

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

К.А. Ярков, Ф. Н. Захаров

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БПЛА МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА

Методические указания для практических и самостоятельных работ
студентов всех форм обучения, обучающихся по техническим направлениям

Томск
2024

УДК 629.7.02
ББК 39.54
Я-74

Рецензенты:

Аникин А.С., доцент кафедры радиотехнических систем,
канд. техн. наук

Ярков, Кирилл Алексеевич, Захаров, Фёдор Николаевич

Я-74 Проектирование БПЛА мультироторного типа : Методические указания для практических и самостоятельных работ студентов всех форм обучения, обучающихся по техническим направлениям / Ярков К. А., Захаров Ф. Н. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024 – 24 с.

Методические указания составлены с учетом требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО).

Методические указания содержат информацию о методике проектирования БПЛА мультироторного типа с взлетной массой до 15 кг. Практикум предназначен для студентов, обучающихся по техническим направлениям и изучающих беспилотные технологии.

Одобрено на заседании кафедры РТС, протокол № 4 от 16.11.2023

УДК 629.7.02
ББК 39.54

© Ярков К. А., Захаров Ф. Н., 2024
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024

Оглавление

1 ВВЕДЕНИЕ.....	4
2 ВЫБОР МИНИМАЛЬНОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ	5
2.1 Рама.....	5
2.2 Двигатели.....	6
2.3 Регуляторы оборотов	7
2.4 Аккумуляторная батарея	8
2.5 Полетный контроллер.....	9
2.6 Аппаратура управления.....	10
3 ВЫБОР РАСШИРЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ.....	12
3.1 Телеметрия.....	12
3.2 FPV.....	12
3.3 Видеокамера	13
3.4 Радиопередатчик и радиоприемник	15
3.5 Устройство воспроизведения видеоизображения	15
4 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЛИНИИ СВЯЗИ.....	16
4.1 Распространение радиоволн в свободном пространстве	16
4.2 Дальность прямой видимости.....	17
4.3 Дальность действия линии связи в свободном пространстве	18
5 ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ.....	19
6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	22
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	23
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	24

1 Введение

Применение БПЛА в современном мире имеет высокую актуальность. В частности, БПЛА нашли широкое применение в задачах радионавигации, радиолокации, радиоэлектронных системах связи и др. [1, 2]. Для подобных исследований обычно требуется БПЛА с возможностью закрепления специфичного и габаритного оборудования [3, 4]. Готовые БПЛА, как правило, не удовлетворяют уникальным задачам полезной нагрузки, что вынуждает проектировать новый БПЛА. Для проектирования БПЛА часто применялись комплектующие европейских и североамериканских фирм. В усложнившейся геополитической обстановке закупка многих комплектующих значительно усложнилась либо стала вовсе не доступна. Эти обстоятельства вынуждают обратиться на доступные рынки дружественных стран, в первую очередь азиатских.

Для проектирования конкретного БПЛА требуются четко поставленные задачи и условия применения БПЛА. Тем не менее перечень основных элементов для БПЛА вертикального взлета остается постоянным. Условно можно разделить оборудование БПЛА на три части – минимально необходимое, дополнительное и полезная нагрузка. Минимально необходимый состав БПЛА включает в себя раму, двигатели, регуляторы оборотов, полетный контроллер, аккумуляторную батарею и аппаратуру управления. К дополнительному оборудованию стоит отнести FPV систему, систему телеметрии, так как их наличие необязательно для ряда задач и в определенных задачах может отсутствовать.

Задача методических указаний заключается в описании методики проектирования мультироторных БПЛА вертикального взлета с массой полезной нагрузки не более 5 кг.

2 Выбор минимальной элементной базы

Минимальная элементная база обеспечивает минимальные функции достаточные для подъема в воздух полезной нагрузки и мягкой посадки всего БПЛА. Функционал такой крайне прост, а дальность действия платформы ограничена прямой оптической видимостью между БПЛА и оператором. К минимальной элементной базе отнесем раму, двигатели, регуляторы оборотов, аккумуляторную батарею, полетный контроллер и аппаратуру управления.

2.1 Рама

Проектирование следует начать с рамы, так как именно она задает итоговые масса-габаритные показатели проектируемого мультикоптера. На азиатском рынке существует большое количество производителей рам для БПЛА. В основном это рамы без указания конкретного производителя из пластика или углепластика (карбона) небольшого размера (180-450 мм). Значительно реже встречаются более крупные рамы от 600 мм в диаметре.

Таблица 1 – Краткий перечень рам для постройки БПЛА

№	Наименование	Особенности
1	Tarot 650 sport	Рама 4-х роторная, размер пропеллера 10-12 дюймов, собственная масса 550-750 г
2	Tarot 680 PRO	Рама 6-ти роторная, размер пропеллера 10-13 дюймов. Собственная масса 810 г
3	Tarot 690	Рама 6-ти роторная, размер пропеллера 10-13 дюймов. Собственная масса 650 г
4	Tarot TL810	Рама 6-ти роторная, размер пропеллера 15 дюймов. Собственная масса 1020 г
5	Tarot TL8X000	Рама 8-ми роторная, размер пропеллера 15 дюймов. Собственная масса 1950 г
6	Tarot XS690	Рама 4-х роторная, размер пропеллера 15 дюймов, собственная масса 562 г
7	Tarot TL15T00	Рама 8-ми роторная, размер пропеллера 15-18 дюймов. Собственная масса 1950 г
8	T-MOTOR M1200	Рама 4-х роторная, с силовой частью. Максимальная взлетная масса 18 кг. Максимальная полезная нагрузка 4 кг
9	T-MOTOR M1500	Рама 6-ти роторная, с силовой частью. Максимальная взлетная масса 22,8 кг. Максимальная полезная нагрузка 10 кг
10	DJI MATRICLE 600 PRO	Рама 6-ти роторная, с полным минимальным комплектом. Максимальная взлетная масса 15,1 кг. Максимальная полезная нагрузка 5,1 кг
11	S1000 Premium ARF KIT	Рама 8-ми роторная, максимальная взлетная масса 15,1 кг

Исходя из найденных готовых решений в среднегабаритном сегменте преобладают БПЛА с 6 и 8 роторами. На четырех роторах также встречаются, но значительно реже.

Для обеспечения нужной взлетной массы целесообразно использовать коптер с 6 и более роторами, так как меньшее количество роторов вынуждает использовать мощные, дорогих двигателей с большим потреблением тока и соответствующих им регуляторов оборотов. Для построения БПЛА широкого назначения предлагается использовать раму Tarot TL810. Низкая стоимость и наличие 6-ти роторов с возможностью установки 15 дюймовых пропеллеров дают широкие возможности при построении БПЛА.

2.2 Двигатели

Для выбранной рамы, производителем рекомендуется использовать бесколлекторные двигатели 4XXX с количеством оборотов в минуту 300-500. Под данным рекомендациям найдены двигатели, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Краткий перечень бесколлекторных двигателей для БПЛА

№	Название	Стоимость (руб.) на февраль 2022г	Особенности
1	Tarot 4114/320kv	3300-5000	2600г тяги при 16А потребления тока; максимум 2650г при 16,8А
2	IFlight XING X4214 400KV	5500-6000	3300г тяги при 22.3 А потребления тока; максимум 3688г при 25,9А
3	T-Motor MN4014 KV330	8000-12000	2000г тяги при 16А потребления тока; максимум 2300г при 16,8А
4	GARTT ML 4114 330KV	2500-3000	2000г при 13А потребления тока; максимум 2200г при 15А
5	T-Motor Antigravity 4004 KV300	6200	918г при 4А потребления тока; максимум 1311г при 7,5А

Все значения указаны для 15 дюймовых пропеллеров, по данным представленным производителями.

Стандартный расчет мощности двигателей при проектировании БПЛА производится по формуле:

$$P = \frac{W_{полн} \cdot 2}{n_{пот}}$$

где P – тяга одного двигателя в кг, $W_{полн}$ - полная взлетная масса коптера со всем навесным оборудованием, $n_{рот}$ - количество роторов. Расчет идет по увеличенной массе, так как необходим некоторый запас тяги для уверенного полета.

Назвать точную массу коптера со всем навесным оборудованием и полезной нагрузкой на данном этапе невозможно. Предположим, что полная масса коптера будет 15 кг, тогда:

$$P = \frac{15000 * 1.25}{6} = 3125 \text{г.}$$

Получаем, что один двигатель должен иметь тягу не менее чем 3125г. Под это требование подходят лишь один двигатель, Tarot 4114/320kv [5]. При этом, существует определенный запас по мощности (500г на двигатель). Это дает возможность полета в сложных условиях, и сохраняет возможность для маневров. Например, сильный ветер или поворот по оси рыскания, когда для реализации поворота используется ослабление половины двигателей.

2.3 Регуляторы оборотов

Далее необходимо выбрать тесно связанный с двигателями элемент – регулятор оборотов. Исходя из характеристик двигателя, максимальный ток потребления составляет 30,9А. Для этого необходим регулятор, работающий на аккумуляторах 6S, имеющих напряжение до 25,2В и допустимый максимальный ток, превышающий 30,9А.

Таблица 3 – Краткий перечень регуляторов оборотов для БПЛА

№	Название	Стоимость (руб.) на февраль 2022г	Особенности
1	BLHeli MAX 40A	980-1200	6S, 40A
2	VGOOD	950-1100	6S, 40A
3	T-Motor 40A Air	3300-4200	6S, 40A, радиатор в комплекте
4	T-Motor Alpha 40A LV	5500-7000	6S, 40A, радиатор в комплекте
5	Hobbywing XRotor Pro 40A	1500-1700	6S, 40A, радиатор в комплекте

Любые регуляторы, указанные в таблице 3 возможно использовать для построения данного БПЛА. Рекомендуется для мощностей свыше 30А иметь дополнительный радиатор или охлаждение для регулятора. Исходя из этого выбор остановим на Hobbywing XRotor Pro 40А.

2.4 Аккумуляторная батарея

Закончим выбор силовой части подбором аккумулятора. Двигатели спроектированы под работу с 6S аккумуляторами (22,4В). Необходимо произвести расчет объема аккумулятора исходя из потребления выбранной аппаратуры. Самый большой вклад в энергопотребление вносят двигатели (сотни Ватт). Полетный контроллер и связанные с ним устройства (GPS, приемник аппаратуры управления и т.д.) потребляют сотни мВт. Исходя из того, что разница составляет несколько порядков, потреблением не силовой электроники можно пренебречь. На 90% мощности один двигатель потребляет 22,3А, тогда как весь БПЛА за час потребит:

$$P_{nom} = I_{дв} \cdot n_{дв} \cdot t_{ч} = 22,3 \cdot 6 \cdot 1 = 133,8 \text{ А} \cdot \text{ч} . \quad (1)$$

Объем аккумулятора, необходимый для полета в течение 1 минуты составляет:

$$V_{акк} = \frac{P_{nom} \cdot t}{60} = \frac{133,8}{60} = 2,23 . \quad (2)$$

Следовательно, для полета более чем на 10 минут, необходим аккумулятор объемом более чем $2,23 \text{ А} \cdot 10 \text{ мин} = 22,300 \text{ А} \cdot \text{ч}$.

Помимо объема необходимо учесть такой параметр, как токоотдача аккумулятора. Для выбранного двигателя максимальный потребляемый ток составляет 30,9А. Все двигатели потребляют в пике 185,4А, соответственно, токоотдача должна составлять не менее 185,4А.

Данный параметр указывается в паспортах батарей косвенно в форме «N C» где N это число, показывающее в какое количество раз меньше времени аккумулятору необходимо для полного и безопасного разряда. Соответственно, для вычисления максимальной токоотдачи аккумулятора в А·ч необходимо умножить на коэффициент «С».



Рисунок 1 – Внешний вид LI-POL аккумулятора с маркировкой токоотдачи

На азиатском рынке представлено большое количество Li-Po батарей как больших объемов более 20 000 мА·ч, так и меньших объемов, которые позволяют собрать составную батарею нужного объема.

Таблица 4 – Краткий перечень полетных контроллеров для БПЛА

№	Название	Стоимость (руб.) на февраль 2022г	Особенности
1	HRB	13500	22000 mAh
2	HRB	8000	12000 mAh
3	TATTU	14000	22000 mAh
4	TCSWORTH	12000	22000 mAh
5	MOSEWORTH	13000	22000 mAh

2.5 Полетный контроллер

После силовой части необходимо подобрать полетный контроллер, который будет осуществлять управление всем коптером. Рассмотрим самые популярные и распространенные на рынке.

Таблица 5 – Краткий перечень полетных контроллеров для БПЛА

№	Название	Стоимость (руб.) на февраль 2022г	Особенности
1	Ardupilot MEGA 2.6 (APM 2.6)	1 500 - 5 000	Отсутствуют данные
2	Ardupilot 2.8 (APM 2.8)	2 000 – 6 000	Отсутствуют данные
3	Pixhawk PX4	3 000 – 7 000	Частота процессора 168 МГц, RAM 192кб, flash-память 1024кб
4	Pixhawk 4	18 000 – 30 000	Частота процессора 216 МГц, RAM 512кб, flash-память 2048кб
5	Racer Cube	8 000	Отсутствуют данные
6	NAZA V2	14 000 – 50 000	Отсутствуют данные
7	Matek F405	3 000 – 15 000	Частота процессора 168 МГц, RAM 192кб, flash-память 1024кб

Из всех упомянутых полетных контроллеров универсальное назначение имеют лишь Pixhawk 4 (и его ранние версии) и NAZA V2. Остальные предназначены для построения коптеров для спортивных соревнований и имеют встроенные компактные датчики или отсутствует возможность для их подключения. Контроллеры NAZA имеют закрытый программный код, который препятствует подключению сторонних датчиков, что осложняет

возможную модернизацию коптера. Помимо этого, контроллер NAZA имеет возможность работы лишь с 6-ю двигателями и 2-я сервоприводами. Также отсутствует возможность подключать датчики по протоколу I2C и UART.

Исходя из этого, целесообразно остановить выбор на контроллере Pixhawk 4.

2.6 Аппаратура управления

Для управления коптером во время полета необходима аппаратура управления. Существует ряд радиочастот, разрешенных и используемых для радиоуправления. Это 27, 35, 40 и 75 МГц и 2,4ГГц. На данный момент широко распространена аппаратура, работающая на частоте 2,4ГГц, потому как для данной частоты существуют бескварцевые технологии подстройки частоты, возможные для реализации на подобных устройствах.

Помимо частоты аппаратура управления имеет множество характеристик, но основные различия находятся в количестве каналов и качестве используемых материалов.

Таблица 6 – Краткий перечень аппаратуры управления для БПЛА

№	Название	Стоимость (руб.) на февраль 2022г	Особенности
1	FrSky Taranis X9d plus	15 000 – 25 000	24 канала
2	FrSky Taranis QX7	9 000 – 18 000	16 каналов
3	Futaba 14SG	40 000 – 90 000	14 каналов
4	FrSky i6x	2 700 – 4 000	6 каналов
5	FsFly T-SIX	4 000 – 6 000	6 каналов
6	RadioLink AT10	9 000 – 12 000	12 каналов
7	WFLY WFT09S	10 000 – 13 000	9 каналов

Выбор был остановлен на популярной аппаратуре FrSky Taranis X9d plus. Она имеет большое количество каналов управления и большой ассортимент запасных частей. К данной аппаратуре необходим приемник, устанавливаемый непосредственно на мультикоптер.

Таблица 7 – Краткий перечень приемников аппаратуры управления для БПЛА

№	Название	Стоимость (руб.) на февраль 2022г	Особенности
1	X8R	3000	До 16 каналов
2	L9R	2900	До 12 каналов, дальняя связь
3	X4RSB	2200	До 16 каналов, малый вес и малая дальность связи
4	S6R	2600	6 каналов с 3х осевым гироскопом
5	RX F801	1000	8 каналов

X8R имеет очень высокую популярность среди радиолюбителей за его надежность и большое количество каналов по протоколу SBUS.

Данной конфигурации мультикоптера минимально достаточно для управляемого оператором полета в зоне прямой видимости. Для осуществления полетов по траектории в автоматическом режиме или вне зоны прямой видимости необходимо дополнительное оборудование. Дополнительное оборудование значительно расширит возможности применения мультикоптера для научных целей.

3 Выбор расширенной элементной базы

3.1 Телеметрия

Система телеметрии позволяет задавать автономные миссии, когда мультикоптер выполняет задания (полет по точкам, по траекториям и т.д.) в автономном режиме без команд с аппаратуры управления. Выполнение полетов точно по заданной траектории часто применяется для сбора статистических данных о полезной нагрузке, устанавливаемой на мультикоптере.

Телеметрия для БПЛА реализуется на частотах 433 МГц и 915 МГц. Для того, чтобы не создавать помех дополнительной аппаратуре, следует остановиться на рабочей частоте 915 МГц. Это частота используется значительно меньшим количеством абонентов в РФ, в отличие от частоты 433 МГц (автомобильная сигнализация, автоматические шлагбаумы, ворота и т.д.).

Таблица 8 – Краткий перечень систем телеметрии для БПЛА

№	Название	Стоимость (руб.)	Особенности
1	3DR telemetry	1600	100 мВт
2	3DR telemetry	1900	500 мВт
3	RadioVS	1500	100 мВт
4	RadioVS	2000	500 мВт

Телеметрия от компании 3DR достаточно долго была эталоном на рынке. О ней существует большое количество информации и пошаговые инструкции, что является большим эксплуатационным преимуществом. Выбор стоит сделать в пользу неё.

3.2 FPV

First Person View (FPV) – вид от первого лица. Такой аббревиатурой называют одно из направлений радиоуправляемого авиамоделизма. В данном случае осуществляется не только управление авиамodelью по радиоканалу системы радиоуправления, но и прием с модели видеоизображения по дополнительному видео-радиоканалу в режиме реального времени.

Минимально необходимое оборудование для FPV системы включает в себя следующее:

- камера,
- передатчик видеосигнала,
- приемник,
- устройство воспроизведения видеоизображения (монитор, смартфон, видеошлем и т.п.).

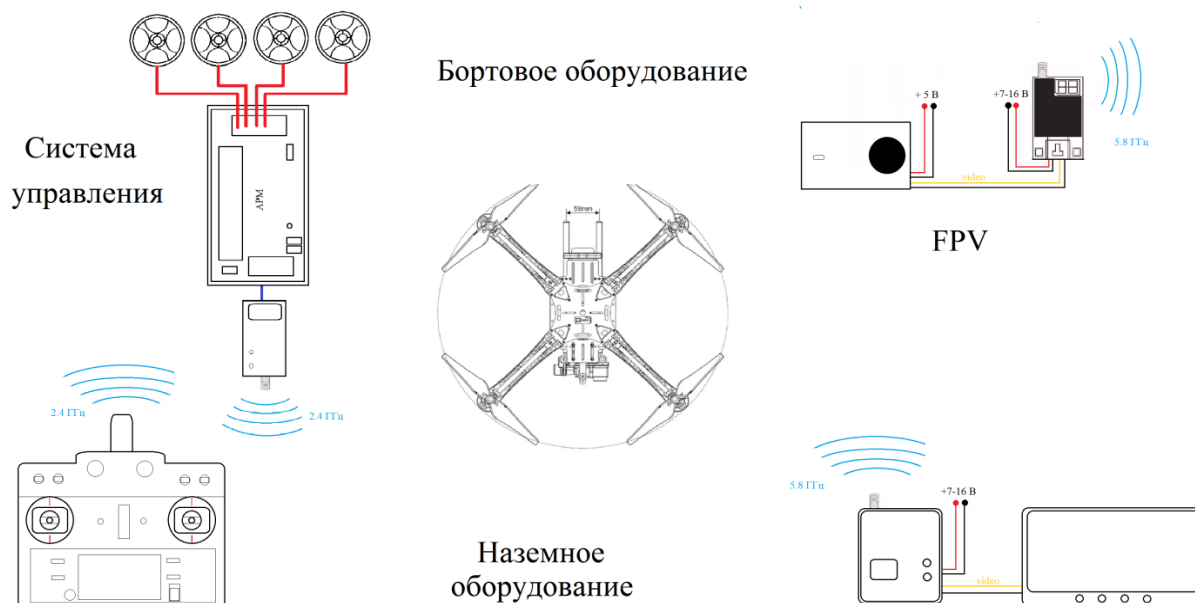


Рисунок 2 – Упрощенная схема БПЛА с FPV системой

Для вывода дополнительной информации поверх транслируемого видео, необходима система OSD (On Screen Display, дисплей на экране). OSD – дополнительное периферийное устройство полетного контроллера, которое подключается между камерой и видеопередатчиком и используется для наложения параметров полета (скорость, высота, координаты и пр.) либо образов на видео.

3.3 Видеокамера

Бортовые видеокамеры могут быть довольно различными как по размеру и весу, так и по другим характеристикам. Чаще всего используются микрокамеры с наклонно-поворотным механизмом, но возможно использование и цифровых камер (таких как Sony NEX-3 или камеры GoPro) со стабилизирующим подвесом. В некоторых случаях устанавливаются две камеры. Одна для записи в высоком качестве изображения во внутреннюю память, вторая для управления по видеосигналу. Ключевыми показателями для FPV камер являются TVL и время задержки матрицы. TVL (Television Lines) – разрешающая способность в телевидении и видеозаписи. Способность устройства передавать мелкие элементы изображения.

В качестве камеры могут использоваться курсовые камеры. Курсовой камерой обычно называют аналоговую микрокамеру. Такая камера имеет очень маленькие массогабаритные параметры, что является очень важным для летательных аппаратов. Так же она без задержки отправляет сигнал на передатчик. Это является решающим фактором для быстрых полетов на БПЛА. К недостаткам камеры относится ее низкое разрешение и отсутствие возможности для записи видео на самом БПЛА.

В качестве камеры для БПЛА так же могут использоваться цифровые экшен-камеры с возможностью аналогового видеовыхода. К преимуществам данных камер относится возможность записи непосредственно с БПЛА,

высокое разрешение видеоизображения вплоть до 4К (на сегодняшний день). Разрешением в 4К называется разрешение в 3840 на 2160 пикселей.

К недостаткам такого типа камеры относится ее более высокие масса и габариты, по сравнению с курсовыми камерами, а также задержка видеосигнала при АЦП и ЦАП. В таблице 9 представлены усредненные технические характеристики типовых камер.

Таблица 9 – Усредненные технические характеристики типовых камер

Название	Размеры [мм]	Масса [грамм]	Напряжение питания [В]	Разрешение видео	Максимальная частота съемки кадров	Задержка [мс]	Возможность записи видео
Курсовая камера	25x25x25	12	5-36	1000TVL L (аналог 1080p)	40	0.001	нет
Экшен камера	65x40x30	95	5	4k	240	0.1	да
Совмещенная камера	20x10x13	5	3.3-5	1080p	30	0,001	нет

Выбор стоит остановить на курсовой камере в виду малых массогабаритных параметров. Запись полета можно вести на устройстве вывода изображения FPV системы.

Таблица 10 – Краткий перечень курсовых камер для FPV

№	Название	Стоимость (руб.)	Особенности
1	QH 1000TVL	700	Максимальное разрешение 1280*960; вес 7 г
2	Jinjean B19	1900	Вес 5.8 г, максимальное разрешение 1000TVL
3	CaddxFPV Ant	1200	Максимальное разрешение 1200 TVL, Вес 3г.
4	Foxeer Mini	2500	Вес 8,5г, разрешение 1200TVL
5	Eachine TX06	1220	Разрешение 700TVL, вес 3г

Все упомянутые камеры имеют схожие параметры и принципиальных отличий не имеют. Остановим выбор на CaddxFPV Ant.

3.4 Радиопередатчик и радиоприемник

Передатчик – устройство, предназначенное для формирования радиосигнала и его излучения. Передатчики для FPV системы отличаются лишь качеством шумоподавления и излучаемой мощностью.

Таблица 11 – Краткий перечень передатчиков для FPV систем

№	Название	Стоимость (руб.)	Особенности
1	TS832	1100	Мощность 600 мВт
2	RadioVS	7 000	Мощность 1000 мВт
3	АКК X2P	1400-2000	Мощность от 20 до 1000 мВт
4	АКК Nano	750	Мощность 300 мВт

Радиоприемник – устройство, соединяемое с антенной и служащее для радиоприема, то есть для выделения сигналов из радиоизлучения.

Таблица 12 – Краткий перечень приемников для FPV систем.

№	Название	Стоимость (руб)	Особенности
1	RS832	1300	Чувствительность -90 дБм
2	Diversityskyzone D40	500	Чувствительность -95 дБм
3	Tarot	2000	Чувствительность -85 дБм
4	Aomway RX004	6200	Чувствительность -100 дБм

Приемник и передатчик выбираются из требования обеспечения максимальной дальности связи. Методика расчета необходимой излучаемой мощности при заданной чувствительности приемника приведена в разделе 4 «Энергетический расчет линии связи».

3.5 Устройство воспроизведения видеоизображения

Самый простой способ – это вывод информации на экран ноутбука. Для этого необходимо связующее звено – устройство видеозахвата. Оно представляет собой АЦП/ЦАП с аппаратно-программным комплексом и USB выходом. Популярным примером является устройство Easier cap.

4 Энергетический расчет линии связи

4.1 Распространение радиоволн в свободном пространстве

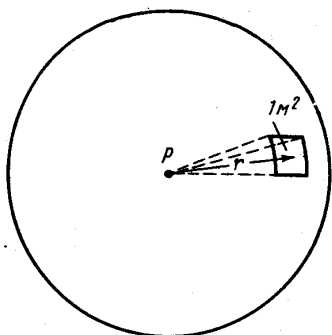


Рисунок 3 – К определению мощности принимаемого сигнала, создаваемого изотропным излучателем

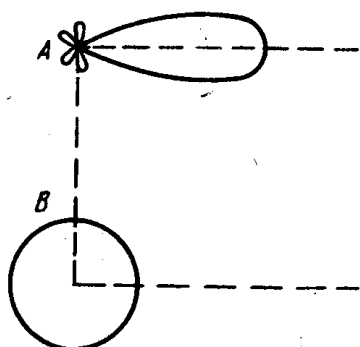


Рисунок 4 – Диаграммы направленности направленной (A) и изотропной (B) антенн

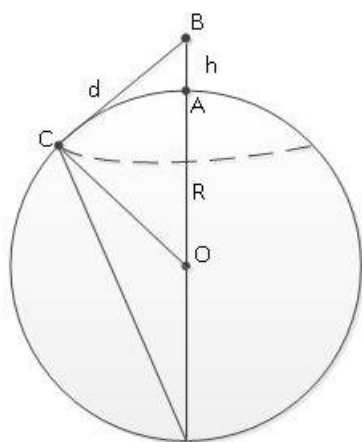


Рисунок 5 – К определению видимого горизонта

Рассмотрим простейший случай распространения радиоволн в свободном пространстве без поглощения. Допустим, что источником радиоволн является **изотропный излучатель**, т.е. воображаемый точечный излучатель, равномерно излучающий радиоволны во всех направлениях.

Обозначая через P излучаемую источником мощность, определим **плотность потока энергии (вектор Пойнтинга)** на расстоянии r от источника радиоволн (рисунок 3), основываясь на том, что излучаемая энергия равномерно распределяется по поверхности сферы радиуса r . Выражая мощность излучателя в ватах, а линейные размеры в метрах, получим для численного значения вектора Пойнтинга выражение

$$\Pi = \frac{P}{2\pi r^2} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right], \quad (3)$$

где $2\pi r^2$ - площадь поверхности сферы, проходящей через точку наблюдения и с центром в точке расположения антенны. Плотность потока мощности показывает, какая мощность приходится на единицу площади фронта радиоволны.

Реальная антенна излучает ту же мощность по разным направлениям неравномерно (см. рисунок 4). За счет этого в направлении максимального излучения вектор Пойнтинга увеличится в D раз:

$$\Pi = \frac{PG}{2\pi r^2}. \quad (4)$$

Параметр G называется **коэффициентом направленного действия антенны (КНД)** и является одним из ее основных параметров. Для **изотропной (ненаправленной) антенны коэффициент направленного действия G равен единице.**

Мощность принимаемого сигнала на выходе приёмной антенны будет зависеть от площади приёмной антенны и определяется выражением:

$$P_{\text{пр}} = \Pi S_A = \frac{PG S_A}{2\pi r^2}, \quad (5)$$

где $S_A = \frac{G_{\text{пр}} \lambda^2}{4\pi}$ – эффективная площадь приёмной антенны, м²; $G_{\text{пр}}$ – коэффициент направленного действия приёмной антенны; λ – длина волны радиосигнала, м.

Из формулы (5) видно, что принимаемая мощность обратно пропорциональна квадрату расстояния между источником и приёмником.

4.2 Дальность прямой видимости

Видимый горизонт. Так как Земля имеет форму шара, наблюдателю, находящемуся, например, в море, представляется, что он находится в центре круга, по краям которого небо как бы смыкается с морской поверхностью. Эта окружность и называется видимым горизонтом наблюдателя. На рисунке 5 видимый горизонт обозначен штриховой линией. То есть для наблюдателя, находящегося в точке A на высоте h от поверхности земли, видимый горизонт будет образован всеми точками касания лучей зрения земной поверхности (угол ВСО равен 90 градусов).

Говоря о видимом горизонте, чаще всего имеют в виду длину d отрезка ВС. Длину d легко вывести из теоремы Пифагора (студентам предлагается проделать это самостоятельно). R – **радиус Земли**, который обычно принимают за **6 378 километров**.

В реальной жизни на стороне человека выступает атмосфера. Она, благодаря явлению **рефракции**, то есть преломлению лучей в атмосфере, увеличивает дальность видимого горизонта примерно на 6%.

Дальность прямой видимости D предметов определяется наибольшим расстоянием, на котором наблюдатель увидит вершину наблюдаемого объекта на линии горизонта. Как видно из рисунка 6, она зависит как от высоты наблюдателя h , так и от высоты наблюдаемого объекта H . Собственно, это сумма дальности видимого горизонта наблюдателя и дальности видимого горизонта наблюдаемого объекта.

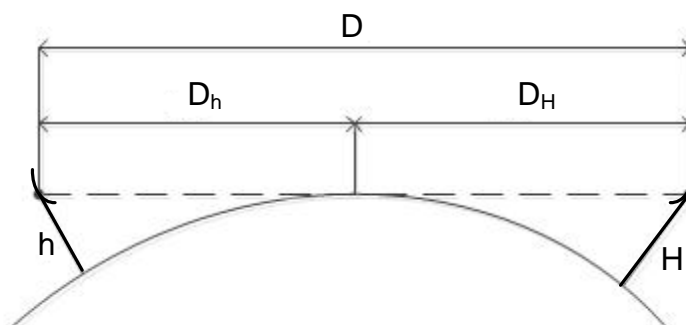


Рисунок 6 – К определению дальности прямой видимости

4.3 Дальность действия линии связи в свободном пространстве

Дальность действия является одной из важнейших характеристик радиосистем различного назначения. *Под дальностью действия понимают* максимальное расстояние $R = R_{\max}$, при котором радиосистема выполняет свои функции с заданными характеристиками качества.

Для любых линий связи максимальная дальность определяется минимальным сигналом на входе приёмника, при котором удовлетворяются технические требования к системе связи. Минимально необходимая мощность сигнала $P_{\text{пр min}}$ на входе приёмника зависит от мощности собственного шума приёмника $P_{\text{ш}}$ и необходимого превышения k_p сигнала над ним:

$$P_{\text{пр min}} = k_p P_{\text{ш}}. \quad (6)$$

Величина k_p называется *коэффициент различимости* и показывает во сколько раз минимальная мощность сигнала на входе приёмника должна превышать мощность собственных шумов приёмника.

Мощность собственных шумов приёмника определяется коэффициентом шума $k_{\text{ш}}$ приёмника, температурой T приёмника (К) и полосой пропускания Δf приёмника (Гц):

$$P_{\text{ш}} = k_{\text{ш}} k T \Delta f, \quad (7)$$

где k – постоянная Больцмана.

Для того, чтобы определить максимальную дальность действия линии связи, необходимо составить уравнение

$$P_{\text{пр}}(R_{\max}) = P_{\text{пр min}} \quad (8)$$

и решить его относительно R_{\max} .

5 Задание на работу

Вариант 1

Спроектировать БПЛА мультироторного типа для транспортировки 500г полезной нагрузки в FPV режиме на расстояние не менее 3 км.

Определить необходимое количество линий связи и произвести энергетический расчет.

Произвести расчет силовой части и осуществить выбор комплектующих для двух типов платформ - с 4-мя и с 6-ю или 8-ю роторами. Аппаратуру связи использовать

Осуществить подбор комплектующих расширенной элементной базы.

Осуществить оценку стоимости комплектующих для полученных конфигураций. Обосновать полученные результаты.

Вариант 2

Спроектировать БПЛА для транспортировки 500г полезной нагрузки на расстояние до 10км в FPV режиме и временем полета не менее 20 минут.

Определить необходимое количество линий связи и произвести энергетический расчет.

Произвести расчет силовой части и осуществить выбор комплектующих для двух типов платформ - с 4-мя и с 6-ю или 8-ю роторами.

Осуществить подбор комплектующих расширенной элементной базы.

Осуществить оценку стоимости комплектующих для полученных конфигураций. Обосновать полученные результаты.

Вариант 3

Спроектировать БПЛА для доставки 2кг полезной нагрузки в автономном режиме с продолжительностью полета не менее 10 минут.

Определить необходимое количество линий связи и произвести энергетический расчет.

Произвести расчет силовой части и осуществить выбор комплектующих для двух типов платформ - с 4-мя и с 6-ю или 8-ю роторами.

Осуществить подбор комплектующих расширенной элементной базы.

Осуществить оценку стоимости комплектующих для полученных конфигураций. Обосновать полученные результаты.

Вариант 4

Спроектировать БПЛА для доставки 5 кг полезной нагрузки в FPV режиме с продолжительностью полета не менее 10 минут.

Определить необходимое количество линий связи и произвести энергетический расчет.

Произвести расчет силовой части и осуществить выбор комплектующих для двух типов платформ - с 4-мя и с 6-ю или 8-ю роторами.

Осуществить подбор комплектующих расширенной элементной базы.

Осуществить оценку стоимости комплектующих для полученных конфигураций. Обосновать полученные результаты.

Вариант 5

Спроектировать БПЛА для доставки 2кг полезной нагрузки в автономном режиме с продолжительностью полета не менее 15 минут.

Определить необходимое количество линий связи и произвести энергетический расчет.

Произвести расчет силовой части и осуществить выбор комплектующих для двух типов платформ - с 4-мя и с 6-ю или 8-ю роторами.

Осуществить подбор комплектующих расширенной элементной базы.

Осуществить оценку стоимости комплектующих для полученных конфигураций. Обосновать полученные результаты.

Вариант 6

Спроектировать БПЛА мультироторного типа для переноса полезной нагрузки массой 10 кг на расстояние не менее 20 км в комбинированном режиме (ручном и автономном).

Определить необходимое количество линий связи и произвести энергетический расчет.

Произвести расчет силовой части и осуществить выбор комплектующих для двух типов платформ - с 4-мя и с 6-ю или 8-ю роторами.

Осуществить подбор комплектующих расширенной элементной базы.

Осуществить оценку стоимости комплектующих для полученных конфигураций. Обосновать полученные результаты.

Вариант 7

Спроектировать БПЛА мультироторного типа для переноса полезной нагрузки массой 25 кг на расстояние не менее 10 км. в комбинированном режиме (ручном и автономном).

Определить необходимое количество линий связи и произвести энергетический расчет.

Произвести расчет силовой части и осуществить выбор комплектующих для двух типов платформ - с 4-мя и с 6-ю или 8-ю роторами.

Осуществить подбор комплектующих расширенной элементной базы.

Осуществить оценку стоимости комплектующих для полученных конфигураций. Обосновать полученные результаты.

Вариант 8

Спроектировать БПЛА мультироторного типа для переноса полезной нагрузки массой 200г в FPV режиме с продолжительностью полета не менее 12 минут.

Определить необходимое количество линий связи и произвести энергетический расчет.

Произвести расчет силовой части и осуществить выбор комплектующих для двух типов платформ - с 4-мя и с 6-ю или 8-ю роторами.

Осуществить подбор комплектующих расширенной элементной базы.

Осуществить оценку стоимости комплектующих для полученных конфигураций. Обосновать полученные результаты.

Вариант 9

Спроектировать БПЛА мультироторного типа для переноса полезной нагрузки массой 100г в FPV режиме с продолжительностью полета не менее 10 минут с минимальной взлетной массой аппарата

Определить необходимое количество линий связи и произвести энергетический расчет.

Осуществить подбор комплектующих расширенной элементной базы.

Осуществить оценку стоимости комплектующих для полученных конфигураций. Обосновать полученные результаты.

Вариант 10

Спроектировать БПЛА мультироторного типа для переноса полезной нагрузки массой 1500г в автономном режиме с получением оператором телеметрии и продолжительностью полета не менее 7 минут.

Определить необходимое количество линий связи и произвести энергетический расчет.

Произвести расчет силовой части и осуществить выбор комплектующих для двух типов платформ - с 4-мя и с 6-ю или 8-ю роторами.

Осуществить подбор комплектующих расширенной элементной базы.

Осуществить оценку стоимости комплектующих для полученных конфигураций. Обосновать полученные результаты.

Вариант 11

Спроектировать БПЛА мультироторного типа для переноса полезной нагрузки массой 200г в FPV режиме и продолжительностью полета не менее 5 минут. Масса снаряженного аппарата не должна превышать 1100г.

Определить необходимое количество линий связи и произвести энергетический расчет.

Произвести расчет силовой части и осуществить выбор комплектующих для платформы с 4-мя роторами.

Осуществить подбор комплектующих расширенной элементной базы.

Осуществить оценку стоимости комплектующих для полученных конфигураций. Обосновать полученные результаты.

6 Контрольные вопросы

1. Перечислите недостатки БПЛА мультироторного типа относительно самолетного БПЛА?
2. Какие функции выполняет полетный контроллер?
3. Перечислите минимально необходимое оборудования для полета БПЛА.
4. Для чего в приемных радиоустройствах применяют две антенны?
5. Каким образом БПЛА определяет своё текущее местоположение?
6. Что такое линейный актуатор?
7. В чем преимущество бесколлекторных двигателей?
8. Что такое FPV и когда применяется?
9. Какие параметры передатчика влияют на дальность действия линии связи?
10. Какие параметры приемника влияют на дальность действия линии связи?
11. От чего зависит дальность прямой радиовидимости?
12. Что такое дифракция радиоволн и как она влияет на дальность прямой радиовидимости?

Список рекомендуемой литературы

1. Лебедев В.Ю. Захаров Ф.Н. Ключевые работы НИИ РТС за последние десять лет // Шарыгинские чтения. Третья международная научная конференция ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации, 29 сентября – 1 октября 2021 г., г. Томск: докл. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2021. – С. 14–30.

2. Верба В.С. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Кн. 1. Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА. Монография. М.: Радиотехника, 2016. 512 с.

3. Титков, О. С. Современное состояние и перспективы развития беспилотных авиационных систем XXI века : аналитический обзор по материалам зарубежных информационных источников / О. С. Титков ; Научно-информационный центр Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем. – Москва : Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, 2012. – 196 с. – EDN VPHERF.

4. Лоськов В.И. Перспективы развития малых и средних БЛА с вертикальным взлетом и посадкой. / Доклады и статьи ежегодной научно-практической конференции «Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами», г. Коломна, 2016. – 274 с.

5. IFLIGHT: [Электронный ресурс]. URL: <https://shop.iflight-rc.com> (Дата обращения 08.07.2022).

6. Методы предварительного проектирования беспилотных вертолетов – Казань: Редакционно-издательский центр «Школа», 2022. – 211 с.

Заключение

Не смотря на возникшие сложности с приобретением комплектующих, создание мультироторных БПЛА на сегодняшний день по-прежнему возможно с использованием компонентой базы азиатского производства. В методических указаниях приведен список оборудования доступный для приобретения на азиатском рынке. В зависимости от предъявляемых требований к мультироторному БПЛА возможно получить различные конфигурации. Например, в данных указаниях приведен выбор и расчет БПЛА со взлетной массой в 15 кг и продолжительностью полета 20 минут.