны загореться светодиоды A и C; в окне конфигуратора изменит цвет индикатор "ARM", а показания оборотов моторов возрастут и будут равны величине, указанной при настройке прошивки в строке

```
#define MINTHROTTLE xxxxx
```

ПРИМЕЧАНИЕ

Еще одна распространенная ошибка начинающих: смотреть на обороты моторов в окне конфигуратора, когда плата контроллера лежит на столе. Помните, что контроллер — это система с обратной связью, которая старается отработать внешнее возмущение, пока оно не будет скомпенсировано. Допустим, плата лежит на столе не идеально ровно. После подачи питания контроллер попытается выровнять ее за счет неравномерных оборотов моторов. Стоит вам чуть пошевелить плату, и контроллер будет пытаться вновь исправить ее положение, изменив обороты. Поэтому в "настолевых" условиях обороты моторов никогда не будут одинаковыми при нейтральном положении рукояток пульта.

Поставьте рукоятку газа в среднее положение. Индикаторы оборотов моторов примут положение, близкое к среднему. Переместите правую рукоятку пульта вперед. Должны увеличиться обороты задних моторов (6)–(3) и уменьшиться передних (2)–(5). При движении рукоятки назад должна наблюдаться обратная картина. При отклонении рукоятки вправо увеличатся обороты левой пары (2)–(6) и уменьшатся правой (5)–(3). Отклонение влево должно дать обратную картину. Переместите ле-

вую рукоятку (YAW) вправо. Должны возрасти обороты диагональной пары (6)–(5) и уменьшится пары (2)–(3). Отклонение влево должно дать обратный эффект. Если реакция отличается, проверьте, не инвертированы ли сигналы в каналах радиоуправления. При необходимости включите инверсию нужных каналов в настройках пульта.

Проверьте реакцию контроллера на переключение тумблеров или вращение регуляторов, подключенных к каналам AUX. Если все работает, как ожидалось, контроллер и радиоуправление готовы к испытаниям на коптере.

Первое включение и первый взлет

Первое включение коптера в рабочем режиме должно происходить без пропеллеров!

Строго запрещается подавать питание от силовой батареи при подключенном к компьютеру USB-кабеле. Если нужно работать с интерфейсом конфигуратора, используйте соединение по Bluetooth, о котором будет сказано далее (см. главу 6).

Смонтируйте контроллер на раму, подключите моторы, приемник и преобразователь питающего напряжения. Не забудьте защитить барометр от воздействия завихрений воздуха и попадания внутрь пыли и прямых солнечных лучей при помощи небольшого кусочка поролона. Включите передатчик, подключите силовую батарею. Во время загрузки контроллера моторы должны издать непродолжительные звуковые сигналы и затихнуть. После окончания инициализации контроллера на нем должен гореть только индикатор питания. Если подключен приемник GPS, то будет мигать светодиод В.

Активируйте моторы, переместив рукоятку газа до упора вправо вниз. Загорятся светодиоды А и С на плате контроллера. Если в настройках прошивки заданы холостые обороты моторов при активации, они начнут вращаться с небольшой частотой. Моторы должны стартовать строго одновременно. В противном случае повторите процедуру калибровки регуляторов. Еще раз проверьте правильность направлений вращения.

Плавно увеличьте газ примерно на 1/3 рабочего хода. Поднимите коптер в воздух и наклоните его. При наклоне рамы вперед на 15–20° должны заметно увеличиться обороты передней пары моторов и уменьшиться задней — контроллер пытается компенсировать крен. Аналогично должны меняться обороты соответствующих пар моторов при кренах в другие стороны. При повороте рамы вокруг своей оси в горизонтальной плоскости должны меняться обороты диагональных пар моторов.

Взявшись рукой за раму, несколько раз пройдите рукояткой газа от минимума до максимума и обратно. Вибрация рамы должна быть незначительной и не иметь выраженных низкочастотных резонансов на всем диапазоне оборотов. В противном случае необходимо провести тщательную балансировку моторов, как было сказано ранее.

Отключите силовую батарею и установите пропеллеры, тщательно соблюдая направленность вращения.

Дальнейшие испытания желательно проводить на открытом воздухе или хотя бы на балконе, в отсутствие детей и домашних животных. Воздержитесь от искушения совершить первый взлет в центре жилой комнаты. Квадрокоптеры могут быть нестабильны на высоте менее 1 м из-за эффекта воздушной подушки и круговых завихрений в комнате, а при неправильно откалиброванном гироскопе склонны к внезапному "соскальзыванию" вбок в момент взлета. Обычно у начинающих пилотов испытания заканчиваются разбитым телевизором или посеченной лопастями мебелью. Просматривая в Интернете видеоролики с полетами в комнате, имейте в виду:

- это делают опытные пилоты, неосознанными движениями рукояток компенсирующие малейший боковой снос при взлете;
- обычно это не первый взлет проверенных и настроенных коптеров.

В качестве компромисса можно привязать к концам лучей рамы утяжелители в виде гантелей или двухлитровых бутылок с водой шнурками длиной около 70 см. Можно также воспользоваться советом подвесить коптер на балконе на туго натянутых горизонтально крест-накрест капроновых шнурах, привязанных к концам лучей. Но такие способы испытаний не очень информативны.

ВНИМАНИЕ!

Дальнейшие испытания потребуют от вас особой аккуратности и осторожности.

Включите питание коптера. Крепко возьмите его одной рукой за нижнюю часть рамы и поднимите над головой. Второй рукой плавно увеличивайте газ, пока не ощутите, что тяга винтов скомпенсировала вес коптера и он достиг точки висения. *Засеките положение рукоятки газа на шкале пульта — впоследствии вам понадобится это знать.* Коптер должен висеть спокойно и ровно, без подрагиваний и попыток повернуться по курсу.

Попробуйте резко наклонять коптер в стороны. Он должен мгновенно реагировать ощутимо сильным сопротивлением и выравнивать раму. Выравнивание не должно сопровождаться рывком в противоположную сторону и/или затухающими колебаниями. Если это происходит, значит, реакция системы стабилизации чрезмерна и потребуются подстройка параметров PID. Аналогично проверьте реакцию на попытку повернуть раму по курсу.

Если коптер в точке висения ведет себя ровно и предсказуемо, осторожно доведите газ до максимума, наблюдая за вибрацией рамы и звуком работы моторов. В принципе, идеальной динамической балансировки добиться невозможно, поэтому всегда будет присутствовать низкочастотная вибрация рамы на частоте биений — разности высокочастотных вибраций винтомоторных пар. Главное, чтобы вибрация не имела выраженных резонансов и коптер не реагировал на вибрацию хаотичным подергиванием по всем осям.

Моторы при максимальной нагрузке должны продолжать работать с ровным звуком, без щелчков, хрипения или провалов тяги, что может означать пропуск фазы мотора от механической перегрузки или срабатывание защитной отсечки регулятора от перегрузки по току, либо просадку питания слабой силовой батареи. В этом

случае надо попробовать установить пропеллеры меньшего диаметра или с меньшим шагом и использовать более мощную батарею.

Когда предполетная проверка проведена и явных неполадок не просматривается, можно приступать к пробным полетам на открытом воздухе. Установите коптер на горизонтальной поверхности, подключите силовую батарею и после этого не двигайте коптер. После подачи питания и запуска контроллера начнется процедура калибровки гироскопов, сопровождаемая быстрым миганием светодиодов А и С. Двигать коптер в этот момент не следует, иначе калибровка сорвется.

В прошивках MultiWii версий от 2.2 и далее предусмотрено обнаружение перемещения и повторная калибровка. Эта функция включается раскомментированием строки

```
//#define GYROCALIBRATIONFAILSAFE
```

ПРИМЕЧАНИЕ

Если коптер двигали в процессе калибровки гироскопов, то при взлете он начнет сильно и непредсказуемо крениться, смещаясь в сторону, и может даже перевернуться. В этом случае гироскоп нужно перекалибровать при помощи команды рукоятками управления (см. приложение 3).

Также в прошивке есть строка

```
#define ONLYARMWHENFLAT
```

которая не даст активировать моторы, если наклон поверхности, с которой стартует коптер, слишком велик.

Активировав моторы, плавно увеличьте газ до момента, когда коптер начнет слегка отрываться от земли. При этом он не должен крениться, дергаться или интенсивно сползать в сторону. Уверенно увеличьте чуть больше точки висения и дайте коптеру подняться на высоту около 2–3 м. Сразу верните газ к точке висения и корректируйте положение коптера правой рукояткой пульта. Обратите внимание, в какую сторону самопроизвольно смещается коптер при отсутствии ветра. Плавно убавьте газ и посадите коптер. Повторите взлет и посадку несколько раз. Теперь вы готовы приступить к триммированию акселерометров.

Триммирование акселерометров

Даже при самой точной калибровке уровня на идеально горизонтальной плоскости собранный коптер будет слегка смещаться в сторону по множеству причин: разная тяга моторов, кривизна рамы, смещение центра тяжести, неточный монтаж контроллера на раме и т. д. Но, как вы знаете, пользоваться триммерами пульта категорически не рекомендуется. Поэтому будем триммировать акселерометры средствами самого контроллера. Это нужно делать в безветренную погоду.

Установив, в какую сторону смещается коптер, посадите его и деактивируйте моторы. Рукоятку газа переместите вверх до упора. Правую рукоятку переместите до упора в сторону, противоположную крену. Если присутствуют крены по двум направлениям, их следует триммировать по очереди. Например, если коптер кренится

вправо и вперед, переместите рукоятку влево. Контроллер ответит на команду серией вспышек светодиодов А и С, после чего верните рукоятку в нейтраль. Аналогично скорректируйте продольный крен смещением рукоятки назад. Одно перемещение рукоятки соответствует крену в $0,1^\circ$. Обычно предварительное триммирование выполняют сериями по 3–4 отклонения рукоятки. Затем поднимите коптер в воздух и проверьте результат. При необходимости повторите процедуру. Правильно триммированный коптер при отсутствии ветра висит спокойно и почти не дрейфует.

Теперь обратим внимание на курсовую устойчивость. Коптер не должен стремиться повернуться вправо или влево. Легкий дрейф курса до 10° в течение нескольких минут считается нормальным. Стремление к повороту может быть вызвано неточной геометрией рамы или установкой моторов не строго горизонтально, особенно на круглых трубчатых лучах, а также неравномерным износом подшипников моторов или затрудненным вращением после аварии. Магнетометр на время проверки следует выключить, чтобы исключить влияние магнитных наводок.

Итак, мы имеем предварительно настроенный коптер, который достаточно стабилен и пригоден для эксплуатации. Зачастую этим можно ограничиться, т. к. прошивка по умолчанию включает в себя подобранные опытным путем усредненные настройки. Но лучших результатов можно достичь при точной настройке параметров обратной связи PID.

Настройка PID

Мультикоптер представляет собой классическую стабилизированную систему с обратной связью, реагирующую на внешние воздействия с целью компенсировать их влияние. Прежде всего, стабилизируется положение коптера по горизонтали и по курсу. Это обязательный минимум. При наличии соответствующих данных может также стабилизироваться высота по барометру и позиция по GPS.

Реакция системы на внешнее воздействие определяется тремя компонентами отклика: пропорциональным (*Proportional*), интегральным (*Integral*) и дифференциальным (*Differential*). Отсюда и пошло сокращение **PID**. Для более ясного понимания компоненты можно свести в условную зависимость:

$$F_{\text{STAB}} = P \cdot \text{Sens} + I \cdot \text{Sens} - D \cdot \text{Sens},$$

где F_{STAB} — усилие, направленное на возврат коптера в положение стабилизации; Sens — данные об угловых ускорениях и кренах, поступающие с сенсоров. Обратите внимание, что D стоит в формуле с отрицательным знаком, это понадобится далее.

Компонент **Proportional** определяет степень пропорциональности отклика системы на воздействие. Функция отклика линейная. Чем больше значение P , тем сильнее система противодействует внешнему влиянию, возвращая коптер в исходное положение. Чрезмерная реакция может привести к тому, что коптер проскочит положение равновесия (перерегулирование). Потребуется возвращать коптер в обратном направлении. Таким образом, могут возникнуть затухающие колебания (осцилля-

ции), а в крайних случаях и незатухающая неуправляемая раскочка. Поэтому параметр P должен быть подобран так, чтобы не возникали осцилляции.

Для более точного и адекватного регулирования желательно, чтобы отклик системы формировался по более сложному закону, чем линейная зависимость. Например, компенсация кратковременного воздействия мимолетного завихрения воздуха не требует такого же мощного отклика, как при воздействии постоянного сильного потока ветра. Вблизи точки равновесия желательно уменьшить реакцию, чтобы не проскочить искомое положение. Поэтому одним лишь параметром P не обойтись.

Integral — период времени, в течение которого накапливаются и усредняются данные об отклонении от равновесной точки. Позволяет устранять дрейф, возникающий за счет небольших отклонений от равновесной точки. Дрейф возникает за счет ошибок в неидеальной системе обратной связи, и реальная система никогда не попадает точно "в ноль". Интегральный компонент позволяет накопить ошибку за заданный интервал времени и полученную суммарную величину применить для окончательного выравнивания. При меньшем значении I коптер быстрее заканчивает цикл выравнивания, но с меньшей точностью попадает в ноль и больше подвержен дрейфу. При большем значении коптер выравнивается дольше, но точнее и меньше подвержен дрейфу.

Differential — зависимость скорости возврата в исходное положение от степени отклонения. Совершенно логичный алгоритм действия: чем сильнее коптер отклонился, тем больше скорость, с которой он начинает возвращаться, а по мере компенсации отклонения скорость возврата снижается.

ВНИМАНИЕ!

Параметр D в конфигураторе задан положительным числом, но в формуле используется со знаком "минус". Это часто порождает путаницу и вынуждает делать оговорки. Опирируя понятиями "меньше" и "больше", мы будем иметь в виду значения, задаваемые в конфигураторе.

Увеличение D приводит к увеличению скорости возврата, усиливает влияние P и может привести к появлению осцилляций. Уменьшение D снижает склонность к осцилляции и влияние P и уменьшает скорость возврата.

Как видите, изменение компонентов I и D изменяет значимость компонента P для процесса стабилизации. Поэтому настройка PID — это многоэтапный процесс, в котором приходится начинать с настройки P , затем настройки I и D , а затем возвращаться к более точной подстройке P и так, возможно, несколько раз. Прошивка содержит некие более-менее универсальные значения PID, которые позволят вам совершить достаточно стабильные первые полеты, но в дальнейшем вы обязательно захотите настроить PID под свой коптер и свои предпочтения.

Базовая настройка параметра P

Для настройки рекомендуется использовать подключение к коптеру по Bluetooth, т. к. придется неоднократно обращаться к настройкам через программу конфигуратора. Иначе придется каждый раз отключать/подключать силовую батарею и провод USB.

Установите в конфигураторе значения PID по умолчанию. Соблюдая осторожность, крепко возьмите коптер в руку, поднимите над головой и увеличьте газ до состояния свободного висения. Попробуйте наклонить коптер в любую сторону. Он будет сопротивляться и стремиться вернуться обратно. Быстро отклоните коптер и позвольте ему вернуться в горизонталь. Постепенно увеличивайте значение P для осей Pitch и Roll до тех пор, пока не почувствуете, что появились затухающие осцилляции (коптер слегка проскакивает равновесие, совершая колебание). Прибавку значения с каждым шагом уменьшайте. После достижения осцилляции уменьшите значение P на 15–20%. Повторите эту же процедуру для оси Yaw. На этом базовую настройку P можно считать законченной. Дальнейшую настройку вы будете выполнять в поле, меняя параметры I и D и проверяя результат в полете.

Настройка I и D для плавного стабильного полета

Исходим из того, что базовая настройка P уже проведена. Постепенно уменьшайте параметр I до момента, когда почувствуете, что появился неприемлемо сильный дрейф при висении. После этого увеличьте значение примерно на 20%.

Увеличивайте значение D до тех пор, пока не заметите, что стабилизация после резких отклонений стиков не стала неприемлемо слабой. Затем уменьшите D и попробуйте немного уменьшить P .

Настройка I и D для активного пилотирования и акро

Постепенно уменьшайте параметр I до момента, когда почувствуете, что появился неприемлемо сильный дрейф при висении. После этого увеличьте значение примерно на 5–10%. Остаточный дрейф не успеет себя проявить при активном пилотировании. Уменьшайте значение D до тех пор, пока стабилизация после резких манипуляций стиками не начнет приводить к опасной раскачке. Затем увеличьте D до исчезновения чрезмерной раскачки. Теперь можно попробовать немного уменьшить P .

В целом, настройка PID — это субъективный процесс. Его задача — найти ваш личный компромисс между стабильностью коптера и комфортом управления.

ГЛАВА 6



Подключение и настройка внешних модулей

Подключение адаптера USB-COM

Как вы уже знаете, на плате полетного контроллера CRIUS AIOP уже есть встроенный адаптер USB-COM. Но вам все равно придется приобрести дополнительно автономный адаптер. Он неоднократно потребуется для настройки модулей OSD и телеметрии, GPS и Bluetooth. Также при помощи этого адаптера вы сможете менять прошивку большинства модулей OSD.

В продаже доступно большое количество разнообразных адаптеров USB-COM, но все они построены на базе одного из трех чипов: FTDI (**FT232**), Prolific (**PL2303**) или на ставшем популярным относительно недавно **CH340G** производства компании WCH Nanjing QinHeng Electronics. Не рекомендуется приобретать адаптеры на основе PL2303, т. к. они не оснащены выходом DTR, который используется для сброса контроллеров Atmel при записи в них прошивки. Вам будет сложно использовать такой адаптер для перепрошивки, например, модулей OSD — придется вручную нажимать кнопку сброса в момент начала записи прошивки. Лучше всего использовать адаптер на основе оригинального чипа FT232, к нему подойдет драйвер, который вы уже установили при первом подключении полетного контроллера к компьютеру. Компания FTDI сейчас ведет борьбу с производителями дешевых китайских клонов микросхемы FT232, поэтому при обнаружении поддельной микросхемы работа драйвера может быть заблокирована. Для адаптера на основе CH340G можно скачать драйвер и руководство по установке на сайте <http://arduino-project.net/driver-ch340g/>.

После того как драйвер адаптера будет успешно установлен, проверим работу адаптера USB-COM в режиме эха. Для этого соедините между собой выводы Tx и Rx адаптера. Теперь адаптер будет передавать данные сам себе и по кольцу возвращать их обратно в программу терминала.

Запустите программу Termite и выберите нужный порт, который появился в системе при подключении адаптера: **Settings | Port Configuration | Port**. Остальные настройки менять пока не надо, нажмите кнопку **OK**. Теперь в нижней строке окна терминала введите любой текст латиницей и нажмите клавишу **<Enter>**. Текст дол-

жен появиться в окне терминала дважды, как отправленный и принятый. Теперь адаптер и терминал готовы к использованию. Если эхо не работает, проверьте правильность настройки номера порта, появляется ли новый порт в списке устройств компьютера при подключении адаптера, мигают ли на плате адаптера светодиоды приема-передачи при их наличии. При подключении адаптера к другому порту USB ему может быть назначен новый номер порта.

Подключение источника питания

Несмотря на кажущуюся простоту, правильному подключению источника питания к контроллеру CRUIS AIOP v2 следует уделить особое внимание. Иначе вы рискуете столкнуться с непредсказуемым поведением контроллера, зависаниями и сбоями или испортить его.

ПРИМЕЧАНИЕ

На плате контроллера AIOP версии 2 нет встроенного стабилизатора +5V! Подав на контроллер напряжение 12 В от силовой батареи, вы сожжете как минимум встроенный стабилизатор +3,3V.

Обратимся к схеме разводки цепей питания на рис. 6.1. Подать питание на контроллер можно тремя способами: через разъем USB (J1), с внешнего источника через отдельный разъем питания (J2) и с регулятора оборотов через разъем-гребенку для подключения моторов и сервомашинки (J3).

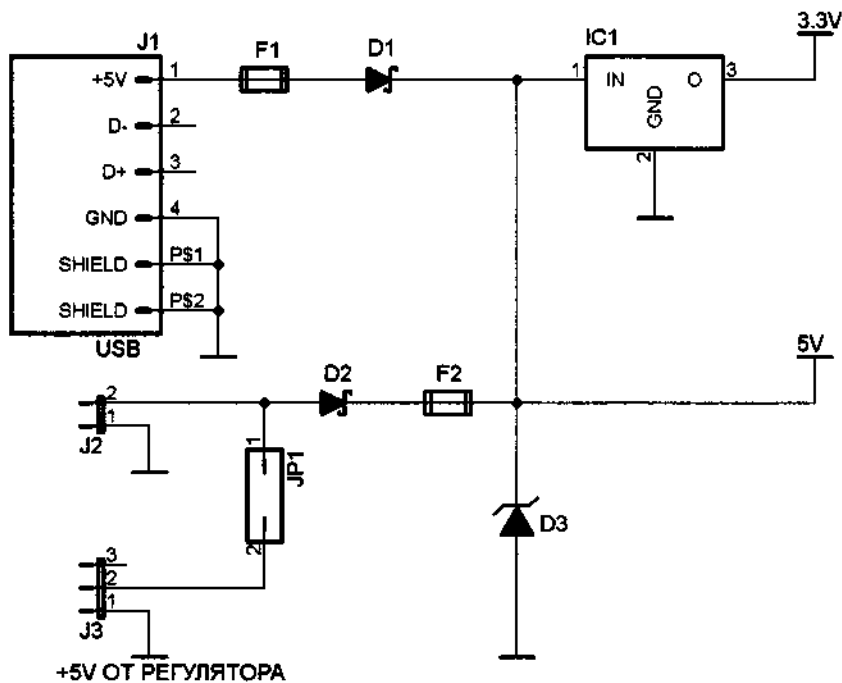


Рис. 6.1. Схема цепей питания полетного контроллера

Стабилитрон D3 и самовосстанавливающиеся предохранители F1, F2 защищают контроллер от переплюсовки. Когда к одному из разъемов приложено напряжение обратной полярности, D3 оказывается включенным в прямом направлении и замыкает цепь питания, что вызывает срабатывание соответствующего предохранителя. Для полного восстановления проводимости предохранителя после срабатывания требуется минимум два часа. К сожалению, самовосстанавливающиеся предохранители срабатывают очень медленно, за доли секунды. Стабилитрон D3 открывается тоже не мгновенно. Поэтому вероятность поломки контроллера при переплюсовке весьма велика.

Диоды D1 и D2 развязывают питание от USB и с внешних разъемов между собой. Питающее напряжение с разъемов J2 и J3 не может попасть на разъем USB через встречно включенный диод D1 и испортить порт компьютера. Но полностью доверять этой защите нельзя. Существует вероятность, что диод D1 будет пробит, в этом случае встречное напряжение будет приложено к порту USB вашего компьютера и может вывести хост-контроллер порта из строя. Поэтому одновременного подключения внешнего питания и порта USB лучше избегать.

ПРИМЕЧАНИЕ

К сожалению, на диодах D1 и D2 падает питающее напряжение. Самовосстанавливающийся предохранитель также обладает сопротивлением 1,5–2 Ом. По измерениям автора, выполненным на разных платах, суммарное падение напряжения на диоде и предохранителе под рабочей нагрузкой составляет 0,33–0,35 В. И если подать на контроллер напряжение 5,00 В, то фактически контроллер будет питаться напряжением 4,65 В. При таком напряжении плата контроллера работает неустойчиво и склонна к непредсказуемым сбоям прямо в процессе полета. Поэтому напряжение источника питания должно лежать в пределах 5,2–5,6 В.

Для питания контроллера можно использовать преобразователь напряжения "step-down" с подстройкой или подобрать номинал постоянных резисторов на плате преобразователя. В специализированных источниках питания для коптеров обычно уже выставлено напряжение с нужным запасом. Если вы хотите использовать простейший линейный стабилизатор на микросхеме 78L05 или аналогичной, то включите в разрыв ее "земляного" вывода один-два маломощных кремниевых диода в прямом направлении, как показано на схеме рис. 6.2.

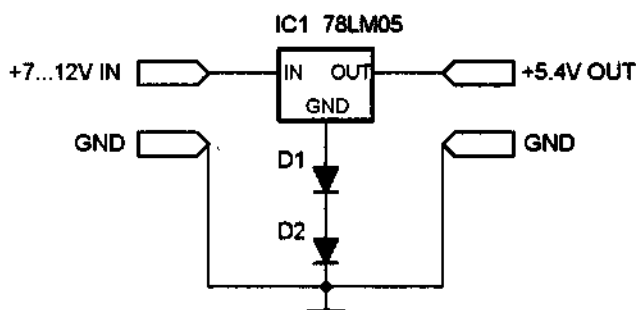


Рис. 6.2. Увеличение выходного напряжения линейного стабилизатора

Если ваш контроллер при питании от порта USB нестабильно работает, выдает странные показания датчиков в программу конфигурации или зависает, то можно попробовать закоротить перемычкой из тонкого провода диод D1, как показано на рис. 6.3. Это следует делать, только если вы четко понимаете, что и зачем делаете, и имеете достаточный опыт пайки миниатюрных SMD-компонентов! После такой переделки порт вашего компьютера останется без защиты от случайной подачи встречного напряжения с регуляторов или через разъем внешнего питания J2. Нужно будет особенно тщательно следить за тем, чтобы случайно не подключить одновременно питание от батареи и порт USB.

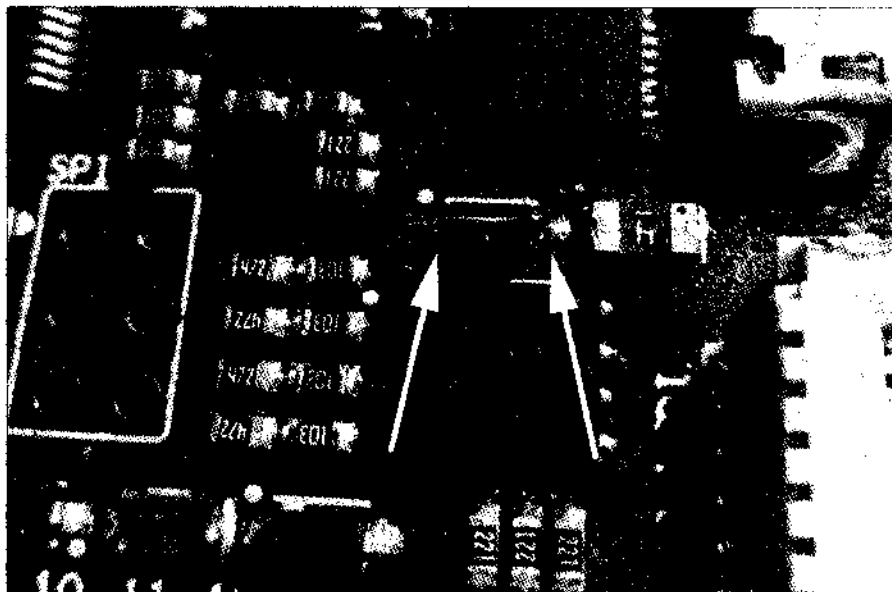


Рис. 6.3. Закорачивание развязывающего диода D1 в цепи питания от порта USB

Подключение звукоизлучателя

Звукоизлучатели (beeper, buzzer) могут быть пассивными либо активными. Активные звукоизлучатели содержат собственно пассивный звукоизлучающий элемент и встроенный генератор звуковой частоты, который начинает работать при подаче питающего напряжения либо разрешающего логического уровня на управляющий вход. В авиамоделизме чаще всего применяются малогабаритные магнитодинамические излучатели, состоящие из мощного редкоземельного магнита, катушки и металлической мембранки. Иногда встречаются пьезоэлектрические звукоизлучатели, но обычно они менее эффективны: имеют меньшую громкость и требуют для работы большего напряжения, поэтому используются реже.

ПРИМЕЧАНИЕ

Пассивные звукоизлучатели категорически запрещается подключать напрямую к выходу микроконтроллера, т. к. это может привести к перегрузке выхода по току и выходу контроллера из строя.

Оптимальным решением является использование готового активного звукоизлучателя, например, такого, как на рис. 3.15. Они стоят очень недорого, содержат встроенный генератор и транзисторный ключ, вход для управления логическим уровнем контроллера.

Имейте в виду, что звукоизлучатели разных типов могут иметь одинаковый корпус, поэтому однозначно отличить активный излучатель от пассивного можно не всегда. Кроме того, вам могут встретиться активные излучатели, рассчитанные на 12 В. Прежде, чем подключать излучатель к контроллеру, подайте на его выводы питающее напряжение +5 В. Если он будет издавать звук достаточной громкости с частотой 1000 Гц, то все в порядке. Иначе придется искать другой бипер или делать простейшую схему звукового генератора. Контроллер генерирует только управляющий сигнал "вкл/выкл".

Простейший ключ для управления бипером можно сделать на основе биполярного или полевого транзистора, как показано на схеме рис. 6.4. Подойдет любой мало-мощный биполярный *n-p-n*-транзистор или полевой *N*-канальный, затвор которого управляется логическими уровнями. Такие транзисторы еще называют "цифровыми".

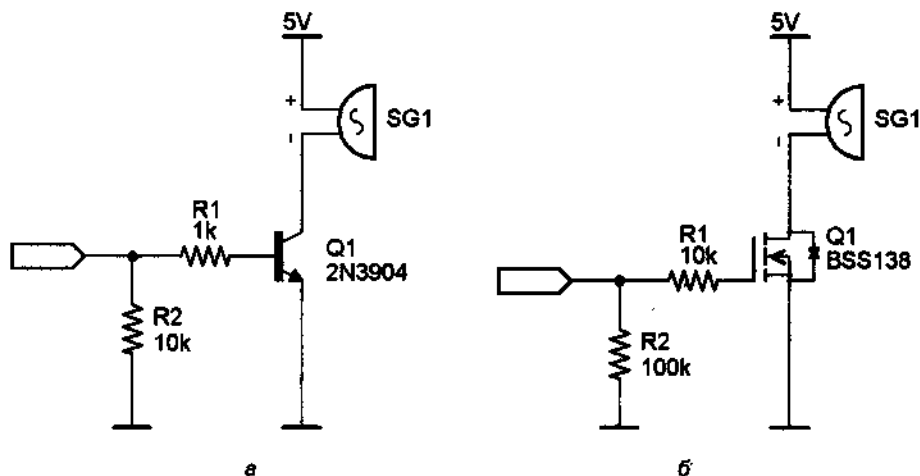


Рис. 6.4. Ключ на биполярном (а) и полевом (б) транзисторе

Для активации функции бипера надо раскомментировать строку

```
#define BUZZER
```

После этого в интерфейсе конфигуратора появится опция **БЕЕПЕР** и можно будет назначить включение звукового сигнала на один из переключателей AUX. Если хотите, чтобы коптер коротким звуковым сигналом реагировал на изменение режимов, раскомментируйте строку

```
#define RCOPTIONSBEEP
```

По умолчанию вход бипера подключается к цифровому выходу D32 на плате контроллера. К сожалению, во второй версии платы Cgius AIOP это не штыревой разъ-

ем, а контактная площадка на плате (рис. 6.5). Рядом расположены площадки нескольких других дополнительных выводов. Крайне неудобное и опасное решение: эти площадки отслаиваются после перегрева при пайке, их можно легко оторвать, неосторожно дернув за провод. Эстетизма конструкции и удобства при эксплуатации торчащие из платы провода тоже не добавляют.

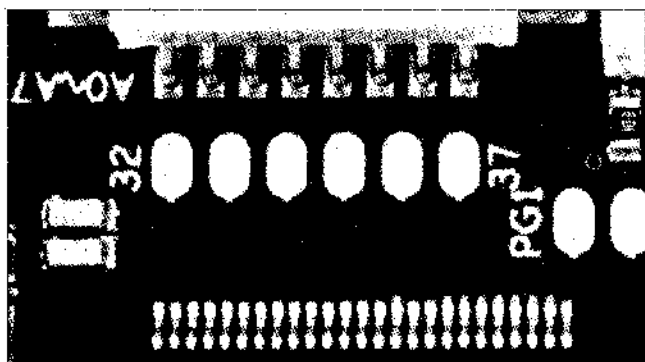


Рис. 6.5. Дополнительные цифровые выходы (D32–D37) контроллера

Поэтому желательно перенести выход бипера на один из свободных цифровых выходов, снабженных штыревым разъемом. Например, если вы не планируете использовать выход D46 для управления затвором фотокамеры, то для переноса выхода бипера на вывод D46 найдите в прошивке строки

```

// #define OVERRIDE_BUZZERPIN_PINMODE    pinMode (A2, OUTPUT);
// #define OVERRIDE_BUZZERPIN_ON        PORTC |= 1<<2;
// #define OVERRIDE_BUZZERPIN_OFF      PORTC &= ~(1<<2);

```

Раскомментируйте их и замените аргументы определений следующими значениями:

```

# define OVERRIDE_BUZZERPIN_PINMODE    pinMode (46, OUTPUT);
# define OVERRIDE_BUZZERPIN_ON        PORTL |= 1<<3;
# define OVERRIDE_BUZZERPIN_OFF      PORTL &= ~(1<<3);

```

Подключать бипер к выводу D46 удобно, т. к. в штатном режиме на гребенке разъема присутствует питающее напряжение +5 В и бипер можно подключить стандартным трехжильным проводом от сервомашинки.

Подключение ультразвукового сонара

Ультразвуковой сонар хорошо подходит для автоматического включения посадочных огней (фонарей подсветки посадочной площадки) в темное время суток, поскольку огни нужно включать на высоте менее 3 м. Это именно та дистанция, на которой обычный модуль сонара начинает достаточно точно и стабильно работать. Такой способ управлять включением огней не является расточительным, т. к. модули сонаров HC-SR04 (рис. 6.6) стоят в Китае менее двухсот рублей. Эти сонары используются во множестве любительских проектов и продаются, как аксессуар для Arduino.

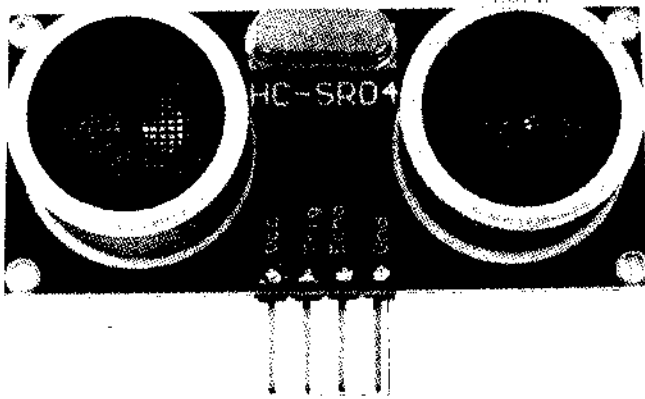


Рис. 6.6. Ультразвуковой сонар HC-SR04

К сожалению, поддержка сонаров SR04 не реализована в прошивке MultiWii 2.3, поэтому для использования сонара можно воспользоваться прошивкой MaHoWii RC3. Для включения сонара раскомментируйте в прошивке строку

```
//#define SONAR_GENERIC_ECHOPULSE
```

Далее обратите внимание на строки

```
#define SONAR_PING 12 // D12 PIN that trigger measure
#define SONAR_READ 11 // D11 PIN to read response pulse
//#define SONAR_PING 9 // D9 PIN that trigger measure
//#define SONAR_READ 10 // D10 PIN to read response pulse
```

Здесь определяется, к каким выводам платы будет подключаться сонар. В нашем случае вывод сонара TRIG подключается к выводу D12 полетного контроллера, а вывод сонара ECHO — к выводу D11 полетного контроллера. Эти выводы расположены в гребенке для подключения регуляторов оборотов. На эту гребенку также выведено напряжение питания, поэтому сонар можно запитать прямо от этого разъема. Рекомендуется использовать именно эти выводы, т. к. выводы D9 и D10 понадобятся нам для управления подсветкой.

Имейте в виду, что *при питании от USB из-за развязывающих диодов D1 и D2 (см. рис. 6.1) напряжение питания не будет поступать на гребенку J3*. Чтобы сонар начал работать, питание должно поступать на плату через разъем J2 или от встроенного стабилизатора регулятора оборотов.

В процессе измерения полетный контроллер генерирует пусковой импульс на выводе SONAR_PING и ждет ответный импульс на входе SONAR_READ. Работающий сонар издает едва различимые щелчки с частотой несколько герц.

Наличие сонара может помочь стабилизировать высоту полета на малой высоте 1–3 м, когда барометр работает плохо. Для настройки в прошивке MaHoWii предназначены две строки:

```
#define SONAR_MAX_DISTANCE 300
#define SONAR_ERROR_MAX 10
```

Первая строка определяет максимальную высоту в сантиметрах, когда показания сонара еще принимаются во внимание при удержании высоты. Как показывает практика, китайские сонары редко работают на расстоянии более 3 м. Вторая строка определяет максимальное количество ошибок измерения, после превышения которого показания сонара считаются недостоверными и происходит переключение на барометр.

Периодически в продаже встречаются бракованные сонары, страдающие большой погрешностью, либо вовсе неисправные. Поэтому при заказе в Китае желательно приобрести два-три экземпляра и тщательно проверить их работоспособность. Для проверки необходимо, чтобы на сонар поступало питающее напряжение при подключении по USB. Плюсовой провод питания сонара временно подключите к штырьку "+" платы контроллера, слева от вывода "PPM". После записи прошивки, в которой включен сонар, он должен начать издавать быстрые щелчки.

Запустите конфигуратор MultiWii WinGUI. В перечне подключенных сенсоров должен появиться сонар. Попробуйте направлять сонар на стены и потолок. В строке ALT интерфейса должна отображаться текущая дистанция до отражающей поверхности с погрешностью не более 2–3 см. Если значение дистанции периодически непредсказуемо меняется или имеет слишком большую погрешность, сонар лучше заменить.

Подключение светодиодной подсветки

Светодиоды используются для подсветки рамы коптера либо посадочной площадки при полетах в ночное время. Возможность управления светодиодами предусмотрена в прошивке. Для коммутации светодиодов понадобится изготовить простейший ключ на одном транзисторе, аналогичный ключу для коммутации звукоизлучателя.

Но перед тем как начать изготовление коммутатора и подсветки, нам потребуется сделать некоторые расчеты.

ПРИМЕЧАНИЕ

Светодиод — довольно капризный элемент схемы. Он рассчитан на строго определенный рабочий ток, протекающий через кристалл. Превышение этого тока приводит к перегреву кристалла и его быстрой деградации, что выражается в снижении яркости.

Главным параметром режима светодиода является именно рабочий ток, протекающий через кристалл, а не напряжение питания, подаваемое на схему. Дело в том, что в рабочем режиме падение напряжения на *p-n*-переходе светодиода почти не меняется при изменении питающего напряжения. Меняется только ток, протекающий через светодиод, и он легко может быть превышен при колебаниях напряжения. Поэтому в светодиодных светильниках используются специальные схемы драйверов, стабилизирующие ток, а не напряжение. Но для наших целей вполне достаточно использовать ограничивающие ток резисторы, поскольку напряжение питания меняется в небольших пределах.

Падение напряжения на светодиоде зависит от цвета свечения и конкретной марки светодиода. Ориентировочные значения для расчета схем приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1. Значения для расчета схем

Цвет	Длина волны, нм	Падение напряжения, В
Инфракрасный	От 760	До 1,9
Красный	610–760	1,60–2,03
Оранжевый	590–610	2,03–2,10
Желтый	570–590	2,10–2,20
Зеленый	500–570	2,20–3,50
Синий	450–500	2,50–3,70
Фиолетовый	400–450	2,80–4,00
Ультрафиолетовый	До 400	3,10–4,40
Белый		3,00–3,70

Как следует из табл. 6.1, разброс падений напряжения может быть довольно существенным даже внутри одной цветовой группы, особенно для популярных синих светодиодов. Разброс напряжений между цветовыми группами еще больше. Поэтому если нет возможности получить точные данные из спецификации конкретной марки светодиодов, то лучше измерить падение напряжения самостоятельно, чтобы рассчитать схему наиболее точно и использовать светодиоды более эффективно.

Рабочий ток светодиодов зависит от паспортной мощности, и здесь желательно все же использовать паспортные данные, хотя бы для аналогичных светодиодов. Можно измерить рабочий ток и напряжение ваших светодиодов при помощи простейшей схемы, состоящей из переменного резистора номиналом 680 Ом, миллиамперметра и вольтметра (рис. 6.7).

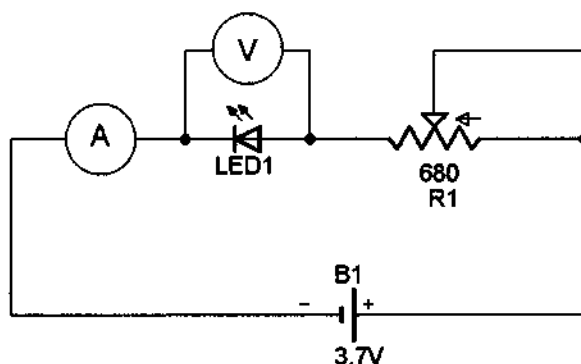


Рис. 6.7. Измерение параметров светодиода

Вместо двух измерительных приборов можно использовать один мультиметр, попеременно включая его в разрыв цепи для контроля тока и параллельно светодиоду для измерения напряжения. Установите движок переменного резистора в положение *максимального* сопротивления (по нашей схеме — вправо) и подайте питание.

Постепенно уменьшая сопротивление, следите за напряжением на светодиоде. Сначала оно будет нарастать пропорционально углу поворота резистора, а светодиод будет светиться все ярче. Но в какой-то момент напряжение почти перестанет нарастать при уменьшении сопротивления. Это будет означать, что светодиод вошел в рабочий режим. Верните движок переменного резистора на 1–2 градуса обратно. Напряжение на светодиоде будет соответствовать предельному рабочему напряжению светодиода, а ток в цепи — предельному рабочему току. Для постоянной эксплуатации эти значения желательно уменьшить на 10%, чтобы продлить срок службы светодиодов.

Для обычных массовых светодиодов с линзой диаметром 5 мм и белым или синим цветом свечения рабочим напряжением принято считать 3 В, а рабочий ток — порядка 12–15 мА. Для красных светодиодов аналогичной мощности рабочим напряжением считается 2 В при том же токе. Таким образом, номинал токоограничительного резистора в цепи будет зависеть от цвета применяемых светодиодов.

Итак, рассчитаем номинал гасящего резистора для линейки из последовательно включенных светодиодов (рис. 6.8). На готовых светодиодных лентах может применяться отдельный резистор для каждого светодиода или пары светодиодов, но в самодельной подсветке мы используем один резистор для линейки из 3–4 светодиодов, так проще. Напряжение максимально заряженной литий-ионной батареи может достигать $4,2 \cdot 3 = 12,6$ В. Но это напряжение под нагрузкой быстро снижается до рабочего $3,72 \cdot 3 = 11,16$ В, поэтому при расчетах мы будем использовать усредненное значение 12 В.

Если взять светодиоды с падением напряжения ровно 3 В, то можно соединить последовательно 4 светодиода и вообще не использовать гасящий резистор. Но это не самое удачное решение, т. к. при случайном превышении напряжения питания ничем не ограниченный ток через светодиоды может нарастать нелинейно, что выведет из строя либо сами светодиоды, либо ключевой транзистор.

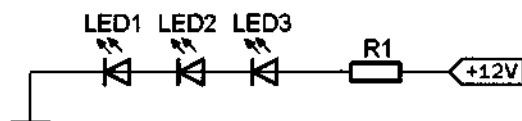


Рис. 6.8. Линейка последовательно включенных светодиодов

Допустим, у нас есть синие светодиоды с рабочим падением напряжения 3,25 В и рабочим током 18 мА. На трех последовательно соединенных диодах падает напряжение $3,25 \cdot 3 = 9,75$ В. Следовательно, на резисторе должно падать напряжение $12 - 9,75 = 2,25$ В. По закону Ома

$$R = U/I,$$

следовательно, $R = 12/18 \cdot 10^{-3} \approx 670$ Ом. Для светодиодов другого цвета или с другим рабочим током расчет сопротивления надо повторить.

Окончательная схема коммутатора, управляющего несколькими линейками светодиодов, показана на рис. 6.9. Количество линеек зависит от конструкции вашей

подсветки. Разумеется, при использовании готовых светодиодных полос они просто подключаются вместо линеек, без гасящих резисторов. Ключевой транзистор может быть любым подходящим по суммарному рабочему току. При использовании мощных светодиодов рекомендуется применять полевые MOSFET-транзисторы, управляемые логическим уровнем TTL на затворе, с низким внутренним сопротивлением, чтобы избежать их нагрева и потерь энергии. Например, можно использовать применяемые в материнских платах компьютеров ключевые N -канальные транзисторы SSM9915H (AP9915H) или IRL3803. Для управления мало-мощными светодиодами можно применить обычный биполярный n - p - n -транзистор, например С945.

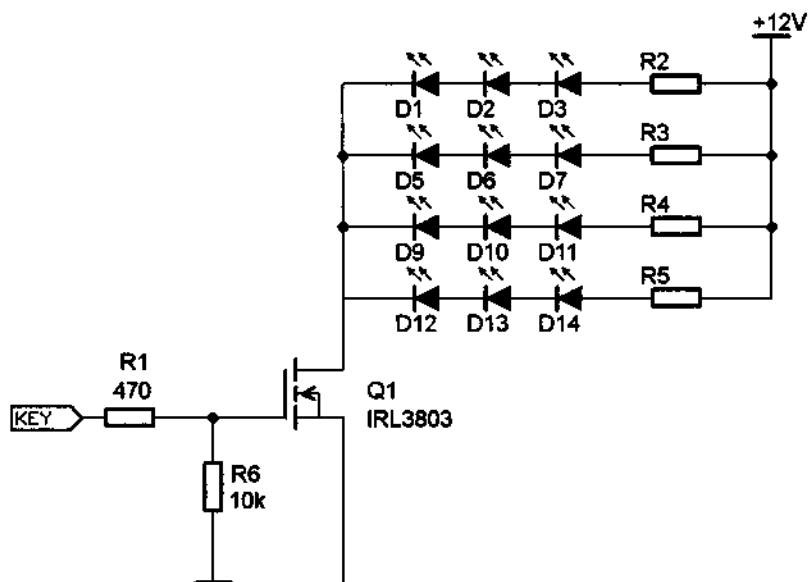


Рис. 6.9. Схема коммутатора для управления светодиодами

Теперь внесем необходимые изменения в исходный код прошивки. Найдите и прокомментируйте следующие строки:

```
#define LED_FLASHER
#define LED_FLASHER_DDR DDRB
#define LED_FLASHER_PORT PORTB
#define LED_FLASHER_BIT PORTB4
```

Первая строка активирует функцию управления подсветкой. Следующие три строки назначают порт микроконтроллера и конкретный вывод порта, к которому мы будем подключать коммутатор. В данном случае изменения не потребуются, т. к. вывод назначен на линию 4 порта В, а это вывод D10 на плате полетного контроллера CRIIOUS AIOP, расположенный на гребенке для подключения регуляторов. Поэтому коммутатор подсветки можно подключить обычным трехжильным проводом для сервомашинки. Напомним, что к выводам D11 и D12 у нас подключен сонар, а к выводу D46 — бипер.

Строка `//#define LED_FLASHER_INVERT` инвертирует выходной сигнал.

Следующие строки определяют свечение светодиодов в различных режимах:

```
#define LED_FLASHER_SEQUENCE      0b00000000
#define LED_FLASHER_SEQUENCE_ARMED 0b00000101
#define LED_FLASHER_SEQUENCE_MAX ' 0b11111111
#define LED_FLASHER_SEQUENCE_LOW  0b00000000
```

В каждой строке присутствует восьмьбитное двоичное число. Это последовательность вспышек светодиода. Последовательность циклически повторяется. Ноль соответствует погашенному светодиоду, единица — включенному. Длительность одной вспышки $0,125$ с, полный цикл $8 \cdot 0,125 = 1$ секунда.

Например, последовательность `0b00000101` означает, что светодиод дает две короткие вспышки длительностью $0,125$ с циклически раз в секунду. Последовательность `0b11111111` соответствует постоянно горящему светодиоду, а `0b00000000` — полностью погашенному. Вы можете задавать произвольную последовательность для любого режима.

Первая строка соответствует режиму **DISARMED** (питание подано, моторы не активны). По умолчанию подсветка погашена. Изменив последовательность на `0b00000001`, можно заставить подсветку вспыхивать раз в секунду, напоминая, что питание подключено. В режиме **ARMED** светодиод по умолчанию вспыхивает дважды.

После активации функции подсветки в панели конфигулятора становятся доступны для настройки еще два параметра, **LEDMAX** и **LEDLOW**, которыми можно управлять при помощи переключателей **AUX**. Разумеется, эти режимы взаимно противоположные и не должны включаться одновременно. Но их можно включать параллельно с другими режимами и задать произвольные последовательности мигания, изменив последовательность двоичных битов.

Подключение посадочных огней

Посадочные огни предназначены для подсветки посадочной площадки при полетах в темное время суток. Обычно они представляют собой несколько мощных белых светодиодов, направленных вертикально вниз. Схема коммутатора для их включения и порядок расчета режима светодиодов идентичны описанным выше.

По умолчанию в прошивке для управления посадочными огнями назначен вывод 37 в виде контактной площадки на печатной плате. Для удобства подключения коммутатора мы переназначим выход на вывод D9 на штыревой гребенке. Найдите в тексте прошивки строки

```
//#define LANDING_LIGHTS_DDR DDRC
//#define LANDING_LIGHTS_PORT PORTC
//#define LANDING_LIGHTS_BIT PORTC0
```

Раскомментируйте их и внесите следующие изменения:

```
#define LANDING_LIGHTS_DDR DDRH
#define LANDING_LIGHTS_PORT PORTH
#define LANDING_LIGHTS_BIT PORTH6
```

После активации этих строк в интерфейсе конфигуратора MultiWii WinGUI появляется опция **LLIGHTS**, позволяющая включать посадочные огни любым тумблером AUX. Поскольку каналов AUX мало, можно сделать включение посадочных огней инверсным по отношению к режиму удержания высоты **BARO (ALTHOLD)**. Когда коптер взлетает или садится, режим удержания высоты отключен и горят посадочные огни.

Подключение приемника по шине S-BUS

Для подключения выхода приемника S-BUS ко входу RX1 порта SERIAL1 необходимо изготовить простейший инвертор сигнала на одном *n-p-n*-транзисторе. Это может быть любой маломощный *n-p-n*-транзистор, например самый распространенный C945 или BC337. Компоненты схемы (рис. 6.10) можно не монтировать на плате, а спаять детали вывод к выводу и поместить их в термоусадочную трубку. Питание на инвертор подается с разъема приемника или контроллера.

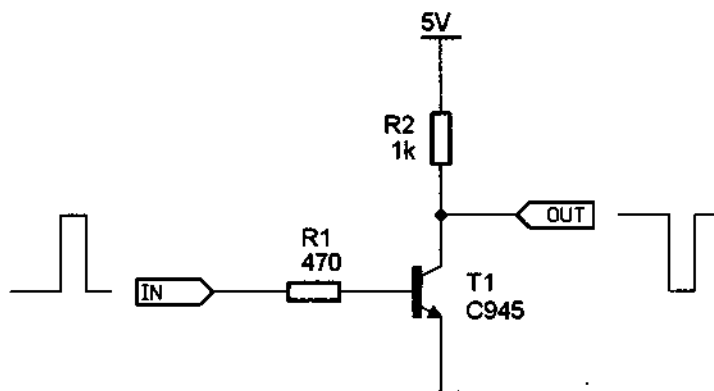


Рис. 6.10. Схема инвертора сигнала для подключения приемника по S-BUS

В файле конфигурации прошивки найдите секцию **SBUS RECEIVER** и раскомментируйте строки

```
#define SBUS
#define SBUS_SERIAL_PORT 1
#define SBUS_MID_OFFSET 988
```

Последняя строка потребуется, если значение среднего положения в сигнале с выхода приемника отличается от стандартного.

К сожалению, поскольку формат сигнала S-BUS Futaba является предметом авторского права, производителям других приемников приходится использовать "фута-

бopodobные" форматы сигнала, которые не полностью соответствуют спецификации Futaba. В прошивку MultiWii 2.3 внесены существенные изменения и дополнения, но по-прежнему нет гарантии, что полетный контроллер сможет декодировать сигнал вашего приемника, если это не приемник Futaba. В крайнем случае, придется прибегнуть к обычному способу подключения.

Подключение и настройка адаптера Bluetooth

Новый модуль Bluetooth нужно проверить и настроить до подключения к полетному контроллеру. Несмотря на кажущуюся простоту, настройка часто вызывает затруднения даже у опытных пользователей, поэтому разберем ее подробнее.

Подключите модуль Bluetooth к адаптеру USB-COM. Обратите внимание, что линии данных надо подключать перекрестно: Tx → Rx, Rx → Tx. Питание на модуль также подайте с разъема адаптера.

Большинство модулей Bluetooth для конфигурирования необходимо перевести в служебный режим (режим модема, AT-mode). В этом режиме модуль перестает работать по радиоканалу и готов принимать команды через последовательный порт. Некоторые модификации модулей не требуют перевода в служебный режим и всегда готовы к приему команд. Скорость обмена данными с терминалом должна совпадать с ранее установленной в настройках модуля. По умолчанию, с фабрики, модули обычно настроены на скорость 9600 бод. Но иногда встречаются модули, настроенные на другую скорость. Заказав модуль в интернет-магазине, вы не можете быть абсолютно уверены, какую версию модуля получите. Поэтому обычно приходится действовать методом проб и ошибок.

Наиболее распространенными и часто покупаемыми являются модули HC-06 и HC-05. Они состоят из двух микросхем (рис. 6.11), одна из них — собственно сам трансивер Bluetooth, а вторая — это микросхема памяти. Визуально они неразличимы, т. к. аппаратная часть у них одинаковая, отличается только прошивка. HC-06 может работать только в режиме slave (ведомый), т. е. только отвечать на приказ установить связь, поступающий от старшего ведущего устройства — компьютера или смартфона, и имеет очень ограниченную систему команд. Модуль HC-05 может работать как в режиме master (ведущий), так и в режиме slave. Система команд этого модуля намного обширнее и отличается по синтаксису от HC-06. Также отличается и процедура перевода модуля в режим настройки. Если модули нужны вам только для связи с коптером, постарайтесь приобрести именно HC-06.

ПРИМЕЧАНИЕ

Для связи с коптером нам нужен только режим ведомого, slave. Не покупайте модули с индексом "M" в названии (HC-06-M, HC-07-M). Это модули, которые на заводе жестко запрограммировали в прошивке в режим master. Для смены режима потребуются достаточно хлопотная процедура замены прошивки, программатор, работающий через аппаратный LPT-порт, и специальные программы.

В последнее время встречаются более новые модули HC-07, состоящие из одной микросхемы, объединяющей в себе процессор и память. Функционально модули

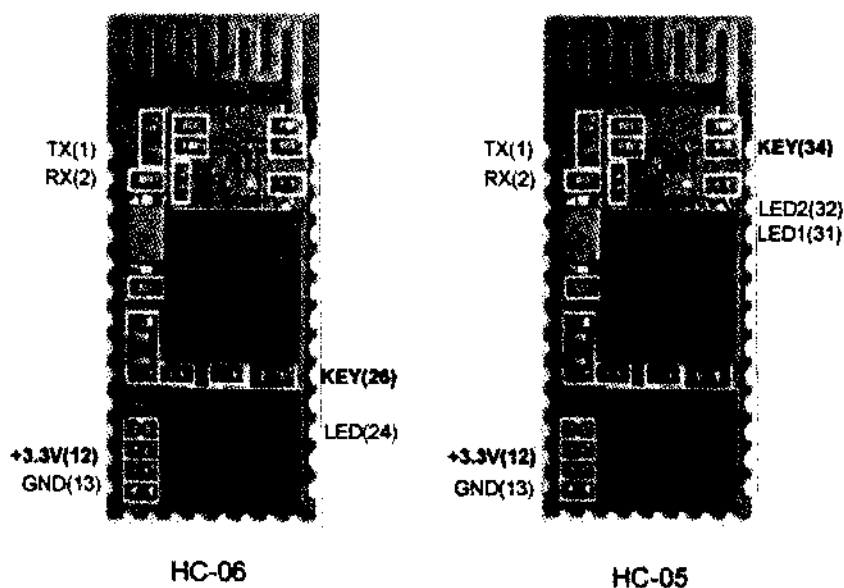


Рис. 6.11. Два варианта расположения управляющего входа KEY

HC-07 полностью совместимы с HC-06, поэтому *все, что касается системы команд и настройки HC-06, применимо и к HC-07*. Существуют и более экзотические, с точки зрения массовых продаж, модули: HC-08 и HC-09. Они встречаются редко, стоят дороже и никакого практического смысла для наших задач в них нет.

Для удобства использования модули обычно припаивают на плату расширения, содержащую стабилизатор питания 3,3 В, один или два светодиода индикации режима и разъем. Если вы приобрели только модуль, плату расширения можно докупить отдельно или сделать самому. Не забудьте поставить на плату стабилизатор 3,3 В!

Настройка модулей HC-06 и HC-07

Итак, изначально мы предполагаем, что в наших руках модуль HC-06 (07). Если у него новая версия прошивки Linvor1.8, то для перевода в режим приема AT-команд не потребуется соединять вывод KEY(26) (см. рис. 6.11) с напряжением питания +3,3 В.

Для настройки мы будем использовать программу терминала Termitе 3.0. Откройте окно настроек терминала кнопкой **Settings** (рис. 6.12). В группе параметров **Port configuration** выберите нужный порт и укажите скорость **9600**. Больше ничего здесь не меняйте. В группе параметров **Transmitted text** установите переключатель **Append nothing** и флажок **Local echo**. Остальные настройки менять не надо, нажмите кнопку **OK**.

В строку ввода введите заглавными латинскими буквами AT и нажмите клавишу <Enter>. Если скорость совпадает и модуль готов к приему AT-команд, он ответит **OK**. Если ответа нет, попробуйте задать скорость обмена **115200**. Если ответа по-прежнему нет, попробуйте по порядку перебрать все доступные варианты скорости.

Если же и это не помогло, следует отключить питание, перевести модуль в режим модема, соединив вывод (26) с выводом (12), и включить питание. Теперь снова попробуйте получить ответ на команду AT на скорости 9600 или 115200.

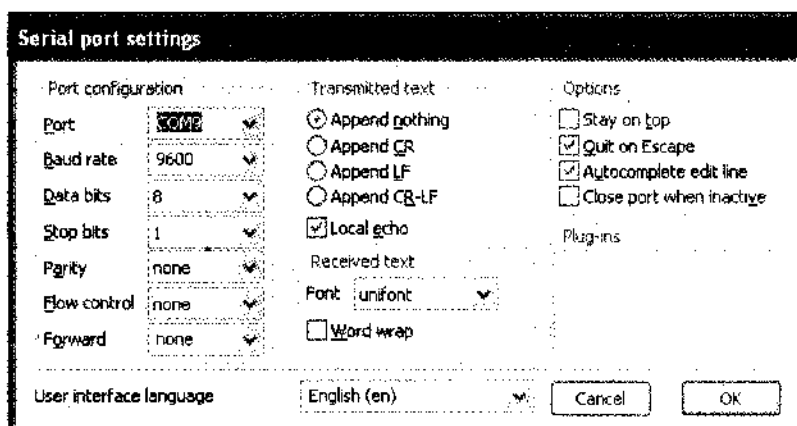


Рис. 6.12. Окно настройки терминала

Когда модуль ответит, можно приступать к конфигурированию. Перечень команд приведен в табл. 6.2.

Таблица 6.2. Базовый перечень команд настройки модулей Bluetooth HC-06

Команда	Ответ	Описание
AT	OK	Проверка отклика
AT+VERSION	OKlinvov1.8	Запрос версии прошивки
AT+NAME****	OKsetname	Установить имя ****
AT+PIN1234	OKsetPIN	Установить пин-код 1234
AT+BAUD1	OK1200	Установить скорость 1200
AT+BAUD2	OK2400	Установить скорость 2400
AT+BAUD3	OK4800	---//--- 4800
AT+BAUD4	OK9600	---//--- 9600
AT+BAUD5	OK19200	---//--- 19200
AT+BAUD6	OK38400	---//--- 38400
AT+BAUD7	OK57600	---//--- 57600
AT+BAUD8	OK115200	---//--- 115200
AT+BAUD9	OK230400	---//--- 230400
AT+BAUDA	OK460800	---//--- 460800
AT+BAUDB	OK921600	---//--- 921600
AT+BAUDC	OK1382400	---//--- 1382400

Рекомендуем задать интуитивно понятное имя, которое будет отображаться на смартфоне или компьютере при установлении связи и выборе устройства. Например, можно назвать модуль COPTER или QUADRO. Командой AT+PIN задайте пин-код (пароль) к вашему модулю. Злые хакеры вряд ли попытаются перехватить управление вашим коптером в полете, поэтому пин-код должен легко запоминаться. И, наконец, задайте скорость обмена данными в радиоканале. По умолчанию в прошивке MultiWii принята скорость 115 200, это максимально допустимое значение. Если вы хотите задать другую скорость обмена, укажите ее не только в настройках Bluetooth, но и в прошивке, в строке

```
#define SERIAL0_COM_SPEED 115200
```

а также в настройках конфигураторов MultiWiiConf и MultiWii WinGUI. Как только вы измените скорость модуля, он перестанет отвечать на старой скорости, и нужно будет изменить скорость в настройках терминала. Убедившись, что модуль отвечает на новой скорости, можно отключить питание модуля, убрать перемычку между выводами (26) и (12), и снова включить питание. Теперь модуль готов к привязке с мобильным устройством или компьютером.

Настройка модулей HC-05

Для перевода модуля HC-05 в режим настройки необходимо соединить вывод (34) с выводом (12) и подать питание (см. рис. 6.11). В режиме настройки модуль *всегда* будет доступен на скорости 38 400 бод независимо от того, какая скорость была задана ранее для рабочего режима.

В настройках терминала надо выбрать порт USB-COM адаптера, скорость 38400 и опцию **Append CR-LF**. Остальные настройки не меняем. Если вам продали действительно модуль HC-05 и он правильно подключен, то он обязательно должен ответить **OK** на команду AT.

Задайте имя модуля командой AT+NAME=<name>, где в треугольных скобках введите нужное вам имя. Проверить, как оно записалось, можно командой AT+NAME?.

Задайте пин-код для доступа командой AT+PSWD=<1234>, где в треугольных скобках введите нужный пин-код. Проверить пин-код можно командой AT+PSWD?.

Проверьте рабочую скорость командой AT+UART?. Если задана неправильная скорость, смените ее командой AT+UART=<bodrate>,<stopbit>,<paritybit>, где в первых скобках скорость из стандартного ряда: 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200. Более высокие скорости доступны в модуле, но нам не потребуются. Остальные два параметра в нашем случае *обязательно нулевые*. Например, команда AT+UART=115200,0,0 задаст рабочую скорость 115 200 бод.

Модуль HC-05 может работать в режиме ведущего (master), т. е. инициировать соединение со своей стороны. Но нам нужен модуль, который работает в режиме ведомого (slave), т. е. устанавливает связь по внешнему запросу ведущего. Поэтому командой AT+ROLE=0 его надо перевести в режим ведомого.

Установка связи модуля с компьютером

Теперь подключим модуль Bluetooth к контроллеру и свяжем его с компьютером. Модуль подключается к разъему, обозначенному на плате, как "SERIAL0". Имейте в виду, что подключение по USB и Bluetooth не могут работать одновременно, т. к. используют один и тот же аппаратный порт контроллера. Для соединения по USB нужно отключить разъем Bluetooth и наоборот.

Ноутбуки оснащены встроенным Bluetooth, а для настольного компьютера нужно приобрести внешний USB-адаптер и установить для него драйвер в соответствии с прилагаемой инструкцией. На компьютере под управлением Windows 7 нажмите кнопку **Пуск** и последовательно выберите команды **Устройства и принтеры** | **Добавление устройства**. Начнется поиск доступных беспроводных устройств. Могут быть найдены самые разные устройства в радиусе доступности, включая телефоны и компьютеры ваших соседей. Примерно через 10–15 с вы увидите в списке устройство Bluetooth, которое называется, как ваш модуль квадрокоптера. Щелкните на нем дважды, выберите **Ввести код образования пары** и введите пин-код модуля. Устройство с именем вашего коптера появится в списке устройств Windows и начнется установка драйверов последовательного порта Bluetooth. После этого в окне диспетчера устройств появится новый порт либо два порта (рис. 6.13). Обычно первый это служебный порт адаптера Bluetooth в компьютере, а второй соответствует виртуальному порту квадрокоптера. Теперь вы можете подключать программы конфигуратора по беспроводному каналу точно так же, как по проводу.

Связывание с мобильным телефоном или планшетом под управлением Android производится в соответствии с меню конкретного мобильного устройства.

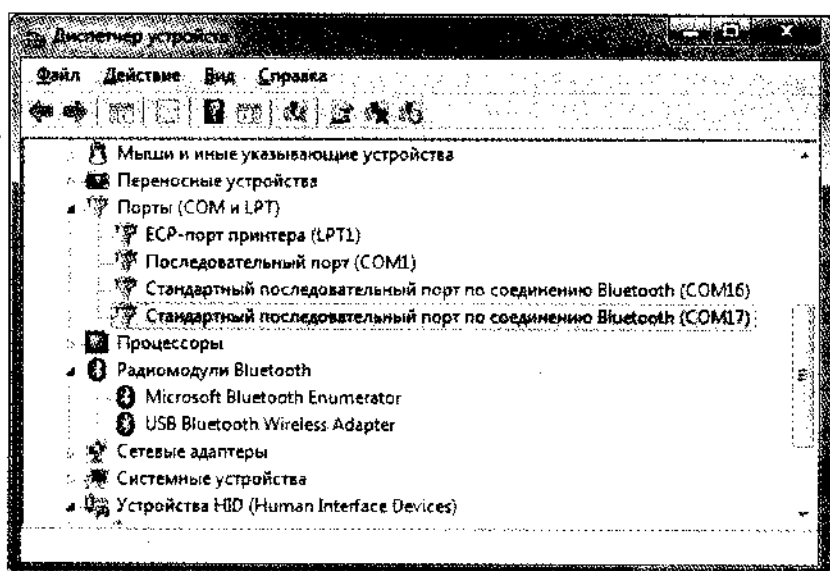


Рис. 6.13. Виртуальные порты Bluetooth

Подключение радиомодема

Адаптеры Bluetooth имеют небольшую дальность действия, в лучшем случае несколько десятков метров на открытой местности. Если у вас нет аппаратуры радиоуправления со встроенным каналом телеметрии, но хочется, чтобы на смартфоне или ноутбуке велись логи (журналы) и отображалась телеметрия на протяжении всей дистанции полета, то придется использовать радиомодем (удлиннитель канала, радиолинк). Решение задачи облегчается тем, что существует простое и относительно недорогое оборудование для организации так называемого "прозрачного" последовательного канала. В этом случае с точки зрения пользователя обмен данными выглядит так, будто полетный контроллер и устройство отображения связаны проводами напрямую, а не разделены километровой дистанцией.

Для организации радиоканала телеметрии мы будем использовать популярные радиомодемы 3DR Radio производства компании 3D Robotics. На сегодняшний день это, пожалуй, лучшее решение по сочетанию цены, качества связи и простоты эксплуатации. Рекомендуем на начальном этапе не экспериментировать с самодельными модемами на основе модулей HM-TRP, а приобрести готовый набор, изображенный на рис. 6.14. Покупка отдельных модулей-полуфабрикатов и антенн не даст вам экономии средств по сравнению с ценой готового набора, а потери времени на программирование модулей и изготовление модемов будут большими и бессмысленными. Модемы в этом наборе уже настроены и готовы к работе "из коробки". В наборе также имеются антенны и соединительные провода. Наборы изготавливаются на разные рабочие частоты: 433, 868, 915 МГц. В нашей стране разрешенным является диапазон 433 МГц.

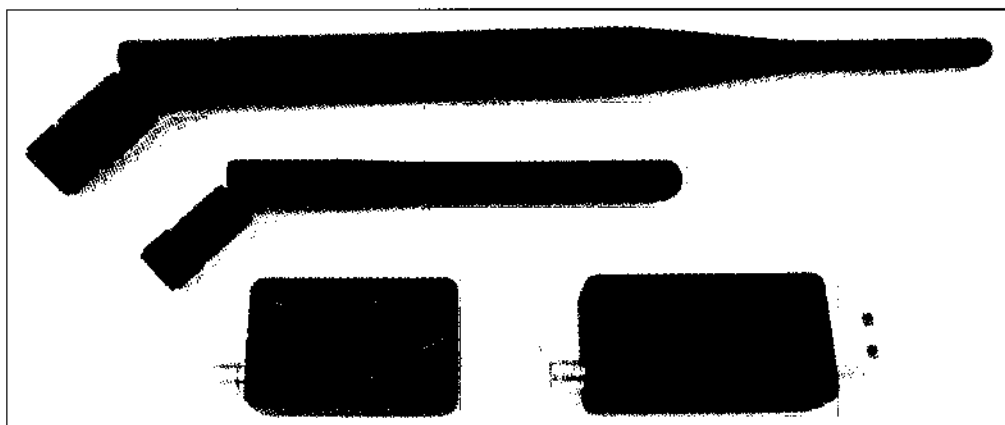


Рис. 6.14. Набор радиомодемов 3D Radio

Один из модемов предназначен для монтажа на борту коптера, имеет разъем для подключения к контроллеру и обозначен словом "Air". Второй модем наземный, оснащен разъемом USB, при помощи которого подключается не только к ноутбуку, но и смартфону или планшету с операционной системой Android. Ваш смартфон или планшет должен иметь функцию разъема OTG. Это тот же самый USB-разъем,

через который вы заряжаете гаджет или подключаете его к компьютеру, но он может работать еще и как активный порт для подключения внешних устройств. В комплекте со смартфоном или планшетом должен поставляться провод-адаптер OTG (рис. 6.15), его можно также купить в магазине мобильных аксессуаров. Разумеется, предварительно надо удостовериться, что ваше мобильное устройство поддерживает OTG.

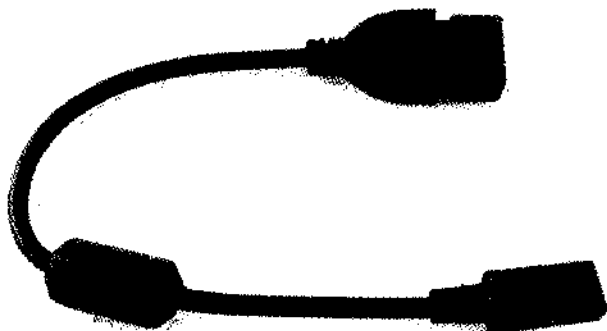


Рис. 6.15. Провод-адаптер для подключения внешних устройств по OTG

В продаже встречаются также варианты модемов без разъема USB, но это менее удобно, т. к. для подключения к компьютеру или мобильному устройству придется использовать внешний адаптер USB-COM.

Поскольку в продаже часто встречаются китайские клоны популярных продуктов, сразу после покупки рекомендуем проверить антенну для бортового модема и убедиться, что она предназначена именно для диапазона 433 МГц и вам не продали антенну от бытового Wi-Fi-роутера на 2,4 ГГц (внешне они выглядят одинаково). Осторожно снимите чехол антенны с основания. Содержимое антенны должно выглядеть так, как показано на рис. 2.15. В крайнем случае, можно самостоятельно изготовить активную часть антенны. Она представляет собой спираль из 19 витков медного провода $\varnothing 0,8$ мм, навитого на оправку $\varnothing 3,5$ мм.

Подключение модемов к компьютеру, проверка и настройка

Подключите антенны к модемам. Включите наземный модем в разъем USB стационарного компьютера. Внутри модема может быть установлена микросхема одного из двух адаптеров USB-COM: FT232 или CP2102. В первом случае драйвер адаптера уже установлен на вашем компьютере, поскольку вы подключали полетный контроллер для настройки. Во втором случае драйвер для адаптера CP2102 необходимо установить отдельно. Скачайте архив драйвера с сайта компании Silicon Labs. После установки драйвера и подключения модема в системе появится новый виртуальный порт COM. Запомните его номер.

Модемы оснащены двумя светодиодами, зеленым и красным. Мигающий зеленый означает, что модем находится в состоянии поиска связи со вторым, парным модемом. Постоянно горящий зеленый светодиод означает, что парный модем найден и

канал связи открыт. Красный светодиод вспыхивает при передаче данных и горит постоянно при записи новой прошивки в память модема.

Подайте напряжение питания +5 В на бортовой модем. Через несколько секунд модемы должны найти друг друга и зеленые светодиоды зажгутся постоянно. Если это не произошло, не волнуйтесь. В этом случае понадобится небольшая дополнительная настройка.

Итак, если зеленые светодиоды горят постоянно, соедините между собой выводы Tx и Rx бортового модема. Таким образом, он будет по кольцу возвращать обратно все, что ему передали, т. е. работать в режиме эха. Запустите программу терминала Termite 3.0 для работы с последовательным портом, которую использовали при настройке адаптера Bluetooth. В настройках терминала выберите порт, к которому подключен модем, скорость 57 600, а также опции **Append CR-LF** и **Local Echo**. Теперь введите любой текст в строке передачи и отправьте его. Он должен отобразиться в окне терминала и тут же повториться в следующей строке. В принципе, после этой проверки модемы можно начинать эксплуатировать.

Но по умолчанию выходная мощность модемов установлена в половину от максимальной. Этого достаточно для близких полетов, но в сложных помеховых условиях или на дальних дистанциях желательно установить полную мощность, 100 мВт. Также может потребоваться сменить идентификатор пары модемов, если в районе ваших полетов могут присутствовать аналогичные модемы.

Для настройки модемов применяется специальный конфигуратор 3DRRadio Config. Он позволяет настроить не только модем, подключенный к порту, но и удаленный модем, используя радиоканал. Разумеется, для удаленного конфигурирования второго модема канал должен быть установлен. Поэтому, если не совпадают частоты или скорости обмена модемов, придется конфигурировать их по отдельности, подключая бортовой модем к компьютеру при помощи внешнего адаптера USB-COM. Архив конфигуратора можно скачать на сайте автора программы по адресу <http://vps.oborne.me/3drradioconfig.zip>.

Конфигуратор не требует установки. Модем должен быть подключен к порту USB до запуска программы, чтобы соответствующий порт появился в списке выбора. На второй модем просто подайте питание +5 В. Если при этом зеленые светодиоды горят непрерывно, второй модем доступен конфигуратору через радиоканал.

Выбрав нужный порт и скорость по умолчанию **57600**, нажмите кнопку **Load Settings**. Начнется считывание конфигурации модемов. Вообще, имейте в виду, что общение конфигуратора с модемами всегда происходит неторопливо и нужно проявлять терпение, дожидаясь окончания всех процедур.

В наборе настроек нас интересуют, в первую очередь, следующие параметры (рис. 6.16).

- Baud** — скорость обмена с внешними устройствами, округленно. Так, опция **57** в списке соответствует скорости 57 600 бод.
- Air Speed** — скорость передачи данных по радиоканалу. Эта скорость обычно устанавливается выше, чем скорость внешнего обмена, т. к. по радиоканалу передаются еще и служебные данные.

- ❑ **Net ID** — идентификатор вашей радиосети, диапазон значений 0–500. Настоятельно рекомендуется сменить его на любой другой из списка, чтобы избежать случайного конфликта с аналогичными модемами. По этому номеру модемы опознают свою пару.
- ❑ **Tx Power** — мощность передатчика в dBm. Для тестирования канала на близких дистанциях рекомендуется использовать малую мощность, затем установить максимальную.
- ❑ **ECC** — Error Correcting Code, режим корректировки ошибок. Каждый пакет данных передается дважды, что вдвое сокращает пропускную способность радиоканала, но существенно снижает количество ошибок. Если канал используется только для передачи телеметрии, то галочку можно снять.
- ❑ **Mavlink** — специальный режим расширенной поддержки протокола Mavlink, применяемого в проекте Ardupilot. В нашем случае, когда применяется прошивка MultiWii, этот режим бесполезен, поэтому рекомендуется выбрать опцию **Raw Data**.

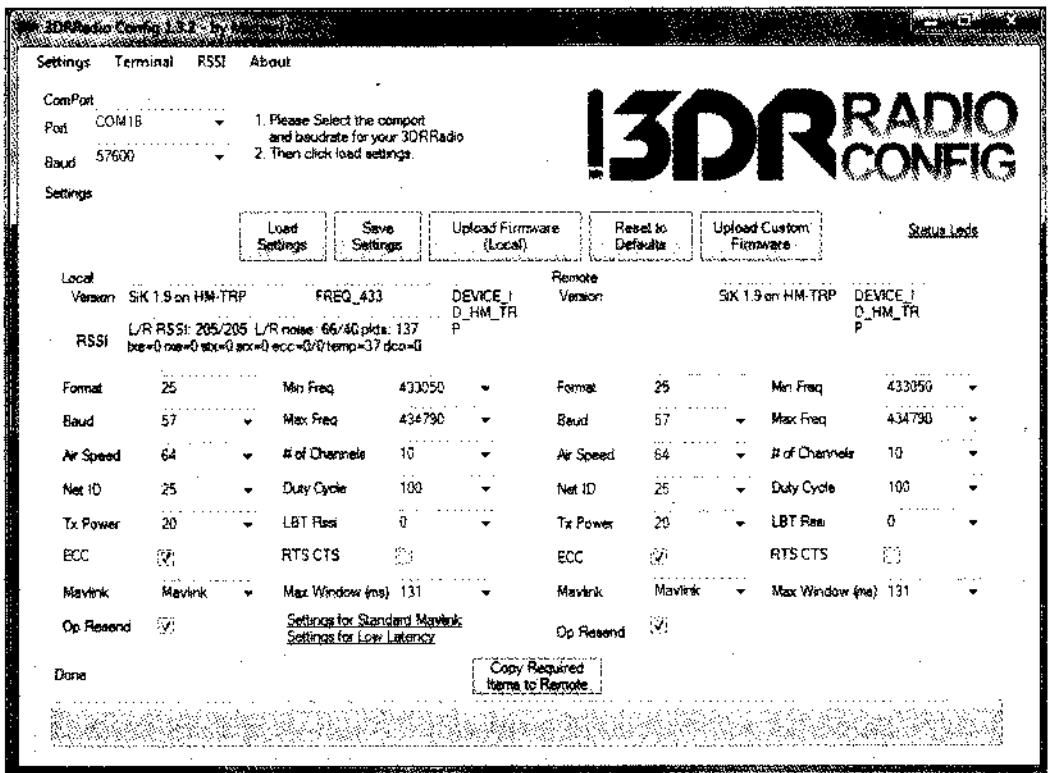


Рис. 6.16. Утилита конфигурирования модемов 3DRadio Config

Остальные опции, особенно рабочие частоты **Min Freq** и **Max Freq**, менять не надо. Пункт меню **Terminal** предназначен для ручного ввода служебных команд модема и в нашем случае не используется.

Настройки, сделанные для первого модема, копируются для второго нажатием кнопки **Copy Required Items to Remote**. Затем нажмите кнопку **Save Settings** и дождитесь окончания записи. Если второй модем недоступен для записи через радиоканал, то сперва сконфигурируйте первый модем и запомните его настройки. Затем подключите через внешний адаптер USB-COM второй модем и повторите процесс настройки. Не забывайте, что выводы Tx и Rx адаптера и модема следует соединять перекрестно: Tx → Rx, Rx → Tx.

Пункт **RSSI** предназначен для проверки качества радиоканала. Здесь мы видим график уровней принимаемого сигнала и отношения "сигнал/шум" для обоих модемов. Измерение **RSSI** работает с накоплением, поэтому график начинает отображаться спустя 3–4 с после нажатия кнопки **Connect**. В течение этого времени не следует вращать колесико мыши и масштабировать окно графика, это может вызвать сбой программы.

ВНИМАНИЕ!

Во время построения графика между модемами идет обмен информацией в служебном режиме, поэтому *строго рекомендуется* прекращать сеанс нажатием кнопки **Disconnect** и обязательно дождаться окончания сеанса связи, когда красный светодиод перестанет мигать. В противном случае возможно "зависание" модема вплоть до необходимости перепрошивки.

Подключение наземного модема к мобильным устройствам

Модемы 3DR Radio без труда подключаются к мобильным устройствам на ОС Android. Достаточно лишь установить приложение EZ-GUI Ground Station. Вместе с этим приложением устанавливаются необходимые драйверы Linux для поддержки последовательного порта через USB. Подключите модем к устройству через разъем USB/OTG. Появится приглашение запустить программу и ассоциировать ее с этим устройством для автозапуска. Если вы не планируете использовать другие программы, можно установить флажок автозапуска.

Далее необходимо внести некоторые изменения в настройки программы. Перейдите в меню **Конфигурации | Настройки**. Выберите опцию **USB/Последовательный порт**. Ниже оставьте по умолчанию универсальный драйвер, если не уверены, на какой микросхеме выполнен адаптер порта в вашем модеме.

Скорость передачи данных выберите соответствующую настройкам вашего модема. В нашем случае это **57600**. Далее при помощи стрелки в правом верхнем углу пролистайте настройки до страницы **Дополнения** и поставьте флажок **Поддержка 3DR Radio**. Выйдите из программы для сохранения настроек и перезапуска. Теперь мобильное приложение настроено для работы через радиомодем. Когда связь с бортовым модемом установлена, в меню **Настройки** начинает работать раздел **3DR RADIO КОНФ**. В этом разделе можно скачать текущие настройки модемов и поменять их, что весьма удобно, если нужно изменить мощность модема или идентификатор сети в полевых условиях.

Следует отметить, что в продаже встречается вариант конструкции наземного модема, вместо адаптера USB-COM, оснащенного стандартным модулем Bluetooth, смонтированным с обратной стороны платы модема. В этом случае модем может связываться с мобильным устройством или компьютером по Bluetooth. Также есть возможность соединения через последовательный порт. Для этого на плате модема есть переключатель, по которому подается либо отключается питание на модуль Bluetooth.

Подключение бортового модема к полетному контроллеру

Наборы модемов могут поступать в продажу с различными вариантами соединительных проводов и вовсе не обязательно разводка проводников на 6-контактном разъеме типа MiniMOLEX совпадет с разводкой порта SERIAL0 на плате CRIUS AIOP. Пользуясь тонкой швейной иглой, осторожно приподнимите фиксирующий лепесток разъема и вытащите контакт из посадочного места. Затем аккуратно вставьте контакт на новое место. Будьте осторожны, не сломайте фиксирующий лепесток в ячейке разъема.

В прошивке нужно установить правильную скорость обмена данными. Найдите строку

```
#define SERIAL0_COM_SPEED 115200
```

и замените значение скорости тем значением, которое задано в настройках модема. Такую же скорость надо задать в интерфейсе программы MultiWii WinGUI, если вы используете ноутбук.

ПРИМЕЧАНИЕ

Не забывайте, что теперь даже по проводу USB контроллер будет соединяться с компьютером на новой скорости.

Подключение модема к порту SERIAL3 полетного контроллера

Если вы используете прошивку MahoWii, то можете подключить модем к порту SERIAL3, тем самым освободив порт SERIAL0/FTDI для других нужд. Найдите в прошивке, в начале файла config.h, следующие строки и раскомментируйте их:

```
#define TELEMETRY_FRSKY
#define TELEMETRY_FRSKY_SERIAL 3
#ifdef TELEMETRY_FRSKY
    #define SERIAL3_COM_SPEED 57600
#endif
```

Строго говоря, этот фрагмент кода подразумевает подключение модуля телеметрии FrSKY, но также работает с модемами 3DR Radio. Через порт SERIAL3 в данном случае при помощи радиомодема можно работать с программами MultiWii WinGUI и EZ-GUI Ground Station точно так же, как и через порт SERIAL0.

В нашем примере в настройках прошивки указана скорость 57 600 бод, она может быть другой, но в любом случае должна совпадать со скоростью обмена в настройках радиомодема.

Подключение и настройка приемника GPS

Подключение стандартного фабричного модуля GPS мы рассмотрим на примере двух популярных приемников: CRIUS NEO-6M v3.0 с обычной керамической патч-антенной (рис. 6.17) и CRIUS NEO-6M v2.0 с активной керамической антенной (рис. 6.18). Оба эти приемника изготовлены на основе модуля u-blox NEO-6M, содержат внешнюю энергонезависимую память EEPROM 32k для хранения текущих настроек и перезаряжаемую литиевую батарейку в качестве резервного источника питания для хранения альманаха. Светодиод FIX, расположенный, к сожалению, с обратной стороны платы, своим миганием сообщает, что приемник вошел в режим захвата спутников 2D/3D Fix.

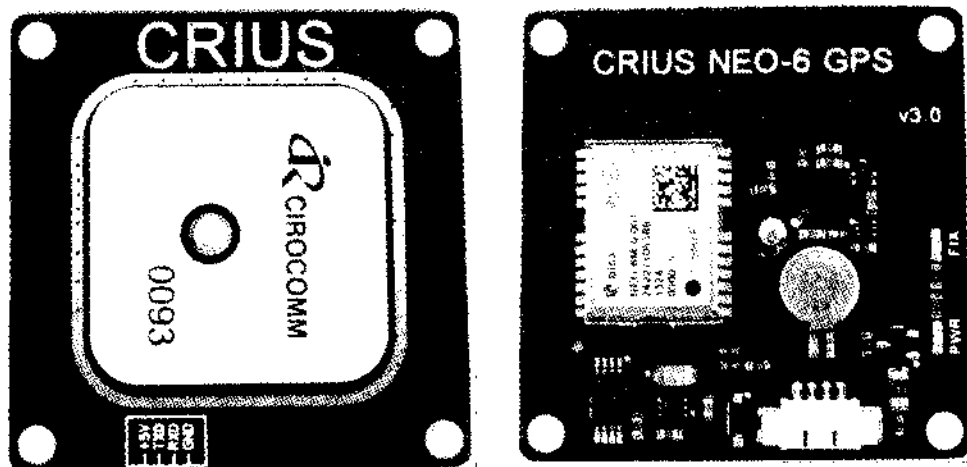


Рис. 6.17. Приемник CRIUS NEO-6M v3.0 с обычной антенной

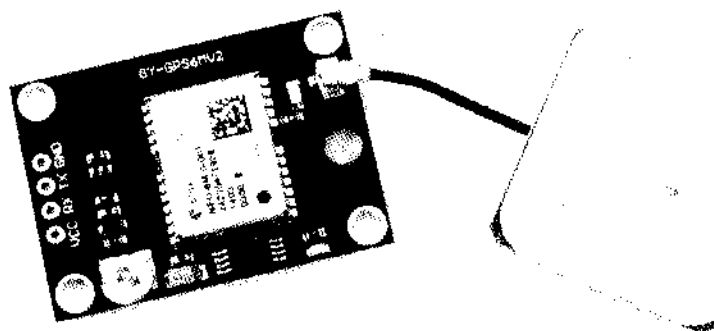


Рис. 6.18. Приемник CRIUS NEO-6M v2.0 с активной антенной

Приемник с активной антенной имеет меньшие габариты и вес, но обеспечивает лучшую чувствительность. По наблюдениям автора, уровень принимаемого сигнала выше на 30–40%.

Вопрос резервного хранения данных очень важен для этих приемников. Первая версия приемника не содержала EEPROM для хранения настроек, поэтому при разряде резервного источника все настройки терялись. Это было очень неудобно, зачастую уже на поле выяснялось, что все настройки утрачены и использовать приемник невозможно. Сейчас эта проблема снята, резервный источник используется только для хранения данных альманаха. Емкость этой батарейки всего 5 мА·ч, полного заряда хватает для хранения альманаха в течение 3–4 дней. Если батарейка разряжена, то для полного заряда требуется подавать питание на приемник минимум в течение 3-х часов. Если не поддерживать заряд батарейки дома, то во время полетов она успевает зарядиться максимум на 20–30%, этого хватает, чтобы хранить альманах и обеспечивать быстрый "горячий" старт в промежутке между отдельными полетами в течение нескольких часов. Впрочем, продолжительность "холодного" старта на открытой местности обычно не превышает 40–60 с, поэтому теперь потеря данных альманаха — не проблема.

Прежде всего, скачайте с сайта производителя и установите самую свежую версию программы u-Center для настройки и проверки приемника. Скачивание доступно по адресу <http://www.u-blox.com/en/evaluation-tools-a-software/u-center/u-center.html>. Во время подготовки книги была доступна версия 8.16.

Подключение приемника к компьютеру

Подключите приемник к вашему адаптеру USB-COM, соблюдая правильную полярность питания и соединяя линии Tx и Rx приемника и адаптера перекрестно: Tx → Rx, Rx → Tx. Затем подключите приемник к компьютеру.

В зависимости от версии прошивки приемника, с большой долей вероятности может случиться досадное недоразумение: Windows распознает ваш приемник, как трекбол Microsoft BallPoint, и установит соответствующий драйвер. В этом случае поток данных с приемника будет восприниматься операционной системой, как управляющие сигналы трекбола. При подключенном приемнике указатель мыши будет хаотично прыгать по экрану, периодически имитируя нажатия кнопок. Чтобы устранить это недоразумение, внесите небольшое изменение в реестр Windows. Запустите системную утилиту Regedit, откройте ветку реестра

```
HKEY_LOCAL_MACHINE\SYSTEM\CurrentControlSet\services\sermouse
```

и измените значение параметра Start с 3 на 4. Затем перезагрузите компьютер. После перезагрузки в системе после подключения адаптера и приемника должен быть виден только виртуальный COM-порт.

По умолчанию в приемниках NEO-6M установлена скорость обмена данными 9600 бод и протокол выходного потока данных NMEA. Но в приемниках, купленных с рук или настроенных продавцом под конкретное устройство, эти параметры могут быть другими.

Подключите приемник к компьютеру и запустите программу u-Center (рис. 6.19). В меню **Receiver | Port** выберите нужный последовательный порт. Далее в меню **Receiver** поставьте галочку напротив строки **Autobauding**. Если скорость обмена заранее неизвестна или изменилась в процессе настройки, программа сама подберет правильную скорость. Далее выберите версию вашего приемника: **Receiver | Generation | u-blox 6**.

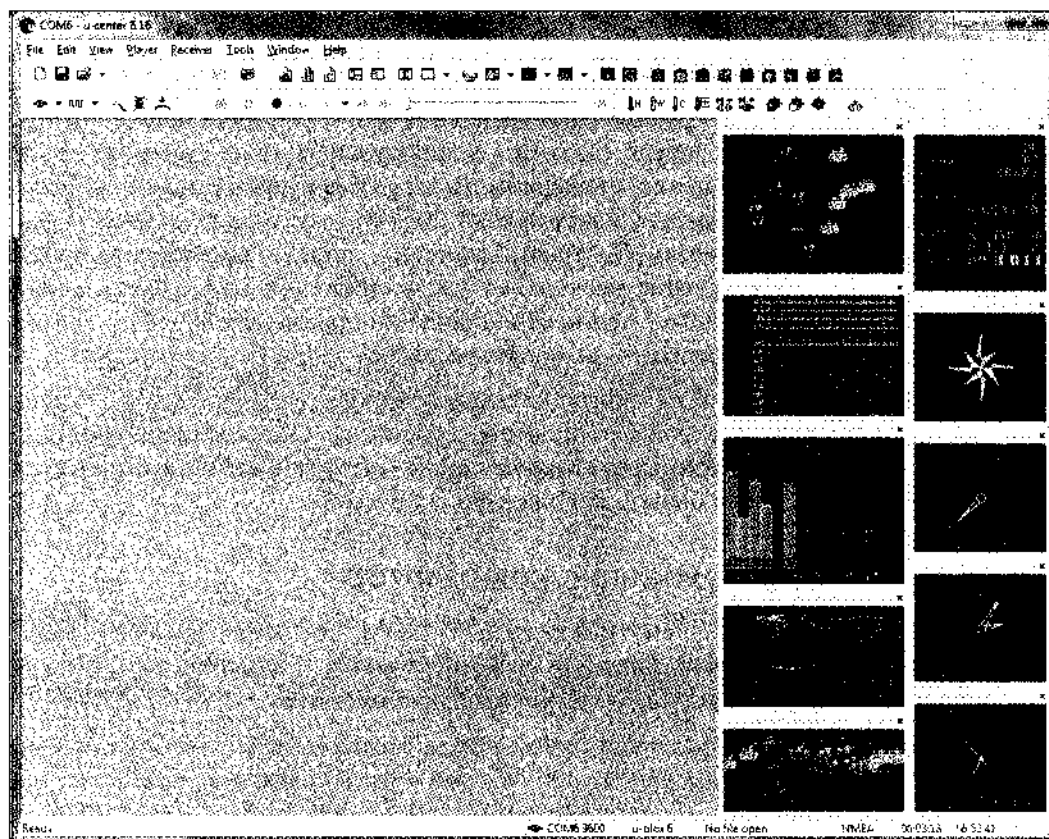


Рис. 6.19. Главное окно программы u-Center

Как правило, после этого соединение с приемником устанавливается автоматически, о чем говорит мигающий зеленым цветом значок в строке состояния внизу окна, а в окнах программы появляется отображение текущих данных.

Первый старт приемника может происходить очень долго, даже при хорошей видимости спутников. В некоторых случаях захват спутников 3D Fix может не произойти вообще. Не волнуйтесь, это нормально. Далее мы разберемся, как загрузить в приемник данные для холодного старта с внешнего сервера.

ПРИМЕЧАНИЕ

Первое, что нужно сделать после установления связи с новым приемником, — сохранить в файл его текущую конфигурацию на случай, если вы что-то случайно испортите в процессе настройки или экспериментов.

Выберите меню **Tools | GNSS Configuration** и нажмите кнопку **GNSS > File**. Текущие настройки будут прочитаны из приемника и сохранены в виде текстового файла. В дальнейшем этот файл можно редактировать, нажав кнопку **Edit**, если вы хорошо изучили спецификацию приемников u-blox и хорошо понимаете, что делаете. Готовые файлы настроек для специальных случаев можно часто встретить на форумах. Эти настройки нужны при работе с пользовательскими версиями прошивок или дополнительными устройствами наподобие адаптера для подключения приемника по шине I²C.

Сохраненную конфигурацию можно выгрузить в приемник из файла нажатием кнопки **File > GNSS**. Если при этом установлена галочка сохранения в энергонезависимую память (*non-volatile memory*), то настройки будут записаны в EEPROM и сохранятся после отключения питания. *В противном случае настройки будут действовать только до первого отключения питания.*

Следующий шаг после подключения приемника — регистрация на фирменном онлайн-сервисе u-blox AssistNow для получения логина и пароля.

Получение доступа к сервису AssistNow Online

При первом включении после долгого перерыва, когда резервный источник разряжен или данные альманаха или эфемериса, сохраненные в памяти, утратили свою валидность, старт приемника может затянуться на минуты или часы, а при неудачном стечении внешних факторов не состояться вообще.

AssistNow — это фирменный онлайн-сервис компании u-blox. Сообщив этому сервису свои текущие или предполагаемые координаты, вы тут же получаете в ответ набор данных (альманах, эфемериды, точное время) для данной точки земной поверхности в момент запроса. Этот альманах через последовательный порт загружается в приемник, после чего приемник в течение нескольких секунд переходит в режим 3D Fix.

Сервис полностью бесплатный и доступен всем при наличии интернет-соединения. Логин и пароль предоставляются в автоматическом режиме. Отправьте письмо с темой "login/password request" на адрес agps-server@u-blox.com. Через несколько минут вы получите автоматическое ответное письмо, в котором будет ваш логин и пароль. Обычно в качестве логина используется адрес электронной почты, с которого отправлено письмо. В письме сказано, что доступ к сервису предоставляется в течение нескольких часов после отправки письма, но на самом деле обычно доступен сразу, как только вы получили ответ.

Выберите в меню u-Center пункт **Tools | AssistNow Online | AssistNow Oline (u-blox 5-7)**. В поля **Latitude** (широта) и **Longitude** (долгота) введите ваши предполагаемые координаты. Их можно определить при помощи смартфона или посмотреть на карте maps.google.com. Высоту **Altitude** и погрешность **Accuracy** можно задать нулевыми. Далее введите свои логин и пароль, адрес сервера и номер серверного порта не меняйте. Запрос пакета данных **Request — full** (полный набор всех доступных данных).

Далее необходимо выбрать команду сброса, которая будет передана приемнику после загрузки данных (рис. 6.20). Рекомендуем всегда выбирать полный "холодный" рестарт (cold), т. к. при быстром "горячем" рестарте приемник иногда почему-то остается в состоянии 2D Fix. Холодный рестарт длится на 20–30 с дольше, но гарантированно перезапускает приемник в полностью рабочее состояние.

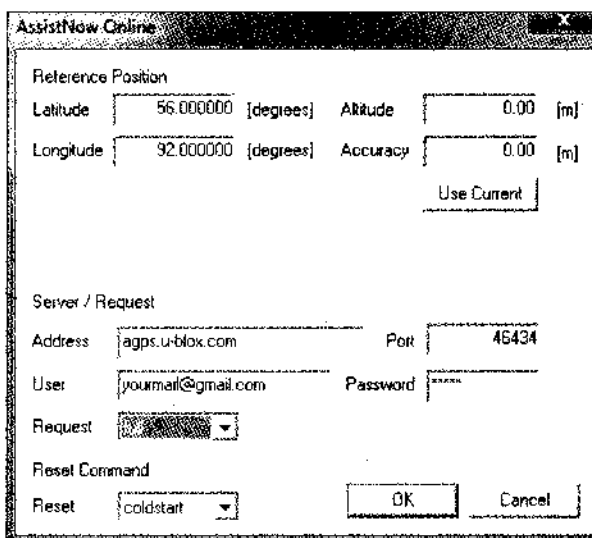


Рис. 6.20. Настройки сервиса AssistNow Online

Теперь нажмите кнопку **OK**, и начнется загрузка данных с сервера в ваш приемник. Это займет 3–4 с. После того как приемник перезагрузится, определит текущие координаты и войдет в режим 3D Fix, вы можете вновь открыть окно **AssistNow Online**, нажать кнопку **Use Current** для использования текущих координат и повторно загрузить уточненные данные. Все введенные значения полей сохраняются в памяти компьютера и могут быть использованы при следующем запросе. Но, как правило, при нормальной эксплуатации приемника с небольшими, не более недели, перерывами, необходимость повторных обращений к сервису не возникает.

Изменение текущих настроек

Для подключения приемника к полетному контроллеру необходимо изменить лишь три основные настройки: скорость последовательного порта, частоту обновления навигационных данных и протокол потока данных. В программе **u-Center** при подключенном приемнике нажмите клавишу <F9>. Откроется окно настроек и сообщений. Убедитесь, что в левом нижнем углу нажата кнопка **Disable/Enable Autopolling** (названия кнопок появляются при наведении указателя мыши). Это функция автоматического опроса настроек приемника. Настройки считываются примерно раз в три секунды.

В левом столбце выберите раздел **UBX** и подраздел **CFG (Config)**. Ниже в списке выберите пункт **PRT (Ports)**. Теперь в списке справа выберите опции именно так,

как показано на рис. 6.21, и нажмите кнопку **Send** в левом нижнем углу. Настройки будут отправлены в приемник и начнут действовать *до первого отключения питания*. Для сохранения настроек в EEPROM необходимо выполнить отдельную процедуру.

ВНИМАНИЕ!

Обратите особое внимание на то, что в раскрываемом списке **Protocol in** должна быть выбрана именно строка **0+1+2 - UBX+NMEA+RTCM**, поскольку именно по протоколу RTCM в приемник загружаются настройки. Если вы случайно отключите этот протокол, то рискуете потерять возможность менять настройки через u-Center.

Выходным протоколом в нашем случае укажем только NMEA, поскольку нет никакой необходимости выводить смешанный поток данных NMEA+UBLOX или использовать проприетарный протокол UBLOX.

Скорость обмена 57 600 бод соответствует частоте обновления навигационных данных 5 Гц. Кроме того, это рекомендованная скорость для прошивки MultiWii 2.3.

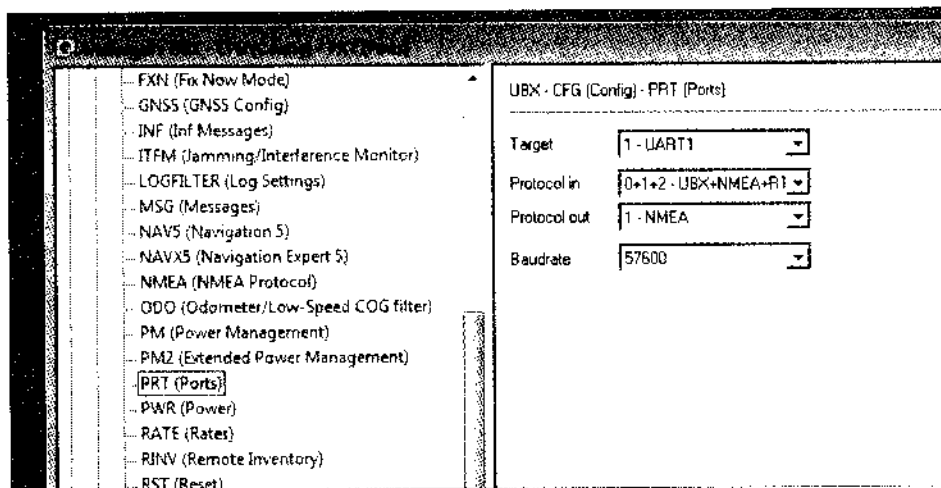


Рис. 6.21. Настройка скорости порта и протокола данных

Теперь в левой колонке выберите пункт **RATE (Rates)** и задайте новую скорость обновления навигационных данных. По умолчанию задана частота 1 Гц, т. е. свежие навигационные данные поступают в контроллер один раз в секунду. Но для управления коптером, как мы уже говорили выше, необходимо обновлять данные как минимум с частотой 5 Гц. Увеличение частоты обновления данных требует увеличения скорости обмена порта. Для частоты 5 Гц порт должен работать со скоростью не менее 57 600 бод, именно ее мы установили только что. Задайте настройки, как показано на рис. 6.22, и нажмите кнопку **Send**. Сразу после этого в главном окне программы должно быть визуально заметно, что данные стали обновлять намного чаще, а значок соединения в строке статуса должен мигать с частотой 5 Гц.

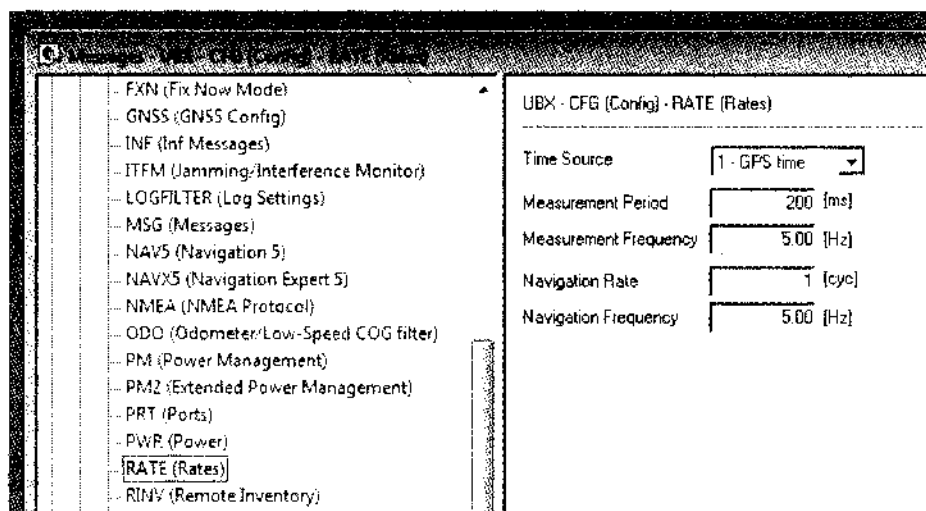


Рис. 6.22. Настройка частоты обновления навигационных данных

Чем выше частота обновления данных, тем точнее работает функция позиционирования и удержания в полетном контроллере. В зависимости от модификации приемника и прошивки, некоторые модули u-blox могут работать с частотой 10 Гц. Но есть нюансы. Путем некоторых ухищрений, введя команду `$PMTK220,100*2F` в ручном режиме, можно заставить любой приемник NEO-6 выдавать пакеты данных с частотой 10 Гц. Но если при этом сам чипсет приемника не способен производить измерения с частотой более 5 Гц, то очевидно, что при частоте вывода пакетов

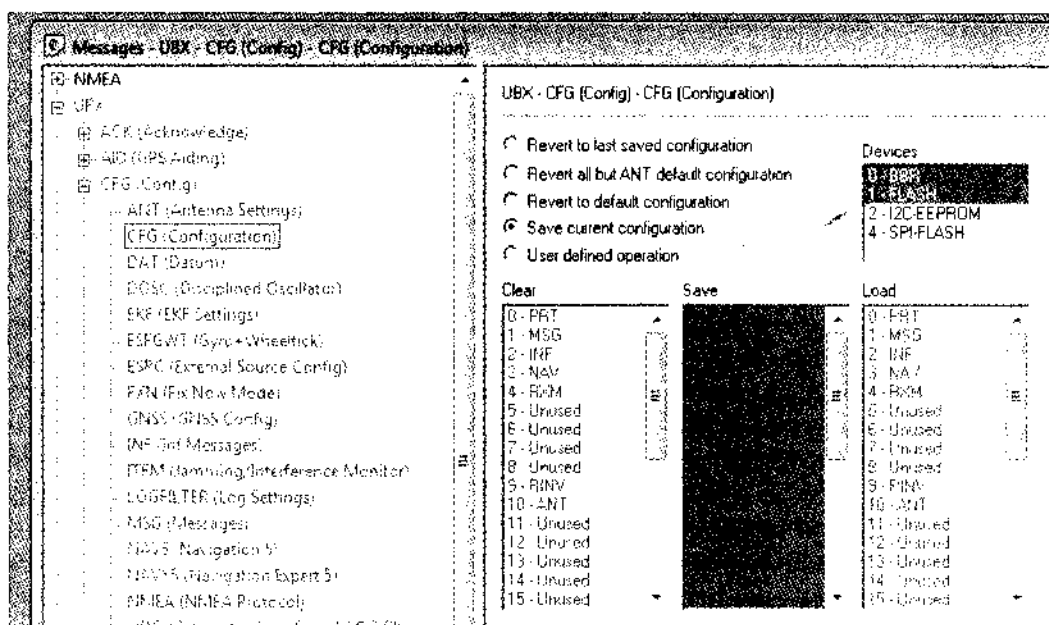


Рис. 6.23. Сохранение текущих настроек в энергонезависимую память

10 Гц каждый пакет данных будет дублироваться, и реального прироста скорости обновления мы все равно не получим.

Чтобы проверить возможности вашего варианта приемника, введите в настройки следующие параметры: **Measurement Period = 100ms**; **Navigation Rate = 1**. Если при этом поле **Navigation Rate** не становится розовым, а после нажатия кнопки **Send** под ней не появляется сообщение об ошибке, значит, ваш приемник может обновлять данные с частотой 10 Гц. В этом случае не забудьте увеличить скорость порта до 115 200 бод, иначе для передачи потока данных не хватит скорости порта.

Убедившись, что с новыми настройками приемник функционирует нормально, можете сохранить их в энергонезависимую память. В левом столбце выберите строку **CFG (Config)**, в правой части установите переключатель **Save current configuration** (рис. 6.23) и нажмите кнопку **Send**. На этом настройка завершена. Перейдите в меню **Tools | GNSS Configuration** и сохраните текущую конфигурацию в отдельный файл. Это поможет при необходимости быстро восстановить настройки.

Подключение приемника к полетному контроллеру

Приемник подключается к порту SERIAL2, причем достаточно подключить лишь выход Tx ко входу Rx2 полетного контроллера, т. к. мы подключаем заранее настроенный приемник и настройка "на лету" средствами прошивки нам не понадобится.

В случае использования прошивки MultiWii 2.3 вносить изменения в настройки практически не потребуется. Необходимо найти следующие строки и убедиться, что они раскомментированы:

```
#define GPS_SERIAL 2
#define GPS_BAUD 57600
#define NMEA
#define MAG_DECLINATION x.xxxf
```

Этих строк достаточно для того, чтобы начать использовать функцию GPS. Убедитесь, что параметр **GPS_BAUD** соответствует скорости последовательного порта приемника, а в параметре **MAG_DECLINATION** правильно указано магнитное склонение для вашей местности. Про настройку этого параметра было сказано ранее, в разделе о настройке прошивки MultiWii.

Строку `//#define INIT_MTK_GPS` в нашем случае следует оставить закомментированной. Она активирует процедуру автоматической настройки параметров приемников на основе чипсета MTK и в нашем случае не подходит для приемников u-blox.

Строка `#define GPS_LED_INDICATOR` включает мигание светодиода В при поступлении данных с приемника. Пока нет захвата спутников 3D Fix, светодиод мигает в такт поступающим пакетам данных с приемника. В режиме 3D Fix одна короткая вспышка соответствует пяти спутникам, две вспышки — шести спутникам и т. д.

Данным GPS присуща случайная погрешность, поэтому координаты пользователя не застревают в некой точке, а с каждым новым измерением "прыгают" внутри окружности, представляющей собой границы зоны погрешности. Соответственно, если квадрокоптер будет идеально отслеживать координаты каждого измерения, то в режиме удержания позиции он начнет хаотично метаться внутри окружности с радиусом 2–4 м. Поэтому данные GPS подвергают усреднению и фильтрации.

Строка `#define GPS_LEAD_FILTER` активизирует режим предиктивной фильтрации, чтобы скомпенсировать задержку данных GPS, когда коптер быстро сменил позицию, а новые координаты еще не поступили. Алгоритм фильтра пытается ввести предсказание координат на основании известного ранее вектора движения и данных об ускорениях с акселерометра.

Строку `//#define GPS_FILTERING` лучше оставить закомментированной. Это фильтр с сильным усреднением для компенсации шумов данных, когда данные распределены внутри зоны погрешности чересчур хаотично. Фильтр вносит большую задержку в работу функции позиционирования. Может быть полезен при использовании старых модификаций приемников.

Строка `#define GPS_WP_RADIUS 200` определяет расстояние до заданной точки в сантиметрах, при котором можно считать, что точка уже достигнута. Указывать расстояние менее 200 см нет смысла, т. к. это минимальная погрешность применяемых нами гражданских приемников. В противном случае контроллер коптера может считать, что нужные координаты не достигнуты и бесконечно долго флуктуировать около точки назначения.

Параметр `#define NAV_SLEW_RATE 30` определяет сглаживание случайных выбросов данных. Если коптер ведет себя стабильно в режимах GPS HOLD и GPS HOME, можно попробовать уменьшить этот параметр до 15.

Стартовая позиция GPS HOME обнуляется каждый раз при арминге моторов. То есть, квадрокоптер считает "домашней" ту точку, в которой активированы моторы. Но это не всегда приемлемо для опытных пилотов. Например, при полетах по FPV оператор может посадить коптер на крышу здания, отключить моторы, затем взлететь снова. В этом случае первоначальные домашние координаты будут утрачены и в случае срабатывания функции Filesafe при утрате связи коптер автоматически вернется на крышу здания, а не к оператору. Чтобы этого не случилось, можно раскомментировать строку

```
//#define DONT_RESET_HOME_AT_ARM
```

При этом в качестве домашних запоминаются координаты, в которых выполнена команда калибровки гироскопов (левый стик до упора влево и вниз, правый стик до упора вверх).

Подключение приемника GPS с прошивкой MaHoWii

Настройка прошивки MaHoWii для подключения приемника NEO-6M лишь незначительно отличается от настроек прошивки MultiWii v2.3. Необходимо задать высоту полета, которую будет поддерживать коптер при автоматическом возвращении

домой по функции RTH в строке `#define ALT_TO_RTH 3000`. Высота задается в сантиметрах.

В строке `#define ALT_TO_RTH_FINISH 200` указывается высота зависания при достижении точки возврата. Не следует указывать высоту меньше 200 см, т. к. за время полета может накопиться погрешность барометра. Кроме того, как вы помните, барометр дает большую погрешность при висении на малой высоте.

Строка `#define INS_PH_NAV_ON` включает инерциальную систему удержания позиции, которая учитывает данные акселерометра для повышения точности удержания.

Подключение дисплея

Теперь, когда можно приобрести по доступной цене графические OLED- или TFT-модули, приобретение двустрочного текстового дисплея для подключения к полетному контроллеру вряд ли целесообразно. Поддержка OLED-дисплеев встроена в прошивку MultiWii. Для подключения цветного TFT-дисплея автор разработал собственную конструкцию на базе микроконтроллера ATmega328.

Монохромный OLED дисплей CRIUS CO-16

Дисплей подключается по протоколу I²C к соответствующему четырехконтактному разъему полетного контроллера. На этот же разъем выведено напряжение питания +5 В. Обратите внимание, что в отличие от "перекрестного" подключения по последовательному протоколу UART, соединение для I²C должно быть прямым: SDA → SDA, SCL → SCL.

Для активации поддержки OLED-дисплея в прошивке найдите секцию `LCD/OLED - display settings` и раскомментируйте строку

```
#define OLED_I2C_128x64
```

Если вы не хотите, чтобы при включении питания на дисплей выводилась стартовая заставка в виде логотипа MultiWii, то закройте комментарием строку

```
#define SUPPRESS_OLED_I2C_128x64LOGO
```

Теперь включим вывод телеметрии на дисплей строкой

```
#define LCD_TELEMETRY
```

Информация разбита на девять страниц, с 1 по 9. Нулевой странице соответствует пустой экран. Можно задать автопереключение страниц строкой

```
#define LCD_TELEMETRY_AUTO "123452679"
```

или установить произвольный порядок автопереключения, например

```
#define LCD_TELEMETRY_AUTO "212232425262729"
```

где странице номер два уделено особое внимание. Должна быть раскомментирована только одна из двух упомянутых строк.

Страницы можно переключать вручную, движением правого стика до упора вправо вверх. Для этого строки автопереключения должны быть закомментированы, а раскомментировать надо строку

```
#define LCD_TELEMETRY_STEP "0123456789"
```

Порядок следования страниц может быть произвольным, любые страницы, включая нулевую, можно удалить из последовательности или повторить.

Настройка параметров через меню дисплея

При помощи стиков пульта и меню, отображаемого на дисплее, можно настроить различные параметры: PID, экспоненты, минимальный и максимальный газ, привязку переключателей AUX. Прямо скажем, делать это, глядя на крошечный монохромный экран — удовольствие на большого любителя. Но в ситуации, когда подходящий смартфон или ноутбук недоступен, может пригодиться и дисплей. Для включения функции конфигурирования раскомментируйте строку

```
#define LCD_CONF
```

Чтобы разрешить изменение привязки переключателей AUX, раскомментируйте еще одну строку:

```
#define LCD_CONF_AUX
```

Для входа в меню конфигурации надо левый стик переместить вправо вниз, а правый стик — вверх. Эти движения следует делать одновременно, иначе вместо входа в меню вы можете левым стиком активировать моторы. Полный перечень движений стиков для настройки через дисплей приведен в *приложении 3*.

Проблемы с подключением дисплеев CRIUS OLED и их решение

Дисплеям CRIUS CO-16 версии 1.0 присущи конструктивные недостатки, которые устранены в более новых версиях. Но дисплеев первой версии и их клонов было изготовлено очень много, поэтому вероятность купить неустойчиво работающий модуль довольно велика. Прежде всего, упомянутым дисплеям присуща проблема неустойчивого сброса, так называемое "звездное небо". При включении питания встроенный контроллер дисплея не сбрасывается, очищая видеопамять, и экран хаотично покрывается одиночными светящимися пикселями. Далее дисплей уже не реагирует на команды и данные с полетного контроллера. Некоторые экземпляры дисплеев зависают изредка, некоторые при каждом включении.

Простым и широко известным способом решения этой проблемы является включение резистора с номиналом 150–200 Ом в разрыв плюсового провода питания. Резистор маломощный, затягивается вместе с проводом и местом пайки в термоусадочную трубку. Может потребоваться подобрать номинал резистора для более устойчивой работы. У автора дисплей работает с сопротивлением 180 Ом. Этот способ хорош тем, что требует минимальные навыки пайки.

Если включение резистора не помогает, попробуйте подключить RC-цепь к выводу сброса контроллера дисплея, как показано на рис. 6.24 и 6.25. Этот способ требует наличия соответствующих инструментов и навыка пайки миниатюрных компонентов.

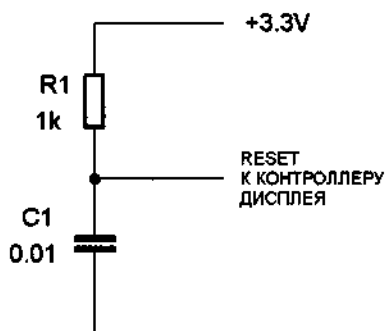


Рис. 6.24. Схема подключения RC-цепи сброса

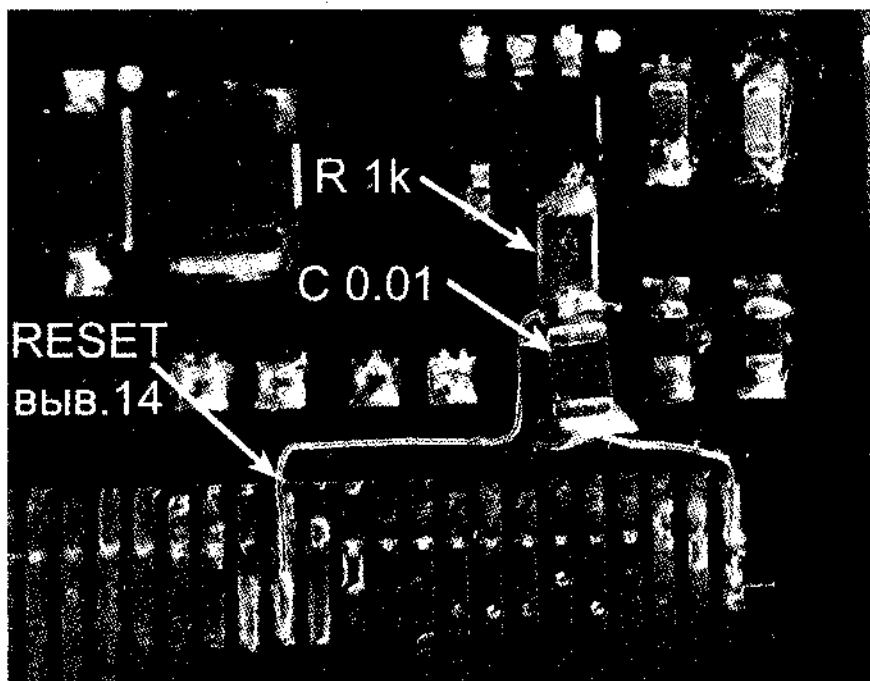


Рис. 6.25. Монтаж компонентов цепи сброса

В сочетании определенных экземпляров полетного контроллера и дисплея может возникнуть ситуация, когда при подключении дисплея резко возрастает количество ошибок на шине I²C, полетный контроллер неустойчиво читает данные с датчиков либо вообще зависает. Предположительно, это вызвано чрезмерной "подтяжкой" линий SCL и SDA к напряжению питания встроенным контроллером дисплея, что

приводит к неустойчивой работе отдельных экземпляров сенсоров на плате полетного контроллера. Проблема может быть устранена последовательным включением резисторов с сопротивлением 560–750 Ом в разрыв проводов SCL и SDA, соединяющих дисплей и полетный контроллер. Точное значение номинала резисторов надо подобрать опытным путем.

Самодельный цветной дисплей

Вниманию читателей, имеющих некоторый опыт самостоятельного изготовления печатных плат, предлагается авторская конструкция цветного дисплея для MultiWii. Дисплей построен на основе готового дисплейного модуля с разрешением 128×160 точек, диагональю 1,8 дюйма и цветовой палитрой 262 000 оттенков. Обмен данными с дисплеем происходит по последовательному протоколу SPI. Поскольку в прошивке MultiWii поддержка этого протокола не реализована, в дисплее используется дополнительный микроконтроллер ATmega328. Он обменивается данными с полетным контроллером по внутреннему протоколу MSP (MultiWii Serial Protocol) и пересылает обработанные данные собственно в графическую память дисплея по SPI. Дисплей кроме графической матрицы содержит в себе специальную микросхему, так называемый драйвер дисплея. Драйвер содержит цепи управления ЖК-матрицей и буферную память изображения. Он подчиняется внешним командам и позволяет извне обращаться к отдельным пикселям изображения. Иными словами, микроконтроллер ATmega328 служит посредником между полетным контроллером и драйвером дисплея, обрабатывая данные и пересылая их драйверу.

Конструктивно дисплей выполнен в виде "бутерброда", состоящего из собственно дисплейного модуля и самодельной платы расширения, которая припаяна прямо на выводы платы дисплея (рис. 6.26 и 6.27).

Плата расширения представляет собой несложную самодельную печатную плату, на которую припаян готовый китайский клон модуля Arduino Pro Mini с рабочим

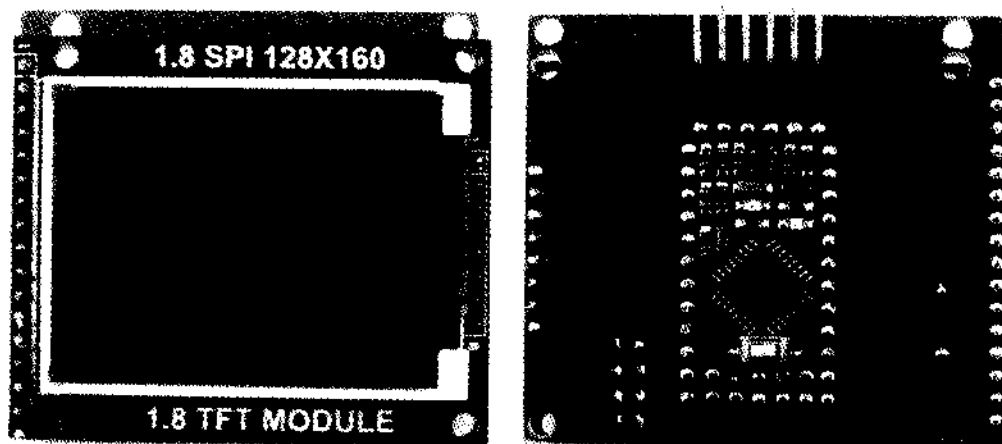


Рис. 6.26. Общий вид дисплейного модуля

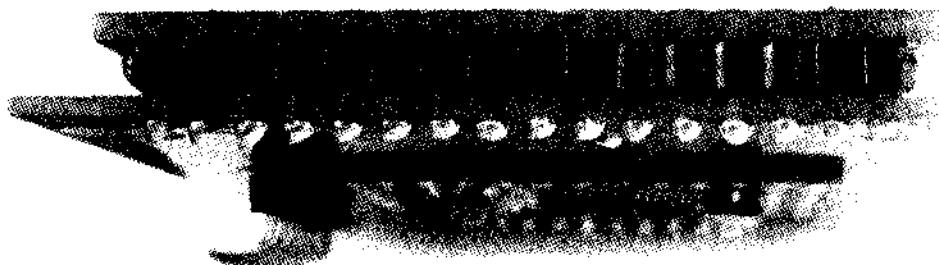


Рис. 6.27. Монтаж платы расширения дисплейного модуля

напряжением 5 В и тактовой частотой 16 МГц. Использование готового модуля намного рациональнее в отношении затрат времени и денег, чем самостоятельное изготовление печатной платы, содержащей микроконтроллер и навесные элементы. Встречаются различные варианты клонов Arduino Pro Mini. На рис. 6.28 показан внешний вид платы, использованной в дисплее. Разводка расширяющей платы дисплея выполнена под этот вариант клона. Можно приобрести другую версию модуля Arduino, но тогда придется изменить разводку расширяющей платы.

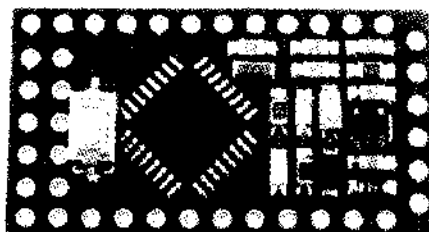


Рис. 6.28. Готовый модуль Arduino Pro Mini для дисплея

Дисплейный модуль можно приобрести в России, в магазинах, торгующих аксессуарами и модулями расширения для Arduino, либо заказать в Китае или на eBay. Также потребуется приобрести клон модуля Arduino Pro Mini. Автор приобретал компоненты на Aliexpress. Ключевые слова для поиска: "TFT SPI display" и "Arduino Pro Mini".

Печатная плата изготавливается любым удобным способом. Все они многократно и подробно описаны в Интернете и радиоловительской литературе, поэтому здесь мы не будем останавливаться на технологических подробностях. Отметим лишь, что ширина проводников и зазоры между контактными площадками позволяют использовать "лазерно-утюжную технологию" (ЛУТ). Контактные площадки под монтаж модуля Arduino выполнены без отверстий. Для качественной пайки достаточно смазать флюсом площадки и отверстия модуля. Припой легко затекает в отверстие модуля Arduino и надежно приплавляет его к расширяющей плате.

Принципиальная электрическая схема изображена на рис. 6.29. Исходный файл схемы, а также рисунок печатной платы в формате DipTrace можно скачать на сайте издательства (см. приложение 4). Схема несложная и содержит минимум деталей, поэтому все соединения можно выполнить даже без печатной платы, отрезками тонкого провода.

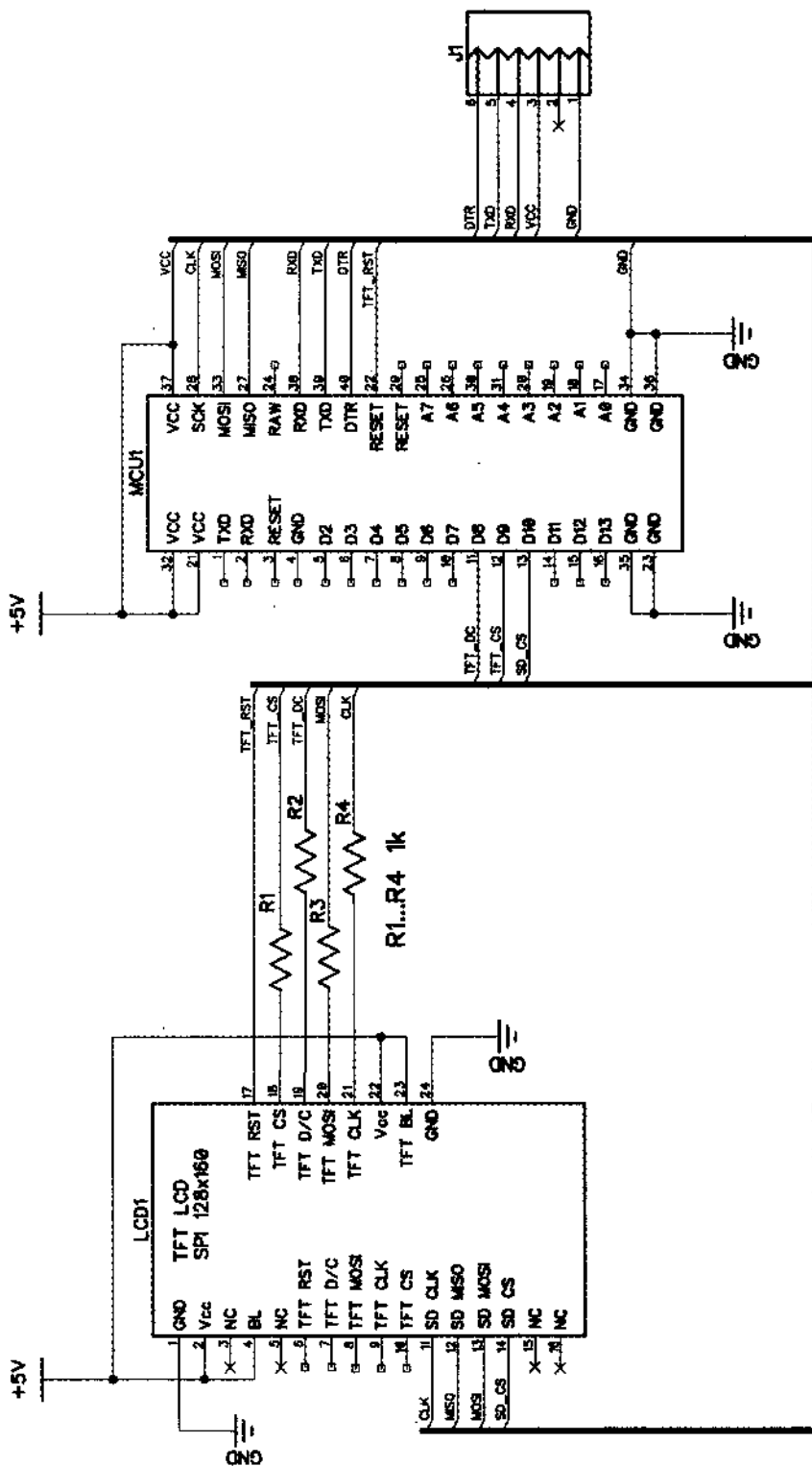


Рис. 6.28. Схема дисплея

Резисторы R1–R4 предназначены для взаимного согласования логических уровней между модулями. Дело в том, что хоть общее напряжение питания конструкции 5 В, но внутреннее рабочее напряжение питания дисплейного модуля — 3,3 В, вырабатывается встроенным стабилизатором. А рабочее напряжение модуля Arduino — 5 В. Соответственно различаются напряжения логических уровней двух модулей. Если выходы Arduino Pro Mini соединить напрямую со входами контроллера дисплея, то он может выйти из строя. Резисторы R1–R4 ограничивают ток в цепи и в сочетании с внутренним сопротивлением входов работают, как делители напряжения.

Дисплейный модуль содержит слот для подключения карты SD, разведенный на отдельные выводы. Причем согласующие резисторы уже установлены на плате модуля. В схеме устройства предусмотрено подключение карты SD к микроконтроллеру, это позволяет в будущем использовать дисплей и для записи логов (журналов) полета. Но в настоящее время функция ведения лога в прошивке не реализована.

Для подключения дисплея к полетному контроллеру, а также для записи прошивки используется разъем J1. По разводке выводов он совпадает с популярной платой MinimOSD и совместим с фирменным адаптером FTDI USB-COM и его клонами. Поэтому один и тот же адаптер пригодится для записи прошивок в разные модули. Поскольку дисплей подключается к порту SERIAL0, то для подключения по USB дисплей следует отключать.

Запись прошивки в контроллер дисплея

В прошивке дисплея используется свободно распространяемая графическая библиотека для работы с драйвером дисплейного модуля. Для тех, кто раньше не сталкивался с программированием, коротко поясним, что библиотека — это заранее написанный набор стандартных процедур для работы с чем-либо. В нашем случае с дисплеем. Любое стандартное действие, будь то очистка экрана, вывод текста или рисование прямоугольника, выполняется через обращение к готовой процедуре библиотеки.

Но в стандартном наборе библиотек Arduino IDE нужной нам библиотеки нет, ее следует установить отдельно. В скачанном с сайта издательства архиве найдите папку с названием Adafruit_ST7735 и скопируйте ее полностью, не меняя название, в папку для библиотек Arduino — C:\Program Files\Arduino\libraries. Затем скопируйте туда же библиотеку графического ядра Adafruit_GFX. Содержимое папки библиотек должно выглядеть приблизительно так, как на рис. 6.30.

Теперь запустите Arduino IDE и откройте меню **Файл | Образцы**. В списке должна появиться строка **Adafruit_ST7735**. Это означает, что графическая библиотека установлена правильно. Номер в ее названии соответствует номеру микросхемы драйвера дисплея.

ПРИМЕЧАНИЕ

В некоторых случаях в модуле дисплея может быть установлен драйвер Samsung S6D02A1. К сожалению, по внешнему виду модуля это невозможно распознать, а про-

давцы заранее не предупреждают. Поэтому, если правильно собранный дисплей не подает признаков жизни, необходимо установить библиотеку `Adafruit_QDTech` и внести исправления в прошивку.

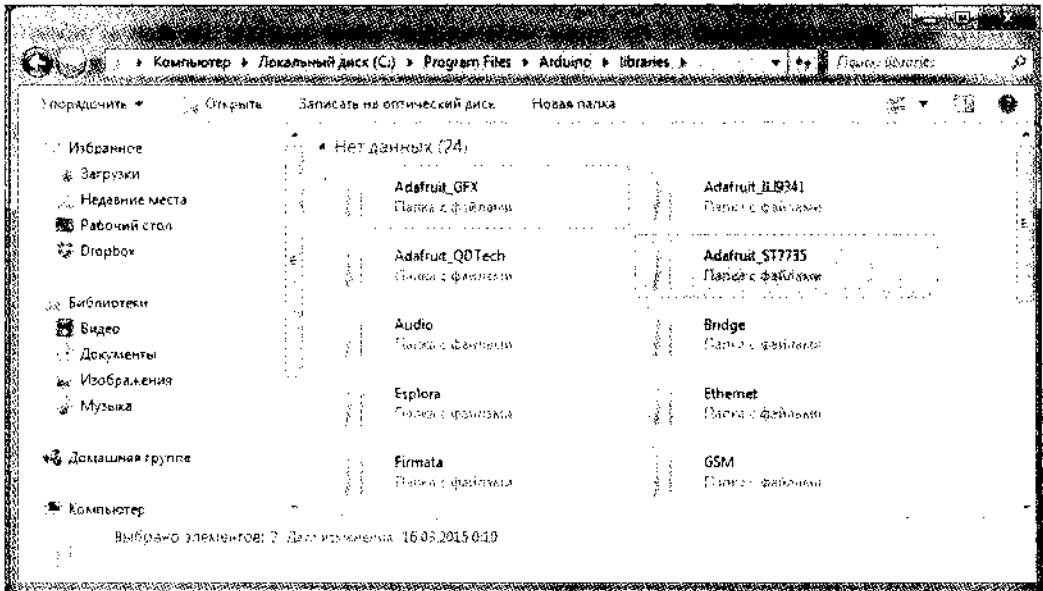


Рис. 6.30. Папка библиотек Arduino с графическими библиотеками дисплея

Настройка прошивки

По умолчанию прошивка готова к использованию без каких-либо изменений. Тем не менее, при желании пользователь может настроить под себя содержимое выводимых данных и их размещение на экране, даже не имея навыков программирования.

Вывод данных разбит на страницы. За формирование каждой страницы отвечает отдельный файл `page1.ino`, `page2.ino` и т. д. Всего страниц семь. Строка главного файла программы

```
#define START_PAGE 1
```

задает стартовую страницу при включении дисплея. Вы можете указать здесь любой другой номер из числа доступных.

```
#define TOTAL_PAGE 7
```

задает общее количество страниц. После достижения этого числа происходит возврат к первой странице, т. е. страницы переключаются по кругу. Следующий фрагмент программы задает порядок следования страниц:

```
case 1: show_1(); break; //STATUS
case 2: show_2(); break; //RADIO
case 3: show_3(); break; //ACTIVE MODE
```



```
case 4: show_4(); break; //GPS
case 5: show_5(); break; //MOTORS
case 6: show_6(); break; //SERVOS
case 7: show_7(); break; //SENSORS
```

Здесь case 1:, case 2: и т. д. — это порядковый номер отображаемой страницы. Например, если вы напишете

```
case 1: show_4(); break; //GPS
...
case 4: show_1(); break; //STATUS
...
```

то отображаемые страницы 1 (STATUS) и 4 (GPS) поменяются местами при отображении, и при включении питания первым будет отображаться статус GPS.

В файле `screenmap.h` указаны опорные координаты каждой надписи на каждой странице. Меняя эти координаты по своему усмотрению, вы можете переставлять на страницах данные и подписи к ним. На экране дисплея нулевая точка координат находится слева вверху. То есть, значения по оси *x* отсчитываются как обычно, слева направо. Но значения по оси *y* отсчитываются сверху вниз.

Страницы перелистываются перемещением правой рукоятки пульта вправо вверх до упора. При активации моторов на всех страницах внизу появляется предупреждающая красная строка.

Поскольку обмен данными происходит через порт SERIAL0, то при подключении провода USB дисплей следует отключать от разъема. В прошивке дисплея задана скорость порта по умолчанию 115 200. Если вы изменили скорость порта SERIAL0 в настройках контроллера, то в прошивке дисплея также следует установить новую скорость. Найдите в коде прошивки дисплея строку

```
Serial.begin(115200);
```

и в скобках укажите новое значение скорости обмена.

Дисплей можно подключить к порту SERIAL3, если к этому порту не подключен модем телеметрии. В этом случае также надо обратить внимание на совпадение скоростей портов.

Монтаж и подключение оборудования FPV

В общем случае, полеты с обзором по видеокамере — довольно дорогостоящее занятие, если использовать оборудование высокого качества с большим радиусом действия. Зачастую комплект такого оборудования стоит дороже самого коптера. Но для того чтобы начать отрабатывать навыки полетов и успешно провести первый сезон, нам не потребуются существенные затраты и сложное оборудование. Теперь разберемся, какие компоненты необходимы начинающему пилоту, а без каких вполне можно обойтись.

Одним из оптимальных и недорогих начальных вариантов может быть покупка набора, состоящего из малогабаритной CCD-видеокамеры, видеопередатчика, видеоприемника, пары всенаправленных антенн и видеоочков. Стоимость такого набора

заметно меньше, чем суммарная стоимость компонентов при покупке по отдельности. Набор обычно снабжается подробными инструкциями по подключению и необходимыми соединительными проводами. Но, к сожалению, такие наборы не всегда бывают в наличии по доступной цене, поэтому нужно быть готовым к самостоятельному подбору компонентов.

Видеокамера

Вместо использования двух видеокамер — курсовой и видовой — для начинающего пилота вполне достаточно одной камеры среднего качества, закрепленной на управляемом стабилизированном подвесе. Следовательно, отпадает потребность в видеокоммутаторе и освобождается один из радиоканалов, которых и так мало в недорогой аппаратуре радиоуправления.

Наиболее простым и очевидным решением будет покупка одной из специализированных популярных экшн-камер: GoPro, Xiaomi Yi или Mōbius. Для этих камер в продаже имеется широчайший выбор готовых стабилизированных подвесов различной степени сложности, разные аксессуары — чехлы, кабели, адаптеры — вплоть до специальных передатчиков, подключаемых прямо к разъему камеры.

ПРИМЕЧАНИЕ

Обратите внимание на наличие в камере композитного видеовыхода и выхода канала звука. Такая опция обычно обозначается как "A/V Output". Некоторые современные экшн-камеры оснащены только выходом стандарта HDMI, что делает невозможным подключение такой камеры к обычному видеопередатчику. Даже если наличие композитного видеосигнала обозначено в перечне опций, вы можете столкнуться с отсутствием специального кабеля для подключения к видеовыходу. При покупке экшн-камеры не забудьте одновременно с ней приобрести соответствующий видеокабель. Через этот кабель иногда на камеру можно подавать внешнее питающее напряжение.

Стоимость даже начального комплекта "экшн-камера + подвес" составляет около 6–8 тыс. руб., что может оказаться неприемлемо для начинающего пилота, особенно с учетом возможных аварий в процессе обучения. Учебный комплект начального уровня (рис. 6.31), состоящий из миниатюрной CCD-камеры и простого подвеса на двух сервомашинках, обойдется нам не дороже 1500 руб., весьма живуч и ремонтпригоден при авариях. Миниатюрная камера, как правило, вообще не страдает даже при самых сложных падениях.

Приобретая подвес для мини-камеры, обратите внимание, входят ли сервомашинки в комплект. Если нет, то отдельно купите сервомашинки Turnigy TG-9 или Hextronik HXT900, причем в двойном количестве, поскольку при авариях у них ломаются шестеренки редуктора.

При выборе видеокамеры предпочтителен вариант со встроенным стабилизатором питания, чтобы можно было питать камеру от источника с напряжением 7–12 В без отдельного внешнего стабилизатора. Следует избегать питания камеры и видеопередатчика от силовой батареи, т. к. в силовой цепи присутствуют импульсные помехи, засоряющие изображение. Наличие встроенного микрофона является преимуществом камеры, т. к. во время полета полезно слышать звук моторов, это элемент обратной связи между квадрокоптером и пилотом.

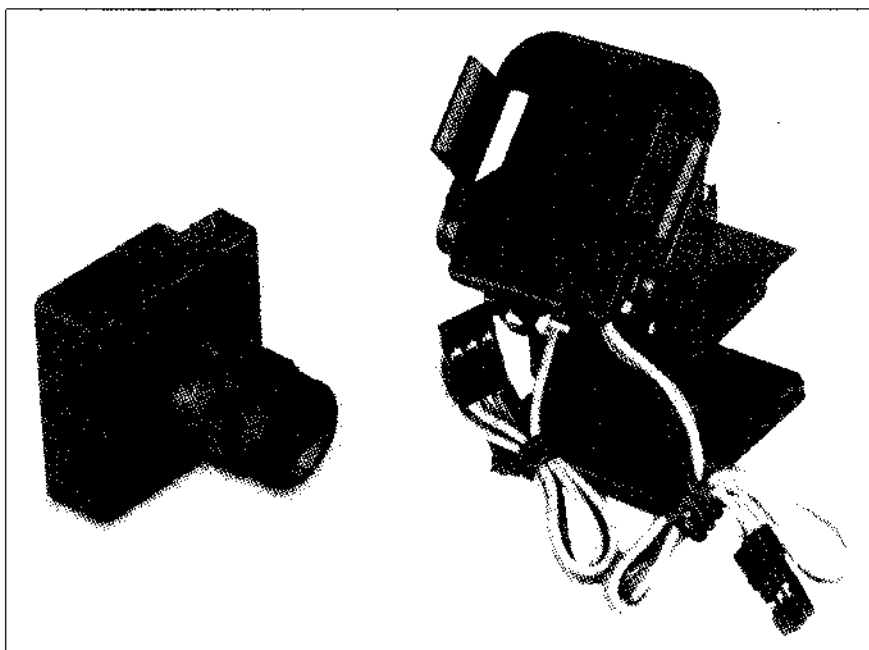


Рис. 6.31. Камера и подвес начального уровня на сервомашинках

Система изображения у большинства камер сейчас PAL, реже встречается NTSC, но видеоочки, мониторы и модули OSD способны автоматически определять систему. В крайнем случае можно задать систему принудительно в настройках очков и переключкой на модуле OSD.

Угол обзора объектива должен быть порядка 90–96°, чтобы обеспечить достаточный обзор. Встречаются камеры с углами обзора 110–120°. Но при таких углах возникают сильные оптические искажения перспективы, к которым нужно привыкнуть, и которые не для всех комфортны.

Одним из вариантов является использование малогабаритного автомобильного видеорегистратора. Если изготовить сменное крепление, можно переставлять регистратор с автомобиля на время полетов. Автор делал так на одном из своих коптеров. Но для этого нужно, чтобы регистратор имел композитный видеовыход.

Видеопередатчик и приемник

При выборе передатчика и приемника или очков со встроенным приемником нужно уделить особое внимание частотной совместимости. Наиболее часто используемым является диапазон 5,8 ГГц. Он разбит на 32 канала, таблица частот приведена в приложении 2. Некоторые универсальные передатчики и приемники могут использовать весь диапазон. Но чаще доступны только восемь каналов, и у разных производителей они различаются. Поэтому, если вы не покупаете готовый набор, обратите внимание на точное совпадение частот каналов, а не просто частотного диапазона. Проблема совместимости снимается, если применяется передатчик на

32 канала. Такой передатчик легко определить визуально, у него на плате есть двухпозиционный переключатель из 5 сегментов: $2^5 = 32$. Если есть шестой сегмент, то он не используется.

Наиболее популярными являются передатчики и приемники на основе модулей BOSCAM и их многочисленных клонов. Для начинающего пилота оптимальным решением будет покупка 32-канального передатчика TS5823 с выходной мощностью 200 мВт (рис. 6.32). Реальная дальность действия видеоканала при этом около 800–900 м, что сопоставимо с дальностью действия обычного пульта радиуправления Turnigy или аналогичного. Покупка более мощного передатчика имеет смысл, если аппаратура радиуправления позволяет улетать на большие расстояния. Самодельные передатчики на основе модулей BOSCAM имеет смысл делать только в условиях жесткой экономии веса для миниатюрных коптеров и при наличии радиолюбительского опыта.



Рис. 6.32. Малогабаритный видеопередатчик TS5823

Отдельно следует обсудить монтаж передатчика на раме коптера. Плата передатчика, даже маломощного, сильно нагревается. Поэтому нельзя помещать передатчик внутрь защитного чехла или корпуса, он должен хорошо обдуваться. Диаграмма направленности популярной антенны типа "клевер" (см. рис. 2.16) несимметрична по вертикали и напоминает купол в направлении, противоположном питающему кабелю. Это означает, что для достижения максимальной дальности действия антенна передатчика должна быть направлена вниз и располагаться на максимальном удалении от металлических частей рамы. Но с точки зрения безопасности при авариях и жестких посадках это очень опасный способ монтажа, и антенна зачастую обрывается при аварии. Поэтому начинающим пилотам следует монтировать антенну с направлением вниз только при наличии высоких посадочных стоек. В любом случае, следует стараться смонтировать передатчик на максимальном удалении от приемников GPS и радиуправления. Несмотря на то, что их рабочие диапазоны не совпадают, нельзя исключать возможность высокочастотных наводок на вторичные цепи или помех, образованных паразитными гармониками излучения.

ВНИМАНИЕ!

Передатчики мощностью от 250 мВт и более содержат выходной усилитель. Он выходит из строя при включении передатчика без антенны даже на короткое время, а также при замыкании в цепи нагрузки. Поэтому авария с обрывом антенны или замыканием кабеля возле разъема обычно приводит к поломке передатчика. Также, строго не ре-

комендуется подавать питание на передатчик при отключенной антенне. Неисправность выражается в резком снижении дальности передачи без каких-либо иных внешних признаков. Чтобы убедиться в неисправности выходного каскада, необходимо использовать высокочастотный ваттметр или хотя бы заведомо исправные антенны и приемник.

При наличии некоторого радиолюбительского опыта можно приобрести приемный модуль BOSCAM RX5808 (рис. 6.33). Его необходимо смонтировать на простейшую самодельную плату, снабженную антенным разъемом типа SMA-F (можно извлечь из неисправного сетевого оборудования D-Link), стабилизатором питания +5 В, микропереключателем из трех сегментов для выбора канала и разделительным конденсатором в цепи видео (рис. 6.34).

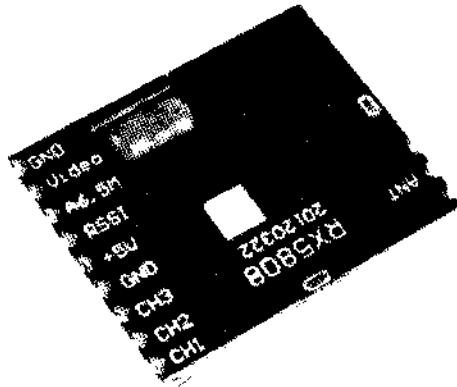


Рис. 6.33. Модуль BOSCAM RX5808

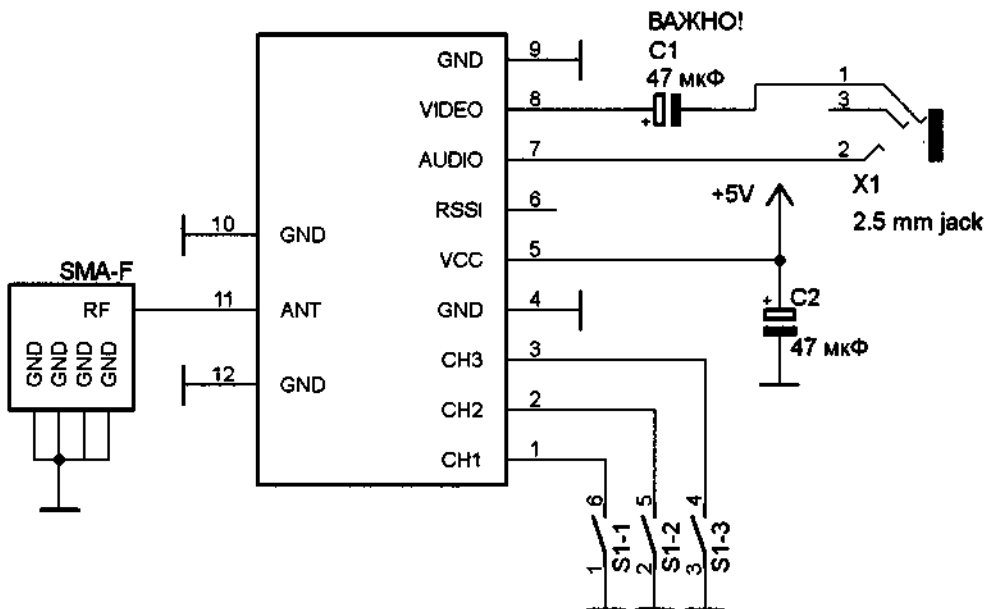


Рис. 6.34. Схема подключения модуля RX5808

ВНИМАНИЕ!

Подключение модуля без разделительного конденсатора в цепи видео может привести к выходу модуля из строя!

Микропереключатели S1-1...S1-3 нужны для выбора каналов. Всего таким способом можно выбрать $2^3 = 8$ каналов, перечисленных в табл. 6.3.

Таблица 6.3. Стандартные каналы приемника RX5808

Номер канала		1	2	3	4	5	6	7	8
Частота канала		5705	5685	5665	5645	5885	5905	5925	5945
Логические уровни на входах выбора канала	CH1	0	1	0	1	0	1	0	1
	CH2	0	0	1	1	0	0	1	1
	CH3	0	0	0	0	1	1	1	1

При питании от готового источника +5 В стабилизатор не нужен, а вместо микропереключателя можно использовать перемычки. Путем небольшой переделки и добавления микроконтроллера ATmega328 модуль RX5808 можно превратить в 32-канальный приемник, совместимый с любым передатчиком диапазона 5,8 ГГц. Автором этого открытого проекта является Саймон Чемберс (Simon Chambers). Детальное описание модификации, а также исходный код для прошивки микроконтроллера можно получить на странице разработчика по адресу <https://code.google.com/p/rx5808-pro/wiki/rx5805>. Мы ограничимся пояснениями к идее проекта, поскольку нет необходимости дублировать в книге подробный материал разработчика.

В модуле приемника применяется микросхема RTC6715. Частоту приема можно задать двумя способами: выбором из восьми фиксированных значений, если вывод микросхемы SPI_EN (7) с общим проводом, и подачей команд по интерфейсу SPI, если на выводе SPI_EN высокий уровень. Во втором случае выводы CH1–CH3 превращаются в выводы SPI. Управляя рабочей частотой приемника при помощи микроконтроллера, можно заставить его работать на любом из 32 каналов. Для переделки приемника достаточно отпаять защитный экран, удалить с платы одну перемычку и припаять экран обратно. Аналогичным образом можно модифицировать приемник, встроенный в видеоочки. Такая модификация приемника очень популярна и применяется во многих любительских конструкциях.

Покупка 32-канального приемника RC832 (рис. 6.35) также снимает все проблемы совместимости частот с аппаратурой разных марок. У приемника два комбинированных аудио/видеоыхода, к одному подключается монитор или видеоочки, ко второму можно подключить любое устройство для записи видео. Для подключения потребуется миниатюрный штыревой разъем диаметром 2,5 мм. Такие разъемы встречаются в гарнитурах некоторых мобильных телефонов, обычно Nokia. Подойдет как трех-, так и четырехконтактный разъем. Поэтому для подключения видеоочков к приемнику можно купить в салоне сотовой связи переходник для наушников "штекер 2,5 — гнездо 3,5" или недорогую гарнитуру и отрезать от нее разъем.

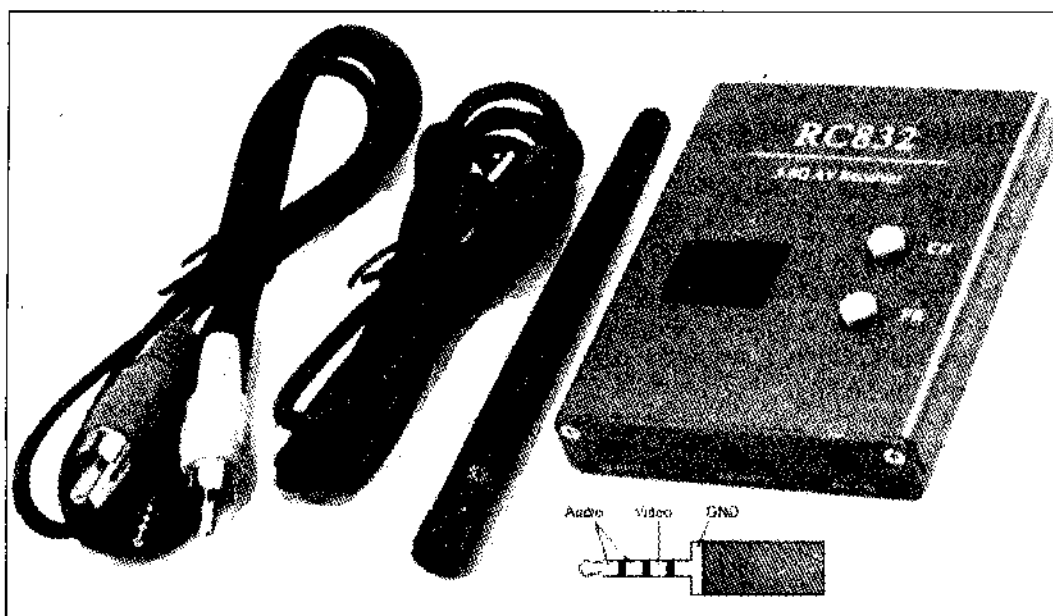


Рис. 6.35. Приемник RC832 и назначение выводов штыревого разъема

Видеоочки и монитор

Если вы используете внешний независимый видеоприемник, то к нему можно подключить любые видеоочки, предназначенные для видеоигр или просмотра видео. Следует обратить внимание на совпадение форматов изображения (4:3 или 16:9) камеры и очков. Самым простым и доступным по стоимости вариантом для новичков являются видеоочки Quantum, которые можно приобрести в виде набора для самостоятельной сборки. Они состоят из пенопластового корпуса, монитора и линзы Френеля, которая позволяет смотреть на монитор с расстояния в несколько сантиметров. Линз в наборе несколько, под разную остроту зрения. Важным достоинством монитора является то, что он не отключается в "синий экран" при пропадании сигнала.

Отдельно следует упомянуть полный набор начального уровня "Quantum + SkyZone", который состоит из очков-монитора, передатчика TS5823, приемника RC832, пары антенн с круговой поляризацией, миниатюрной камеры Sony и комплекта соединительных проводов. Причем стоимость этого набора заметно ниже, чем компонентов по отдельности. Вам потребуется докупить лишь подвес на сервомашинках, как на рис. 6.31. Набор можно смонтировать на коптере практически без применения пайки. Очки имеют довольно неуклюжий дизайн и примитивную конструкцию, зато являются безусловным лидером по соотношению "цена/качество". Впоследствии, приобретя себе более дорогие видеоочки, вы можете использовать "Quantum" для демонстрации полетов с видом "из кабины пилота" своим друзьям и близким.

В том случае, если вы предпочитаете использовать монитор, обратите внимание на модель Fieldview 777. Мониторы этой марки бывают как одиночные, так и со

встроенными 32-канальным приемником на 5,8 ГГц и видеорекордером. Данные мониторы также не отключаются при потере сигнала.

Подключение подвеса к контроллеру

Прежде, чем приступать к настройке параметров управления подвесом, его нужно правильно собрать и смонтировать на раму квадрокоптера. При сборке валы сервомашинки необходимо поставить в среднее положение и собрать подвес так, чтобы камера была направлена прямо вперед по курсу и под углом примерно 45° вниз от горизонтали. Небольшие отклонения будут исправлены при настройке. Подвес необходимо прикрепить к виброизолированной площадке, подвешенной на 4–6 амортизаторах (рис. 6.36).

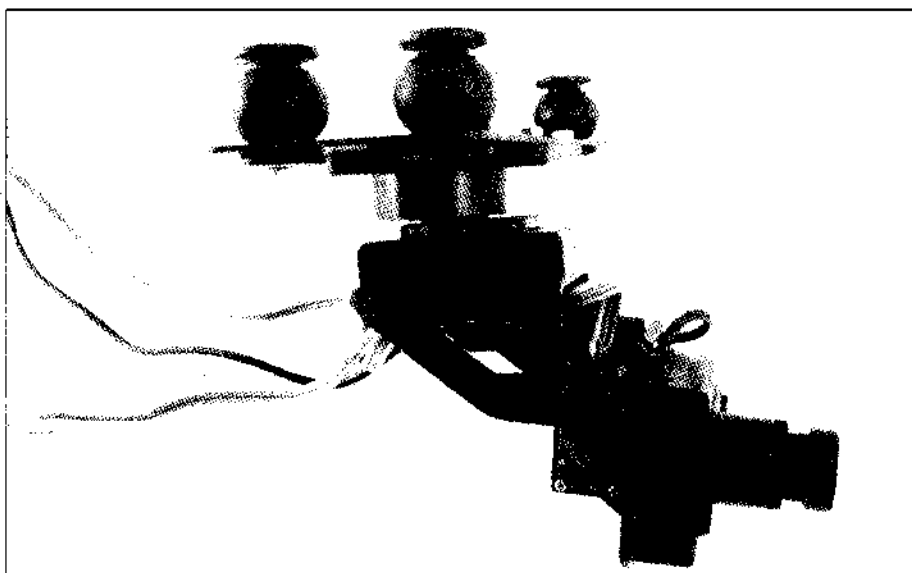


Рис. 6.36. Пример крепления подвеса к виброизолирующему основанию

Простой подвес на сервомашинках подключается к контроллеру с минимальными правками в прошивке. Достаточно в секции Cam Stabilisation найти и раскомментировать строку:

```
#define SERVO_TILT
```

Предыдущая строка `//#define SERVO_MIX_TILT` предназначена для подвесов другого типа, с другой конструкцией механики.

После записи прошивки в контроллер в конфигураторах MultiWii WinGUI и MultiWiiConf появится новая опция CAMSTAB. Ее, как и любую другую опцию, можно активировать по одному из каналов AUX1–AUX4 или включить постоянно, поставив галочки для всех трех значений любого канала AUX одновременно. Сохраните настройки в конфигураторе. Подключите сервомашинку, отвечающую за курсовое положение, к разъему ROLL (45), а за отклонение вверх-вниз — к разъему

PITCH (44). Теперь, если начать наклонять раму коптера в стороны, подвес будет стараться сохранить исходное положение камеры в пространстве. Не забывайте, что на трехрядную гребенку разъема должно поступать питание +5 В, поэтому при питании через провод USB сервомашинки работать не будут.

По умолчанию в прошивке уже заданы параметры, при которых подвес достаточно точно работает с недорогими сервомашинками TG9 и HXT900. Но наверняка исходное положение камеры будет выставлено неточно, а при кренах рамы компенсация недостаточно велика либо чрезмерна. Для устранения недочетов нужно произвести точную настройку параметров. Это как раз тот случай, когда произвести настройку при помощи мобильного приложения EZ-GUI Ground Station намного проще, чем при помощи стационарного компьютера. Тем не менее, рассмотрим оба варианта.

Настройка при помощи EZ-GUI Ground Station

Запустите приложение EZ-GUI Ground Station и установите соединение с мобильным устройством одним из описанных выше способов: через адаптер Bluetooth или радиомodem. Если опция CAMSTAB еще не активирована, войдите в экран **Настройки** | **AUX**, отметьте нужные флажки и сохраните в память контроллера.

Затем на экране **Настройки** нажмите кнопку **СЕРВЫ** (рис. 6.37). Из контроллера автоматически прочтутся текущие настройки, а именно: минимальное и максимальное значение управляющего сигнала, значение для среднего положения и коэффициент реакции. Чем он больше, тем сильнее реакция подвеса на отклонение

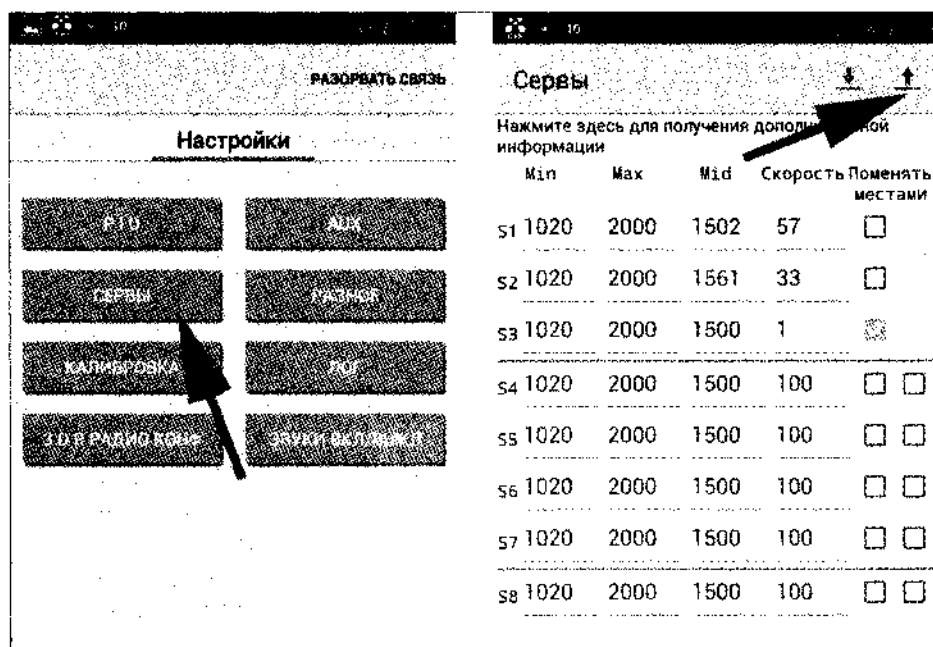


Рис. 6.37. Меню настройки подвеса в EZ-GUI Ground Station

рамы. Отрицательное значение инвертирует направление отклонения. При настройке следует добиваться того, чтобы при отклонениях рамы угол наклона камеры практически не менялся.

Крайние значения **Min** и **Max** необходимо уменьшать в том случае, если при максимальных отклонениях подвеса камера во что-то упирается. Значение среднего положения **Mid** используется не только для регулировки нейтрального положения подвеса. В окне настройки этого параметра можно выбрать, через какой канал радиоуправления мы можем вручную управлять положением камеры. По умолчанию стоит прочерк, т. е. подвес работает в полностью автоматическом режиме и стабилизируется относительно нейтрального положения.

Но вы можете захотеть управлять камерой вручную, через каналы AUX. Ведь на пульте этим каналам можно назначить не только тумблеры, но и переменные резисторы. В этом случае при наличии свободных каналов вы можете манипулировать камерой вправо-влево и вверх-вниз, либо по одной из осей. Подвес будет стабилизироваться относительно текущего положения камеры. Новые значения отправляют в контроллер кнопкой "вверх" и сразу после этого они начинают действовать.

Настройка подвеса при помощи конфигуратора MultiWiiConf

После запуска конфигуратора и установления связи с контроллером нажмите кнопку **Read**. После считывания текущих настроек прошивки в меню появится вкладка **SERVO** (рис. 6.38). Иногда нужно нажать кнопку дважды, чтобы эта вкладка по-

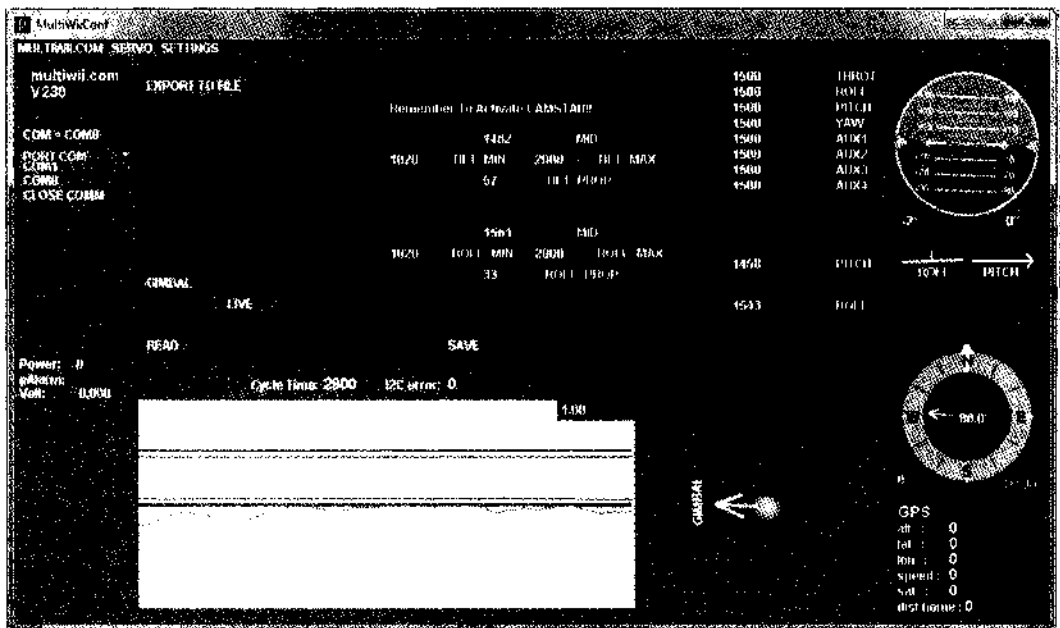


Рис. 6.38. Вкладка **SERVO** конфигуратора MultiWiiConf

явилась. Перейдите на вкладку и нажмите кнопку **GIMBALL**. Настройки автоматически прочтутся из контроллера и отобразятся на экране. Теперь нажмите кнопку **GO LIVE**, чтобы записывать новые значения в контроллер в режиме реального времени. Перемещая при помощи мыши движки значений **MID**, можно настроить нейтральное положение камеры. При помощи движков **TILT_PROP** и **ROLL_PROP** задается коэффициент пропорциональности реакции подвеса на отклонение.

При помощи движков **MID** также можно определить каналы для ручного управления камерой. Эта часть интерфейса программы своей изощренной логикой способна шокировать даже подготовленного пользователя. Для перехода в режим определения канала следует уменьшить значение **MID** до 0, а затем начать плавно увеличивать. Теперь в подписи к движку будут отображаться названия каналов. Выбрав нужный канал, нажмите кнопку **SAVE**.

Настройка подвеса в прошивке MaHoWii

В прошивке MaHoWii настройка через конфигуратор на момент подготовки книги не была предусмотрена. Все настройки выполняются в файле `config.h`. К сожалению, при этом для проверки настроек нужно каждый раз записывать прошивку в контроллер. Найдите секцию `Cam Stabilisation` и раскомментируйте строку

```
#define SERVO_TILT
```

В строках ниже указаны параметры настроек положения сервомашинки `TILT` (отклонение по вертикали):

```
#define TILT_PITCH_MIN      1020
#define TILT_PITCH_MAX     2000
#define TILT_PITCH_MIDDLE  1500
#define TILT_PITCH_PROP    10
```

//`#define TILT_PITCH_AUX_CH AUX4` — раскомментируйте эту строку, чтобы определить канал ручного управления. Можно указать один из `AUX1–AUX4`.

Далее следуют строки настройки положения сервомашинки `ROLL` (отклонение по горизонтали):

```
#define TILT_ROLL_MIN      1020
#define TILT_ROLL_MAX     2000
#define TILT_ROLL_MIDDLE  1500
#define TILT_ROLL_PROP    -10
//#define TILT_ROLL_AUX_CH AUX4
```

Параметры `TILT_PITCH_PROP` и `TILT_ROLL_PROP` задают коэффициент пропорциональности для реакции на отклонения рамы. Отрицательное значение инвертирует направление отклонения.

Настройка модуля MinimOSD

Мы будем использовать модуль MinimOSD второй версии (рис. 6.39). От первой версии он отличается наличием импульсного источника питания, который из 7–

12 В входного напряжения делает +5 В для питания аналоговой части. В предыдущей версии вместо импульсного источника стоял линейный стабилизатор, который при питании напряжением 12 В очень сильно нагревался. А поскольку микросхема видеомиксера MAX7456 сама нагревается весьма ощутимо, то суммарный нагрев мог привести к выходу модуля из строя, и требовалось монтировать модуль с учетом хорошего обдува. Но даже при обдуве модули иногда выходили из строя в жаркую погоду. Поэтому при покупке обратите внимание на наличие импульсного стабилизатора.

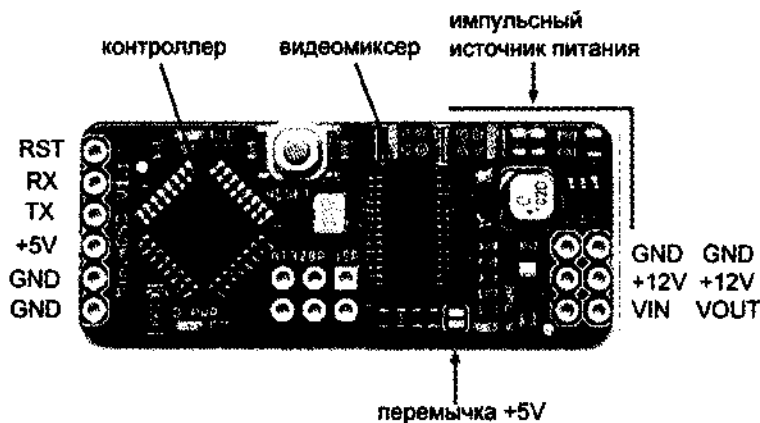


Рис. 6.39. Модуль MinimOSD и его компоненты

Наличие независимого стабилизатора напряжения позволяет питать аналоговую часть модуля от той же самой батареи 2S–3S, которая питает видеокамеру и передатчик. При этом цифровая часть питается стабилизированным напряжением +5 В через разъем полетного контроллера.

Прежде чем приступить к настройке модуля, необходимо выполнить небольшую доработку модуля (рис. 6.40). Металлическая подложка микросхемы должна быть припаяна к плате. Это необходимо для надежного отведения тепла от микросхемы. Посмотрите на отверстия под микросхемой с обратной стороны платы. Если видно, что подложка микросхемы не припаяна к плате, вы можете сделать это самостоятельно, при помощи паяльника мощностью около 60 Вт. Смочите отверстия под микросхемой спиртоканифольным флюсом и заполните их припоем так, чтобы он достиг подложки. Ни в коем случае не используйте активные кислотосодержащие флюсы!

Далее следует соединить между собой шины цифровой и аналоговой "земли", поместив каплю припоя на площадки для перемычки. Разработчики разделили шины из лучших побуждений, так принято делать в классической практике помехозащиты, чтобы помехи из цифровой части схемы как можно меньше попадали в аналоговый видеотракт. Но на практике это приводит к частым выходам микросхемы видеомиксера из строя. Причиной этого являются переходные процессы, которые возникают в цепях питания при включении. Во время переходных процессов иногда на малые доли секунды потенциал на входах микросхемы оказывается ниже,

чем потенциал "земли", т. е. ко входу прикладывается отрицательный потенциал. Оказалось, что микросхема MAX7456 крайне чувствительна к этому и выходит из строя.

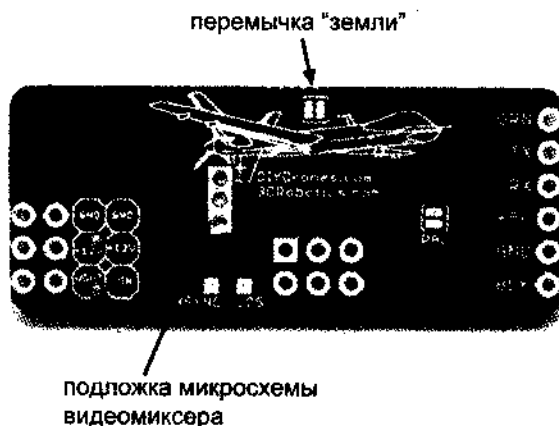


Рис. 6.40. Обратная сторона платы модуля MinimOSD

На время программирования и настройки обе части модуля, цифровую и аналоговую, можно питать напряжением +5 В от USB-порта компьютера. Для этого соедините капелькой припоя перемычку питания, показанную на рис. 6.39.

Проверку и настройку модуля MinimOSD можно выполнить без камеры. Достаточно иметь источник питания +5 В и монитор с аналоговым композитным видеовходом. В качестве монитора может также выступать любой телевизор.

Модули MinimOSD и их многочисленные клоны обычно поступают в продажу запрограммированными прошивкой для работы с проектом ArduPilot. Эта прошивка обменивается данными с полетным контроллером через протокол MAVLink (Micro Air Vehicle Link), но проект MultiWii использует собственный протокол MSP (MultiWii Serial Protocol), поэтому прошивку придется заменить. Для этого нам потребуется уже привычный набор: среда программирования Arduino IDE и адаптер USB-COM на основе чипа FTDI FT232. Плата модуля OSD разработана для подключения к фирменному адаптеру USB-COM, поэтому выводы на обратной стороне платы помечены в соответствии с цветами проводов адаптера. Вы можете подключить любой адаптер FTDI в соответствии с рис. 6.39. Напомним, что выводы Tx и Rx следует подключать перекрестно: Tx → Rx, Rx → Tx.

Последний стабильный релиз прошивки KV_Team_OSD можно скачать по адресу <https://code.google.com/p/rush-osd-development/>. Архив содержит исходный код прошивки для Arduino IDE, оболочку KV_Team_GUI и шрифт для загрузки в знакогенератор микросхемы MAX7456. Видеомиксер не генерирует произвольные графические символы, а накладывает на изображение готовые из встроенного знакогенератора. Память знакогенератора независима и заполняется информацией через микроконтроллер модуля OSD; напрямую из файла компьютера через USB-адаптер этого сделать нельзя.

К сожалению, новая среда разработки Arduino IDE 1.6.1 выдает ошибку компиляции исходного кода, поэтому будем использовать Arduino IDE 1.0.5. В меню **Сервис | Плата** выберите **Arduino Pro or Pro Mini (5V, 16MHz) with ATmega328**, затем через меню **Сервис | Порт** укажите порт, к которому через адаптер подключен модуль. Теперь, как и в случае с полетным контроллером, перед записью новой прошивки обязательно следует очистить энергонезависимую память EEPROM. В меню **Файл | Примеры | EEPROM** выберите пример "eeprom_clear". В строке

```
for (int i = 0; i < 512; i++)
```

исправьте параметр 512 на 1024, это объем памяти EEPROM микроконтроллера ATmega328. Скомпилируйте программу и запишите ее в микроконтроллер модуля OSD нажатием на круглую кнопку со стрелкой вправо. Дождитесь загорания светодиода, расположенного над микроконтроллером. Теперь память EEPROM очищена и можно записывать основную прошивку.

Откройте в Arduino IDE файл KV_Team_OSD.ino и скомпилируйте проект с записью прошивки в модуль. Если компиляция и запись прошли успешно, сразу после перезагрузки вы, скорее всего, увидите на экране беспорядочный набор символов, потому что таблица знакогенератора не соответствует версии прошивки. Для записи новой таблицы символов и дальнейшей настройки воспользуемся утилитой-конфигуратором.

В папке KV_Team_GUI выберите подпапку, соответствующую операционной системе вашего компьютера, и запустите конфигуратор (рис. 6.41).

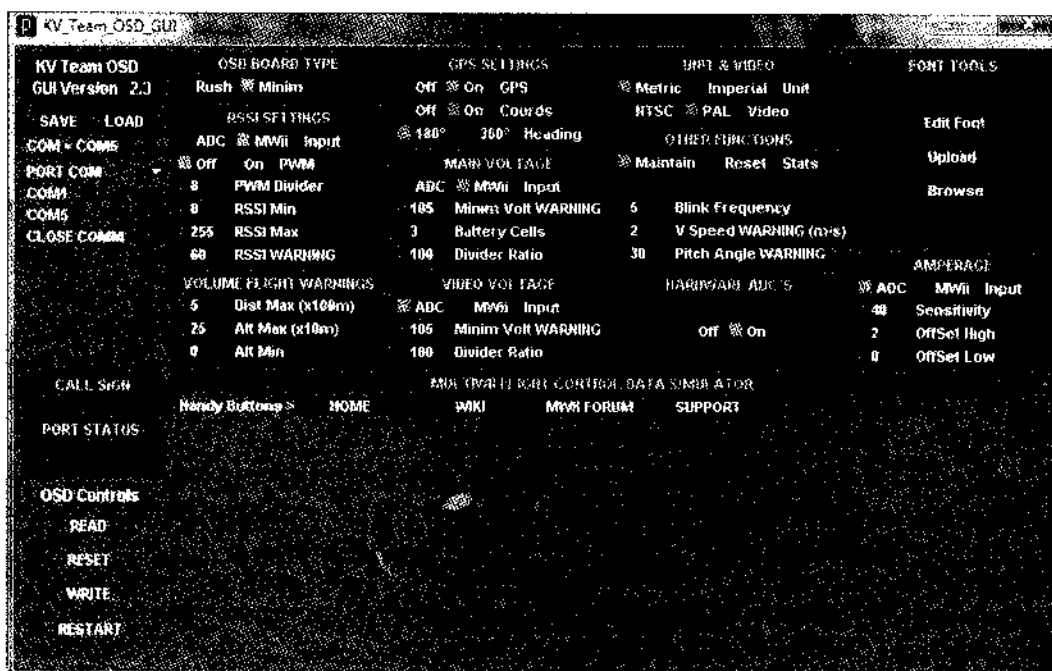


Рис. 6.41. Конфигуратор прошивки KV_Team_OSD

В левой колонке выберите нужный порт, соединение на скорости 115 200 бод будет установлено автоматически. Теперь в секции **FONT TOOLS** нажмите кнопку **Browse** для выбора шрифта. Файлы шрифтов хранятся в папке Data и имеют расширение `.tst`. На выбор предлагаются два варианта: крупный и мелкий шрифт. Какой из них выбрать — зависит от конкретного монитора, поэтому проверьте оба размера. Выбрав шрифт, дождитесь всплывающего окна с уведомлением, что шрифт загружен в буфер конфигулятора, и нажмите кнопку **Upload**. Через несколько секунд шрифт будет загружен в знакогенератор микросхемы MAX7456. Если после окончания загрузки не произошел сброс и перезапуск модуля, нажмите кнопку сброса на плате. Теперь на экране появится заставка MultiWii и рабочий экран. Можно приступить к конфигурированию отображаемых данных. Отметим, что запись прошивки, шрифта и все настройки можно выполнять при подключенном мониторе и визуально наблюдать все изменения в реальном времени.

Вы можете самостоятельно редактировать символы знакогенератора по своему усмотрению. Для этого в конфигуратор встроен простой пиксельный редактор символов, который вызывается кнопкой **Edit Font**.

Рассмотрим детально секции конфигулятора, но перед этим следует пояснить, что для измерения напряжения батареек, потребляемого тока и уровня сигнала радиопередачи можно использовать как аналоговые входы полетного контроллера, с передачей обработанных значений в потоке данных, так и входы контроллера модуля OSD. В этой главе далее будет рассказано, как подключить аналоговые сигналы к модулю.

CALL SIGN — здесь вы можете ввести условное имя своего коптера, если их несколько. В вашем распоряжении 10 латинских символов. Имя будет появляться на заставке при включении.

OSD BOARD TYPE — конфигулятор может работать с платами двух проектов: Rushduino и MinimOSD. Различие этих плат только в выводах контроллера, управляющих видеомиксером MAX7456.

RSSI SETTINGS — секция контроля за уровнем сигнала на антенном входе приемника. Если приемник не имеет выхода RSSI, эту секцию можно пропустить. Флажок **ADC/MWii Input** позволяет выбрать внутренний АЦП модуля или аналоговый вход полетного контроллера с прошивкой MultiWii. Переключатель **Off/On PWM** предназначен для выбора типа сигнала RSSI. В зависимости от приемника это может быть либо аналоговый уровень, либо широтно-модулированный сигнал, где длительность импульса пропорциональна уровню сигнала. Параметр **PWM Divider** требует настройки под конкретный приемник. Разработчик проекта не рекомендует применять простой метод, когда передатчик расположен рядом с приемником, и при включенном передатчике уровень сигнала принимается за 100%, а при выключенном 0%. Рекомендуется минимальным уровнем считать сигнал с запасом 15–20% от реального сигнала. **RSSI WARNING** задает уровень сигнала, при котором срабатывает предупреждение.

VOLUME FLIGHT WARNINGS — предельные параметры полета, при которых будет срабатывать предупреждение. Предельное удаление **Dist Max** может быть

задано в метрах от 0 до 25 000. По умолчанию задано $5 \cdot 100 = 500$ м. Максимальная высота **Alt Max** задается в метрах, умноженных на 10. По умолчанию задано $25 \cdot 10 = 250$ м. Минимальная высота полета задается в диапазоне 0–50 м. Если в этом поле установлено значение, большее нуля, то аварийная индикация сможет сработать только спустя 60 с полета. Этот интервал времени необходим для предотвращения ложных срабатываний при наборе высоты. Сигнализация максимальной высоты готова к срабатыванию сразу после взлета.

GPS SETTINGS — отображение информации GPS. Можно полностью выключить отображение переключателем **Off/On GPS** или убрать с экрана только координаты переключателем **Off/On Coords**. Переключатель **180°/360° Heading** меняет вид компаса.

MAIN VOLTAGE — индикация напряжения силовой батареи. По аналогии со входом **RSSI**, переключатель **ADC/MWii Input** выбирает источник информации о напряжении. Минимальное напряжение **Minim Volt WARNING** отображается без десятичной точки, т. е. значение 105 соответствует напряжению 10,5 В. Параметр **Divider Ratio** используется для точной подстройки показаний под реальное напряжение батареи и действует только при использовании встроенного АЦП модуля (ADC).

VIDEO VOLTAGE — индикация напряжения батареи бортового видеопередатчика. Обычно видеоканал и видеопередатчик питают от отдельной батареи. Модуль OSD может питаться:

- полностью от разъема порта полетного контроллера;
- полностью от видеобатареи, через разъем для подключения видео и встроенный импульсный источник;
- цифровая часть — от разъема порта, аналоговая — от видеобатареи через разъем видео.

UNIT & VIDEO — единицы измерения и система видео. По умолчанию установлены метрическая система и PAL, поэтому менять ничего не надо.

OTHER FUNCTIONS — здесь находятся настройки, для которых нет отдельной секции. Если вы хотите, чтобы при коротком перерыве между полетами, когда вы не отключаете питание, сохранялась статистика полета (время полета, потребленный ток, максимальная достигнутая дистанция и т. д.), то выберите опцию **Maintain**. В противном случае статистика будет обнуляться при каждом отключении моторов.

Далее следуют частота мигания символов **Blink Frequency**, предупреждение о максимальной горизонтальной скорости **V Speed WARNING** и предупреждение о максимальном угле наклона по оси вперед-назад **Pitch Angle WARNING**.

HARDWARE ADC'S — включение/отключение встроенных АЦП модуля. Это зависит от того, куда вы подключаете датчики напряжения и тока.

AMPERAGE — настройка датчика тока. На основании показаний датчика тока, напряжения и секундомера вычисляется потребленное количество энергии в мил-

лиампер-часах. Здесь также может быть использован встроенный АЦП, на который подается сигнал с датчика тока. Параметр **Sensitivity** — это коэффициент пересчета для точной подстройки показаний под реальный потребляемый ток, больший нуля. Для настройки потребуется достаточно точный дополнительный амперметр, например авиамодельный амперметр-ваттметр. Настройка параметров **OffSet High** и **OffSet Low** представляет собой довольно хлопотное занятие и зависит от типа применяемого сенсора тока. Эти параметры задают смещение точки ноля АЦП, поскольку обычно при нулевом потребляемом токе с датчика приходит ненулевое значение напряжения.

MULTIWIPI FLIGHT CONTROL DATA SIMULATOR — в этой секции конфигуратор симулирует данные (рис. 6.42), поступающие из полетного контроллера под управлением MultiWii. Очень удобная опция, позволяющая полностью настроить и проверить работу модуля OSD на столе, не используя пульт радиуправления и полетный контроллер. При помощи симулятора можно не только привыкнуть к отображаемой информации перед взлетом. В прошивке KV_Team_OSD v.2.3 имеется возможность точной настройки расположения элементов экрана при помощи стиков пульта, и симулятор для этой цели вполне подходит.

В любом случае, перед реальными полетами следует поработать с симулятором, чтобы довести до автоматизма чтение данных, отображаемых на экране. Во время полета у вас может не оказаться времени на поиск важной информации взглядом.

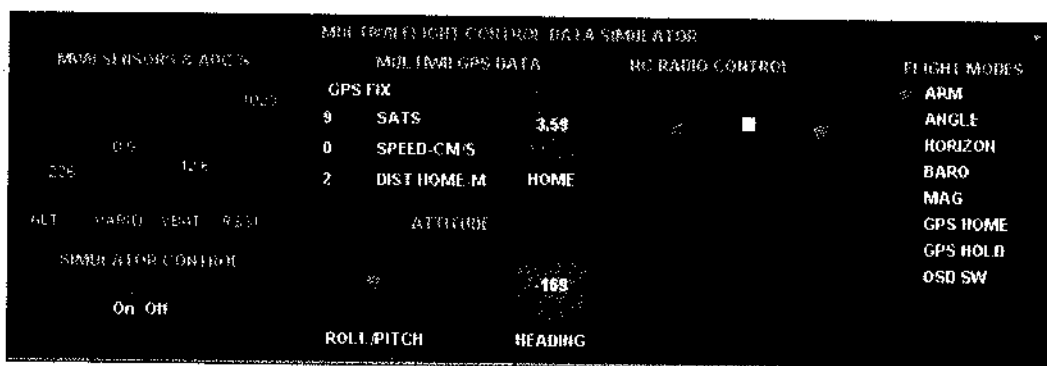


Рис. 6.42. Секция симулятора данных MultiWii

Секция **MWI SENSORS & ADC'S** управляет симуляцией данных с датчиков полетного контроллера.

- **ALT** — высота полета по показаниям барометра. Может изменяться от 0 до 1000 метров.
- **VARIO** — вариометр (скорость изменения высоты, скороподъемность). Измеряется в метрах в секунду. Отрицательная величина означает скорость снижения, положительная скорость — набора высоты. Доступен диапазон от -4 до $+4$ м/с. В симуляторе отображается в виде значения, умноженного на 10, т. е. значение -25.0 означает снижение со скоростью 2,5 м/с. На экране OSD отображаются только целочисленные значения.

□ **VBAT** — напряжение силовой батареи, доступны значения от 7 до 25 В.

□ **RSSI** — уровень сигнала на входе приемника.

Секция **MULTIWIPI GPS DATA** симулирует данные GPS, прошедшие обработку в полетном контроллере.

□ **GPS FIX** — имитация режима удержания спутников 3D Fix.

□ **SATS** — количество доступных спутников.

□ **SPEED** — горизонтальная скорость по данным GPS. Отображается на экране, только если моторы активированы. В программе в этом месте небольшая ошибка и данные в симуляторе не соответствуют отображаемой на экране OSD скорости.

□ **DIST HOME** — расстояние до точки взлета.

Круговые движки **HOME** и **HEADING** симулируют изменение направления "домой" и реакцию компаса на поворот рамы. Соответственно, при повороте рамы на экране меняется положение стрелки, указывающей направление "домой".

ATTITUDE — движок для имитации кренов коптера. Можно при помощи мыши имитировать крены и смотреть, как это влияет на положение авиагоризонта на экране.

RC RADIO CONTROL — два движка, имитирующих рукоятки пульта управления. Эти рукоятки никак не влияют на положение авиагоризонта, зато позволяют входить в служебное меню OSD. Между рукоятками расположен флажок, после установки которого рукоятка газа перестает возвращаться в среднее положение после смещения при помощи мыши.

FLIGHT MODES — флажки, имитирующие включение различных опций прошивки. Позволяют натренировать восприятие индикаторов на экране. Отдельно следует отметить опцию **OSD SW**. Она имитирует отключение вывода информации на экран, кроме авиагоризонта, переключателем **AUX** на пульте, если такая опция предусмотрена в прошивке полетного контроллера. Не следует бояться, что вы пропустите тревожное предупреждение, когда вывод отключен. Соответствующая тревожная информация появится на экране в любом случае. Можете в симуляторе снизить напряжение батареи или увеличить высоту полета и посмотреть, как это работает.

Структура экрана KV_Team_OSD v.2.3

Элементы экрана и система координат видеомиксера представлены на рис. 6.43 и 6.44 соответственно.

Служебное меню прошивки KV_Team_OSD

Служебное меню прошивки предназначено для настройки параметров полетного контроллера и модуля OSD в полевых условиях только при помощи пульта радиуправления. Для входа в служебное меню поместите левую рукоятку пульта в

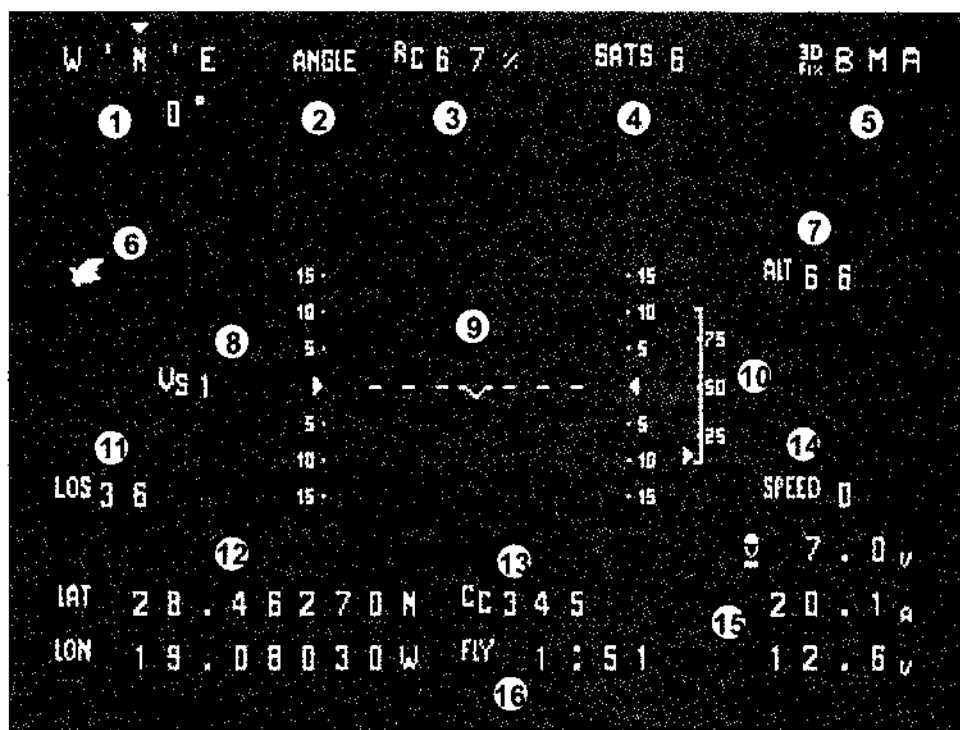


Рис. 6.43. Элементы экрана OSD:

- 1 — компас 180°/360°; 2 — режим стабилизации; 3 — уровень радиосигнала RSSI; 4 — количество спутников; 5 — состояние GPS и активные сенсоры: барометр, магнитометр, акселерометр; 6 — направление "домой"; 7 — высота в метрах, по барометру; 8 — скорость изменения высоты, м/с; 9 — авиаторизонт; 10 — положение ручки газа в %; 11 — расстояние от точки взлета в метрах, по данным GPS; 12 — координаты по GPS; 13 — потребленная от батареи энергия, мА·ч; 14 — горизонтальная скорость, м/с; 15 — напряжение видеобатареи, потребляемый ток, напряжение силовой батареи; 16 — время полета

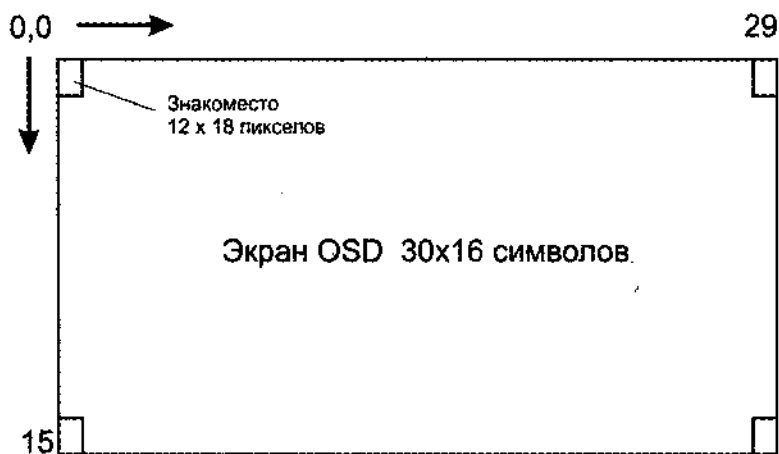


Рис. 6.44. Система координат видеомиксера MAX7456

положение среднего газа и до упора вправо, затем отклоните правую рукоятку до упора вверх. При использовании симулятора перемещайте левый движок в нужное положение при нажатой клавише <Ctrl>, или щелкните на флажке между движками, чтобы зафиксировать положение движка при отпускании кнопки мыши. Продолжая удерживать клавишу <Ctrl>, передвиньте правый движок до упора вперед.

Меню состоит из девяти страниц, которые можно перелистывать, отклоняя вправо или влево левую рукоятку пульта. Газ при этом должен оставаться в среднем положении. Для перемещения курсора по экрану используйте правую рукоятку пульта. При помощи экранного меню можно изменить все основные настроечные коэффициенты полетного контроллера, включая PID, и запустить процедуры калибровки акселерометра, гироскопа и магнетометра. Особый интерес представляет возможность точной настройки расположения элементов экрана OSD и включение/выключение их индикации.

Рассмотрим процесс настройки экранного элемента на примере включения индикации напряжения батареи видеоканала (рис. 6.45). По умолчанию индикация этого элемента отключена, и ее невозможно включить через конфигуратор. Перейдя в служебное меню, пролистайте его до восьмой страницы. Это проще сделать движением рукоятки газа влево.

Под заголовком **ITEM** находится название настраиваемого элемента. **DSP** может иметь значения **ON/OFF** и управляет отображением элемента на экране. Значения **LINE** и **COL** означают номер строки и столбца в системе координат экрана. Эти значения можно менять.

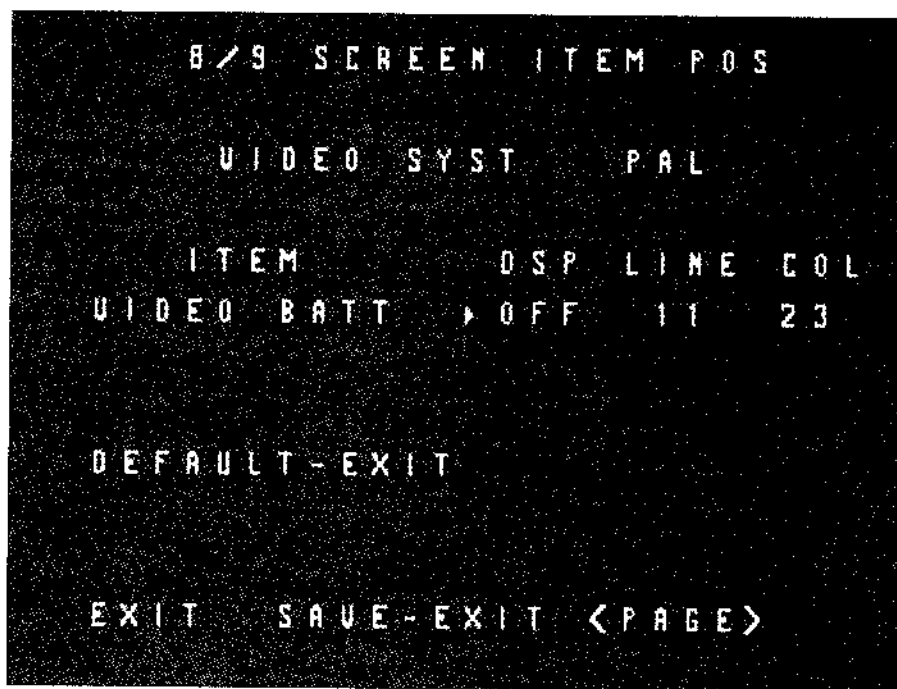


Рис. 6.45. Настройка позиции элемента на экране

Переведите правой рукояткой курсор так, чтобы он указывал на название элемента. Теперь движением рукоятки газа вправо пролистывайте элементы. В прошивке есть ошибка: при достижении последнего элемента, а также при попытке пролистнуть элементы влево, чтобы сразу попасть на последний элемент, модуль иногда самопроизвольно перезагружается.

Когда доберетесь до элемента **VIDEO BATT**, переместите курсор на параметр **DSP**, по умолчанию равный **OFF**, и движением рукоятки газа вправо смените его на **ON**. Переместите курсор на пункт **SAVE-EXIT** и движением рукоятки газа сохраните настройку элемента. Программа перейдет в обычный режим и в правом нижнем углу экрана должен появиться символ видеобатареи и ее напряжение. Они будут мигать и показывать нулевое напряжение, т. к. пока мы не подключили датчик напряжения к модулю. Аналогичным образом можно включать и выключать отображение других элементов, а также располагать их на экране по своему вкусу. Если ваш приемник не оснащен выходом сигнала **RSSI**, отключите этот элемент, чтобы своим миганием он не отвлекал ваше внимание.

Подключение датчиков тока и напряжения к модулю OSD

ПРИМЕЧАНИЕ

Микроконтроллер **ATMEGA328**, на основе которого собран модуль, имеет встроенные аналого-цифровые преобразователи, способные измерять напряжение не выше, чем напряжение питания. В нашем случае это 5 В. Но батареи, особенно силовая, имеют существенно большее рабочее напряжение. Поэтому для измерения напряжения батарей следует обязательно использовать резистивные делители.

В продаже имеются модификации модуля OSD, уже оснащенные необходимыми делителями, как на рис. 6.46. К входам такого модуля достаточно присоединить провода в соответствии с надписями на плате и настроить коэффициенты в конфигураторе. Поэтому, если есть возможность, лучше приобрести модифицированный модуль.

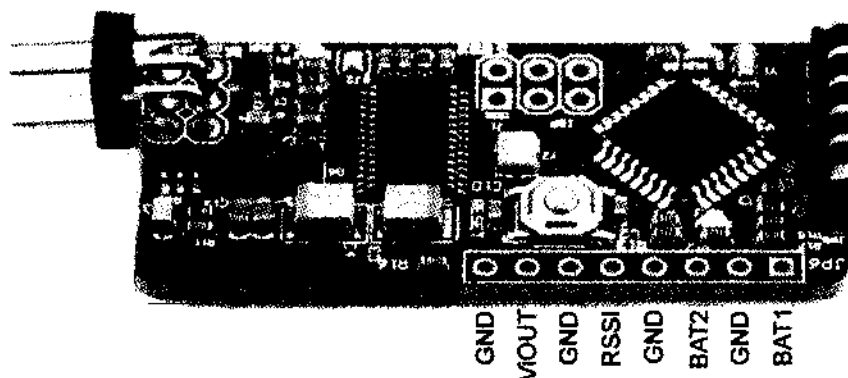


Рис. 6.46. Модифицированный модуль OSD со встроенными делителями

Стандартный модуль можно доработать самостоятельно, если вы обладаете необходимыми навыками пайки. Потребуется припаять тонкие провода непосредственно к выводам микроконтроллера. Лучше всего подойдет тонкий провод МГТФ во фторопластовой оболочке, но можно использовать провода в виниловой изоляции, а также жилки из кабеля от наушников. Если нет миниатюрного паяльника, можно намотать несколько витков медного провода диаметром 2 мм на жало большого паяльника, оставив свободную часть длиной около 1 см, заточенную под клин и облуженную. Внешние резисторы делителей можно смонтировать на небольшом кусочке стеклотекстолита или припаять к проводам и затянуть в термоусадочные трубки.

Схема подключения показана на рис. 6.47. Номиналы резисторов могут быть другими, важно лишь, чтобы их соотношение было приблизительно 1:15, этого достаточно для батарей с напряжением до 4S. На входах RSSI и датчика тока применяются не делители, а защитные токоограничительные резисторы, включенные последовательно, потому что на выходе измерителя тока, а также на выходе RSSI приемника присутствует напряжение, заведомо не превышающее напряжение питания +5 В.

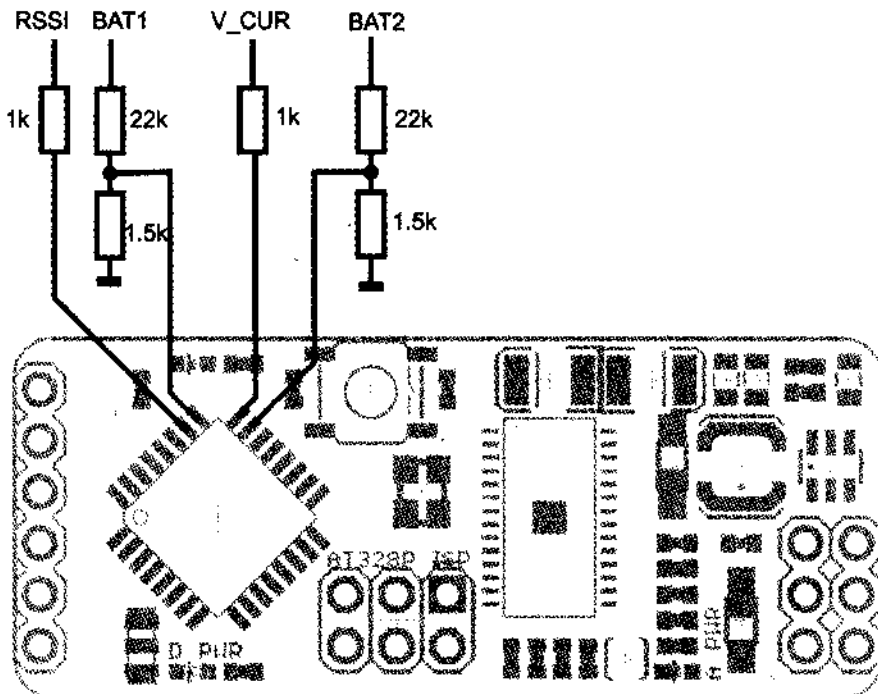


Рис. 6.47. Подключение датчиков тока и напряжения к MinimOSD:

BAT1 — батарея видеотракта; BAT2 — силовая батарея; V_CUR — напряжение с выхода датчика тока; RSSI — напряжение или импульсы ШИМ с выхода RSSI приемника

Резисторы делителя напряжения для батарей видеотракта удобно припаивать непосредственно к выводам питания аналоговой части модуля, как показано на рис. 6.48. Керамический конденсатор номиналом 0,1 мкФ снижает помехи в изме-

рительной цепи, но использовать его не обязательно. После подключения делителей необходимо настроить калибровочные коэффициенты, чтобы отображаемое на экране напряжение соответствовало реальному напряжению батареи. Подключите плату к компьютеру через адаптер и на линии BAT1 и BAT2 подайте заведомо известное напряжение в диапазоне 11–12 В, измеренное при помощи вольтметра. Меняя константы **Divider Ratio**, добейтесь, чтобы напряжение на экране максимально соответствовало реальному. Допускается периодическое мерцание значения после запятой. Это связано с тем, что в прошивке не фильтруются погрешности измерения и пересчета с плавающей точкой.

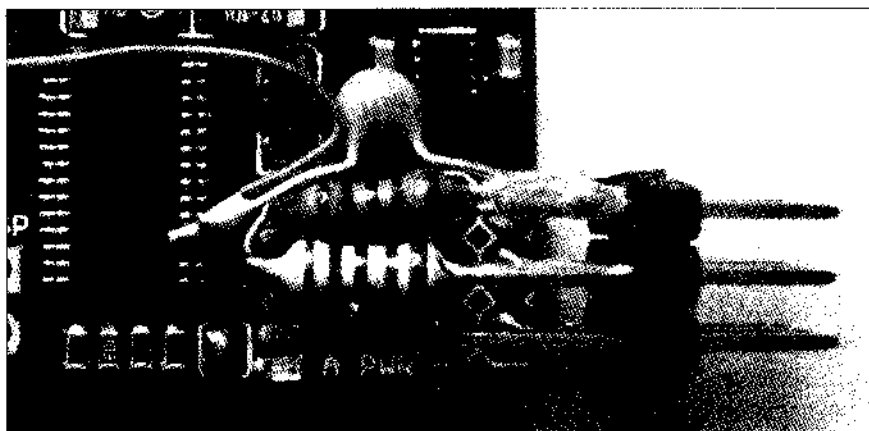


Рис. 6.48. Монтаж делителя напряжения батареи видеотракта

Отображение показаний датчика тока настраивается иначе. Если используется **двухнаправленный сенсор тока** (обычно низкоомный шунт), то установите **High** в 0 и начните менять параметр **Low** с 0 и далее 1, 2, ... таким образом, чтобы при отсутствии нагрузки отображалось нулевое значение тока. Обычно значений 1 или 2 достаточно.

Если используется **однонаправленный сенсор тока** (обычно на магниторезистивном датчике), установите **High** = 2 и **Low** = 0. Проверьте индикацию нулевого тока, отображаемое значение должно быть близким к нулю. Если это не так, установите **High** = 1 и **Low** = 255. Затем постепенно уменьшая **Low** = 254, 253, 252, ..., добейтесь максимальной близости показаний к нулю при отсутствии нагрузки.

Далее, используя дополнительный амперметр или амперметр/ваттметр, замеряют ток под нагрузкой и, меняя константу **Sensitivity**, добиваются правильных показаний.

После настройки и калибровки OSD можно смонтировать модуль на коптере. По опыту автора, несмотря на довольно сильный нагрев микросхемы MAX7456, модуль OSD можно затягивать в термоусадочную трубку, и это не приведет к перегреву. Важно лишь, чтобы модуль был смонтирован на открытом месте с хорошим обдувом. Желательно сохранить возможность подключения адаптера USB-COM на случай настройки или перепрошивки "на борту".

При правильном подключении соединительных проводников между камерой, модулем OSD, контроллером и передатчиком видеосистема начнет работать сразу. Если с контроллера не поступают данные на OSD, убедитесь, что модуль соединен с портом SERIAL3 по схеме Rx → Tx, Tx → Rx и в настройках прошивки полетного контроллера указана скорость этого порта 115 200 бод. При использовании некоторых камер модуль неправильно определяет стандарт видеосигнала и переходит в режим NTSC, хотя на самом деле поступает сигнал стандарта PAL. В этом случае следует запаять перемычку PAL с обратной стороны платы (см. рис. 6.40).

Подключение датчиков тока и напряжения к контроллеру

Подключение датчиков тока и напряжения непосредственно к полетному контроллеру менее предпочтительно с точки зрения выхода контроллера из строя и сложности настройки. Но иногда необходимо это сделать, например, если для отображения телеметрии используется не экран OSD, а другие средства.

В случае использования готового измерительного модуля, аналогичного представленному на рис. 3.8, сигналы с его выходов можно подавать непосредственно на аналоговые входы полетного контроллера. Если имеется только датчик тока, то схема входных цепей аналогична показанной на рис. 6.47. Измеряемое напряжение силовой батареи необходимо подавать только через резистивный делитель! В противном случае аналоговый вход контроллера выйдет из строя. В стандартной схеме подключения измеряемое напряжение с выхода делителя или модуля подается на вход A1 полетного контроллера, а напряжение с выхода датчика тока — на вход A2. В комментарии внутри кода прошивки предлагается использовать иные номиналы резисторов (33 и 51 кОм), с меньшим коэффициентом деления. Но при указанных номиналах на вход датчика нельзя подавать напряжение 12 В с батареи, т. к. на выходе делителя будет около 8 В.

В прошивке контроллера необходимо сделать некоторые изменения. Включим измерение напряжения. В файле `config.h` найдите секцию `battery voltage monitoring`. Раскомментируйте строку `//#define VBAT`. Далее необходимо подобрать опытным путем коэффициент деления в строке `#define VBATSCALE` таким образом, чтобы отображаемое напряжение соответствовало реальному напряжению батареи, измеренному контрольным вольтметром. В отличие от удобного конфигуратора OSD, где настройки можно менять в режиме реального времени, в данном случае нам придется после каждого изменения параметра заново компилировать и загружать прошивку. Чтобы работала звуковая сигнализация разряда батареи, необходимо раскомментировать опцию `#define BUZZER`, расположенную немного выше по тексту кода.

Параметр `VBATNOMINAL` нужен только для телеметрии на LCD-экране и соответствует напряжению заряженной силовой батареи без десятичной точки. Следующие параметры позволяют настроить трехуровневое предупреждение о разряде батареи:


```
#define VBATLEVEL_WARN1 107 // (*) (**) 10,7V  
#define VBATLEVEL_WARN2 99 // (*) (**) 9.9V  
#define VBATLEVEL_CRIT 93 // (*) (**) 9.3V
```

Параметр `#define NO_VBAT` необходим для отключения сигнализации разряда, если силовая батарея вообще не подключена. Такая ситуация возникает, например, при подключении полетного контроллера к разъему USB — контроллер работает и пытается измерить напряжение, но силовой батарее нет.

Далее приступим к настройке измерителя тока. Во время регулярных полетов нас интересует не мгновенное значение потребляемого тока, а количество потребленной энергии в миллиампер-часах. Мы можем приблизительно предположить, сколько еще энергии осталось для полета, а также оценить степень износа самой батареи, насколько ее реальная емкость соответствует заявленной. В прошивке MultiWii v.2.3 предусмотрены два способа оценки потребленной энергии: более точный аппаратный и приблизительный программный на случай, если аппаратный датчик тока отсутствует.

Настройка аппаратного измерителя тока и потребленной энергии

Раскомментируйте строку `//#define POWERMETER_HARD`.

На выходе датчика тока присутствует постоянное напряжение, значение которого прямо пропорционально току, протекающему через измеритель. Полетный контроллер измеряет это напряжение и пересчитывает в ток. В режиме нулевого тока напряжение обычно не равно нулю. Подберите константу в строке `#define PSENSORNULL` таким образом, чтобы при выключенных моторах в GUI или показаниях телеметрии отображалось нулевое значение тока. Теперь приступим к настройке коэффициента пересчета напряжения, поступающего с датчика тока, в отображаемое значение тока. Вам понадобится ваттметр с функцией измерения тока или мощный амперметр, включенный в разрыв провода силовой батареи.

ПРИМЕЧАНИЕ

Дальнейшие действия потребуют от вас особой осторожности, поскольку измерения будем проводить в рабочем режиме, с установленными винтами. Надежно закрепите квадрокоптер на земле при помощи груза или растяжек. Позаботьтесь о том, чтобы провод USB и посторонние предметы не попали в плоскость вращения винтов.

Активируйте моторы и дайте газ примерно 60–70%. Сравните показания контрольного прибора со значением тока в GUI или данных телеметрии. При необходимости измените значение параметра `#define PINT2mA`. Увеличение этого параметра приводит к увеличению отображаемых значений тока и потребленной энергии. По достижении приемлемой для вас точности измерения тока настройку можно считать законченной.

Настройка программного измерителя потребленной энергии

При отсутствии датчика тока потребленная энергия рассчитывается приблизительно, через время полета и некую усредненную эмпирическую константу, значение которой имитирует потребляемый ток. Разумеется, в этом случае в данных телеметрии мы видим только потребленную энергию. Точность расчета зависит от аппаратной конфигурации коптера, условий и стиля полета. После настройки точность составляет около 10%. Если совершить около десятка реальных полетов с использованием ваттметра и после каждого полета корректировать поправочный коэффициент, то можно достичь точности около 5%. Но любое изменение аппаратной конфигурации, включая использование батарей разного веса и мощности, будет приводить к существенному ухудшению точности.

Убедитесь, что напряжение батарей измеряется максимально точно. Раскомментируйте строку `//#define POWERMETER_SOFT`. "Залейте" прошивку в контроллер. Далее потребуются несколько раз совершить последовательность действий:

1. Совершите обычный полет, в своем обычном стиле и с обычной продолжительностью.
2. После окончания полета не спешите обесточивать коптер. Сперва запишите значение потребленной энергии с экрана LCD или из данных телеметрии.
3. Подключите силовую батарею к зарядному устройству и зарядите в обычном режиме. Посмотрите, какое количество энергии в миллиамперчасах "залито" в батарею на самом деле.
4. Подкорректируйте значение параметра `#define PINT2mA`. Увеличение значения повышает результат измерения и наоборот.
5. Повторите полет и вновь сравните вычисленное значение и фактически загруженное в батарею при зарядке.

Для ускорения процедуры первые 1–2 оценочных полета можно проводить не до полного разряда батарей, а лишь дождавшись, пока отображаемое значение потребленной энергии достигнет 100–200 мА·ч. Этого будет достаточно, чтобы оценить, в какую сторону изменять коэффициент `PINT2mA` и насколько существенно.

ГЛАВА 7



Обслуживание и ремонт квадрокоптера

Предполетная проверка

Даже если не было аварий в предыдущие полетные дни, квадрокоптер может получить мелкие повреждения при транспортировке в автомобиле и просто вследствие естественного износа при эксплуатации. Перед полетом необходимо проверить, не повреждены ли антенны и их соединительные кабели, надежно ли подключены разъемы к приемнику и полетному контроллеру. Убедитесь, не деформированы ли воздушные винты при хранении и транспортировке, надежно ли они закреплены.

Характерные неполадки

Обсудим некоторые характерные неполадки, которые не проявляются при настройке, либо не присутствуют постоянно, однако внезапно возникают при эксплуатации. Такие пропадающие неполадки бывает сложно выявить, поскольку они пропадают так же непредсказуемо, как и возникают. Но на самом деле причины большинства из таких неполадок в авиамodelьном сообществе хорошо известны. Поэтому начинать поиск лучше с очевидных причин и лишь затем углубляться в экзотику наподобие микротрещин печатной платы контроллера.

Квадрокоптер изредка внезапно дергается по курсовому направлению и уровню, при этом в момент рывка слышен перепад звука вращения моторов.

Вероятные причины:

- ❑ плохой контакт в разъемном соединении типа "тюльпан" между мотором и регулятором или между регулятором и распределителем питания. Следует отказаться от разъемных соединений и использовать только пайку;
- ❑ бракованный регулятор оборотов с непропаем на плате. Попробуйте поочередно заменять регуляторы запасным;
- ❑ высокий уровень помех в цепи питания полетного контроллера. Попробуйте питать контроллер от отдельного источника питания.

Квадрокоптер внезапно рывком теряет ориентацию в пространстве и терпит аварию во время ровного полета или висения, при этом моторы могут включиться на максимальные обороты или отключиться.

Вероятная причина: сниженное напряжение питания полетного контроллера. При этом происходит либо перезагрузка контроллера, либо сбой шины I²C с передачей хаотичных данных от акселерометра и гироскопа. Следует увеличить напряжение питания до 5,2–5,3 В.

Квадрокоптер внезапно на некоторое время перестает слушаться команд управления, затем прием команд восстанавливается.

Вероятные причины:

- недалеко от зоны полетов включается мощный источник помех (охранная сигнализация, радиостанция и т. д.);
- коптер попадает в створ луча радиосигнала релейной станции или радиоудлинителя интернет-канала;
- поврежден провод антенны приемника, и он периодически теряет сигнал;
- находящийся в кармане мобильный телефон при служебном обмене с базовой станцией создает наводки на плату пульта управления;
- предгрозовая погода с высоким уровнем электростатических помех.

Постарайтесь внимательно изучить окрестности на предмет наличия потенциальных источников помех. Мобильный телефон во время полета старайтесь держать на расстоянии не менее метра от пульта. Проверьте надежность соединения антенны с платой приемника и убедитесь в отсутствии механических повреждений антенного кабеля и самой антенны.

В режиме удержания высоты квадрокоптер внезапно совершает девиации по высоте порядка двух метров вверх и вниз.

Вероятные причины:

- барометр не защищен от завихрений воздуха при помощи кусочка поролона или чехла для полетного контроллера;
- прямые солнечные лучи попадают на сенсор барометра через отверстия в корпусе;
- высокая нестабильность плотности воздуха и давления перед грозой.

При резком наборе высоты или энергичных маневрах коптер плавно закручивается по курсу или дергается по крену.

Вероятные причины:

- сильные магнитные наводки на компас;
- срабатывает отсечка регулятора оборотов при перегрузке регуляторов по току;
- просадка напряжения силовой батареи при пиковой нагрузке;
- пропуск фаз вращения одного из моторов при пиковой нагрузке.

Прежде всего, следует проверить реакцию компаса на максимальный ток в силовых цепях. Процедура проверки потребует большой осторожности и аккуратности. Необходимо надежно зафиксировать коптер так, чтобы он не взлетел при максимальной тяге. Для наблюдения за показаниями компаса желательно использовать беспроводное соединение. Если при максимальной тяге показания компаса изменяются больше, чем на 8–10 градусов, то необходимо принять меры для уменьшения магнитных наводок: укоротить и уложить по-другому силовые провода, изменить расположение батареи, поднять компас вверх на выносной плате. В случае, если под максимальной нагрузкой моторы начинают хрипеть и вращаться неравномерно, нужно использовать воздушные винты меньшего диаметра и/или шага. Возможно, придется провести повторный расчет силовой установки в онлайн-калькуляторе.

Ремонт квадрокоптера после аварии

ПРИМЕЧАНИЕ

Первое, что нужно сделать при серьезной аварии, — деактивировать моторы и отключить силовую батарею и батарею видеопередатчика.

Динамические перегрузки, возникающие при ударе квадрокоптера о землю или окружающие предметы, иногда проявляют себя весьма парадоксально, в неожиданных местах конструкции. Например, простое падение коптера с работающими моторами с высоты 3 м может привести к изгибу валов двух моторов, порче трех пропеллеров и трещине рамы. Поэтому даже небольшая авария требует вашего пристального внимания!

Осмотр и поиск дефектов

Если удар о землю или поверхность был не слишком сильным (жесткая посадка, падение с небольшой высоты), то можно ограничиться внешним осмотром наиболее часто страдающих элементов: посадочных стоек шасси, антенн, пропеллеров, крепления камеры, нейлоновых элементов крепежа. *Обратите особое внимание на воздушные винты. При кажущейся исправности у них может появиться деформация лопастей, приводящая к расхождению плоскостей вращения (так называемая "бабочка"), или трещина бобышки винта.* Второй дефект очень опасен, т. к. слабо заметен визуально, однако на больших оборотах приводит к сильной вибрации с возможностью отстрела лопастей и травмирования окружающих. Убедитесь, что внутри моторов не остались песок или трава, и они вращаются легко и все одинаково.

Если дефекты, влияющие на безопасный полет, не выявлены, попробуйте поднять коптер в воздух, осторожно добавляя обороты. Внимательно следите за звуком работы моторов и поведением коптера. При появлении вибрации, необычных звуков или странном поведении коптера немедленно прекратите полет. Скорее всего, от удара лопастями винта о землю появился изгиб вала мотора. Этот изгиб редко заметен визуально, однако приводит к сильной вибрации. Вообще, при использовании высокопрофильных моторов с длинным валом последствия удара винтом

о землю непредсказуемы. Вал может остаться целым при разрушении винта и, наоборот, погнуться при неповрежденном винте. В случае специальных низкопрофильных моторов с коротким толстым валом обычно страдают только винты.

После аварии с очевидными повреждениями конструкции начинайте проверку и ремонт по принципу "снаружи — внутрь". Снимите уцелевшие винты и проверьте их геометрию. Вращая моторы, проверьте их на визуально заметный изгиб валов. Если изгиб не просматривается, оставьте окончательную проверку на потом. Прикладывая усилия к лучам, проверьте детали рамы на наличие скрытых трещин. Обратите внимание на сохранность нейлоновых винтов и монтажных стоек. Они могут продолжать удерживаться на месте, но при этом быть срезанными по резьбовой части, либо иметь сорванную резьбу.

При помощи увеличительного стекла тщательно осмотрите керамическую антенну приемника GPS. Даже если приемник помещен в пластиковый корпус, при ударе о камень или асфальт антенна может треснуть. Такая трещина иногда почти незаметна невооруженным глазом, но приводит к значительному ухудшению качества приема спутников. Ремонт керамической антенны невозможен, склеивание бесполезно. Поврежденную антенну можно только заменить.

Проверьте исправность и надежность подключения антенны приемника. Иногда антенный кабель внутри приемника не припаян, а присоединяется к плате миниатюрным разъемом типа "грибок". После удара и рывка за кабель "грибок" может частично соскочить с ответной части. Это существенно снижает дальность действия и стабильность работы приемника.

Проверьте исправность и надежность подключения прочих разъемов и проводов. На этом стандартные проверки можно считать оконченными и приступать к ремонту и замене механических частей конструкции. Специфические повреждения, типа трещины платы полетного контроллера, случаются крайне редко. Если плата контроллера смонтирована правильно, на защитных нейлоновых стойках или амортизаторах, то обычно остается исправной даже при очень серьезных авариях.

Ремонт двигателей

Поскольку двигатели расположены на концах лучей и являются точным механическим устройством, они наиболее подвержены различным повреждениям при аварии. К обычным повреждениям относятся:

- изгиб вала;
- повреждение подшипников;
- обрыв вывода обмотки;
- отрыв магнита от корпуса ротора и/или трещина магнита.

При ремонте двигателей могут быть допущены ошибки, приводящие к повреждению двигателя или ухудшению его свойств, поэтому рассмотрим процесс ремонта более подробно.

Разборка двигателя

Для разборки двигателя вам понадобятся: тиски, пассатижи с длинными губками, иголка, качественный шестигранный ключ нужного размера и инструмент для локального нагрева. Это может быть фен паяльной станции, миниатюрная газовая горелка или зажигалка.

Используя пассатижи и иголку, аккуратно удалите стопорный замок с вала двигателя, как показано на рис. 7.1, и снимите с вала ротор с магнитами. На вал могут быть надеты бронзовые шайбы и втулки, иногда с двух сторон. Не потеряйте их и запомните, где они находились.

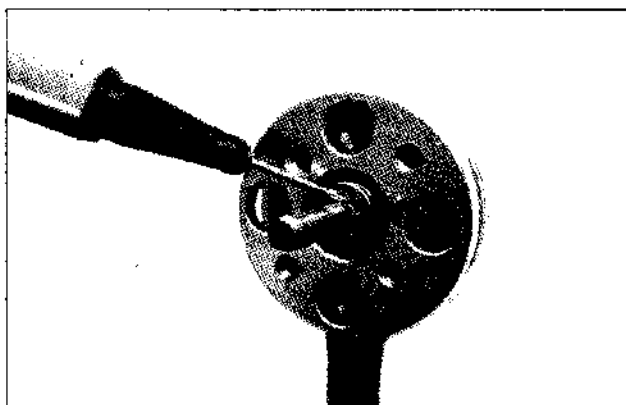


Рис. 7.1. Удаление замка для разборки двигателя

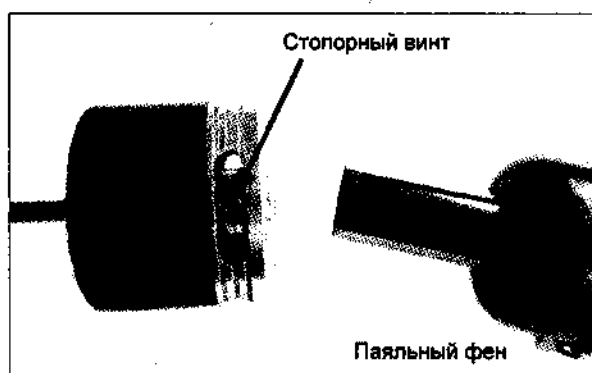


Рис. 7.2. Удаление стопорных винтов

Теперь при помощи шестигранного ключа нужно вывинтить стопорные винты, фиксирующие вал в роторе (рис. 7.2). Это очень ответственный момент, т. к. *шестигранное гнездо головки винта можно очень легко испортить, после чего дальнейший ремонт двигателя будет очень сложен или невозможен*. Не экономьте на шестигранных ключах, используйте только качественные, хорошо закаленные ключи! Винты обычно бывают посажены на фиксатор резьбы, который размягчается

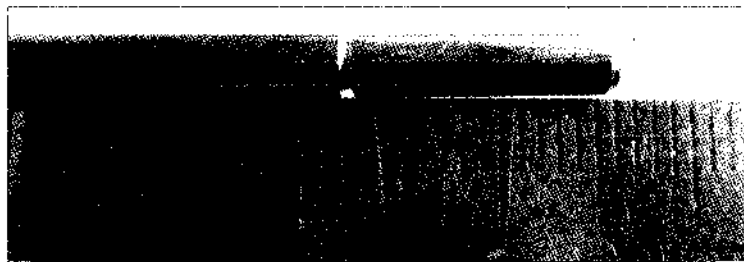
при нагреве до 80–120 °С. Хорошо прогрейте место посадки винтов при помощи фена или горелки и только после этого приступайте к вывинчиванию винтов. Не прилагайте чрезмерные усилия, чтобы не сорвать насечку винта или ключа. Лучше прогрейте резьбу еще раз. Винты следует вывинтить полностью, т. к. понадобится очистить резьбу и нанести на нее свежий фиксатор.

Во многих моторах вал имеет очень прочную "нулевую" посадку в гнездо и не вынимается даже после удаления стопорных винтов. Кроме того, вал иногда может быть также посажен на фиксирующую жидкость. Ни в коем случае не пытайтесь выбить его из отверстия ротора! Вообще избегайте любых ударов по ротору, чтобы не повредить магниты. Зажмите конец вала длиной около 5 мм в тиски и осторожно, но сильно начните проворачивать статор на валу, избегая прикладывать боковое усилие, чтобы не погнуть вал, если он вдруг не испорчен. Если повернуть вал в гнезде не удастся, еще раз хорошо прогрейте посадочное место и вращайте вал, пока оно горячее. Постепенно стяните ротор с вала, совершая колебательное вращение.

Проверка и замена вала

Если вы не уверены, погнут ли вал, нужно его проверить. В быту доступны два несложных способа. Можно катать вал по гладкому стеклу, слегка прижимая пальцами. Ровный вал катается плавно, неоднородности при перекатывании не ощущаются. Подойдет поверхность зеркала или мебельного стекла. Обычное оконное стекло может иметь неровности. Во втором способе вал прикладывают к образцово ровной поверхности и смотрят зазор на свет. Можно прикладывать вал к стальной линейке. На рис. 7.3 видно, что вал слегка изогнут в области проточки для стопорного кольца. Обычно это самое слабое место вала. Проворачивая вал вокруг оси, нужно убедиться, что он в любом положении прилегает к поверхности без зазора по всей длине.

Если обнаружен хотя бы незначительный изгиб, то вал следует заменить новым. В безвыходных ситуациях можно попытаться выправить вал (рис. 7.4). Для этого



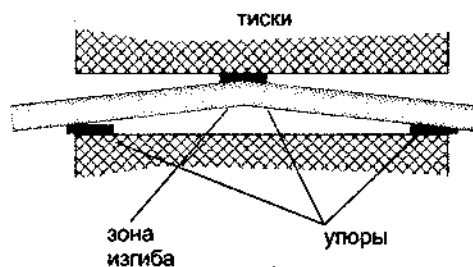


Рис. 7.4. Устранение изгиба вала

поставьте маркером выступающую сторону изгиба на валу. Зажимая вал в тисках через проставки из сложенной в несколько слоев фольги, исправьте изгиб вала. Проставки нужны для того, чтобы скомпенсировать упругость вала, слегка выгибая его в противоположную сторону. Если просто зажать вал в тисках, он спружинит и не выпрямится до конца. Возможно, операцию придется повторить несколько раз, контролируя результат. Идеально выправить вал в домашних условиях вряд ли получится, поэтому при первой же возможности его следует заменить.

Очистите резьбу в гнездах под фиксирующие винты от остатков фиксатора резьбы при помощи метчика нужного размера. Желательно также очистить и сами винты, вворачивая их в плашку для нарезания резьбы или, хотя бы, в новую гайку. Зафиксировав кончик вала в тисках, осторожно наденьте на него статор, совершая вращательные движения, аналогично тому, как вынимали вал. Обратите внимание: если на валу есть шлиц, проверните вал так, чтобы шлиц оказался напротив одного из винтов. Слегка увлажнив резьбу винтов фиксатором синего или красного цвета, плотно вверните их на место.

Проверка и замена подшипников

При ударе воздушного винта о препятствие и изгибе вала часто страдают миниатюрные шарикоподшипники. Дело в том, что при боковом ударе по валу шарики "впечатываются" в рабочую поверхность обоймы, создавая в ней вмятины, так называемые питчи. Подшипник начинает гудеть, увеличивается сопротивление вращению. Эффективность двигателя с гудящим подшипником снижается на 15–20%. Это, в свою очередь, приводит к закручиванию коптера по оси направления и несимметричной обработке кренов, а также к более быстрому разряду батареи.

Кроме того, подшипники начинают гудеть вследствие попадания в них воды, а также естественного износа. Иногда достаточно одного сезона интенсивных полетов, чтобы подшипники потребовали замену даже без аварий. Гудящий подшипник легко обнаруживается при сравнении вращения валов разных двигателей от руки. При исправных подшипниках во время вращения вала ощущаются только толчки от взаимодействия магнитов ротора с железом статора. В случае неисправного подшипника ощущается высокочастотная вибрация в такт качению шариков. Чтобы эффект ощущался сильнее, рекомендуется при вращении вала пальцами слегка прижимать его вбок. Во время полета двигатель с неисправным подшипником из-

дает специфический неприятный скрипяще-гудящий звук и нагревается сильнее остальных.

Разумеется, неисправный подшипник можно только заменить. При аварии обычно страдает один подшипник, расположенный ближе к воздушному винту. При обычной эксплуатации он также быстрее изнашивается. В двигателях может использоваться как пара одинаковых подшипников, так и подшипники с разным диаметром внешней обоймы. Этот нюанс надо иметь в виду при покупке запасных подшипников.

Специального инструмента для удаления подшипников из посадочных гнезд у любителей обычно не бывает. Иногда подшипники посажены в своем ложе не слишком прочно, и их удастся вытащить при помощи зацепов из стальной проволоки. Если же подшипник посажен очень прочно, можно выбить его при помощи стального стержня диаметром меньше, чем толщина вала. Вставьте стержень с противоположной стороны, слегка под углом, чтобы он уперся в обойму подшипника. Удерживая статор в руке и осторожно постукивая по стержню, выбейте подшипник. После этого он испортится окончательно, поэтому никогда не выбивайте исправные подшипники.

Чистка и смазка подшипников

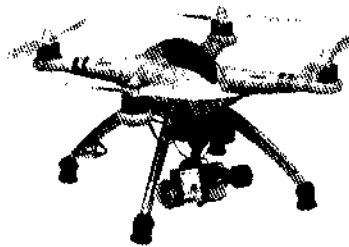
Иногда, при полетах в дождливую погоду или после падения коптера в воду, внутрь подшипников может попасть вода. Обычно во время полета двигатель нагревается до 40–60 °С. Когда двигатель остывает, вода всасывается внутрь подшипника. Не рекомендуется включать моторы и продолжать полет после попадания воды. Влага опасна не только тем, что может вызвать коррозию подшипника. Есть еще два негативных эффекта от попадания внутрь подшипника любой жидкости, не только воды.

Во-первых, жидкость выдавливает из подшипника специальную консистентную смазку, после чего у рабочих поверхностей начинается масляное голодание и быстрый износ. Во-вторых, при быстром вращении вала со скоростью несколько тысяч оборотов в минуту, при прокатывании шариков внутри обоймы подшипника, наполненной водой, возникает кавитация и микроскопические гидроудары, которые приводят к нарушению целостности зеркала рабочей поверхности качения. Как только зеркало нарушено, износ подшипника резко ускоряется и последующая чистка и смазка помогает мало.

Сказанное выше объясняет, почему *не рекомендуется использовать для промывки подшипников и чистки двигателя популярную жидкость WD-40*. Состав этой жидкости подобран таким образом, чтобы обеспечить максимальное проникание в любые, даже микроскопические зазоры и трещины. Жидкость WD-40 не только полностью заполняет подшипник, растворяя смазку. Она проникает в микротрещины зеркала обоймы и при скоростном вращении возникают гидроудары, щелушающие поверхностный слой и вызывающие появление каверн.

Для очистки двигателя от грязи лучше применять механическую очистку и продувание сжатым воздухом. Подшипники после попадания в них влаги рекомендуется

выварить в консистентной смазке. Лучше всего подойдет специальная вязкая полимерная смазка для скоростных подшипников, но можно использовать обычный "Циатим" или "Литол". В небольшой жестяной емкости нагрейте смазку до температуры 110–120 °С и пять-десять минут выдержите в ней подшипники, чтобы влага выпарилась из подшипников. Затем дайте им остыть, находясь в смазке. В процессе остывания смазка, еще остающаяся жидкой, втянется в пустоты закрытой обоймы. Подшипники не смазывают жидким моторным маслом, т. к. при нагреве и больших оборотах оно быстро покидает обойму подшипника.



ПРИЛОЖЕНИЯ

- Приложение 1.** Управление коптером со смартфона
- Приложение 2.** Сетка частот каналов видеотракта
- Приложение 3.** Команды управления и конфигурирования при помощи рукояток пульта
- Приложение 4.** Описание электронного архива

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Управление коптером со смартфона

Некоторые выпускаемые промышленно модели квадрокоптеров поддерживают возможность управления при помощи смартфона. Но эта функция доступна и для самодельного коптера, причем не потребуется покупать дорогое оборудование. Достаточно иметь смартфон или планшет с ОС Android, на котором установлена уже известная вам программа EZ-GUI Ground Station, а также установленный на коптере модуль беспроводной связи Bluetooth или радиомодем. Один из вариантов этого оборудования, чаще всего Bluetooth, все равно используется на коптере, поэтому даже не придется докупать дополнительное оборудование.

Следует сразу заметить, что управлять самодельным коптером при помощи сенсорного экрана, особенно с недорогим телефоном низкого качества, довольно сложно. Смартфон не заменит полностью пульт радиоуправления, прежде всего, потому что Bluetooth имеет очень ограниченный радиус действия. Радиомодем работает на большом расстоянии, но имеет ограничения по скорости передачи данных.

С другой стороны, при помощи смартфона можно провести испытательные взлеты и поверить основные настройки контроллера и функционирование узлов, если пульт еще не куплен или задержался в дороге. Простые тренировочные полеты и висение также вполне доступны при управлении через смартфон или планшет.

Благодаря наличию в современных гаджетах акселерометра, доступна такая интересная функция, как управление коптером при помощи наклона гаджета в нужную сторону. Такой способ управления интуитивно понятен и эффектно выглядит со стороны, но, к сожалению, быстро вырабатывает вредную привычку произвольно наклонять пульт управления. При переходе к обычному пульта управления от этой привычки трудно избавиться.

Установка и настройка программы EZ-GUI Ground Station описана в одноименном подразделе *раздела "Программы для мобильных устройств" главы 5*. Далее, должно быть настроено беспроводное соединение с полетным контроллером по Bluetooth или радиомодему. Подключение беспроводного оборудования описано в *главе 6*. Как показали испытания, проведенные автором, скорости радиомодема 57 600 бод недостаточно, возникают "рывки" сигнала управления, поэтому в данном случае модем надо настроить на скорость 115 200 бод. Это сокращает макси-

мальную дальность действия, но она остается вполне достаточной. Также установлено, что с некоторыми моделями мобильных гаджетов управление через радиомodem работает нестабильно. В частности, возникают периодические скачки оборотов двигателей. При использовании Bluetooth сбой не был замечен.

Запустите EZ-GUI Ground Station и перейдите в раздел **Конфигурации | Расширенные | Model Control**. Рабочий экран показан на рис. П1.1. Он по умолчанию находится в вертикальной ориентации и не разворачивается. Четыре пункта выбора опций из ниспадающих списков в верхней строке предназначены для симуляции тумблеров AUX1–AUX4 на пульте и имитируют одно из трех значений управляющего сигнала: низкий, средний и высокий. Выбирая нужные значения в соответствии с конфигурацией прошивки контроллера, можно переключать режимы точно так же, как это делается с пульта. Органы управления расположены таким образом, что горизонтальный движок предназначен для управления по оси направления YAW, а движок управления газом расположен справа от джойстика управления кренами, т. е. соответствует варианту пульта Mode 1. Такое расположение движка газа неудобно для тех, кто привык к пульту Mode 2, а также вырабатывает неправильную моторику у тех, кто еще не начал пользоваться пультом.

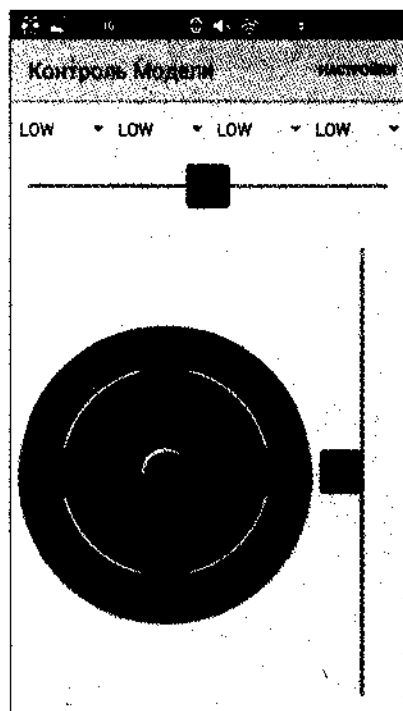


Рис. П1.1. Главный экран управления коптером программы EZ-GUI Ground Station

К счастью, назначение органов управления можно переназначить в настройках. Для этого нажмите опцию **Настройки** в правом верхнем углу экрана. Показанный на рис. П1.2 вариант настроек соответствует горизонтальному положению гаджета, когда короткий слайдер оказывается слева от джойстика и соответствует движку газа, а длинный слайдер сверху и соответствует управлению по оси направления

YAW. Как и устроено в настоящем пульте, положение движка газа фиксируется, а остальные движки автоматически возвращаются в среднее положение. Кроме того, включен режим управления положением коптера при помощи наклонов гаджета **Использовать датчик движения — Left-Right-Up-Down**. При таких настройках активация моторов происходит обычным способом: поместите движок газа в минимальное положение, затем переместите движок YAW в крайнее правое положение. Для отключения моторов переместите движок YAW в крайнее левое положение при минимальном газе.

ВНИМАНИЕ!

Все настройки и проверки проводите только при снятых воздушных винтах!

Перед использованием функции управления наклоном может потребоваться калибровка встроенного акселерометра телефона или планшета. Если функция калибровки не предусмотрена в прошивке, скачайте на Google Play приложение Bubble level и откалибруйте акселерометры, поочередно помещая гаджет на образцовую горизонтальную поверхность короткой стороной, длинной стороной и задней крышкой, каждый раз нажимая кнопку Меню и запуская калибровку.

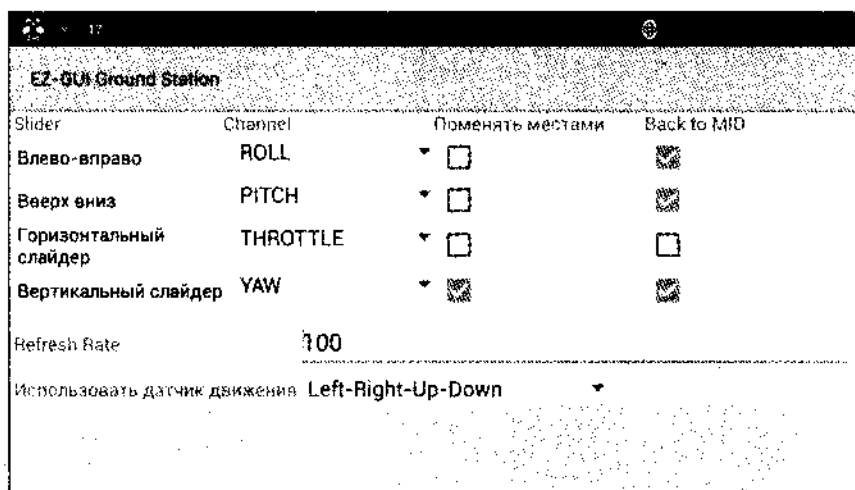


Рис. П1.2. Экран настроек для управления коптером

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Сетка частот каналов видеотракта

Таблица П2.1

Диапазон	Номер канала	Частота, МГц
FR1 / A	CH1	5865
	CH2	5845
	CH3	5825
	CH4	5805
	CH5	5785
	CH6	5765
	CH7	5745
	CH8	5725
FR2 / B	CH1	5733
	CH2	5752
	CH3	5771
	CH4	5790
	CH5	5809
	CH6	5828
	CH7	5847
	CH8	5866
FR3 / E	CH1	5707
	CH2	5685
	CH3	5665
	CH4	5645
	CH5	5885
	CH6	5905
	CH7	5925
	CH8	5945

Таблица П2.1 (продолжение)

Диапазон	Номер канала	Частота, МГц
FR4 / F	CH1	5740
	CH2	5760
	CH3	5780
	CH4	5800
	CH5	5820
	CH6	5840
	CH7	5860
	CH8	5880

Обратите внимание, что в связи с особенностями работы синтезатора частоты в некоторых поддиапазонах физические частоты каналов не идут подряд.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Команды управления и конфигурирования при помощи рукояток пульта

Активация моторов
(по умолчанию)



или



Деактивация моторов
(по умолчанию)



или



Калибровка гироскопа



Калибровка
акселерометра



Калибровка компаса



Подстройка
акселерометра



Калибровка в полете



Выбор профиля
настроек



Управление показом телеметрии

Старт/Стоп телеметрии
в циклическом режиме



Ручное переключение
страниц телеметрии



Настройка через ЖК-дисплей

Выйти без сохранения



Выбрать параметр



Изменить значение
параметра (1x)



Изменить значение
параметра (10x)



Сохранить и выйти



ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Описание электронного архива

По ссылке <ftp://ftp.bhv.ru/9785977535861.zip> можно скачать электронный архив с чертежами простой платы квадрокоптера, утилитами для настройки и файлами, необходимыми для изготовления самодельного цветного дисплея. Эта ссылка доступна также со страницы книги на сайте www.bhv.ru.

Распаковав архив в любую рабочую папку, вы получите структуру папок, приведенную в табл. П4.1.

Таблица П4.1. Структура электронного архива

Папка	Описание
display	Схема и рисунок печатной платы цветного дисплея в формате DipTrace, библиотеки исходного кода прошивки
display\Adafruit_GFX *	Библиотека графического ядра для Arduino IDE
display\Adafruit_ST7735 *	Библиотека для поддержки видеоконтроллера ST7735
display\Adafruit_QDTech *	Библиотека для поддержки видеоконтроллера S6D02A1
display\MW\display *	Исходные коды прошивки дисплея
drivers	Драйверы для адаптеров USB-COM CH340/341, CP2102
frame	Папка с чертежами деталей рамы коптера
utils	Утилиты для настройки приемников GPS и радиомодемов 3DR Radio
utils\3drradioconfig	Утилита настройки радиомодема
utils\GPS_Viewer_v1.8	Универсальная утилита для тестирования приемников GPS производства Global Top и аналогичных им

ВНИМАНИЕ!

Папки, помеченные символом *, переименовывать нельзя.

Предметный указатель

З

3DRRadio Config 188

А

AssistNow 195

В

Battery Elimination Circuit (BEC) 68

Bluetooth:

- ◇ настройка модуля 181
- ◇ подключение модуля 181

Е

EZ-GUI Ground Station 157, 190, 217

Г

GPS-трекер 100

М

Mahowii 146

MultiWii Configuration Tool 159

MultiWii EZ-GUI 157

MULTIWII WINGUI 154

MultiWiiConf 150

Н

NAZE32 Configurator 158

Р

Pulse Code Modulation (PCM) 39

Pulse Position Modulation (PPM) 37

Pulse Width Modulation (PWM) 38

Т

Termite 3.0 156, 182

U

u-Center 193

А

- Адаптер Bluetooth 88
- Аккумулятор 62
 - ◊ зарядка 64
- Аксéлерометр 24, 92
 - ◊ калибровка 25
- Альманах 83
- Антенна 46
 - ◊ направленная 52
 - ◊ поломка 238
 - ◊ пространственная диверсификация 55
 - ◊ типа "клевер" 51
 - ◊ штыревая 49
- Аутраннер 56

Б

- Балансир 130
- Балансировка:
 - ◊ винтов 129
 - ◊ моторов 131
- Барометр 92
 - ◊ интегральный 28
- Батарея См. Аккумулятор
- Биндинг 41
- Бипер 99, 171
- Бустер 95

В

- Вибрация 118
- Видеокмутатор 75
- Видеомонитор 79
- Видеоочки 79
- Видеопередатчик 78
- Видеоточка 215
- Винт 58

Г

- Гироскоп 26

Д

- Датчик:
 - ◊ напряжения 91
 - ◊ расстояния См. Сонар ультразвуковой
 - ◊ температуры 92
 - ◊ тока 91

Двигатель:

- ◊ бесколлекторный 56
- ◊ коллекторный 56
- Диаграмма направленности 46
- Древесина 113

И

- Индикатор разряда батареи 72
- Инраннер 57
- Источник бортового питания 68

К

- Калибровка регуляторов оборотов 159
- Камера:
 - ◊ курсовая 75
 - ◊ основная 75
- Канал радиопередачи, настройка 160
- Карбон 114
 - ◊ листовой 115
- Компас 92
 - ◊ интегральный См. Магнитометр
- Контроллер полетный 92
- Коэффициент усиления 48

М

- Магнитоизоляция 124
- Магнитометр 26
 - ◊ калибровка 28
- Модуляция:
 - ◊ импульсно-кодовая 39
 - ◊ фазово-импульсная 37
 - ◊ широтно-импульсная 38
- Мощность рабочая 48
- Мультикоптер 165

П

- Пакет 39
- Пластик 117
- Подвес стабилизированный 76
- Подсветка светодиодная 175
- Полоса частот 48
- Поляризация 48
- Приемники GPS 80
- Принцип обратимости антенн 48
- Протокол:
 - ◊ DSM2 40
 - ◊ DSMX 40
- Профиль экструдированный 115

Р

Радиомаячок 100
Радиомодем 94, 186
Радиоприемник 92
Репитер 96

С

Светодиод 175
Сервомашинка 101
Система слежения за направлением,
автоматическая 53
Склонение магнитное 28
Сонар ультразвуковой 30, 173
Сплавы алюминия 117
Стабилизатор последовательный
линейный 69
Старт:
◊ "горячий" 84
◊ "теплый" 84
◊ "холодный" 84

Стеклотекстолит радиотехнический 114
Субтриммер 42
Сэндвич:
◊ алюминиевый 116
◊ карбоновый 116

Т

Текстолит конструкционный 114
Ткань карбоновая 115
Трекер 53
Триммер 42
Трубка карбоновая 115

Ч

Частота рабочая 48

Э

Экспонента 43
Эфемериды 84