

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
(РОСАВИАЦИЯ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)

Кафедра технической эксплуатации
радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта

С.С. Коротков, О.В. Васильев,
А.Т. Кудинов, Н.В. Гевак

**РАДИОЭЛЕКТРОННОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ,
РАДИОЛИНИИ УПРАВЛЕНИЯ
И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ
БЕСПИЛОТНЫХ
АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Учебное пособие

*Утверждено редакционно-
издательским советом МГТУ ГА
в качестве учебного пособия*

Москва
ИД Академии Жуковского
2023

УДК 629.7.05:623.746.-519

ББК 0571

К66

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Московского государственного технического университета ГА

Рецензенты:

Стукалов С.Б. (МГТУ ГА) – канд. техн. наук, доцент;

Полосин С.А. (ФАУ «ГосНИИАС») – канд. техн. наук, доцент

Коротков С.С.

К66 Радиозлектронное оборудование, радиолинии управления и передачи данных беспилотных авиационных систем [Текст] : учебное пособие / С.С. Коротков, О.В. Васильев, А.Т. Кудинов, Н.В. Гевак. – М. : ИД Академии Жуковского, 2023. – 80 с.

ISBN 978-5-907699-63-2

Данное учебное пособие издается в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Радиозлектронное оборудование, радиолинии управления и передачи данных БАС» по учебному плану специальности 25.03.03 «Аэронавигация» по направленности (профилю) «Эксплуатация беспилотных авиационных систем» для всех форм обучения.

В учебном пособии «Радиозлектронное оборудование, радиолинии управления и передачи данных БАС» рассматривается назначение, состав, основные принципы действия радиозлектронного оборудования беспилотных авиационных систем. Отдельным вопросом рассматриваются радиолинии управления и передачи данных таких систем. Материал учебного пособия полностью обеспечивает теоретическую часть дисциплины «Радиозлектронное оборудование, радиолинии управления и передачи данных БАС».

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 16.03.2023 г. и методического совета 12.04.2023 г.

УДК 629.7.05:623.746.-519
ББК 0571

Св. тем. план 2023 г.

поз. 20

КОРОТКОВ Сергей Сергеевич, ВАСИЛЬЕВ Олег Валерьевич,
КУДИНОВ Александр Тимофеевич, ГЕВАК Николай Владимирович
РАДИОЭЛЕКТРОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, РАДИОЛИНИИ УПРАВЛЕНИЯ
И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Учебное пособие

В авторской редакции

Подписано в печать 18.10.2023 г.

Формат 60x84/16 Печ. л. 5 Усл. печ. л. 4,65

Заказ № 977/0621-УП07 Тираж 30 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

Издательский дом Академии имени Н. Е. Жуковского

125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., д. 6А

Тел.: (495) 973-45-68 E-mail: zakaz@itsbook.ru

ISBN 978-5-907699-63-2

© Московский государственный технический
университет гражданской авиации, 2023

Содержание

Содержание	3
Список принятых сокращений	4
Раздел 1. Радиоэлектронное оборудование БАС	5
1 Общие сведения о радиоэлектронном оборудовании БАС	5
2 Методы радионавигационных измерений	13
3 Принципы построения бортовых радиолокационных датчиков БАС	22
4 Методы интеграции данных от различных источников информации в составе многодатчиковых комплексов БАС	35
Раздел 2. Радиолинии управления и передачи данных БАС	45
5 Системы радиоуправления	45
6 Радиотехнические системы передачи информации	67
Список использованных источников	80

Список принятых сокращений

АР	– антенная решетка
АФУ	– антенно-фидерное устройство
БАС	– беспилотная авиационная система
БВС	– беспилотное воздушное судно
ВС	– воздушное судно
ГКРЧ	– Государственная комиссия по радиочастотам
ДИСС	– доплеровский измеритель путевой скорости и угла сноса
ДН (ДНА)	– диаграмма направленности (диаграмма направленности антенны)
ИРИ	– источник радиоизлучения
КНД	– коэффициент направленного действия
КП	– командный пункт
КРЛ	– командная радиолиния
КРТУ	– командное радиотелеуправление
ЛА	– летательный аппарат
НКУ	– наземный комплекс управления
ОСШ	– отношение сигнал/шум
ОЭС	– оптико-электронная система
РЛИ	– радиолокационное изображение
РЛС	– радиолокационная станция
РСН	– равносигнальное направление
РТС	– радиотехническая система
РЭО	– радиоэлектронное оборудование
САС	– системе автоматического спасения
СВЧ	– сверхвысокие частоты
СНС	– спутниковая навигационная система
СРМ	– система радиомониторинга
ТМИ	– телеметрическая информация
ТТХ	– тактико-технические характеристики
УКВ	– ультракороткие волны
ФЦА	– фазовый центр антенны

Раздел 1. Радиоэлектронное оборудование БАС

1 Общие сведения о радиоэлектронном оборудовании БАС

1.1 Общие сведения

Управление движением современных беспилотных летательных аппаратов осуществляется с помощью пилотажно-навигационных комплексов (ПНК). Основу информационного обеспечения ПНК составляет набор бортовых радиотехнических систем различного назначения, которые решают следующие основные задачи:

1. Определение с высокой точностью текущих навигационных параметров полёта БАС, к которым относятся: пространственное местоположение БАС, высота полёта, курс, скорость, время полёта и др.;
2. Осуществление управления полёта;
3. Своевременное обнаружение различных препятствий и опасных зон на пути полёта: возвышенностей, высотных сооружений, других ЛА, метеообразований, предупреждение об опасном сближении с подстилающей поверхностью и т.п.;
4. Обеспечение автоматической передачи в контрольные диспетчерские службы телеметрической информации о состоянии БВС. В эту информацию, как правило, входят бортовой номер БВС, координаты его местоположения, высота полёта, сведения об аварийной ситуации на борту БВС;
5. Обеспечение взлёта и посадки БВС.

Разнообразие решаемых задач приводит к достаточно большому разнообразию видов и количеству РТС, размещаемых на БВС, а также радиоаппаратуры взаимодействия, находящейся вне летательных аппаратов, на диспетчерских пунктах, радиомаяках, искусственных спутниках Земли и др.

1.2 Классификация РЭО БАС

Основным критерием, по которому осуществляют классификацию РЭО БАС, является **назначение системы**. По этому признаку различают:

- Системы передачи информации. К таким системам относят системы радиосвязи, радиовещания, телеметрии.
- Системы извлечения информации. Это системы радиолокации, радионавигации, радиоразведки.
- Системы радиоуправления, осуществляющие управление различными БАС (самолётного или вертолётного типа).

Приведённая классификация в некоторой степени имеет условный характер, так как не имеет жёстких границ между отдельными признаками. Например, во многие системы радиоуправления входят системы радиолокации, радионавигации, системы телеметрии и передачи команд управления.

Совмещение функций различных объектов РЭО БАС особенно характерно применительно к задачам управления беспилотными летательными аппаратами.

По виду излучаемых сигналов разделяют системы с импульсным излучением, системы с непрерывным излучением и системы с цифровыми сигналами. В импульсных системах сигнал представляет собой последовательность радиоимпульсов, в которой информацию могут нести параметры отдельных импульсов (в изменениях амплитуды, частоты, фазы, длительности), а также вся последовательность импульсного излучения (в изменениях числа импульсов, интервалов между ними). В системах с непрерывным излучением информация закладывается в изменения амплитуды, частоты или фазы непрерывных сигналов. В цифровых системах передаваемая информация содержится в определённых кодовых последовательностях используемых сигналов.

По размещению первичного источника излучения радиоволн различают *активные, полуактивные, активные с активным ответом и пассивные* РТС.

Иногда в качестве классификационного признака используют **вид модуляции несущих колебаний**. Это отражается в названиях аппаратуры, например, частотный высотомер, фазовый дальномер, амплитудно-фазовый пеленгатор и т.д.

1.3 Обобщённая структурная схема РТС БАС

Основными устройствами большинства РТС являются передатчик и приёмник. Задача выделения полезной информации, которую доставляет радиосигнал, усложняется наличием на входе приёмника радиосистемы естественных или искусственно создаваемых помех. По своему происхождению помехи могут быть в виде атмосферного или космического шума, собственных (внутренних) шумов приёмника, помеховых воздействий от других работающих систем, в виде отражений от местных предметов и т.д. Такие помехи накладываются на полезный сигнал и поэтому их называют аддитивными (от addition - добавление, сложение). Другой вид помех обусловлен тем, что параметры полезного сигнала могут флуктуировать из-за неоднородности среды, в которой распространяются радиосигналы, из-за случайных изменений параметров преобразующих устройств аппаратурной части системы и т.д. Такие помехи называют мультипликативными (от multiplication - умножение). Помехи маскируют полезный сигнал, вызывают его искажения, могут привести к его пропуску при приёме или к образованию ложного сигнала. Эти обстоятельства необходимо учитывать при разработке и эксплуатации РТС. Взаимодействие основных устройств радиотехнической системы, среды распространения электромагнитной энергии и источников помеховых воздействий можно представить в виде обобщённой структурной схемы, приведенной на рисунке 1.1.

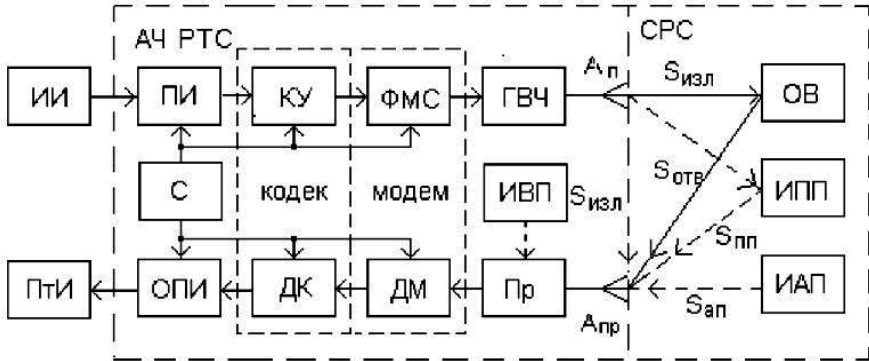


Рисунок 1.1 – Обобщенная структурная схема РТС БАС

Передающий канал аппаратурной части системы АЧ РТС включает в себя преобразователь информации ПИ, поступающей от источника информации ИИ, кодирующее устройство КУ (кодер), формирователь модулирующих сигналов ФМС (модулятор), генератор высокой частоты ГВЧ и передающую антенну $A_{п}$, которая излучает радиосигналы $S_{изл}$. Приёмный канал состоит из приёмной антенны $A_{пр}$, принимающей ответные (или отражённые) сигналы $S_{отв}$, супергетеродинного приёмника Пр, в котором происходит преобразование частоты и основное усиление принятых сигналов, демодулятора ДМ, декодера ДК и обратного преобразователя информации ОПИ. Тип и построение ОПИ зависит от вида входного сигнала, а также от вида потребителя информации ПТИ. Если потребителем информации является оператор (диспетчер и т.п.), то в качестве ОПИ применяют акустические или оптические преобразователи с различными видами индикации. При использовании полученной информации вычислительным комплексом ОПИ представляет собой преобразователь выходных сигналов приёмника в вид, удобный для использования в ЭВМ. Временную координацию работы отдельных устройств системы осуществляет синхронизатор С. Часто в системах, в которых передатчик и приёмник находятся в одном месте, кодер и декодер, а также модулятор и демодулятор объединяют в устройства, называемые кодеком и модемом.

Объектами взаимодействия ОВ могут быть активные ответчики, радиомаяки, ретрансляторы, другие абоненты, объекты, отражающие радиосигналы и т.п.

Помеховые воздействия, которым сигналы, несущие информацию, подвергаются в аппаратурной части системы, учтены обобщённым структурным элементом ИВП - источником внутренних помех. Искажения информации, обусловленные средой распространения сигналов СРС, показаны в схеме элементами ИАП - источник активных помех $S_{ап}$ и ИПП - источник пассивных помех $S_{пп}$. Кроме того, на вход приёмного канала могут также проникать сигналы собственного передатчика $S_{изл}$.

В системах радиосвязи передатчик одного абонента и приёмник другого образуют канал связи. При двухсторонней связи передатчик второго абонента и приёмник первого образуют второй канал связи. В этом случае один из каналов связи условно называют прямым каналом, а второй - обратным.

Некоторые системы могут содержать другие принципиально необходимые устройства, помимо приведённых в схеме, и наоборот, часть рассмотренных элементов может отсутствовать. Например, в системах с импульсным излучением и важным элементом является антенный переключатель, с помощью которого осуществляется временная развязка между работой передающего и приёмного каналов. Кроме того, переключатель позволяет использовать одну антенну и в режиме излучения и в режиме приёма радиосигналов. Это значительно сокращает масса-габаритные характеристики аппаратуры и упрощает размещение её на объектах. Другим примером могут служить радионавигационные пеленгаторы, которые работают по сигналам радиомаяков и у них отсутствует передающий канал, а во многих системах радиолокации отсутствуют кодирующие и декодирующие устройства.

1.4 Эксплуатационные характеристики РЭО БАС

Любую РТС можно охарактеризовать большим числом эксплуатационных параметров. Количество и вид этих параметров в основном зависит от назначения системы и её практического использования. Среди этих параметров можно выделить ряд основных характеристик, которые могут быть отнесены к большинству радиотехнических систем. Рассмотрим эти характеристики.

Рабочая зона действия системы

Рабочая зона ограничивается максимальной $R_{\text{макс}}$ и минимальной $R_{\text{мин}}$ дальностью действия системы, а также секторами её работы в горизонтальной (азимутальной) Φ_{α} и вертикальной (угломестной) Φ_{β} плоскостях (рисунок 1.2).

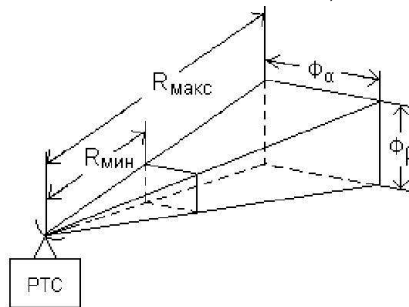


Рисунок.1.2 – Рабочая зона действия РТС

Максимальная дальность действия определяется возможностью приёма радиосигналов и выделения полезной информации с заданной достоверностью на фоне помех. Минимальная дальность действия определяется так называемой «мёртвой зоной», которая может быть образована излучением собственного РТС

передатчика активной РТС (приёмник не принимает сигналы во время работы передатчика), помехами из-за отражений сигналов от местных предметов и т.д.

Угловые сектора работы РТС определяются диаграммами направленности антенных устройств, а также возможным перемещением этих диаграмм в пространстве (сканирование пространства в режиме обзора, перемещение диаграммы в режиме сопровождения по направлению и т.д.)

Точность принимаемой информации

Точность характеризуется величиной ошибки, возникающей при приёме сигналов и измерении информационных параметров этих сигналов. По характеру проявления ошибки разделяют на систематические и случайные.

Систематическими называют ошибки, которые при многократных измерениях остаются постоянными или закономерно изменяются под воздействием возмущающих факторов (например, изменения температуры, влажности, параметров источников питания и др.). В большинстве случаев систематические ошибки могут быть скомпенсированы введением каких-либо коэффициентов в результаты измерений или проведением периодических калибровок измерительных устройств.

Случайными называются неопределённые по значению и знаку ошибки, в проявлении которых не наблюдается какой-либо закономерности. Такие ошибки являются следствием воздействия на сигнал различных случайных помех или случайных изменений состояния измерительных устройств (например, воздействие вибраций, пульсаций питающего напряжения и др.). Для определения таких ошибок и корректировки полученных результатов используют статистические методы анализа принятых сигналов.

Разрешающая способность

Под разрешающей способностью РТС понимают возможность раздельного наблюдения близко расположенных одна к другой точечных целей и измерение параметров каждой из них или возможность раздельного приёма двух информационных сообщений. В радионавигации и радиолокации различают разрешающую способность по дальности, по направлению (по угловым координатам) и по скорости.

Пропускная способность

Пропускную способность системы характеризуют максимальным количеством информации, которое может быть передано или извлечено системой за единицу времени.

Быстродействие

Быстродействие системы определяется её способностью отслеживать быстрые изменения входной величины, характеризует инерционность системы. Количественной характеристикой быстродействия является выходная реакция системы $S_{\text{вых}}(t)$ (рисунок 1.3, б) на единичный скачек какого-либо параметра входного сигнала $S_{\text{вх}}(t)$ (рисунок 1.3, а).

Определяется быстродействие временем установления $t_y = \frac{1}{2\Delta f}$,

где Δf - полоса пропускания системы.

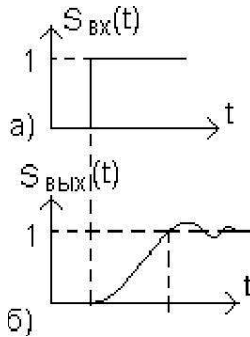


Рисунок.1.3 – Определение быстродействия РТС

Помехоустойчивость

Помехоустойчивостью называется способность системы сохранять свои основные параметры в заданных пределах при воздействии помех. Количественно помехоустойчивость системы оценивают соотношением

$$\mu = \frac{U_c / U_{п \text{ ВЫХ}}}{U_c / U_{п \text{ ВХ}}} \quad (1.1)$$

где $U_c / U_{п \text{ ВЫХ}}$ и $U_c / U_{п \text{ ВХ}}$ - отношения сигнал/помеха соответственно на выходе и входе системы.

Скрытность работы

Под скрытностью работы понимают качественный показатель, характеризующий трудность обнаружения работы системы и определения её основных параметров. Скрытность обеспечивается применением остронаправленного излучения, ограничением времени работы системы, максимально возможным сужением полосы излучаемых частот, детерминированным изменением каких-либо параметров сигнала, и другими мерами.

К понятию скрытности относится также ограничение утечки информации о параметрах вновь разрабатываемых систем, другими словами засекречивание процесса разработки, производства и испытаний новых видов систем. Это даёт

возможность при необходимости использовать эффект внезапности применения таких средств и реализовать техническое превосходство над эвентуальным противником.

Эксплуатационная надёжность

Эксплуатационной надёжностью называется свойство системы выполнять возложенные на неё функции в реальных условиях эксплуатации. Обычно надёжность характеризуют вероятностью безотказной работы системы в течение заданного времени или средним значением времени работы между двумя последующими отказами.

Экономическая эффективность

Эту характеристику оценивают стоимостью затрат на разработку, производство и эксплуатацию радиосистем, причём затраты на эксплуатацию сложных радиосистем и комплексов значительно превышают затраты на их проектирование и производство. Особенно остро вопросы экономичности встают при эксплуатации систем, размещаемых на подвижных объектах. В этом случае необходимо учитывать также стоимость транспортировки каждого килограмма веса аппаратуры и обслуживающего персонала.

Эргономичность

Эта характеристика отражает степень приспособленности аппаратурной части системы к потребностям эксплуатирующего персонала или другими словами - определяет степень удобства эксплуатации системы.

1.5 Технические характеристики РЭО БАС

Совокупность технических характеристик обеспечивает установленные эксплуатационно - тактические требования, предъявляемые к системе. Рассмотрим кратко основные технические характеристики РТС.

Частота (диапазон частот) несущих колебаний

Частота несущих колебаний имеет исключительно большое значение для свойств и возможностей РТС. От частоты радиосигналов зависят особенности их распространения, отражения и рассеяния. Для излучения и приёма радиосигналов приходится использовать различные типы антенн, различные виды активных и пассивных элементов высокочастотных трактов передающих и приёмных каналов РТС, электрические и конструктивные параметры которых в значительной степени определяются частотой колебаний.

Часто в технических характеристиках радиосистем вместо несущей частоты f указывают длину волны λ (диапазон длин волн) несущих колебаний. Напомним, что длиной волны называют расстояние, которое проходит радиосигнал в среде распространения со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с за время, равное одному периоду колебания $T = 1/f$

$$\lambda = cT = c/f . \quad (1.2)$$

Мощность излучаемых колебаний

От выходной мощности во многом зависит обеспечение необходимой дальности действия РТС. В зависимости от назначения и режимов работы современные РТС используют передатчики с выходной мощностью от долей милливатта до десятков мегаватт.

Чувствительность приёмных устройств

Чувствительность характеризует способность радиоприёмника принимать слабые радиосигналы. Количественно она определяется минимальной мощностью сигнала на входе приёмника, при которой сигнал на его выходе обеспечивает нормальную работу выходного устройства при заданных показателях качества (например, необходимый уровень разборчивости речи в системах связи, обнаружение целей с заданной вероятностью по отметкам на индикаторе РЛС и т.д.). Ограничение чувствительности происходит из-за наличия шумов на входе приёмника. Во многих случаях чувствительность определяют по уровню двойного превышения мощности полезного сигнала над мощностью шумов. В некоторых РТС чувствительность достигает очень малых значений 10-22 Вт [1], т.е. на 22 порядка меньше одного ватта.

Вид излучения и параметры модуляции излучаемых сигналов

Вид излучаемых сигналов определяет структурное построение многих узлов и каналов РТС. При импульсном излучении в технических характеристиках указывают длительность импульсов и частоту или период их следования.

В качестве основных видов модуляции излучаемых сигналов используют амплитудную АМ, частотную ЧМ и фазовую ФМ модуляции. Часто применяют комбинированные виды модуляции: амплитудно-импульсную АИМ, широтно-импульсную ШИМ, время-импульсную ВИМ и др. Параметры модуляции определяют исходя из требуемых тактических характеристик.

Характеристики антенных устройств

К основным характеристикам антенных устройств относят форму и ширину диаграммы направленности в главных сечениях азимутальной и угломестной плоскостей, коэффициент усиления антенны, уровень боковых лепестков, вид и параметры перемещения (сканирования) диаграммы направленности в пространстве.

Во многих РТС характеристики антенных устройств определяют основные параметры системы в целом, такие, как точность определения угловых координат объектов, разрешающую способность по угловым координатам, пространственную избирательность и др.

Параметры первичных источников питания

Основными источниками первичного питания бортового радиоэлектронного оборудования являются источники переменного тока 200 В 400 Гц и 115 В 400 Гц, а также источник постоянного тока ± 27 В.

Масса-габаритные характеристики аппаратуры

Масса-габаритные характеристики определяют линейные размеры аппаратуры, её массу и занимаемый объём при размещении на объектах. Они

часто являются одними из основных, определяющих характеристик аппаратуры, устанавливаемой на БАС.

2 Методы радионавигационных измерений

2.1 Методы измерения расстояний

В основе радиотехнических методов измерения расстояний лежат свойства радиоволн распространяться в однородной среде прямолинейно и с постоянной скоростью. Во многих методах используется способность радиоволн отражаться от физических объектов и неоднородностей среды, встречающихся на пути их распространения.

Измерение расстояния производится из одной точки пространства и в принципе может быть осуществлено *беззапросным* или *запросным методами*.

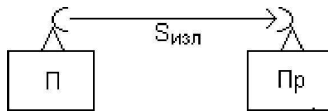


Рисунок.1.4 – Беззапросный метод измерения расстояний

Беззапросный метод основан на том, что время распространения радиоволн от источника излучения - передатчика П до точки расположения приёмника Пр (рисунок 1.4) пропорционально пройденному пути и расстояние определяют, используя известное соотношение

$$R = ct_R \quad (2.1)$$

где R - измеряемое расстояние; c - скорость распространения радиоволн, равная скорости света; t_R - время прохождения радиоволн от источника излучения до приёмника - измерителя. Источниками излучения в таком методе являются радиомаяки, координаты которых известны.

Таким образом, для определения расстояния до радиомаяка необходимо измерить каким-либо способом время t_R . Чтобы измерить это время, в пункте приёма необходимо точно знать момент излучения сигнала радиомаяком, то есть иметь опорный сигнал, согласованный по времени с излучаемым. Для этого в состав аппаратуры радиомаяка и аппаратуры потребителя должны входить высокостабильные часы (эталонные времени), обеспечивающие формирование местных шкал времени, согласованных между собой и привязанных с высокой точностью к шкале единого системного времени, хранителем которого является эталонный генератор (стандарт частоты) общегосударственной службы времени.

Одним из главных достоинств беззапросного метода является отсутствие передатчика в аппаратуре потребителя, что приводит к значительному снижению массогабаритных характеристик аппаратуры и к отсутствию демаскирующего излучения. Кроме того, такой метод позволяет обеспечивать неограниченную пропускную способность дальномерных систем и более низкий уровень взаимных помех.

Основным элементом всяких часов является генератор, стабильность которого определяет точность их хода. Так как стабильность частоты реально используемых генераторов ограничена, то при измерении дальности беззапросным методом, может возникнуть расхождение шкал местного времени, то есть расхождение эталонов времени радиомаяка и аппаратуры потребителя. Это приводит к тому, что измеренное по шкале местного времени потребителя значение запаздывания сигналов радиомаяка может отличаться от истинного запаздывания на величину сдвига шкал Δt . В результате этого измеренная дальность до радиомаяка $R_{\text{изм}}$ также будет отличаться от истинной дальности $R_{\text{ист}}$ на неопределённую величину $\Delta R = c\Delta t$. Измеренную дальность в этом случае называют псевдодальностью. Псевдодальность тем больше отличается от действительной дальности, чем меньше стабильность эталонов времени.

Ввиду этого реализация беззапросного метода измерения расстояний связана с большими техническими трудностями, которые заключаются в значительном усложнении аппаратуры различных потребителей, увеличение её массогабаритных характеристик и стоимости. Кроме того, эксплуатация такой аппаратуры требует построения специальной контрольно-измерительной системы для периодической коррекции эталонов. Эти трудности приводят к тому, что в настоящее время большинство бортовых дальномеров используют **запросные методы измерения расстояний**. Запросный сигнал в этом методе является опорным для отсчёта времени запаздывания принимаемого ответного сигнала.

По способам формирования ответного сигнала запросные методы разделяются на методы с пассивным ответом, т.е. с отражёнными сигналами, и методы с активным ответом, т.е. с ретранслированными сигналами. В первом случае радиодальномер работает в автономном режиме, излучая сигналы в направлении объектов, расстояния до которых измеряются, и принимая отражённые от них сигналы (рисунок 1.5).

В радиолокации и радионавигации такие объекты часто называют целями Ц. Во втором случае используется неавтономный режим работы и измерительная дальномерная система состоит из запросчика ЗП и ответчика ОТ (ретранслятора сигналов), расположенного на объекте, до которого измеряется расстояние (рисунок 1.6). В обоих случаях радиосигнал проходит измеряемое

расстояние дважды и поэтому время запаздывания принятого сигнала будет равно $t_R = \frac{2R}{c}$, а искомое расстояние $R = \frac{ct_R}{2}$.

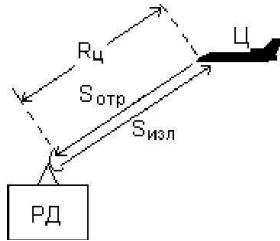


Рисунок 1.5 – Запросный метод измерения расстояний с пассивным ответом (с отражёнными сигналами)

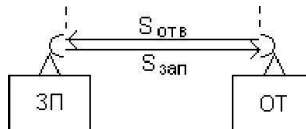


Рисунок 1.6 – Запросный метод измерения расстояний с активным ответом (с ретранслированными сигналами)

В зависимости от того, какой из параметров принимаемых сигналов играет основную роль при измерении времени распространения радиоволн, методы измерения расстояний подразделяют на амплитудные, частотные, и фазовые.

2.2 Методы измерения расстояний

Для измерения угловых координат объектов с помощью радиотехнических средств используют методы радиопеленгования, под которыми понимают процесс определения направления на источник радиоизлучения. Объект, координаты которого определяются, может сам излучать радиосигналы, то есть быть первичным излучателем, или отражать сигналы внешнего облучения, то есть быть вторичным излучателем. Определение направления на источник излучения основано на прямолинейности распространения радиоволн в однородной среде.

Известно, что точки пространства, имеющие одинаковую фазу электрического поля радиоволны, образуют поверхность, называемую фронтом волны. В общем виде любой радиопеленгатор строит нормаль к фазовому фронту волны, приходящей от источника излучения. Фронт волны точечного источника имеет сферическую форму.

Нормаль к сферической поверхности, как известно, совпадает с направлением на центр сферы, местом расположения источника излучения. Сравнение полученного таким образом направления с некоторым исходным (базовым) направлением, принятым за начало отсчёта, позволяет определить угловые координаты излучающего объекта. Так например, при навигационных измерениях в околоземном пространстве за исходное направление в горизонтальной (азимутальной) плоскости чаще всего принимают направление на Северный полюс Земли, а в вертикальной (угломестной) плоскости - направление на линию горизонта.

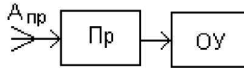


Рисунок 2.7 – Запросный метод измерения расстояний с активным ответом

Главными элементами радиопеленгатора являются (рисунок 1.7) приемная антенна $A_{пр}$ и приемник Пр, в которых осуществляется основное усиление и необходимые преобразования принятых сигналов, а также оконечное устройство ОУ, позволяющее произвести отсчет координаты или преобразовать полученную информацию о направлении на объект в форму удобную для последующего использования.

К основным характеристикам пеленгационного устройства относят пеленгационную характеристику

$$U_{\text{вых}} = f(\varphi), \quad (2.2)$$

представляющую собой зависимость выходного напряжения пеленгатора от направления прихода радиоволн φ , и пеленгационную чувствительность $S_{\text{пел}}$, равную крутизне пеленгационной характеристики устройства в направлении на источник излучения, то есть при $\varphi = \varphi_n$:

$$S = \left. \frac{dU(\varphi)}{d\varphi} \right|_{\varphi=\varphi_n} \quad (2.3)$$

Из выражения видно, что чувствительность пеленгатора определяется как производная функция пеленгационной характеристики.

В зависимости от того, какой из параметров принятого сигнала является носителем информации об угловом положении объектов методы измерения угловых координат разделяют на амплитудные, частотные, фазовые, амплитудно-фазовые и временные.

2.3 Методы измерения скорости движения объектов

Одним из важнейших навигационных параметров является скорость движения объектов. Измеряя время, за которое объект проходит расстояние между двумя ориентирами с известными координатами, можно легко вычислить среднюю скорость движения объекта по известному соотношению

$$V_{cp} = \frac{R}{t_R}, \quad (2.4)$$

где R - расстояние между ориентирами; t_R - время движения.

Текущее значение скорости движения объектов можно определить дифференцированием текущей дальности или интегрированием ускорения движения объекта. Такие методы требуют предварительного измерения исходных координат: дальности или ускорения. Кроме того, операции дифференцирования или интегрирования ведут к потере точности измерений. В связи с этим в навигации летательных аппаратов широкое распространение получили методы непосредственного измерения скорости, основанные на использовании эффекта Доплера. Такие методы обеспечивают несравненно большую точность измерений.

Эффект Доплера заключается в том, что при взаимном перемещении излучателя колебаний и приёмника частота колебаний, воспринимаемая приёмником, будет отличаться от частоты излучённых колебаний тем больше, чем больше скорость их относительного перемещения.

Физический смысл этого эффекта можно пояснить следующим образом (рисунок 2.8). Если передатчик П, излучающий колебания с частотой f_0 , и приёмник Пр неподвижны и расстояние между ними R не изменяется, то приёмник за единицу времени воспримет то же число колебаний $S_{изл}$, которое послал излучатель. Частота принимаемых сигналов $f_{пр}$ в этом случае будет равна частоте сигналов излучения $f_{пр} = f_0$.

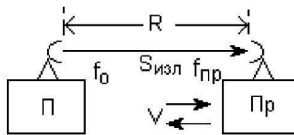


Рисунок 2.8 – К пояснению эффекта Доплера

Если приёмник перемещается со скоростью V в направлении передатчика, он как бы движется навстречу распространяющимся колебаниям, и потому примет за единицу времени избыточное число колебаний по сравнению с неподвижным вариантом. Частота принимаемых сигналов будет более высокая, чем излучаемых и будет равна

$$f_{\text{пр}} = f_0 \left(1 + \frac{V}{c} \right) . \quad (2.5)$$

Если приёмник удаляется от излучателя, он как бы «отстывает» от набегающих на него волн колебаний, и не сможет принять за единицу времени некоторой части колебаний, которые успели бы его достигнуть, если бы он был неподвижен. В этом случае частота принимаемых колебаний будет уменьшаться по сравнению с частотой излучаемых сигналов

$$f_{\text{пр}} = f_0 \left(1 - \frac{V}{c} \right) . \quad (2.6)$$

Таким образом, частота принимаемых сигналов в зависимости от скорости взаимного перемещения передатчика и приёмника может изменяться в следующих пределах

$$f_{\text{пр}} = f_0 \left(1 \pm \frac{V}{c} \right) . \quad (2.7)$$

Разность частот излучаемого и принимаемого сигналов называют доплеровским приращением частоты или частотой Доплера

$$f_0 - f_{\text{пр}} = F_d = f_0 \frac{V}{c} . \quad (2.8)$$

2.4 Методы измерения путевой скорости летательных аппаратов

Одним из наиболее распространенных вариантов реализации запросной измерительной системы является бортовой доплеровский измеритель путевой скорости и угла сноса летательных аппаратов (ДИСС).

Путевой скоростью V называют горизонтальную составляющую скорости летательного аппарата ЛА (рисунок 2.9).

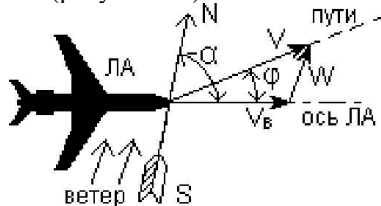


Рисунок 2.9 – К определению путевой скорости (навигационный треугольник)

Она определяется как векторная сумма воздушной скорости V_B , т.е. скорости движения ЛА относительно воздушной среды, и скорости ветра W , т.е. скорости движения воздушной среды относительно Земли. Все три вектора образуют так называемый навигационный треугольник.

Угол между векторами путевой скорости V и воздушной скорости V_B называется углом сноса φ . Величина угла сноса определяется силой и направлением ветра. Направление вектора воздушной скорости V_B определяется направлением силы тяги двигателей и практически совпадает с продольной осью ЛА. Это направление известно. Следовательно, чтобы определить угол сноса нужно определить направление вектора путевой скорости. Доплеровский измеритель позволяет непосредственно определить оба навигационных параметра: путевую скорость и угол сноса.

Важнейшей характеристикой ДИСС является автономность, т.е. работа в составе бортового измерительного комплекса без связи с наземными радионавигационными точками, без ограничения дальности действия. Они могут устанавливаться на летательные аппараты различных видов: самолёты, вертолёты, ракеты и др. Характерной особенностью таких измерителей является то, что необходимая навигационная информация формируется в них в результате обработки сигналов бортового передатчика, отражённых от подстилающей поверхности, над которой осуществляется полёт летательного аппарата, и принятых бортовым приёмником.

Путевая скорость и угол сноса могут быть измерены аппаратурой, которая имеет в своём составе передающее и приёмное устройства и антенную систему, создающую узконаправленный луч для облучения подстилающей поверхности при горизонтальном полёте летательного аппарата и для приёма отражённых сигналов. Для получения доплеровского приращения частоты отражённого сигнала, излучение передатчика должно быть направлено под острым углом к оси летательного аппарата в нижнюю полусферу, например, как показано на рисунке 2.10.

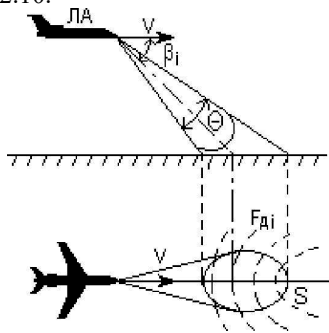


Рисунок 2.10 – Формирование спектра отражённого сигнала

Вследствие конечной ширины луча всегда облучается некоторый участок поверхности в виде площадки S .

Так как наличие доплеровского приращения характерно для всех участков площадки, а облучение каждого из них происходит под разными углами β_i , то отражённый сигнал содержит спектр доплеровских частот. Следовательно, на устройство обработки приёмника всегда поступает сигнал, сформированный в результате отражения от множества элементарных отражателей, который содержит в своём спектре многие составляющие доплеровских частот.

Очевидно, что элементарные отражатели, облучаемые под одинаковым углом β_i , при прочих равных условиях дадут одинаковые значения доплеровской частоты. Следовательно, линией положения отражателей, дающих одно и тоже значение доплеровской частоты, является линия пересечения горизонтальной поверхности с конусом, ось которого совпадает с направлением вектора путевой скорости. Такой линией является гипербола. Семейство линий положения, дающих одинаковые значения доплеровской частоты, называемых изочастотными линиями, является семейство гипербол.

Каждый элементарный отражатель, расположенный на изочастотной линии, при облучении даёт сигнал с одинаковой доплеровской частотой. Сигналы, принятые от всех отражателей расположенных на изочастотной линии, имеют случайные фазы и амплитуды. Поскольку на вход приёмного устройства поступают сигналы от отражателей, расположенных на множестве различных гипербол, суммарный отражённый сигнал формируется как результат наложения множества элементарных сигналов со случайными амплитудами U_i и случайными фазами φ_i

$$u(t) = U_i(t) \cos(\omega_0 + \Omega_i)t + \varphi_i, \quad (2.9)$$

т.е. сигналы суммируются по мощности, образуя результирующую среднюю мощность радиоволны, отражённой от площадки S .

Частоты сигналов, принятых от всех отражателей одной изочастотной линии, будут одинаковы и равны

$$f_i = f_0 + F_{oi} = f_0 + \frac{2V}{\lambda} \cos \beta_i. \quad (2.10)$$

Для всей облучаемой площадки спектр отражённого сигнала можно представить как сумму частотных составляющих, полученных от n изочастотных линий

$$\Delta f_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n (f_0 + F_{oi}) = \sum_{i=1}^n f_0 + \frac{2V}{\lambda} \cos \beta_i. \quad (2.11)$$

Следовательно, отражённый сигнал содержит спектр частот с множеством доплеровских сдвигов $F_{Д}$ относительно частоты излучаемого сигнала, расположенных вокруг некоторого среднего значения $F_{Д0}$.

Облучение участков поверхности и приём сигналов в доплеровских измерителях осуществляется, как правило, антеннами с достаточно узкими диаграммами направленности. Это обуславливает различный уровень принятых сигналов от разных точек отражающей поверхности. Если не учитывать малые различия энергии элементарных сигналов, связанные с различием расстояний до гиперболических полосок в пределах раствора диаграммы направленности антенны, а также различием коэффициентов обратного рассеяния отдельных участков отражающей площадки, то огибающая доплеровского спектра будет определяться формой диаграммы направленности антенны. В частности, симметричной диаграмме направленности соответствует симметричный спектр, огибающая которого показана на рисунке 2.11.

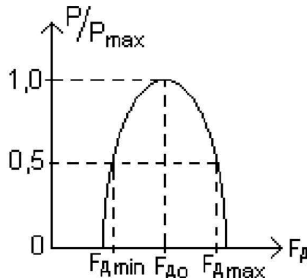


Рисунок 2.11 – Формирование спектра отражённого сигнала

Средняя частота спектра

$$F_{Д0} = \frac{2V}{\lambda} \cos \beta_0 \quad (2.12)$$

соответствует направлению максимума диаграммы направленности.

Ширину доплеровского спектра на уровне половинной мощности нетрудно определить, используя рисунки 2.10 и 2.11. Граничные частоты отражённых сигналов соответственно равны

$$F_{Д\text{ мин}} = \frac{2V}{\lambda} \cos \beta_0 + \frac{\Theta_\beta}{2} \quad \text{и} \quad F_{Д\text{ макс}} = \frac{2V}{\lambda} \cos \beta_0 - \frac{\Theta_\beta}{2} . \quad (2.13)$$

Ширина спектра равна их разности

$$\begin{aligned} \Delta F_D &= F_{D \text{ макс}} - F_{D \text{ мин}} = \frac{2V}{\lambda} \cos \beta_0 - \frac{\Theta_\beta}{2} - \cos \beta_0 + \frac{\Theta_\beta}{2} = \\ &= \frac{4V}{\lambda} \sin \beta_0 \sin \frac{\Theta_\beta}{2}, \end{aligned} \quad (2.14)$$

где Θ_β - ширина диаграммы направленности антенны по уровню 0,5 в угломестной плоскости. При достаточно узкой диаграмме направленности можно принять

$$\Delta F_D = \frac{2V}{\lambda} \sin \beta_0 \Theta_\beta. \quad (2.15)$$

Из (2.15) видно, что ширина доплеровского спектра пропорциональна путевой скорости летательного аппарата V , ширине диаграммы направленности антенны измерителя Θ_β и углу между направлениями полёта и максимума излучения β_0 .

Относительная ширина доплеровского спектра

$$\frac{\Delta F_D}{F_{D0}} = \Theta_\beta \operatorname{tg} \beta_0. \quad (2.16)$$

При типовых значениях $\beta_0 = 70^\circ$; $\Theta_\beta \approx 4 \text{ } 5^\circ$, $\Delta F_D / F_{D0} \text{ } 0,1 \text{ } 0,15..$

Таким образом, измерение путевой скорости сводится к измерению средней частоты сформированного на выходе бортового приёмника доплеровского спектра.

3 Принципы построения бортовых радиолокационных датчиков БАС

Радиолокационные датчики являются всепогодными средствами мониторинга, функционирование которых не зависит от времени суток. Установка их на борт БВС позволяет создавать мобильные системы мониторинга, действие которых не зависит от условий оптической видимости.

3.1 Принципы формирования изображений земной поверхности с помощью бортовых радиолокационных средств БВС

Формирование РЛИ земной поверхности при использовании радиолокационных средств БВС возможно при использовании апертуры как реальной (РА), так и синтезированной (СА) антенны [5]. При использовании реальной апертуры (режим «Реальный луч» (РЛ)) (формирование РЛИ осуществляется за счет двух взаимосвязанных процессов.

1. Сканирование по дальности участка земной поверхности в пределах главного луча (ГЛ) диаграммы направленности (ДН) реальной антенны за счет естественного распространения зондирующих колебаний РЛС вдоль линии пути (направления полета) носителя радиолокатора, в роли которого выступает БВС, в пределах от минимальной его дальности действия до максимальной.

2. Перемещение (сканирование) ГЛ реальной антенны в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Если область земной поверхности, представляющая интерес, целиком располагается в пределах ГЛ диаграммы направленности реальной антенны, то процесс формирования РЛИ осуществляется без сканирования ГЛ.

При формировании РЛИ с использованием синтезированной апертуры сканирование по дальности осуществляется аналогично режиму РЛ, а обзор по азимуту и формирование ГЛ искусственной (виртуальной) антенны ведутся за счет перемещения фазового центра РА по заданной траектории с известной скоростью при когерентной обработке принимаемых сигналов. В случае использования в качестве носителей бортовых РЛС (БРЛС) летательных аппаратов, в том числе и беспилотных, фазовый центр перемещается, как правило, по прямолинейной траектории с постоянной скоростью V_n соответствующей скорости носителя РЛС.

Детальность формируемого РЛИ земной поверхности, следовательно, и качество получаемого изображения наблюдаемой поверхности, целиком определяется параметрами разрешения РЛС по дальности δD и угловым координатам $\delta\varphi_{г,в}$ (здесь индекс «г» относится к горизонтальной (азимутальной) плоскости, а «в» - к вертикальной (угломестной) плоскости). Причем известно [6], что потенциальные возможности РЛС по разрешению по дальности целиком и полностью определяются шириной спектра Δf_c^i зондирующего сигнала, используемого в РЛС:

$$\delta D = \frac{C}{2\Delta f_c} \quad (3.1)$$

где C – скорость распространения радиоволн (РВ).

Потенциальные возможности РЛС по угловым координатам целиком определяются используемой апертурой.

При использовании режима РЛ разрешающая способность РЛС по угловым координатам зависит от ширины Θ_A ДН реальной антенны. В частности, при одинаковой ширине ДН антенны в вертикальной и горизонтальной плоскостях $\Theta_{Аг} = \Theta_{Ав} = \Theta_A$, имеем [6]

$$\delta\varphi_{г,в} = \frac{\lambda}{d_A} \quad (3.2)$$

где λ – длина волны зондирующих колебаний; d_A – протяженность апертуры РА.

В случае использования искусственной апертуры потенциальные возможности по угловому разрешению $\delta\varphi_{CA}$ РЛС с режимом синтезирования апертуры (РСА) при известной скорости носителя V_n и длине волны λ зависят от времени когерентной обработки T_c принимаемого сигнала (времени синтезирования апертуры искусственной антенны) и угла установки γ_A [5]

$$\delta\varphi_{CA} = \frac{\lambda}{2V_n T_c \sin \gamma_A} \quad (3.3)$$

В знаменателе выражения (3.3) произведение $2V_n T_c \sin \gamma_A$ представляет собой ничто иное, как размер апертуры искусственной антенны, видимый с направления γ_A , которое отсчитывается относительно линии пути носителя РЛС (при этом полагается, что положение вектора скорости носителя совпадает с его продольной осью). Если обозначить данное произведение как $L_{cy} = 2V_n T_c \sin \gamma_A$, в котором индекс « γ » указывает на то, что ГЛ ДН реальной антенны отклонен относительно вектора скорости носителя РЛС на угол γ , то выражение (6.3) можно представить в виде

$$\delta\varphi_{CA} = \frac{\lambda}{2L_{cy}} \quad (3.4)$$

Из сравнения (3.2) и (3.4) видно, что при использовании искусственной антенны в знаменателе выражения, определяющего угловую разрешающую способность, появляется множитель 2. Это связано с тем, что синтез искусственной апертуры происходит в результате совмещения двух процессов: 1) облучение наблюдаемой поверхности зондирующим сигналом; 2) когерентная обработка сигнала, отраженного от данной поверхности (траекторного сигнала), в процессе полета носителя РЛС. Другими словами, множитель учитывает, что радиоволна (РВ) первоначально распространяется к наблюдаемой поверхности, а затем от поверхности к РЛС.

Из (3.4) следует, что угловое разрешение в режиме синтезирования апертуры искусственной антенны, как и в режиме РЛ, при известной длине волны зондирующих колебаний зависит от протяженности апертуры. Поскольку на практике значение L_{cy} может составлять сотни метров, то величина $\delta\varphi_{CA}$ оказывается существенно меньше, чем величина $\delta\varphi_{Г,В}$ и, следовательно, в режиме синтезирования апертуры обеспечивается более высокое угловое разрешение, что дает возможность получения более детального РЛИ. Необходимо заметить, что за счет синтезирования апертуры

искусственной антенны можно обеспечить высокое разрешение как в азимутальной, так и угломестной плоскостях [7]. Однако в угломестной плоскости высокое разрешение за счет синтезирования будет обеспечиваться на сравнительно небольшом расстоянии до поверхности Земли. В этой связи разрешение в вертикальном направлении, а точнее по проекции углового сектора на поверхность Земли, обеспечивается за счет разрешающей способности РЛС по дальности.

При известной дальности D до земной поверхности, которая при радиолокационном наблюдении составляет несколько десятков, а то и сотни километров, линейное разрешение по азимуту в режиме синтезирования апертуры будет определяться в соответствии с выражением

$$\delta l_{\text{аз}} = \delta \varphi_{CA} D \quad (3.5)$$

Поскольку РЛИ обычно представляется в координатах «дальность - азимут» (линейная шкала азимута), то произведение $\delta D \delta l_{\text{аз}}$ определяет ничто иное, как элемент разложения РЛИ (пиксел изображения). Задавая равновеликие достаточно малые величины δD и $\delta l_{\text{аз}}$ можно обеспечить формирование радиолокационного изображения, которое по своей детальности не будет уступать оптическому изображению. Однако, в отличие от последнего, качество получаемого РЛИ не зависит от изменения условий оптической видимости, вызванных, например, дождем, снегом, туманом либо изменением времени суток.

Как видно из (3.3), для достижения потенциальных показателей РСА по угловому разрешению на борту БВС необходимо точно определять скорость движения носителя V_n и угол установки антенны γ_A ГЛ РА. Можно показать, что при движении БВС по прямолинейной траектории со скоростью V_n VH и угле установки $\gamma_A = 90^\circ$ линейное разрешение РЛС по азимуту не будет зависеть от значения дальности D до поверхности земли и определяться как

$$\delta l_{\text{аз}} = \frac{d_A}{2}. \quad (3.6)$$

где d_A - размер апертуры реальной антенны.

Следовательно, при движении БВС (фазового центра РА) по прямолинейной траектории в условиях точного знания скорости носителя и строго бокового обзора, потенциально можно достичь линейное разрешение по азимуту, равное половине апертуры РА. В частности, при диаметре реальной антенны, равном 70 см, и заявленных выше условиях синтезирования, можно получить линейное разрешение $\delta l_{\text{аз}}$ равного 35 см.

Известно [1, 6—8], что в процессе синтеза апертуры траекторный сигнал от наблюдаемого объекта приобретает линейную частотную модуляцию (ЛЧМ),

коэффициент модуляции которой при известной длине волны зависит от скорости полета носителя V_n , дальности D до объекта и его углового положения. При обработке траекторного сигнала параметры, определяющие характер частотной модуляции, должны быть либо точно известными и учитываться в процессе когерентного накопления принимаемого сигнала, либо должны отслеживаться их изменения с требуемой точностью. В этом случае при обработке траекторного сигнала в течение времени синтезирования удается скомпенсировать линейное изменение частоты данного сигнала и получить выходной отклик, свободный от частотной модуляции, т.е. обеспечить максимально возможное сжатие ЛЧМ-сигнала.

Обычно, когда в процессе синтеза апертуры при обработке траекторного сигнала в течение времени синтезирования T_c обеспечивается компенсация линейной частотной модуляции, то говорят, что реализуется *фокусированная синтезированная апертура* (ФСА).

В ряде случаев процесс синтеза искусственной апертуры можно обеспечить при некотором ограничении на время синтезирования T_c^* , которое обычно выбирается меньшим, чем величина T_c . Выбор данного времени ограничивается максимально допустимым изменением фазового сдвига траекторного сигнала, принимаемого на краях апертуры по отношению к сигналу, воспринимаемому в ее центре. Это фазовое различие не должно превышать значение, равное $\pi/2$. При таком фазовом сдвиге сигналы, отраженные от отдельного отражателя земной поверхности, в процессе синтеза апертуры будут еще складываться когерентно.

Пример. Пусть наземный объект - точечная цель, располагаемая под углом 90° относительно траектории движения (линии пути) БВС - носителя БРЛС и удаленная от нее на расстояние D_0 .

Траектория движения БВС является прямой линией, а сам носитель перемещается со скоростью V_n (рисунок 3.1).

Отрезок пути, соответствующий синтезированной апертуре, на котором обеспечивается полная компенсация квадратичного набег фазы (линейной частотной модуляции) траекторного сигнала, обозначен на рисунке как L_c . Здесь же показан другой участок меньшего размера L_c (эквивалентная апертура), на котором обеспечивается когерентная обработка траекторного сигнала, но при существующем ограничении в фазовом сдвиге сигналов, воспринимаемых в центре и на краях апертуры, равном $\pi/2$.

Тогда, опираясь на (6.4), получим угловое разрешение для апертуры (3.10), равное

$$\delta\varphi_{ca} = \sqrt{\frac{\lambda}{4D_0}}, \quad (3.11)$$

которому соответствует линейное разрешение по азимуту, определяемое выражением

$$\delta l_{az} = \frac{\sqrt{\lambda D_0}}{2}, \quad (3.12)$$

Процесс формирования синтезированной апертуры L_{cs} , при котором существует ограничение на величину фазового набега в пределах данной апертуры, называют нефокусированным, а режим работы БРЛС в этой ситуации *режимом нефокусированной синтезированной апертуры* (режим НФСА), который чаще именуют *режимом доплеровского обужения* или *обострения луча* (режим ДОЛ).

При реализации бортовой РЛС БАС режима «ФСА» в процессе обработки траекторного сигнала обеспечивается компенсация квадратичного набега фазы. При этом время синтезирования будет определяться временным интервалом, в течение которого обеспечивается сохранение процесса когерентного накопления траекторного сигнала.

При реализации бортовой РЛС БВС режима ДОЛ время синтезирования не может быть большим и ограничивается интервалом изменения доплеровского смещения частоты в пределах отдельно взятого доплеровского фильтра (ДФ).

Линейное разрешение по азимуту режиме ДОЛ, определяется выражением

$$\delta l_{az} = \sqrt{\lambda D_0}. \quad (3.13)$$

Разрешающая способность БРЛС в режиме РЛ также может быть определена, опираясь на выражение (3.5), в котором вместо $\delta\varphi_{ca}$ необходимо подставить $\delta\varphi_{pa}$, определяемое выражением (3.2). В результате получим, что линейная разрешающая способность БРЛС по азимуту в режиме РЛ определяется как

$$\delta l_{az} = \frac{\lambda D_0}{d_A}. \quad (3.14)$$

Сравнивая выражения (3.13) и (3.14), видим, что как в режиме ДОЛ, так и в режиме РЛ линейная разрешающая способность БРЛС по азимуту зависит от дальности до наблюдаемой поверхности. Но если в режиме РЛ эта зависимость прямо пропорциональная, то в режиме ДОЛ величина $\delta l_{аз}$ меняется пропорционально корню квадратному из дальности.

В качестве сравнения в таб. 3.1 приведены значения величин $\delta l_{аз}$, полученные согласно выражениям (3.13) и (3.14) для режимов ДОЛ и РЛ соответственно. При расчетах принималось $\lambda = 3$ см и $d_A = 70$ см.

Таблица 3.1 – Сравнение разрешающей способности РЛС в режимах РЛ и ДОЛ

Режим работы	Оцениваемый параметр	Дальность, км						
		16	25	36	49	64	81	100
РЛ	$\varphi_{рл}$, град	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
	$\delta l_{аз}$, м	686	1072	1543	2100	2743	3472	4286
ДОЛ	$\delta\varphi_{сЛ}$, град	0,25	0,2	0,17	0,14	0,12	0,11	0,10
	$\delta l_{аз}$, м	22	27,4	32,8	38,3	43,8	49,2	54,7
	$\theta_A/\theta_{доЛ}$	10	12,5	14,7	17,9	20,8	22,7	25

Из данных, представленных в табл. 3.1, видно, что при наблюдении поверхности Земли когерентная обработка траекторного сигнала от точечного отражателя только с учетом изменения доплеровского смещения частоты в пределах половины полосы пропускания фильтра доплеровской селекции, обеспечивает формирование апертуры искусственной антенны, ширина ДН $\theta_{доЛ}$ которой может быть меньше аналогичного показателя θ_A реальной антенны от 10 до 25 раз (последняя строка табл. 3.1). Уменьшение данного показателя искусственной антенны позволяет говорить об обострении (обужении) ее ДН по отношению к диаграмме реальной антенны. Из таблицы также видно, что ширина ДН искусственной антенны уменьшается при увеличении дальности наблюдения до поверхности Земли. Причем это уменьшение происходит обратно пропорционально увеличению корня квадратного из дальности.

Использование когерентной процедуры обработки сигналов, отраженных от наблюдаемой поверхности Земли, в процессе перемещения ФЦ реальной

антенны за счет поступательного движения носителя БРЛС БАС позволяет получать РЛИ наблюдаемой поверхности с требуемой детальностью.

Такое перемещение ФЦ имеет место в случае, когда БРЛС располагается на БВС самолетного типа. В то же время, существуют БВС вертолетного типа, особенностью которых является наличие у ЛА лопастной структуры.

Лопастная структура БВС вертолетного типа позволяет реализовать режим синтеза апертуры за счет естественного вращения лопастей носителя в случае, если в законцовке лопасти установить антенну, имеющую слабонаправленную ДН.

В зависимости от конструктивных особенностей лопастной структуры, которая обеспечивает перемещение БВС вертолетного типа, а также при его зависании над заданной областью поверхности Земли, возможны различные варианты реализации режимов синтезирования апертуры антенны. Например, БВС может иметь однолопастную структуру, многолопастную структуру, соосную схему расположения лопастной структуры. Учет данных особенностей конструкций лопастной структуры вертолетного носителя позволяет реализовывать бортовые РЛС со специальными режимами синтезирования апертуры антенны. Помимо этого, при использовании БВС вертолетного типа возможна реализация режима синтеза апертуры искусственной антенны при одновременном учете как поступательного движения БВС, так и вращательного движения его лопастной структуры.

3.2 Радиолокационные датчики высокого разрешения, построенные на принципах прямого синтеза апертуры при вращательном движении фазового центра реальной антенны

3.2.1 Особенности синтеза апертуры искусственной антенны при вращении фазового центра реальной антенны

Основная идея, лежащая в основе синтезирования апертуры, когерентное накопление отраженного сигнала при движении фазового центра (ФЦ) реальной антенны относительно неподвижного объекта зондирования. При традиционном подходе к синтезу апертуры искусственной антенны ФЦ реальной антенны, жестко связанной с центром масс носителя, обычно перемещается по прямолинейной траектории совместно с движением носителя РЛС. При излучении и приеме импульсного зондирующего сигнала, отраженного от одиночной точечной наземной цели (траекторного сигнала), ФЦ антенны занимает различные положения в пространстве, отстоящие друг от друга на величину, равную произведению периода повторения зондирующих импульсов на скорость перемещения носителя РЛС. Запомнив отсчеты отраженного сигнала в течение некоторого интервала времени и обеспечив далее их когерентное сложение (сжатие), можно сформировать антенную

решетку, поперечный размер которой определяется длиной траектории, по которой двигался ФЦА в процессе накопления сигнала.

Особенностью же процесса синтеза апертуры при вращении ФЦ антенны является то, что движение ФЦ обусловлено вращением лопастной структуры носителя вертолетного типа, поэтому процесс синтеза апертуры будет происходить и в случае, когда сам носитель РЛС остается неподвижным.

Этапы обработки траекторного сигнала

Этап 1. Формирование опорной функции (сигнала), являющейся комплексно-сопряженной функцией к траекторному сигналу.

Этап 2. Перемножение опорного сигнала и принимаемой реализации в виде совокупности принимаемого (траекторного) сигнала и шумов наблюдения.

Этап 3. Накопление (интегрирование) полученных произведений в течение времени синтезирования T_c и выделение модуля накопленных результатов произведений в процессе синтезирования апертуры.

Данные этапы имеют место и при синтезировании апертуры за счет вращения ФЦ.

3.2.2 Структура РЛС с режимом синтезирования апертуры за счет вращения фазового центра реальной антенны для БАС вертолетного типа

Конструктивные особенности БАС вертолетного типа позволяют говорить о возможности построения РЛС с режимом синтезирования апертуры искусственной антенны за счет вращения лопастной структуры данного носителя. Для этого достаточно разместить слабонаправленную антенную систему в законцовке лопасти несущего винта и обеспечить когерентную работу РЛС при формировании зондирующего сигнала и приеме отраженного сигнала от наблюдаемой поверхности в течение времени когерентного накопления (времени синтезирования).

Размещение антенны РЛС в законцовке лопасти несущего винта БВС вертолетного типа приводит к необходимости изменения традиционных схем построения радиолокационных визирных систем, обеспечивающих режим синтезирования апертуры антенны.

Один из возможных вариантов построения структуры бортовой РЛС для БВС вертолетного типа приведен на рисунок 3.2.

Основным источником когерентности в приведенной структурной схеме РЛС выступает задающий генератор ЗГ. Данный генератор обеспечивает формирование высокостабильного опорного колебания, которое служит для формирования вспомогательных колебаний, необходимых для обеспечения когерентности приемо-передающего тракта РЛС. Опорное колебание ЗГ в передающем тракте РЛС используется для формирования зондирующего сигнала. Для этого сигнал частоты поступает с ЗГ на формирователь зондирующего сигнала ФЗС, входящий в передающий тракт РЛС. В ФЗС из

данного сигнала формируется сигнал с частотой f_0 равной несущей частоте зондирующего сигнала. Сформированный сигнал усиливается в усилителе мощности УМ и через антенный переключатель АП подается в антенну АНТ, которая преобразует его в зондирующее электромагнитное колебание и затем излучает в направлении наблюдаемой земной поверхности.

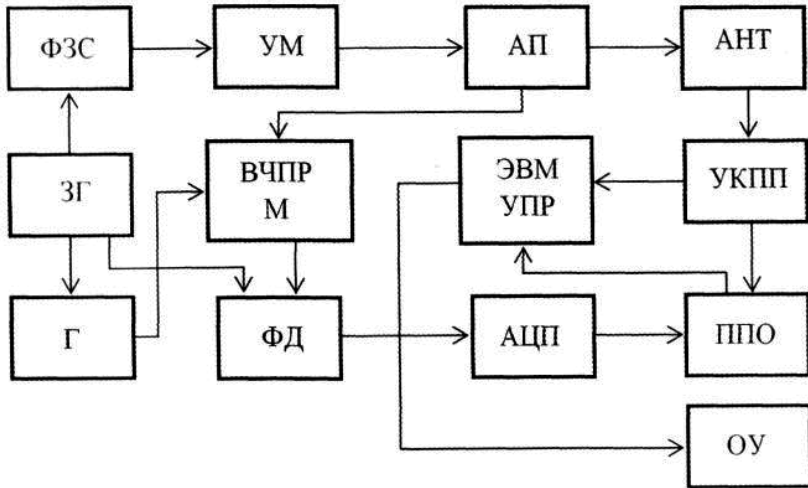


Рисунок 3.2 – Схема РЛС с режимом синтезирования апертуры за счет вращения ФЦ реальной антенны

В приемном канале РЛС опорное колебание ЗГ поступает в гетеродин Г, в котором из данного колебания формируется сигнал частоты f_{Γ} , поступающий затем в качестве гетеродинного сигнала на смеситель высокочастотной части приемника ВЧ ПРМ. На второй вход данного смесителя поступает сигнал, отраженный от земной поверхности, который воспринимается АНТ РЛС и через АП подается в приемник. В ВЧ ПРМ выполняется перенос принятого сигнала на промежуточную частоту и усиление его до требуемого уровня.

Кроме того, сигнал ЗГ частоты $f_{\text{оп}}$ используется для формирования опорных колебаний для блока фазовых детекторов ФД. В блоке ФД формируются квадратурные составляющие принятого сигнала, которые затем преобразуются в цифровой сигнал с помощью аналого-цифрового преобразователя АЦП и затем подаются в процессор первичной обработки ППО.

В ППО реализуется алгоритм формирования радиолокационного изображения РЛИ подстилающей поверхности. Для реализации алгоритма углового стробирования необходимо иметь информацию о текущей ориентации

лопасти несущего винта, в которой расположена антенна. Эту информацию в ППО выдает устройство контроля положения лопасти УКПЛ. Данная информация позволяет также частично скомпенсировать траекторные нестабильности, возникающие вследствие вращения и деформации лопасти при ее движении.

ЭВМ УПР по сигналам с УКПЛ осуществляет координатную привязку полученного РЛИ и выдачу его на оконечное устройство ОУ. В качестве ОУ выступает модулятор радиoliniии передачи целевой информации БВС, которая осуществляет ретрансляцию полученного РЛИ на пункт управления аппаратом.

3.2.3 Алгоритм обработки траекторного сигнал

Поскольку при решении задачи обнаружения малоразмерных наземных целей имеется существенное ограничение на время получения РЛИ и его последующий анализ, всю обработку сигнала и формирование кадров РЛИ необходимо вести в близком к реальному масштабу времени. Это означает, что к моменту формирования синтезированной апертуры требуемого размера изображение должно быть уже сформировано. Кроме того, учитывая некоторые особенности, связанные с обеспечением пространственной селекции в рассматриваемой РЛС с режимом СА, единственно возможный способ удовлетворения заданных требований - использование цифровой системы обработки ЦСО принимаемых сигналов. На рисунок 3.2 роль данной системы выполняет ППО.

Рассмотрим процесс оптимальной обработки траекторного сигнала ЦСО. Для этого представим схему алгоритма обработки в виде, приведенном на рисунок 3.3. В состав данной структурной схемы входят следующие элементы: согласованный фильтр с одиночным радиоимпульсом СФОИ, буферное запоминающее устройство БЗУ, генератор стробирующей функции ГСФ, генератор опорного сигнала ГОС, вычислитель опорной функции ВОФ, фазовые детекторы ФД, фазовращатель на $\pi/2$, генератор весовой функции ГВФ, перемножители, сумматоры, устройства взятия модуля выходного отклика. Представленная структура обработки тесно взаимодействует с системой навигации СН и ЭВМ управления.

Согласованный фильтр с одиночным радиоимпульсом выполняет операции, характерные для алгоритма внутрипериодной обработки (сжатие сигналов по дальности). Далее буферное ЗУ запоминает отсчеты выходного сигнала системы внутрипериодной обработки. Генератор стробирующей функции осуществляет стробирование траекторного сигнала таким образом, чтобы для каждого азимутального канала сформировать выборку отсчетов, соответствующую половине оборота ФЦА. Это позволяет снизить требования к быстродействию ЦСО путем удаления отсчетов траекторного сигнала, накопление которых не приведет к улучшению разрешающей способности.

Для устранения случайной начальной фазы траекторного сигнала осуществляется квадратурная обработка. Формирование квадратурных составляющих выполняется с помощью ГОС, фазовращателя на $\frac{\pi}{2}$ и ФД в каждом канале обработки (синфазном и квадратурном).

Далее производится операция перемножения квадратурных составляющих траекторного сигнала на опорную функцию. Вычислитель опорной функции рассчитывает ее по данным НС, которая обеспечивает измерение текущего положения ФЦ реальной антенны, его скорости и ориентации в пространстве самой антенны. Действительная весовая функция системы обработки $W(t)$, поступающая на ВОФ, необходима для обеспечения требуемого уровня боковых лепестков выходного отклика системы обработки. Ее вычисление производится ГВФ. Вычислитель ОФ синхронизируется с ГСФ. В четырех цифровых умножителях формируются произведения составляющих опорной функции и траекторного сигнала (цифровое гетеродинирование). Затем производится накопление отсчетов, соответствующих данному элементу разрешения и операция взятия модуля.

Для снижения требований по объему памяти и быстродействию ЦСО возможно использование алгоритмов предварительной фильтрации (частичного суммирования).

Некогерентное накопление РЛИ. Одной из отрицательных сторон когерентного узкополосного зондирования подстилающей поверхности является наличие «спекл-эффект» на РЛИ, который заключается в зернистости изображений статистически однородных поверхностей [6-8, 14]. Появление ложных ярких отметок на РЛИ, вызываемых спекл-эффектом, повышает вероятность ложной тревоги при автоматическом обнаружении целей.

Наиболее простым методом борьбы с подобными явлениями стало некогерентное накопление кадров РЛИ, полученных последовательно во времени. При зависании носителя РСА вертолетного типа за счет вращения ФЦ антенны имеется возможность оперативно получать РЛИ с частотой, равной частоте вращения несущего винта (3...6 Гц). При этом, поскольку центр масс носителя РСА неподвижен, не происходит разворот РЛИ во времени, что является характерным при поступательном движении ФЦА за счет движения носителя РСА.

4 Методы интеграции данных от различных источников информации в составе многодатчиковых комплексов БАС

4.1 Источники информации в многодатчиковых комплексах БВС

Проблема интеграции данных возникает всякий раз, когда в состав сложного технического комплекса входят датчики различной физической природы. Не исключение и комплекс с БВС. В состав данного комплекса

входят разносектральные датчики, информацию от которых желательно использовать в полной мере для решения возлагаемых на комплекс задач.

Особенностью использования комплексов с БВС является то, что на борту носителя отсутствует человек-оператор, который мог бы решать задачи по обработке разнородной информации, поступающей от информационных датчиков комплекса, и принятию решений на основе ее анализа. Непосредственно в контуре управления БВС присутствует человек-оператор, но на него, в основном, возлагаются функции по управлению беспилотным носителем.

Для обработки и анализа всего объема поступающей информации от разнородных датчиков комплекса с БВС необходимо в состав комплекса дополнительно включать человека, который выполнял бы данные функции, либо автоматизировать процесс обработки и принятия решений.

При решении задачи интеграции данных необходимо учитывать, что информационные разносектральные датчики, применяемые в комплексах с БВС, осуществляют сбор данных об окружающей обстановке, работая в различных режимах функционирования, а также используя разнообразные режимы излучения и приема сигналов, поступающих от объектов интереса. Кроме того, учитывая особенности применения комплексов с БВС, обработку информации от разносектральных датчиков и принятие решений необходимо осуществлять в реальном масштабе времени.

Источниками информации о воздушном, наземном и водном пространствах в бортовых комплексах БЛА являются датчики (системы), построенные на различных физических принципах, которые осуществляют мониторинг окружающего БВС пространства:

- системы, получающие информацию на основе анализа электромагнитного поля в различных диапазонах длин волн: оптические и инфракрасные датчики, лазерные локационные системы, системы активной и пассивной радиолокации, системы радиомониторинга, радиометрические датчики;
- магнитометрические датчики;
- сейсмические датчики;
- акустические и гидроакустические датчики и др.

Любая совокупность вышеперечисленных датчиков может размещаться как на одном БВС, так и на нескольких БВС, выполняющих общую задачу в составе группы. При этом обработка результатов мониторинга может проходить как на борту БВС, так и в центре обработки информации, располагаемом на Земле, на море или в воздушном пространстве.

Использование в составе комплексов нескольких датчиков, получающих информацию об одной и той же области пространства с использованием различных физических принципов, в общем случае повышает общую помехозащищенность комплексов.

Датчики, применяемые в комплексах БВС, могут представлять собой сложные многофункциональные системы, реализующие сбор данных об окружающем пространстве в различных режимах функционирования и в различных областях спектра. Так, может использоваться многоспектральная оптико-электронная система мониторинга, позволяющая получать изображения одного и того же участка пространства в различных областях оптического диапазона волн (видимой, инфракрасной).

Современные радиолокационные системы способны осуществлять зондирование пространства одновременно в различных частотных диапазонах, а также при разных режимах работы приемо-передатчиков и систем обработки сигналов, что позволяет получать различные типы представлений наблюдаемой области. Такие многофункциональные системы можно рассматривать в качестве датчиков, содержащих в себе несколько источников информации.

4.2 Интеграция информации в многодатчиковых комплексах БВС

В многодатчиковых комплексах мониторинга на базе БВС представление о наблюдаемой области пространства формируется в процессе совместной интеграционной обработки информации, собираемой различными датчиками. Интеграция сведений об одной и той же области пространства по данным из разнородных источников повышает достоверность и информативность представления о наблюдаемой области, а также надежность принимаемых в рамках этого представления решений. Отметим, что с учетом меняющейся обстановки в районе применения БВС, особенно относительно воздушного пространства, совместная обработка информации от различных датчиков в общем случае должна проводиться в масштабе времени, близком к реальному.

Интеграция сведений, получаемых различными датчиками, может осуществляться на уровне первичной и вторичной обработки информации о наблюдаемом пространстве.

Традиционно, под первичной обработкой информации принято понимать обнаружение, селекцию, преобразование и обработку сигналов на фоне помех на входе одного датчика с целью определения соответствующих параметров принятых сигналов или отметок целей (потенциальных объектов), например таких как дальность, радиальная скорость, угловые координаты объекта, радиотехнические параметры сигнала от внешнего источника радиоизлучения, гиперболические координаты носителя системы мониторинга в разностно-дальномерной навигационной системе [8]. Для датчиков, работающих в режиме картографирования, к первичной обработке относят обработку входных сигналов с целью формирования изображений местности.

Интеграция информации на уровне первичной обработки сигналов достаточно ограничена в силу различий в физической природе сигналов. Например, проблематична реализация совместной обработки радиолокационного сигнала, отраженного от объекта, и акустического

(звукового) сигнала, принятого от этого же объекта, в целях определения, например, дальности до объекта.

Однако имеются частные задачи интеграции информации, получаемой от разнородных датчиков, реализуемых на уровне первичной обработки. Например, в [8] описан ряд подходов к решению задачи комплексирования радиотехнических измерителей (датчиков), позволяющих улучшить точностные характеристики измерителей в режиме слежения за целью и качество их функционирования в аномальных режимах работы (при срывах слежения, ложных захватах из-за действия помех и др.).

К интеграции на уровне первичной обработки сигналов также могут быть отнесены задачи автоматической привязки изображений к карте местности и автоматического слияния изображений, полученных от датчиков, принимающих сигналы в различных диапазонах длин волн электромагнитного излучения (видимом, инфракрасном, радиодиапазоне).

В целом, в рамках интеграции на уровне первичной обработки задача получения комплексного представления об области пространства, наблюдаемой различными датчиками, является трудно реализуемой. Решение этой задачи может быть выполнено в рамках интеграции на уровне вторичной обработки информации.

Под вторичной обработкой информации понимают обработку выходных данных системы первичной обработки сигналов с целью получения сведений об объектах, присутствующих в области наблюдения одного датчика. В рамках вторичной обработки проводится, например, отождествление отдельных объектов по совокупности зарегистрированных сигналов или отметок, оценивание координат объектов, формирование трасс подвижных объектов, распознавание типов объектов, определение географических координат носителя системы мониторинга по данным из навигационной системы [8].

Для датчиков, работающих в режиме картографирования, ко вторичной обработке относят обработку изображений с целью выделения на них объектов, оценивания параметров их состояния и распознавания их типов.

Интеграция информации на уровне вторичной обработки предполагает совместную обработку данных, полученных по результатам первичной обработки в нескольких датчиках, с целью получения обобщающего представления об объектах в совместно наблюдаемой области окружающего пространства. При этом помимо информации, получаемой от датчиков в составе одного комплекса, может использоваться и информация, поступающая по каналам связи от датчиков других территориально удаленных комплексов мониторинга, а также центров обработки и хранения данных.

При интеграционной обработке на рассматриваемом уровне (иногда называемой третичной обработкой) решаются те же задачи, что и при собственно вторичной обработке в рамках одного датчика, т.е. задачи отождествления, оценивания состояния и распознавания объектов,

формирования трасс подвижных объектов и др. При этом за счет увеличения общего объема обрабатываемых данных, в том числе данных различной физической природы, повышается достоверность и информативность получаемого представления о наблюдаемой области.

Поясним смысл интеграции данных на уровне вторичной обработки на примере решения задачи формирования трасс перемещающихся в пространстве объектов, имеющих в своем составе источники радиоизлучения (ИРИ), по данным, получаемым от радиолокационной системы и системы радиомониторинга (СРМ).

На выходе системы первичной обработки РЛС, осуществляющей активное зондирование окружающего пространства, формируются отметки обнаруженных в различные моменты времени объектов, содержащие в себе информацию об их пространственных координатах (дальностях и углах пеленга) и скорости движения.

На выходе системы первичной обработки СРМ, осуществляющей пассивное пеленгование ИРИ в окружающем пространстве, формируются данные об углах пеленга и радиотехнических параметрах сигналов объектов, содержащих ИРИ.

Задача формирования трасс объектов может быть решена независимо как системой вторичной обработки РЛС, так и системой вторичной обработки СРМ (с некоторыми ограничениями). Однако, с учетом наличия шумов измерений, воздействия помех и ограниченного объема данных о наблюдаемых объектах в каждой из систем мониторинга, эти системы в отдельности дают менее достоверное решение задачи формирования трасс по сравнению с решением, которое можно получить при совместной интеграционной обработке.

При использовании каждой из указанных систем вторичной обработки в отдельности решение задачи (формирования трасс при последовательной обработке регистрируемых измерений (отметок объектов) в простейшем случае включает два взаимосвязанных этапа.

Этап 1 - отождествление объектов по регистрируемым измерениям (отметкам). Состоит в установлении соответствия текущего обрабатываемого измерения одному из ранее отождествленных объектов (с учетом прогноза изменения измеряемых параметров этих объектов на текущий момент времени) или новому объекту (процедура завязки новой трассы).

Этап 2 - оценивание текущих пространственных координат и скоростей движения каждого отождествленного объекта, на основании которых и формируются трассы объектов.

Совместная обработка данных РЛС и СРМ позволяет повысить качество принимаемых решений как об отождествлении, так и об оценивании по сравнению с независимой обработкой данных в отдельных системах за счет того, что:

а) решение об отождествлении на текущем шаге принимается не только с учетом прогноза изменения пространственного местоположения ранее отождествленных объектов, формируемого с учетом оценок скоростей объектов по данным из РЛС, но и с учетом значений радиотехнических параметров сигналов от ИРИ, входящих в объекты, по данным из СРМ;

б) более высокая, по сравнению с РЛС, точность измерения углов пеленга объектов в СРМ в совокупности с определяемой РЛС дальностью до объектов (не измеряемой СРМ) обусловила формирование более точных оценок пространственного местоположения объектов.

В отечественных и зарубежных источниках можно найти описание множества других частных задач интеграции информации на уровне вторичной обработки данных и подходов к их решению в системах мониторинга окружающего пространства [3]. Эти задачи, как правило, носят прикладной характер и актуальны для конкретных условий проведения мониторинга.

4.3 Задачи формирования обобщающего представления об окружающем пространстве

Задача получения обобщающего представления об окружающем пространстве на основании данных, формируемых системами первичной обработки сигналов различных датчиков в составе многодатчиковых комплексов БВС, в общем случае может быть сформулирована как задача оценки количества объектов в совместно наблюдаемой области пространства, координат и параметров движения объектов, свойств (параметров) объектов, типов объектов. Под объектами при этом могут пониматься любые сущности материального мира, в том числе одиночные малоразмерные объекты, групповые объекты, распределенные (площадные и объемные) объекты и т.д.

Задача формирования обобщающего представления о наблюдаемых объектах должна решаться с учетом динамики изменения их свойств и положения в пространстве, что требует проведения анализа информации, собираемой датчиками, в масштабе времени, близком к реальному. Такой анализ предполагает использование последовательных процедур обработки измерений от различных датчиков по мере их поступления в систему интеграционной обработки.

В терминах математической статистики отмеченные выше задачи получения обобщающего представления об окружающем пространстве при наличии последовательных измерений от датчиков формулируются следующим образом.

1. Задача оценки количества объектов формулируется как задача отождествления объектов по измерениям (под отождествлением понимается установление соответствия между отдельными поступающими от различных датчиков измерениями и экземплярами объектов [8]).

2. Задача оценки координат, параметров движения и свойств объектов формулируется как задача оценивания координат состояния этих объектов в пространстве состояний [8].

3. Задача оценки типов объектов формулируется как задача распознавания объектов (под распознаванием понимается установление принадлежности экземпляров объектов к одному из типов (классов), определенных в априорной библиотеке типов объектов [10]).

Между указанными тремя задачами имеют место взаимозависимости, состоящие в следующем.

Процедура принятия решения (решающее правило) о принадлежности очередного поступившего на вход системы обработки измерения тому или иному объекту (процедура отождествления объекта) зависит от сведений, которые содержатся в оценке его вектора состояния и прогнозе его изменения. В свою очередь, процедура оценивания координат состояния объекта и прогноз его изменения строится с использованием некоторых априорных сведений о его возможном поведении, а эти априорные сведения определяются типом объекта, т.е. выбор соответствующего априорного описания при оценивании зависит от результатов распознавания типов объектов.

Возвращаясь к рассмотренной выше задаче формирования трасс перемещающихся в пространстве объектов, отметим, что при решении этой задачи результаты прогнозирования изменения пространственного местоположения объектов, используемые при отождествлении, должны формироваться с учетом априорных моделей движения отождествляемых объектов, которые могут быть обоснованно заданы только по результатам распознавания их типов. Например, будут существенно отличаться между собой модели движения для таких подвижных объектов как высокоманевренный спортивный самолет, транспортный самолет, автомобиль или морское судно. Соответственно, прогноз изменения их пространственного положения должен строиться по разным соотношениям.

С учетом сказанного, взаимозависимости между задачами отождествления, оценивания и распознавания в общем случае следует учитывать при решении задачи формирования обобщающего представления об окружающем пространстве.

Такой учет может быть осуществлен при выполнении синтеза оптимальной совместной процедуры обработки измерений от различных датчиков на основе байесовского подхода [8], в рамках которого решающее правило выводится путем минимизации апостериорного риска, выступающего в качестве функционала качества и представляющего собой среднее значение функции потерь [11].

Применение байесовского подхода позволяет получить совместное решающее правило об отождествлении, оценивании координат состояния и распознавании объектов за счет использования совместной функции потерь,

определяющей в формализованном виде зависимость решающих правил по каждой из трех процедур от потерь, связанных с двумя другими процедурами.

Математическая постановка задачи

Задача формирования обобщающего представления об объектах, находящихся в наблюдаемой области пространства, на основании данных, получаемых от датчиков различной физической природы, в математической форме формулируется следующим образом.

На вход системы интеграционной обработки многодатчикового комплекса, имеющего в своем составе G разнотипных датчиков, поступают последовательности $\{\mathbf{z}\}_k^{(g)}$, $g = \overline{1, G}$ векторов параметров объектов, измеренных различными датчиками в моменты времени от первого до k -го. Эти последовательности в совокупности образуют входной поток измерений, представляемый обобщенной последовательностью измерений :

$$\{\tilde{\mathbf{z}}\}_k = \left\{ \{\mathbf{z}\}_k^{(1)}, \{\mathbf{z}\}_k^{(2)}, \dots, \{\mathbf{z}\}_k^{(g)}, \dots, \{\mathbf{z}\}_k^{(G)} \right\}. \quad (4.1)$$

Модель наблюдения, используемая при решении задачи получения обобщающего представления об окружающем пространстве, определяется обобщенным уравнением наблюдения

$$\tilde{\mathbf{z}}_k = \tilde{\mathbf{h}}\left(t_k, \mathbf{x}_k^{(i)}, \mathbf{x}_{ck}\right) + \tilde{\mathbf{o}}_{ик}, \quad (4.2)$$

устанавливающим связь между вектором $\mathbf{x}_k^{(i)}$ координат состояния произвольного i -го объекта в момент времени t_k и обобщенным вектором $\tilde{\mathbf{z}}_k$ измерений параметров этого объекта всеми датчиками, который включает;

а) один вектор $\mathbf{z}_k^{(g)}$ измерений параметров i -го объекта, сформированный g -м датчиком в момент t_k ;

б) $G-1$ векторов $\mathbf{z}_{\Delta k}^{(j)}$, $j = \overline{1, G}$, $j \neq g$ экстраполированных на момент t_k измерений параметров того же i -го объекта, сформированных в моменты времени, предшествующие t_k , всеми другими датчиками кроме g -го.

Экстраполяция на момент t_k измерений $\mathbf{z}_{\Delta k}^{(j)}$ от различных датчиков осуществляется на основании специфичных для этих датчиков уравнений наблюдения

$$\mathbf{z}_k^g = \mathbf{h}^g\left(t_k, \mathbf{x}_k^{(i)}, \mathbf{x}_{ck}\right) + \mathbf{o}_{ик}^g \quad (4.3)$$

с учетом прогнозируемых на момент t_k значений координат состояния i -го объекта. Прогноз изменения состояния объекта строится с использованием соотношений, определяемых его моделью состояния.

Модель состояния объектов, находящихся в совместно наблюдаемой различными датчиками области пространства, описывается обобщенным уравнением состояния

$$\tilde{\mathbf{x}}_k = \tilde{\Phi}_{k|k-1} \tilde{\mathbf{x}}_{k-1} + \tilde{\xi}_{\mathbf{x}k}, \quad (4.4)$$

которое определяет априорный закон изменения координат состояния всех I_k объектов, представленных на момент t_k в обобщенном векторе состояния $\tilde{\mathbf{x}}_k$.

Сведения о типах объектов, используемые при распознавании наблюдаемых объектов, определяются описанием *априорной библиотеки типов*.

Априорная библиотека типов объектов это:

1) алфавит типов

$$\mathbf{B} = \{B_1, B_2, \dots, B_s, \dots, B_{N_B}\}, \quad (4.5)$$

где N_B - число типов объектов в библиотеке;

2) априорная вероятность наличия объектов различных типов в наблюдаемой области пространства

$$P_{pr}(B_s), s = \overline{1, N_B}; \quad (4.6)$$

3) алфавит доступных измерению признаков типов, представляемый в виде вектора

$$\mathbf{a} = a_1, a_2, \dots, a_{N_n}^T, \quad (4.7)$$

где N_n - число признаков типов объектов в алфавите;

4) априорная плотность распределения вероятностей значений признаков для различных типов

$$p(\mathbf{a}|B_s) = p(a_1, a_2, \dots, a_{N_n}|B_s), s = \overline{1, N_B}, \quad (4.8)$$

которая характеризует вероятный разброс значений признаков между отдельными экземплярами в пределах типа;

5) неструктурированный набор недоступных измерению различных свойств, присущих каждому типу.

Примеры недоступных измерению свойств типов объектов:

➤ набор летно-технических характеристик ЛА;

- совокупность параметров, определяющих априорную модель движения объектов.

Свойства типов, привязываемые к наблюдаемым объектам по результатам их распознавания на основе измеряемых признаков, могут использоваться, например, в целях прогнозирования возможного поведения наблюдаемых объектов при оценивании их координат состояния.

Алфавит доступных измерению признаков в априорной библиотеке типов формируется в соответствии с теми измеряемыми в различных датчиках параметрами объектов, значения которых несут в себе информацию, специфичную для различных типов объектов. Например, в алфавит не имеет смысла включать признаки, соответствующие измеряемым дальности и углам пеленга объекта, так как эти параметры не содержат информацию, специфичную с точки зрения типа объекта.

Примеры измеряемых признаков, включенных в алфавит:

- эффективная поверхность рассеяния.
- габаритные размеры.
- скорость движения и ускорение объекта.
- спектральные характеристики отраженного от объекта радиолокационного сигнала.
- радиотехнические параметры излучаемого объектом электромагнитного сигнала и др.

Распознавание осуществляется на основании анализа обобщенной последовательности измеренных различными датчиками значений признаков объектов, которая является подмножеством обобщенной последовательности $\{\tilde{\mathbf{z}}\}_k$ измерений.

В ходе интеграционной обработки входного потока измерений $\{\tilde{\mathbf{z}}\}_k$ необходимо в рамках принятых моделей наблюдения и состояния путем совместного выполнения процедур отождествления объектов по измерениям, оценивания координат состояния и распознавания типов объектов в каждый момент времени t_k формировать обобщающее представление об объектах, представленных в наблюдаемом процессе $\{\tilde{\mathbf{z}}\}_k$, которое определяется перечнем (числом) объектов, оценками их координат состояния и соотносением объектов с типами в априорной библиотеке типов.

Раздел 2. Радиопередачи управления и передачи данных БАС

5 Системы радиоуправления

5.1 Общие принципы построения систем радиоуправления

Радиоуправление – это область радиоэлектроники, изучающая методы управления какими-либо аппаратами, приборами или процессами с помощью радиосредств. Основными задачами радиоуправления, как и задачами любой системы автоматического управления, является осуществление стабилизации параметров какого-либо процесса или управление этими параметрами по заранее определённым (заданным) законам.

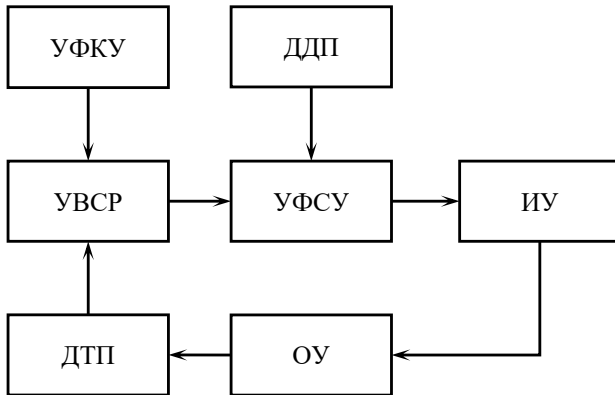
В общем случае состояние объекта управления может быть охарактеризовано в любой момент времени вектором текущих (измеренных) параметров $x_{изм}$. Цель управления также может быть задана требуемыми параметрами вектора состояния z_T . Их разность представляет собой вектор сигналов рассогласования Δ (5.1):

$$\begin{aligned} x_{изм} &= (x_{изм}^1, x_{изм}^2, \dots, x_{изм}^n) \\ z_T &= (z_T^1, z_T^2, \dots, z_T^n) \\ \Delta &= x_{изм} - z_T = (x_{изм}^1 - z_T^1, x_{изм}^2 - z_T^2, \dots, x_{изм}^n - z_T^n) \end{aligned} \quad (5.1)$$

Основная задача системы управления в этом случае состоит в выделении и определении сигналов рассогласования, формировании управляющих сигналов и управлении объектом таким образом, чтобы сигналы рассогласования изменялись до некоторого заданного значения. Это значение зависит от метода управления, типа управляемого объекта и других факторов. Во многих случаях стараются поддерживать нулевое рассогласование.

При управлении движением беспилотных воздушных судов сигналы рассогласования являются главными, но не единственными сигналами, влияющими на движение БВС. На привод управляющего органа (в соответствии с аэродинамической схемой БВС и способом создания управляющей силы это может быть, например, аэродинамический руль или элерон, газодинамический руль, управляющие винты и т.п.) подаётся управляющий сигнал, в состав которого могут входить сигналы от дополнительных измерителей. Дополнительные измерители предназначены для улучшения качества процесса управления или стабилизации свойств ВС как объекта управления. Например, эффективность работы аэродинамических рулей определяет сила давления на них воздушного потока, параметры которого, в свою очередь, зависят от высоты полёта, скорости движения летательного аппарата, скорости и направления ветра. В качестве

дополнительных измерителей используют высотомеры, акселерометры, гироскопы и др. Упрощенная структурная схема системы радиоуправления показана на рисунке 5.1.



- УФК* – устройство формирования команд управления;
ДТП – датчики текущих (измеренных) параметров;
УВСР – устройство выделения сигналов рассогласования;
УФСУ – устройство формирования сигналов управления;
ИУ – исполнительное устройство;
ОУ – объект управления
ДДП – датчики дополнительных параметров

Рисунок 5.1 – Упрощенная структурная схема системы радиоуправления

Различные виды БВС могут предназначаться для решения самых разнообразных задач. В зависимости от этих задач и вида управляемого БВС выбирается принцип действия и технические характеристики системы управления, которые разделяют на системы радиотеленаведения, системы командного радиоуправления, системы самонаведения, корреляционно-экстремальные системы управления.

Беспилотное воздушное судно является сложным телом, состоящим (в общем случае) из совокупности твёрдых, жидких и газообразных масс, которые в полёте могут перемещаться друг относительно друга, изменять свою массу и объём (например, выгорание топлива). Полное математическое описание движения БВС весьма сложно, и поэтому при составлении уравнений движения обычно прибегают к ряду ограничений и допущений. Путь следования БВС разбивают на характерные участки и на каждом участке воздушное судно считают абсолютно твёрдым телом постоянной массы, а его сложное движение

представляют совокупностью поступательного движения центра масс и вращательного движения вокруг центра масс.

Поступательное движение происходит при условии, что направление действующей силы проходит через центр масс объекта. Вращательное движение совершается под действием моментов, образуемых силами, направление действия которых не проходят через центр масс объекта. Это движение называется ориентацией БВС. Поэтому управление движением любого ВС в общем случае заключается в управлении поступательным перемещением его центра масс и управлении поворотами вокруг центра масс. Первый вид управления называют управлением полётом, а второй - управлением ориентацией или просто ориентацией. Следовательно, в общем случае управление движением БВС состоит из управления полётом и ориентацией.

5.2 Методы наведения воздушных судов

5.2.1 Наведение по фиксированным траекториям

В зависимости от характера цели (точки) наведения, разделяют методы наведения по фиксированным и нефиксированным траекториям. Реализацию методов наведения будем рассматривать на примерах наведения БВС различных классов на движущиеся и неподвижные объекты.

Фиксированные траектории определяют до взлёта (пуска, старта) БВС и рассчитывают программу движения судна по этой траектории. Программу закладывают в память бортового комплекса радиуправления. Она определяет моменты достижения заданных точек траектории полёта и, при необходимости, выдаёт команды исполнительным органам управления для изменения режима полёта так, чтобы вектор скорости БВС в любой момент времени имел бы требуемое направление и величину. Часто такой метод называют наведением по опорной траектории.

На примере движения БВС, перемещающего груз из пункта А в пункт Б по заданному маршруту, рассмотрим реализацию метода наведения по опорной траектории (рисунок 5.2).

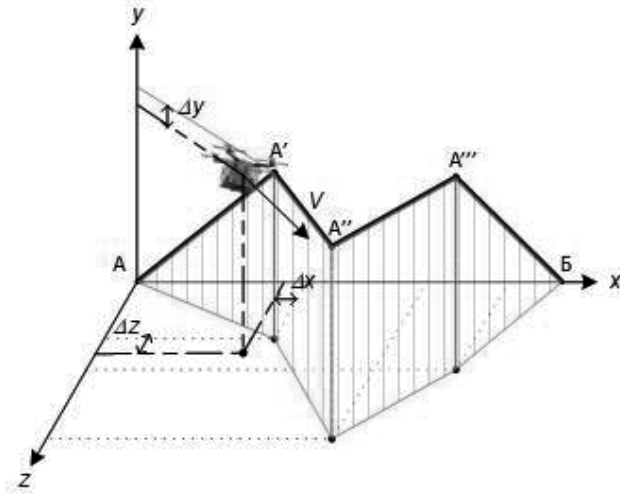


Рисунок 5.2 - Наведение БВС по опорной траектории

Для относительно небольших дальностей полёта можно пренебречь кривизной и вращением Земли. Тогда опорная траектория будет кривой, лежащей в вертикальной плоскости (плоскости наведения) и будет состоять из следующих характерных участков: AA – участок набора высоты, $AA A$ – участок горизонтального полёта и $A B$ – участок снижения и посадки. На этом же рисунке показано некоторое положение БВС в полёте, характеризующееся случайным отклонением координат фактической траектории от кинематической расчётной: Δy – по высоте, Δz – в боковом направлении и Δx – в продольном направлении. Эти параметры называют параметрами рассогласования. Чтобы удержать БВС на фиксированной траектории, необходимо в каждый момент времени обеспечивать выполнение следующих требований:

$$\Delta x = 0; \Delta y = 0; \Delta z = 0. \quad (5.2)$$

Таким образом, для наведения по фиксированной траектории необходимо на управляемом БВС иметь измерители текущих навигационных параметров, чтобы сравнивать их с заданными параметрами. Это измерители высоты полёта, угловых координат местоположения БВС и др. Высоту полёта определяют барометрическими измерителями или радиовысотомерами. Угловые координаты измеряют с помощью инерциальных, спутниковых систем навигации. Применение измерителей, основанных на использовании эффекта

Доплера, позволяет получить информацию о скорости движения и бокового сноса ЛА. Интегрируя скорость, получают значение пройденного пути L , необходимого для изменения режима полёта.

В некоторых случаях для формирования параметров рассогласования в системах автономного радиоуправления используют корреляционно-экстремальные системы, основанные на методах распознавания образов. В частности, применяют системы, в которых осуществляется сравнение текущего изображения подстилающей поверхности с эталонным изображением, полученным заранее. Критерием сравнения является значение взаимной пространственной функции корреляции обоих изображений.

Для повышения точности измерений и надёжности работы автономных систем управления ЛА в ряде случаев применяют комбинацию двух или более систем, использующих различные физические принципы получения навигационной информации. Примером может служить комплексирование инерциальных и радиотехнических информационно-измерительных систем.

Основным достоинством наведения по опорной траектории является скрытность работы системы управления и, как следствие, её высокая помехозащищённость. Кроме того, автономность работы позволяет осуществлять наведение на точки, расположенные на больших удалениях от места старта БВС (до нескольких тысяч километров). Однако, при полётах на большие расстояния могут возникать трудности управления из-за того, что условия на трассе полёта могут существенно изменяться и предусмотреть заранее реальную обстановку практически невозможно. В этом случае система управления должна быть адаптивной, а на борту летательного аппарата должны находиться дополнительные средства получения информации об окружающей обстановке.

5.2.2 Наведение по нефиксированным траекториям. Общие положения

Нефиксированные траектории реализуют с помощью различных методов наведения в зависимости от типов БВС, от задач, решаемых при наведении, и других факторов. Различают двухточечные и трёхточечные методы. В двухточечных методах в наведении участвуют два объекта: управляемое БВС и объект (точка, другой подвижный объект), на который осуществляется наведение. В дальнейшем объект (точка пространства), на который осуществляется наведение, будем называть целью. В трёхточечных методах участвуют три объекта: БВС, цель и командный пункт (КП). Командный пункт – это обобщённое понятие места взлёта, старта или пуска БВС. В качестве КП может использоваться подвижный носитель, например, другое ВС, автомобиль, надводное судно и т.п., поэтому при формировании траектории наведения необходимо учитывать параметры движения носителя.

Рассмотрим некоторые методы наведения по нефиксированным траекториям.

Геометрические соотношения при реализации двухточечных методов показаны на рисунке 5.3.

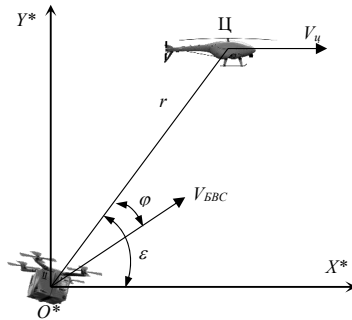


Рисунок 5.3 – Основные геометрические соотношения при реализации двухточечных методов наведения

На рисунке приняты следующие обозначения. Линия r , соединяющая БВС с целью Ц, называют линией визирования цели. Угол φ между линией визирования цели и направлением вектора скорости БВС $V_{БВС}$ называют углом упреждения. Угол ε между линией визирования цели и осью X^* стабилизированной системы координат называют углом визирования цели. Для упрощения рассуждений будем считать, что векторы r , $V_{БВС}$ и $V_{Ц}$ лежат в одной плоскости X^*OY^* стабилизированной системы координат. Стабилизированная система координат относится к виду так называемых подвижных систем координат. Начало координат такой системы совмещено с центром масс движущегося БВС, а оси ориентированы параллельно осям опорной (отсчётной) системы, начало которой, как правило, совмещено с КП.

5.2.3 Метод «Погони»

Характерной особенностью метода погони является то, что в любой момент времени вектор скорости БВС $V_{БВС}$ направлен на цель (рисунок 5.4). Угол упреждения при этом равен нулю: $\varphi=0$.

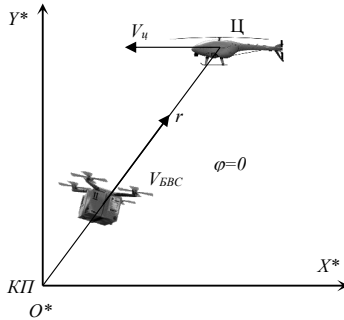


Рисунок 5.4 – Геометрические соотношения метода «Погони»

Скорость сближения БВС с целью будет равна

$$V_{сб} = V_p \pm V_u \cos \beta. \quad (5.3)$$

Так как скорость есть производная от расстояния, то можно записать

$$\frac{d}{dt} r = V_p \pm V_u \cos \beta \quad (5.4)$$

Это уравнение называется уравнением метода погони.

Аппаратура, реализующая этот метод, должна постоянно определять рассогласование между направлением линии визирования цели и направлением вектора скорости БВС и выработать команды управления полётом для устранения этого рассогласования.

Произведем построение кинематической траектории БВС, наводимого на цель по этому методу. При построении заданными являются траектория цели (точки $Ц_1, Ц_2, \dots, Ц_k$), отношение скоростей цели и БВС $n = V_u/V_{БВС}$ и точки расположения цели $Ц_1$ и БВС $Б_1$ в момент начала наведения (рисунок 5.5).

Для построения траектории БВС разобьём траекторию цели на ряд малых участков $Ц_iЦ_{i+1}$. Так как участок $Ц_1Ц_2$ мал, то можно считать, что во время движения цели по этому участку ($\Delta t = t_2 - t_1$) БВС движется по направлению $Ц_1Б_1$ (так как вектор скорости $V_{БВС}$ направлен на цель) и проходит путь

$$Б_1Б_2 = \frac{Ц_1Ц_2}{V_u} V_{БВС} = \frac{Ц_1Ц_2}{n}. \quad (5.5)$$

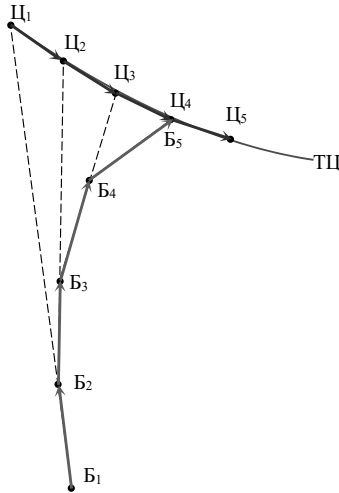


Рисунок 5.5 - Расчётная траектория БВС при наведении методом погони

Откладывая отрезок $Б_1Б_2$, находим точку $Б_2$, в которой БВС окажется в момент t_2 (с учётом того, что $V_{БВС} > V_u$). Так как вектор в каждый момент времени должен быть направлен на цель, то в момент t_2 он будет направлен по прямой $Б_2Ц_2$. Поэтому, когда цель пройдёт путь $Ц_2Ц_3$, БВС пройдёт путь

$$Б_2Б_3 = \frac{Ц_2Ц_3}{n}. \quad (5.6)$$

Откладывая этот отрезок на направлении $Б_2Ц_2$, находим точку положения БВС в момент времени t_3 , т.е. $Б_3$. Продолжая аналогичные построения, находим, что траектория БВС проходит через точки $Б_1, Б_2, Б_3, Б_4$ и т.д. Чем меньше выбраны отрезки $Ц_iЦ_{i+1}$ и др., тем точнее будет построение.

Если скорости цели и БВС изменяются во времени, то при построении отношение скоростей также должно быть задано как функция времени $n=f(t)$ и определение отрезков $Б_1Б_2, Б_2Б_3$ и т.д. нужно производить соответственно для значений $n(t_1), n(t_2)$ и т.д.

Траектория метода погони при поперечных или встречно-поперечных курсах имеет возрастающую кривизну по мере приближения к цели. Когда радиус кривизны траектории становится меньше допустимого радиуса разворота для данного БВС, то БВС может сойти с расчётной траектории, что приведёт к определённому промаху. Чем больше скорость цели, тем больше может быть промах. Это является недостатком метода погони. Поэтому такой метод применяют при наведении на медленно движущиеся цели.

5.2.4 Наведение по методу параллельного сближения

При таком методе вектор скорости БВС в каждый момент времени направлен в упреждённую точку, соответствующую этому моменту времени.

Упреждённая точка - это такая точка пространства, в которой БВС встретился бы с целью, если бы векторы скорости цели и ракеты в дальнейшем оставались неизменными.

Предположим, что цель летит по произвольной траектории ТЦ и в произвольный момент времени t находится в точке Ц, а БВС в этот момент находится в точке Б (рисунок 5.6).

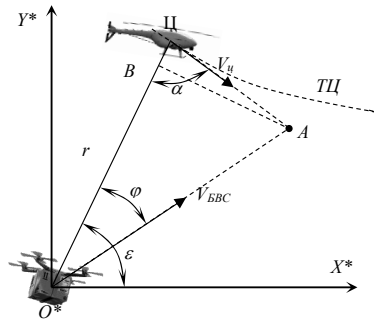


Рисунок 5.6 – Наведение БВС по методу параллельного сближения

Тогда упреждённую точку А, соответствующую этому моменту времени, можно найти из условия

$$\Delta t_{ц} = \Delta t_{БВС} \quad (5.7)$$

где $\Delta t_{ц} = \frac{ЦА}{V_{ц}}$ и $\Delta t_{БВС} = \frac{ОА}{V_{БВС}}$ соответственно времена полета цели и БВС до точки встречи. Следовательно, условие идеального упреждения имеет вид

$$\frac{ЦА}{V_{ц}} = \frac{ОА}{V_{БВС}} \quad (5.8)$$

Найдём, чему равны отрезки ЦА и ОА. Для этого проведем перпендикуляр из точки А на линию визирования цели.

Тогда

$$ЦА = \frac{АВ}{\sin \alpha}, \quad ОА = \frac{АВ}{\sin \phi_0} \quad (5.9)$$

Подставив эти значения в (5.8), получим

$$\frac{AB}{V_{Ц} \sin \alpha} = \frac{AB}{V_{БВС} \sin \varphi_0} \quad (5.10)$$

После сокращения на АВ условие будет иметь вид

$$V_{Ц} \sin \alpha = V_{БВС} \sin \varphi_0 \quad (5.11)$$

Составляющие этого уравнения представляют собой проекции векторов скоростей БВС $V_{БВС}$ и цели $V_{Ц}$ на нормаль к линии визирования цели. Для выполнения этого условия проекции должны быть равны друг другу в течение всего этапа наведения. Очевидно, они будут равны только в том случае, если линия визирования цели в процессе наведения будет поступательно перемещаться параллельно самой себе. Поэтому такой метод наведения называется методом параллельного сближения. Для реализации такого метода необходимо поддерживать скорость изменения угла визирования равной нулю, т.е.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = 0 \quad (5.12)$$

Отличие от нулевого значения угловой скорости вращения линии визирования цели будет являться параметром рассогласования.

Построим траекторию движения ракеты при наведении методом параллельного сближения. Для выполнения такого построения необходимо знать траекторию цели ТЦ, отношение скоростей полёта цели и БВС $n = V_{ц}/V_{БВС}$ и точки начального положения цели $Ц_1$ и БВС $Б_1$ (рисунок 5.7).

Разобьём траекторию цели на ряд малых участков $Ц_iЦ_{i+1}$. Каждый из этих участков цель должна проходить за одинаковое время. Точки $Б_1$ и $Ц_1$ соединим линией визирования цели. Из точек $Ц_2$, $Ц_3$, и т.д. проведём прямые, параллельные линии визирования цели. Далее, вычислим соответствующие участки траектории БВС. Время прохождения цели расстояния $Ц_1Ц_2$ со скоростью $V_{ц}$ равно времени прохождения ракеты расстояния $Б_1Б_2$ со скоростью $V_{БВС}$. т.е.

$$\frac{Ц_1Ц_2}{V_{ц}} = \frac{Б_1Б_2}{V_{БВС}} \quad (5.13)$$

откуда можно записать общее условие

$$B_i B_{i+1} = \frac{C_i C_{i+1}}{V_{Ц}} V_{БВС} = \frac{C_i C_{i+1}}{n}. \quad (5.14)$$

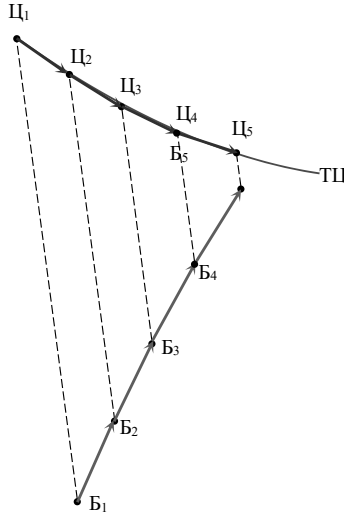


Рисунок 5.7 – Расчётная траектория БВС при наведении методом параллельного сближения

Из точки B_i радиусом, равным $B_i B_{i+1}$ находим точку B_{i+1} на прямой, проходящей через точку C_{i+1} . Чем меньше взяты участки на траектории цели, тем точнее построение траектории ракеты.

Как видно из рисунка 5.7, кривизна траектории БВС при наведении методом параллельного сближения получается гораздо меньше, чем при наведении методом погони и приближается к минимально возможной из всех методов наведения. При прямолинейном движении цели и постоянстве отношении скоростей цели и БВС угол упреждения не изменяется $\varphi = const$ и траектория ракеты получается прямолинейной.

5.2.5 Наведение методом накрытия цели

Такой метод наведения относится к трёхточечным методам, так как в процессе наведения участвуют три объекта (рисунок 5.8): командный пункт КП, БВС Б и цель Ц. На рисунке обозначено: $r_{кц}$ – линия визирования цели

относительно командного пункта, r_{KB} – линия визирования БВС относительно командного пункта, $\varepsilon_{кц}$ – угол визирования цели, $\varepsilon_{кб}$ – угол визирования БВС.

При наведении методом накрытия цели ракета в любой момент времени должна находиться на линии визирования цели относительно командного пункта, т.е. должно выполняться условие

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{кц} - \varepsilon_{кб} = 0. \quad (5.15)$$

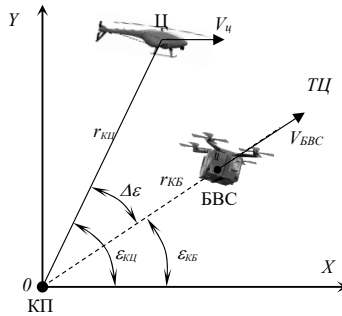


Рисунок 5.8 - К пояснению трёхточечных методов наведения ЛА

Ракета в этом случае как бы закрывает видимость цели от наблюдателя, находящегося на командном пункте. Угол $\Delta\varepsilon$ является параметром рассогласования. Он либо вычисляется как разность углов $\varepsilon_{кц}$ и $\varepsilon_{кб}$, либо измеряется непосредственно.

Рассмотрим графическое построение траектории ракеты при наведении методом накрытия цели. Для построения должны быть заданы: траектория цели ТЦ, траектория командного пункта ТКП, отношения скоростей цели и БВС $n_1 = V_{ц}/V_{БВС}$, и цели и командного пункта $n_2 = V_{ц}/V_{КП}$, начальное положение всех трёх объектов.

Траекторию цели ТЦ (рисунок 5.9) разделим на ряд малых участков $Ц_iЦ_{i+1}$. Соответствующие участки траектории командного пункта находим из следующих соотношений:

$$K_i K_{i+1} = \frac{Ц_i Ц_{i+1} V_K}{V_{ц}} = \frac{Ц_i Ц_{i+1}}{n_2}. \quad (5.16)$$

Соединим прямыми линиями точки положения командного пункта K_i с соответствующими точками положения цели $Ц_i$. Далее, вычислим отрезки траектории БВС:

$$B_i B_{i+1} = \frac{Ц_i Ц_{i+1}}{V_y} V_{BVC} = \frac{Ц_i Ц_{i+1}}{n_1} \quad (5.17)$$

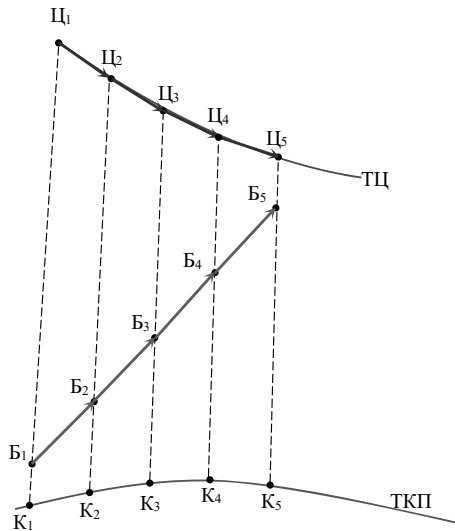


Рисунок 5.9 – Траектория БВС при наведении методом накрытия цели

Из точки начального положения БВС радиусом $B_1 B_2$ делаем засечку на линии визирования $К_2 Ц_2$ и находим положение БВС B_2 . Аналогично определяем последующие точки положения БВС. Соединяя найденные точки, находим искомую траекторию движения БВС. Если наведение по методу накрытия цели начинается с момента старта БВС с командного пункта, то точка начального положения ракеты совпадает с точкой начального положения командного пункта. Если движение командного пункта происходит по закону параллельного сближения, то ракета будет двигаться также, как если бы она наводилась по методу параллельного сближения.

5.3 Системы радиотеленавещения

Основным, наиболее общим признаком, характеризующим радиотеленавещение, является наличие определённой структуры электромагнитного поля, создаваемого передающими устройствами командного пункта. При этом некоторый параметр поля оказывается функционально связанным с координатами соответствующей точки пространства $A(X, Y, Z)$, где X, Y, Z – координаты в опорной (отсчётной) системе координат, связанная с командным пунктом. Бортовая аппаратура,

размещённая на управляемом летательном аппарате, способна измерять параметр электромагнитного поля и таким образом определять своё фактическое положение относительно командного пункта.

Управляя излучением передатчика на командном пункте, можно изменять структуру поля, и соответственно, изменять направление движения управляемого летательного аппарата. Таким образом, можно осуществлять радиотеленаведение по произвольной траектории, которая может изменяться в процессе наведения в соответствии с относительным движением объектов, участвующих в наведении.

Принцип действия и структура радиотехнических средств системы радиотеленаведения определяются прежде всего используемым информационным параметром поля, поэтому различают амплитудные, частотные, фазовые и временные системы.

Часто структуру электромагнитного поля формируют таким образом, чтобы информационные параметры оставались неизменными на некоторой линии или поверхности. Такие линии и поверхности называют равносигнальными. Любое отклонение управляемого летательного аппарата от равносигнальной линии или поверхности приводит к появлению так называемого сигнала ошибки на выходе бортовой приёмной аппаратуры. На основании сигнала ошибки формируют команды, управляющие движением летательного аппарата. Управление производится таким образом, чтобы сигнал ошибки был минимальным в течение всего управляемого полёта летательного аппарата.

5.3.1 Системы наведения по радиолучу

Характерным примером систем пространственного радиотеленаведения, в которых в качестве информационного параметра используется изменение амплитуды принимаемых сигналов, являются системы наведения по радиолучу. Один из вариантов реализации такого метода рассмотрим на примере системы наведения БВС на цель. Подобного плана системы могут использоваться для осуществления «слепой» посадки по радиолучу. Радиотехническая часть системы наведения состоит из управляющей передающей радиотехнической системы (РТС), находящейся на КП, и приёмной аппаратуры, размещённой на БВС. Пространственное положение всех объектов, участвующих в процессе наведения, показано на рисунке 5.10, на котором также обозначено: L - радиолуч; $r_{КЦ}$ и $r_{КБ}$ - линии визирования цели и БВС относительно командного пункта; L , C , B - проекции луча и линий визирования цели и БВС на горизонтальную координатную плоскость XOZ .

Управляющая РТС, с помощью передатчика П и антенного устройства Ап формирует радиолуч L в виде равносигнального направления. Положение радиолуча в пространстве в любой момент времени определяется угловыми

координатами $\alpha_{Л}$ в азимутальной плоскости и $\beta_{Л}$ в угломерной плоскости. Управление положением радиолуча осуществляется на основании информации о текущих навигационных параметрах цели Ц, на которую осуществляется наведение БВС. Это угловые координаты цели $\alpha_{Ц}$ и $\beta_{Ц}$, определяющие положение линии визирования $r_{КЦ}$ цели Ц относительно командного пункта КП (точнее - антенны Ап). Пространственное положение БВС характеризуют соответствующие координаты $\alpha_{Б}$, $\beta_{Б}$ и $r_{КБ}$.

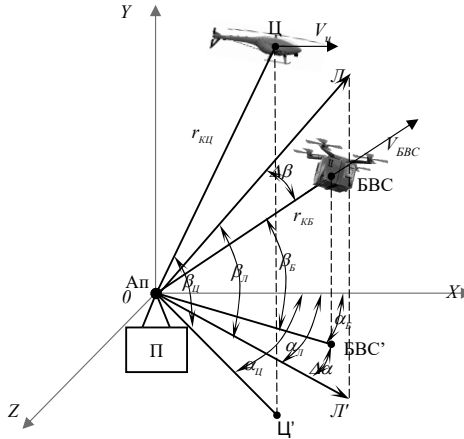


Рисунок 5.10 – Схема пространственного положения объектов при наведении по радиолучу

В зависимости от принятого метода наведения радиолуч может быть направлен на цель (метод накрытия цели) или в упреждённую точку (метод параллельного сближения). При наведении БВС в любой момент времени должно находиться на радиолуче. Параметры

$$\Delta\alpha = \alpha_{Л} - \alpha_{Б} \text{ и } \Delta\beta = \beta_{Л} - \beta_{Б} \quad (5.18)$$

определяют отклонение траектории ракеты от направления радиолуча.

При реализации такого метода чаще всего используют антенную систему с коническим сканированием. Принцип работы такой системы заключается в следующем.

Диаграмма направленности (ДН) вращается в пространстве вокруг оси антенны с угловой скоростью $\Omega_{А}$. Так как ось диаграммы направленности при вращении перемещается по образующей кругового конуса, то такое вращение получило название «конического сканирования». На рисунке 5.11 показано пространственное положение вращающейся диаграммы направленности для

двух произвольных моментов времени t_1 и t_2 . Из рисунка видно, что вдоль оси вращения диаграммы образуется равносигнальное направление (РСН) характерное тем, что для любого пространственного положения сканирующей диаграммы коэффициент усиления антенны определяет величина одного и того же вектора \mathbf{G} и амплитуда сигналов, принимаемых бортовой аппаратурой с этого направления, (направление на BBC_1 на рисунке), остаётся постоянной, равной U_0 (рисунок 5.12,а).

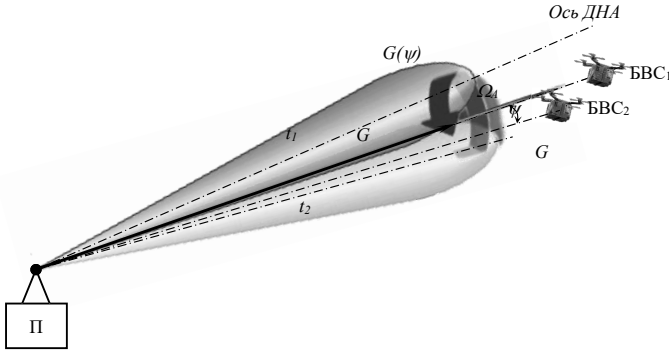


Рисунок 5.11 – Принцип формирования равносигнального направления ДНА

Если же БВС будет смещено относительно РСН (BBC_2 на рисунке 5.11) на угол ψ , то в направлении на BBC_2 будет происходить периодическое изменение коэффициента усиления передающей антенны с частотой, равной угловой скорости вращения диаграммы направленности и вследствие этого будет возникать амплитудная модуляция принимаемых сигналов

$$U_{B2}(t) = U_0(1 + m \cos(\Omega_A t + \varphi_0)) \sin \omega_0 t \quad (5.19)$$

где m – коэффициент глубины модуляции $m = \Delta U / U_0$.

При этом глубина амплитудной модуляции m пропорциональна углу рассогласования ψ , а в фазе огибающей модуляции заложена информация о направлении углового отклонения БВС относительно РСН. Огибающую амплитудно-модулированного сигнала называют сигналом ошибки. Вид амплитудно-модулированного сигнала, принимаемого бортовой аппаратурой с направления на BBC_2 , показан на рисунке 5.12,б.

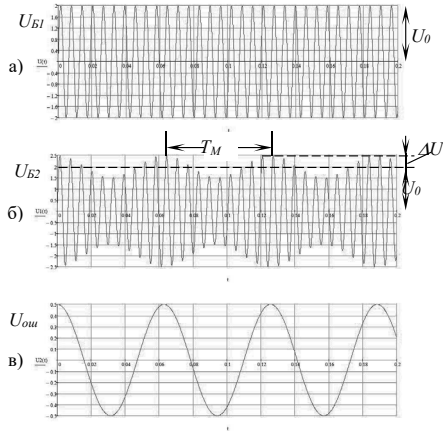


Рисунок 5.12 – Временные диаграммы сигналов, принимаемых бортовой аппаратурой

Таким образом, с помощью сканирующей диаграммы направленности антенной системы передающего канала осуществляется преобразование угла рассогласования в изменение амплитуды принимаемых сигналов.

Для формирования команд управления на борту необходимо сигнал ошибки разложить на две ортогональные составляющие, пропорциональные угловым отклонениям БВС α и β в азимутальной и угломерных плоскостях. Можно показать, что это углы будут определяться выражениями:

$$\begin{aligned} \alpha &= \psi \cos \Phi; \\ \beta &= \psi \sin \Phi; \end{aligned} \quad (5.20)$$

где Φ – угловая координата ракеты в картинной плоскости.

Также к системам радиотелевидения относятся системы наведения по радиозоне. При этом обеспечивается движение БВС в заданной плоскости (радиозоне). Формирование такой плоскости осуществляется путем изменения положения ДН передающей антенны в пространстве. При этом (по аналогии с предыдущей системой) формируется равносигнальная плоскость. Более подробно принцип работы такой системы приведен в [1].

5.4 Системы командного радиотелеуправления

5.4.1 Виды систем командного радиотелеуправления

Системы командного радиотелеуправления позволяют удерживать летательный аппарат на заданной траектории с помощью команд, передаваемых

с командного пункта. Команды формируются на основе информации, полученной на командном пункте с помощью радиоэлектронных систем обзора пространства и целеуказания, систем определения местоположения и параметров движения цели и управляемого БВС. Передача команд на управляемый объект осуществляется с помощью специализированной командной радиолинии.

По способу получения информации о цели различают командное радиотелеуправление (КРТУ) 1-го и 2-го вида.

В системах 1-го вида КРТУ-1 (рисунок 5.13) для получения информации, необходимой при формировании команд, используют аппаратуру, расположенную только на командном пункте КП. Текущие координаты и параметры движения объектов, участвующих в процессе наведения, определяют с помощью РТС сопровождения БВС, РТС обзора и целеуказания и РТС сопровождения цели. По результатам анализа полученной информации в вычислительном устройстве ВУ формируются команды управления для корректировки траектории движения БВС. На борт управляемого объекта команды передаются с помощью командной радиолинии (КРЛ).

Для получения информации о местоположении и параметров движения целей в системах телеуправления 2-го вида КРТУ-2 применяют аппаратуру, расположенную на управляемом объекте. Эта информация с помощью РТС передачи информации передаётся на вычислительное устройство ВУ командного пункта КП. КРЛ передаёт сформированные в ВУ команды на управляемый объект.

Системы КРТУ-1 по сравнению с системами КРТУ-2 имеют более простое построение аппаратуры, расположенной на борту управляемого объекта. Кроме того, бортовая аппаратура обладает высокой помехозащищённостью, так как приёмный канал ориентирован на приём только сигналов командной радиолинии. К недостаткам таких систем можно отнести малую дальность действия, которая ограничивается пределами прямой видимости. Поэтому такие системы применяют в основном для наведения объектов классов «воздух-земля» и «воздух-воздух», в которых командный пункт, формирующий команды управления, находится на борту ВС. В этом случае при формировании команд управления необходимо иметь и учитывать информацию о параметрах движения носителя КП, что усложняет процесс наведения.

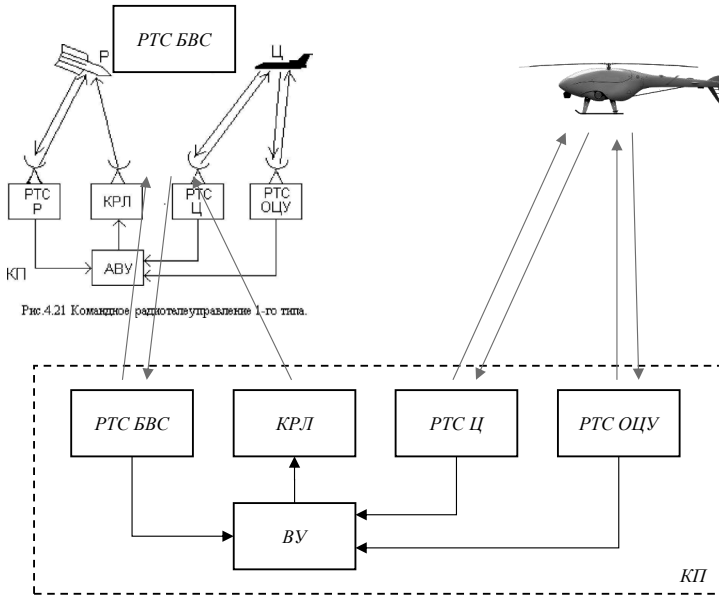


Рисунок 5.13 – Командное радиотелеуправление 1-го типа

Бортовая аппаратура систем КРТУ-2, получающая информацию о цели и ретранслирующая её на командный пункт, значительно увеличивает дальность действия и позволяет осуществлять наведение объектов класса «земля - земля» на низколетящие, наземные и надводные цели.

Однако это существенно увеличивает сложность бортовой аппаратуры и снижает её помехозащищённость, так как приёмный канал открыт со стороны цели и это даёт возможность создавать умышленные помехи системе наведения.

5.4.2 Классы и виды радиокоманд

По условиям исполнения радиокоманды, которые формируются на командном пункте и передаются на объект управления, разделяют на два класса:

- команды в реальном масштабе времени, которые исполняются сразу после приёма их на борту летательного аппарата;
- команды временных программ, которые предварительно записываются в бортовое запоминающее устройство и исполняются в заданный момент времени по сигналу бортового вычислительного устройства (бортовой ЭВМ) или по дополнительной команде, переданной с командного пункта.

Командные радиолинии, как правило, являются многоканальными. В общем случае одна и та же линия может использоваться для одновременной работы с несколькими управляемыми объектами. В связи с этим различают внешние и внутренние адреса команд. Внешний адрес команды определяет объект на который должна поступить переданная команда. Внутренний адрес команды обозначает устройство в составе аппаратуры объекта, которое является потребителем данной команды.

По виду сигналов команды могут быть аналоговыми (непрерывными) и дискретными. Аналоговые команды представляют собой электрические сигналы, параметры которых (ток или напряжение) плавно изменяются с течением времени и могут принимать любые значения в заданных пределах. При формировании аналоговых команд на командном пункте используют вычислительные устройства или различные датчики.

Дискретные команды состоят из отдельных элементов (символов) в виде импульсов электрического тока. Содержание передаваемой команды отражается совокупностью этих элементов. Такие команды могут вырабатываться с помощью ЭВМ или получаться в результате преобразования аналоговых команд в дискретные. Дискретные команды, как правило, передаются на летательный аппарат с помощью цифровых радиолиний, поэтому часто такие команды называют цифровыми.

5.5 Корреляционно-экстремальные системы радиоуправления

Принцип работы корреляционно-экстремальных систем радиоуправления основан на методах распознавания образов. Понятие «образ» представляет собой описание некоторого объекта в виде совокупности определённых признаков. Часто в качестве таких объектов используют изображения радиоориентиров в виде яркостной радиокарты или отрезков реализации одно- или двумерной развёртки рельефа подстилающей поверхности. Такие изображения иногда называют полями и в общем случае они являются функциями двух или более аргументов. Поэтому под образом можно понимать любой фрагмент (отрезок) такого поля, описывающий изображение конкретного участка подстилающей поверхности.

Вид представления образа зависит от потребителя информации: человека-оператора или вычислительного устройства, и может быть аналоговым, цифровым, графическим и т.п.

В системах, использующих методы распознавания образов, осуществляется сравнение текущего изображения подстилающей поверхности с эталонным изображением, полученным заранее (рисунок 5.14).

Сравнение осуществляется с помощью значения взаимной пространственной функции корреляции эталонного и текущего изображений. Наибольшее (экстремальное) значение этой функции содержит информацию о величине относительной дезориентации сравниваемых изображений, а

максимум функции корреляции соответствует их точному совмещению. Поэтому такие системы называют корреляционно - экстремальными. Несовпадение изображений позволяет получить сигнал рассогласования и сформировать команды для управления движением БВС, чтобы возвратить его на требуемую траекторию.

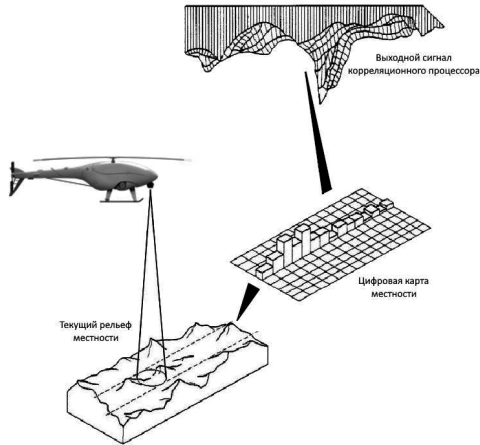


Рисунок 5.14 – Принцип действия корреляционно-экстремальной системы радиоуправления

Обобщенная структурная схема такой системы приведена на рисунке 5.15.

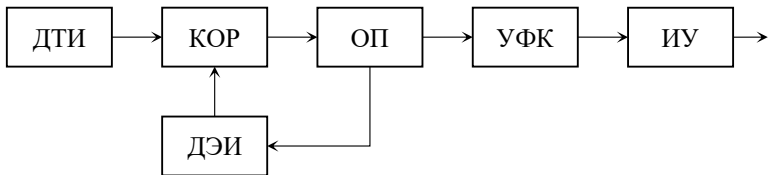


Рисунок 5.15 - Обобщенная структурная схема корреляционно-экстремальной системы радиоуправления

Сигналы с датчика текущего изображения ДТИ и датчика эталонного изображения ДЭИ сравниваются в корреляторе КОР. Автоматический оптимизатор ОП осуществляет поиск координат по наибольшему значению корреляционной функции, обеспечивает управление ДЭИ для соответствующего перемещения эталонного изображения и выдаёт

информацию для устройства формирования командных сигналов УФК. Исполнительное устройство ИУ ликвидирует отклонение летательного аппарата от заданной траектории.

Корреляционно-экстремальный метод управления летательными аппаратами впервые был использован союзниками антигитлеровской коалиции в годы второй мировой войны для определения текущего местоположения ночных бомбардировщиков, совершавших многократные полёты к целям по одним и тем же маршрутам. В первых полётах радиолокационное изображение подстилающей поверхности, полученное на экране обзорной РЛС, фиксировалось с помощью кинокамеры на фотоплёнку. В последующих полётах это изображение принималось в качестве эталонного и сравнивалось с текущим изображением местности с помощью зеркальной системы. Совмещение двух изображений обеспечивало необходимую точность слепого полёта. Такая система представляла собой первую полуавтоматическую корреляционную систему, в которой сравнение изображений осуществлялось оператором.

В современных корреляционно-экстремальных системах текущее и эталонное изображения формирую с помощью различных физических полей, как искусственных (вторичных), так и естественных (первичных). В качестве таких полей используют радиолокационное, оптическое, тепловое, магнитное, гравитационное поля.

Основным преимуществом корреляционно-экстремальных систем является их автономность, высокая помехозащищённость и точность. Точность в основном определяется точностью совмещения текущего информационного и эталонного изображений, при условии корректности и стабильности эталонных карт, и ограничивается размерами ячейки эталонного изображения.

К недостаткам таких систем можно отнести трудности составления сложных эталонных изображений, связанных с выделением устойчивых информационных признаков, не зависящих от освещённости и не подверженных сезонным изменениям. Кроме того, масштаб изображения и его ориентацию необходимо изменять в зависимости от высоты полёта и от углового рассогласования систем координат, в которых получены сличаемые изображения.

Сложность возрастает также с увеличением необходимого количества ячеек эталонного изображения. Количество ячеек зависит от планируемой дальности полёта управляемого объекта и возрастает по квадратичному закону с увеличением дальности. В связи с этим корреляционно-экстремальные системы применяют на относительно небольших дальностях полёта управляемых объектов. Часто такие системы комплексируют с другими, более грубыми, навигационными системами (например инерциальными) и подключают их к управлению объектом на конечном этапе полёта, когда необходимо обеспечение высокой точности управления. Такая комбинация

обеспечивает большую дальность полёта управляемых объектов и высокую конечную точность наведения при приемлемой сложности и стоимости аппаратуры.

6 Радиотехнические системы передачи информации

6.1 Общие сведения

Стремительное развитие БВС в России и за рубежом и развитие радиоэлектроники заставляют постоянно пересматривать требования, выдвигаемые к командно-телеметрическому каналу связи между БВС и наземным комплексом управления (НКУ). На сегодняшний день стало возможным осуществление самолетоуправления автопилотом (АП) при полном отсутствии связи между БВС и НКУ. При этом летное задание выполняется в автономном режиме. Тем не менее, это не позволяет говорить о том, что командно-телеметрическая радиопередача может быть исключена из состава БВС. В силу повышенной сложности и стоимости комплекса при его эксплуатации требуется постоянный контроль за состоянием находящихся в воздухе БВС. Кроме того, иногда возникает необходимость корректировки параметров полета БВС.

Необходимо учитывать, что решаемые современными комплексами БВС задачи требуют наличия высокоскоростных линий передачи информации между БВС и НКУ [2]. Например, задачи оперативного мониторинга или разведки предполагают получение на борту и доставку на НКУ растровых изображений разного разрешения, получаемых с датчиков различных диапазонов длин волн. Наиболее распространенная на сегодняшний день технология передачи информации заключается в непрерывной трансляции изображения по мере его получения в цифровом или аналоговом формате, структура которого не меняется в течение всего полета. Необходимо учесть, что непрерывная трансляция изображений имеет следующие особенности:

- значительная часть визуальной информации может не иметь искомым признаков;
- отсутствует гарантия достоверной доставки информации;
- требуется постоянное излучение сигнала передатчиком, что позволяет легко обнаружить БВС и установить его координаты.

Таким образом, можно сказать, что подсистема управления и радиосвязи БВС представляет собой совокупность различных линий, в которых передаются данные принципиально различного типа, уровня важности, объема, уровня криптозащиты и т.д.

Для управления и обмена данными с БВС организуются следующие направления связи:

– направление «вверх» – организуется от НКУ к БВС и включает в себя направление «вверх» КРУ для передачи команд управления БВС, а также команд управления специальной аппаратурой и техническими средствами полезной нагрузки, размещенными на БВС;

- направление «вниз» – организуется от БВС к НКУ и включает в себя:
 - направление «вниз» КРУ для передачи телеметрической информации (ТМИ) о состоянии подсистем БВС, специальной аппаратуры и технических средств полезной нагрузки, а также квитанций о выполнении команд управления;
 - высокоскоростная линия передачи данных от специальной аппаратуры и технических средств полезной нагрузки, размещенных на БВС.

Вышеуказанные линии связи могут организовываться в различных частотных диапазонах, использовать различные режимы с ретрансляцией и без неё, использовать различные сигнально-кодовые конструкции, специально адаптированные под тип и важность передаваемых данных.

6.2 Особенности организации связи в командной радиолинии управления БПЛА

Командная радиолиния управления в направлениях «вверх» и «вниз» предназначена для передачи наиболее критических данных для процесса нормального управления полетом БВС: команд управления с ПУ и квитанций об их исполнении, программ полета, программ действий в автономном режиме, навигационных и специальных данных, обеспечивающих нормальное функционирование БВС, ТМИ о состоянии отдельных подсистем, остатке топлива и т.д. Указанные данные, как правило, имеют относительно малый объем и требуемую скорость передачи (порядка 2,4-200 кбит/с), однако, должны передаваться в масштабе реального времени.

Для больших и средних БВС, как правило КРУ организуется в режиме прямой видимости с наземным ПУ, а при значительном удалении ПУ – ретрансляцией через узел-ретранслятор. Для малых БВС как специального, так и коммерческого назначения КРУ организуется в режиме прямой видимости с наземным ПУ.

Обобщая материалы различных работ, например [2-3], возможно сформировать следующие обобщенные ТТХ КРУ малых коммерческих БВС. Для таких аппаратов направления «вверх»/«вниз» КРУ организуются в фиксированных частотных диапазонах, которые, как правило, соответствуют использованию на БВС одной или нескольких коммерческих технологий связи:

- RC433: 433 МГц;
- сети 4G: 725-770, 790-830, 850-894 МГц;
- сети CDMA: 850-894 МГц;

- RC868: 868-916 МГц;
- GSM900: 890-915, 935-960 МГц;
- GSM1800: 1710-1880 МГц;
- сети 3G: 2110-2170 МГц;
- сети Wi-Fi на базовой частоте 2,4 ГГц: 2,4-2,5 ГГц;
- сети 4G: 2,5-2,7 ГГц;
- сети Wi-Fi на базовой частоте 5,2 ГГц: 4,9-5,5 ГГц;
- сети Wi-Fi на базовой частоте 5,8 ГГц: 5,5-6,1 ГГц.

Используемые типовые частоты, ширина типовых каналов, типы сигналов и помехоустойчивого кодирования, мощности передатчиков и ТТХ приемных средств определяются соответствующими стандартами на вышеуказанные технологии связи. Данные по наиболее распространённым стандартам Wi-Fi, используемым для управления малыми коммерческими БВС, представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Данные по наиболее распространённым стандартам Wi-Fi, используемым для управления коммерческими малыми БВС

Характеристика	Wi-Fi IEEE 802.11b	Wi-Fi IEEE 802.11g	Wi-Fi IEEE 802.11n
Диапазон частот, ГГц	S (2,4-2,483)	S (2,4-2,483)	S (2,4-2,483), C (5,725-5,875)
Ширина канала, МГц	22	22	20, 40
Мощность передатчика, дБм	до 20	до 20	до 20
Технология разделения каналов	FDMA	FDMA, OFDM	FDMA, OFDM
Используемые сигналы	DBPSK, DQPSK	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
Помехоустойчивое кодирование	код Баркера, комплементарные последовательности, сверточное кодирование		сверточное кодирование $R=5/6$
Скорость передачи дан-ных, Мбит/с	до 11	до 54	до 100
Дополнительные техно-логии помехозащиты	Стандартом предусмотрена воз-можность использования DSSS и ПППЧ		Стандартом предусмотрена возможность использования HR-DSSS и MIMO
Шифрование (опционально)	WEP, WPA, DES, AES-128, AES-256		

Особенностью организации канала «вниз» КРУ в малых коммерческих БВС является то, что фактически сам канал отсутствует, а роль канала передачи

ТМИ от БВС выполняют видеоданные, поступающие от ОЭС БВС и предназначенные для визуального управления со стороны оператора.

ТТХ каналообразующей аппаратуры различных КРУ малых коммерческих БВС представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – ТТХ каналообразующей аппаратуры различных КРУ малых коммерческих БПЛА

Параметр	Значения параметров				
	3D Link	Skyhopper PRO	Picoradio OEM	SOLO7	J11
Наименование КРУ	Geoscan, РФ	Mobilicom, Израиль	Airborne Innovation, Канада	DTC, Великобритания	Redess, Китай
Диапазон частот, ГГц	S (2,4-2,483), C (5,725-5,875)				
Дальность связи, км	20-60	5	н/д	н/д	10-20
Наименование КРУ	3D Link	Skyhopper PRO	Picoradio OEM	SOLO7	J11
Скорость передачи данных, Мбит/с	0,023-64,9	1,6-6	0,78-28	0,144-31,668	1,5-6
Задержка передачи данных, мс	1-20	25	н/д	15-100	15-30
Мощность передатчика, дБм	25	н/д	27-30	20	30
Чувствительность приемника, дБм:	-78,6... -122	-101	-76... -101	-95... -104	-90... -97
Энергетический бюджет КРУ, дБ	103-147	н/д	103-131	н/д	120-127
Поддерживаемые полосы частот, МГц	4-20	4,5; 8,5	2; 4; 8	0,625; 1,25; 2,5; 6; 7; 8	2; 4; 8
Режим организации связи	Дуплекс	Дуплекс	Дуплекс	Симплекс	Дуплекс
Поддержка разнесенного приема	да	да	да	да	да
Отдельный канал для управления/телеметрии	да	да	да	нет	да
Используемые протоколы управления БВС в КРУ / ТМИ	MAVLink, проприетарные	MAVLink, проприетарные	нет	нет	MAVLink
Поддержка мультиплексирования в канале КРУ / ТМИ	да	да	нет	нет	н/д
Используемые сетевые топологии:					
«точка – точка»	да	да	да	да	да
«точка – многоточка»	да	да	да	нет	да
ретрансляция данных	да	да	да	нет	да
Энергопотребление блока связи на БВС, Вт	6-7	н/д	4,8	4,5-7	8
Энергопотребление блока связи на ПУ, Вт	7	н/д	4,8	8	5

Параметр	Значения параметров				
Габариты бортового блока, длина × ширина × высота, мм	77×45×25	74×54×26	40×40×10 (без корпуса)	67×68×22	76×48×20
Масса бортового блока, г	89	105	17,6 (без корпуса)	135	88

6.3 Особенности организации связи в радиолиниях передачи данных с БВС

При организации линий передачи данных «вниз» по направлению «БВС – ПУ» необходимо учитывать следующие особенности:

- специальная аппаратура и технические средства полезной нагрузки, размещенные на БВС, формируют потоки данных значительного объема (таблица 6.3), при этом в большинстве случаев передачу этих данных необходимо вести в режиме времени, близком к реальному (например, видеоданные от ОЭС БВС зачастую используются оператором для управления БВС в ручном режиме);

- большой объем формируемых данных, а также ограниченность доступного частотного ресурса предопределяет необходимость использования различных способов и технологий оптимизации пропускной способности и повышения скорости линии передачи данных: использование технологии адаптивной смены сигнально-кодированных конструкций АСМ (*Adaptive Coding and Modulation*); технологии спектрального уплотнения OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), технологий сжатия данных на борту. При этом небольшие габариты БВС препятствуют размещению на нем направленных антенных систем с относительно высоким коэффициентом усиления, однако возможно использование антенных систем МИМО (*Multiple Input Multiple Output*) на основе нескольких простых антенн;

- большой объем формируемых данных, необходимость их передачи в режиме реального времени, а также отсутствие высокопроизводительной аппаратуры шифрования на борту БВС, предопределяет использование либо низкого уровня криптозащиты, либо ее полное отсутствие.

Обобщая материалы работ [2-3] и других авторов, можно сформировать следующие обобщенные ТТХ радиолиний передачи данных с коммерческих малых БВС.

Для коммерческих малых БВС направления «вверх»/«вниз» КРУ организуются в фиксированных частотных диапазонах, которые, как правило, со-ответствуют использованию на БВС одной или нескольких коммерческих технологий связи:

- RC433: 433 МГц;

- сети 4G: 725-770, 790-830, 850-894 МГц;
- сети CDMA: 850-894 МГц;
- RC868: 868-916 МГц;
- GSM900: 890-915, 935-960 МГц;
- GSM1800: 1710-1880 МГц;
- сети 3G: 2110-2170 МГц;
- сети Wi-Fi на базовой частоте 2,4 ГГц: 2,4-2,5 ГГц;
- сети 4G: 2,5-2,7 ГГц;
- сети Wi-Fi на базовой частоте 5,2 ГГц: 4,9-5,5 ГГц;
- сети Wi-Fi на базовой частоте 5,8 ГГц: 5,5-6,1 ГГц.

Таблица 6.3 – Приблизительные оценки интенсивности потоков данных, формируемых специальной аппаратурой и техническими средствами полезной нагрузки БВС

Технические средства полезной нагрузки	Кол-во источников данных на БВС	Интенсивность потока данных от одного источника без сжатия	Интенсивность потока данных от одного источника с учетом предварительного сжатия
ТВ-камера	1-4	10-150 Мбит/с	2-6 Мбит/с
Фото-камера	1-4	до 20 Мбит/с	до 4 Мбит/с
Тепловизионная аппаратура	1-4	до 0,5 Мбит/с	до 0,5 Мбит/с
Лазерная аппаратура	1	до 0,5 Мбит/с	до 0,5 Мбит/с
РЛС	1	5-200 Мбит/с	до 10 Мбит/с
РРТР аппаратура (с обработкой сигналов РЛС на борту)	1	до 5 Мбит/с	0,2-1 Мбит/с

Используемые типовые частоты, ширина типовых каналов, типы сигналов и помехоустойчивого кодирования, мощности передатчиков и ТТХ приемных средств определяются соответствующими стандартами на вышеуказанные технологии связи и соответствуют ТТХ, представленным выше для КРУ на основе технологии Wi-Fi (таблицы 6.1-6.2).

Основным типом данных, передаваемых по каналу «вниз» являются видеоданные, поступающие от ОЭС БВС и предназначенные для визуального управления со стороны оператора. Формат передаваемых видеоданных: MPEG-2/4, MPEG-TS, H.264.

Для передачи видеоданных, а также мультиплексирования видеоданных и ТМИ, помимо радиолиний на основе Wi-Fi могут использоваться радиолинии на основе стандартов DVB, предназначенных для цифрового телевизионного

вещания: DVB-T1/T2 или DVB-S2 (таблица 6.4). Для передачи высокоскоростных потоков основным требованием является энергетическая эффективность, поэтому в условиях многолучевого распространения в последнее время предпочтение отдается технологии DVB-T2 (с использованием OFDM), как наиболее устойчивой к межсимвольной интерференции, потери от которой могут достигать 10дБ. При этом значительный пик-фактор, свойственный радиосигналу DVB-T2 с множеством ортогональных несущих, компенсируется умеренными требованиями к средней выходной мощности передающего устройства.

Таблица 6.4 – ТТХ радиолиний на основе стандартов DVB

Характеристика	DVB-T1	DVB-T2	DVB-S2
Диапазон частот, ГГц	S (2,4-2,483), C (5,725-5,875)		
Ширина канала, МГц	6; 7; 8	1,7; 5; 6; 7; 8; 10	36
Технология разделения/уплотнения каналов	FDMA, OFDM		FDMA
Используемые сигналы	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM	QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK
Помехоустойчивое кодирование	FEC, PC	FEC, LDPC-код, БЧХ	FEC, LDPC-код
Скорость кода	1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6	1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10
Скорость передачи данных, Мбит/с	до 31,67	до 50,34	
Технологии помехозащиты	ACM	ACM	ACM (прием до –2,4 дБ)
Инкапсуляция данных	MPEG-TS	MPEG-4, GTS, PLP	MPEG-4, PLP

6.4 Командно-телеметрические радиолинии связи с БВС

В случае малых БВС (взлетная масса до 5 кг) вследствие ограничений по габаритам и массе приемопередающего оборудования рациональным является использование единого радиоканала связи для передачи командно-телеметрических данных и данных полезной нагрузки. Посадка таких аппаратов осуществляется, как правило, при помощи парашюта, что не требует дополнительного радиоканала связи для передачи изображения с видеокамер БВС, необходимого при ручной посадке. Дополнительным радиоканалом связи является только линия передачи данных системе автоматического спасения (САС). Для удовлетворения требований по пропускной способности канала связи при передаче как данных телеметрии, так и данных полезной нагрузки,

необходимо расширять полосу частот приемопередающего оборудования и использовать спектрально-эффективные методы модуляции, что приводит к повышенным требованиям по отношению сигнал/шум (ОСШ) на входе приемника, снижению дальности действия радиосистемы, повышению вероятности битовой ошибки и т. д. Таким образом, дополнительная связь оборудования первой и второй групп приводит к ухудшению рабочих характеристик устройств первой группы. Высокая степень интеграции устройств двух групп приведет к уменьшению значения вероятности безотказной работы жизненно важных элементов комплекса. Исходя из этого, на комплексах БВС с взлетной массой более 5 кг целесообразным является использование отдельных радиолиний связи для передачи командно-телеметрических данных и данных полезной нагрузки. При этом на первый план выходят вопросы электромагнитной совместимости приемопередающего оборудования, частотного разделения каналов связи и размещения антенно-фидерного оборудования на борту БВС.

Выбор рабочего частотного диапазона радиоканала связи обуславливается несколькими факторами: требованиями к массе, габаритам и потреблению приемопередающего устройства БВС, необходимой дальностью работы при заданной вероятности битовой ошибки; возможностью получения лицензии на работу в необходимом диапазоне или возможностью безлицензионной работы.

Для систем связи малых БВС решающими факторами при выборе частотного диапазона являются масса и габариты бортового приемопередатчика и антенно-фидерного устройства (АФУ). Целесообразным является выбор диапазона сверхвысоких частот (СВЧ), при этом удастся создать антенну малых размеров, способную разместиться в профиле крыла. Плотная компоновка оборудования внутри малого БВС не позволяет эффективно использовать приемопередатчики большой мощности с укороченными антеннами ультракоротковолнового диапазона (УКВ) вследствие проблем с электромагнитной совместимостью и большим влиянием окружающих объектов на характеристики антенны. Одним из подходящих частотных диапазонов является диапазон 2,4 ГГц. Безлицензионная работа в этом диапазоне разрешена только для внутриофисного оборудования, поэтому необходимо рассматривать варианты получения лицензии.

К системам связи БВС среднего и большого класса предъявляются более жесткие требования по дальности работы, помехозащищенности и вероятности битовой ошибки. В этом случае является возможным и оптимальным комплексирование нескольких каналов связи, работающих в разных частотных диапазонах (рисунок 6.1).

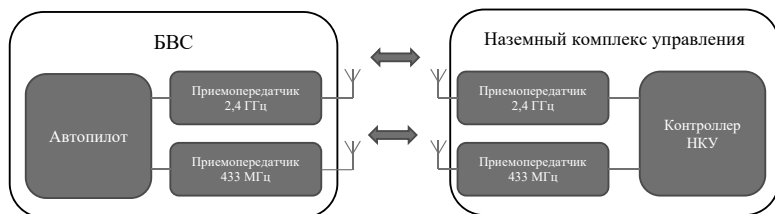


Рисунок 6.1 - Пример комплексирования радиоканалов связи

В процессе работы системы связи оцениваются вероятности битовой ошибки для каждого канала связи и принимается решение о распределении командно-телеметрического потока данных между каналами. Использование нескольких каналов связи повышает надежность системы передачи данных и в то же время является избыточным с точки зрения эффективного использования радиочастотного спектра. Одним из способов повышения эффективности комплексированной системы связи является адаптивная работа системы, которая подразумевает передачу по командно-телеметрическим каналам связи части данных полезной нагрузки, объем которых варьируется в зависимости от текущих условий передачи радиосигнала.

Как правило, максимальное расстояние для прямой радиосвязи между БВС гражданского назначения и НКУ на сегодняшний день составляет не более 100 км. Для командно-телеметрической связи на больших расстояниях возможно использование спутниковой связи. В этом случае поток данных ограничивается минимально необходимой информацией о состоянии БВС, интервал передачи которой может составлять, например, от 30 до 300 с.

Перспективным направлением в развитии систем связи с БВС является использование частотных диапазонов выше 5 ГГц. При этом становится возможной передача большого объема данных полезной нагрузки в режиме реального времени (например, это могут быть изображения с датчиков излучения различного диапазона длин волн). Факторами, резко ограничивающими радиус действия радиосистемы связи при использовании данных диапазонов, являются сильная зависимость условий распространения электромагнитных волн от погодных условий, необходимость прямой видимости и влияние многолучевости.

Рассмотрим возможные ситуации взаимного расположения БВС и НКУ (рисунок 6.2).

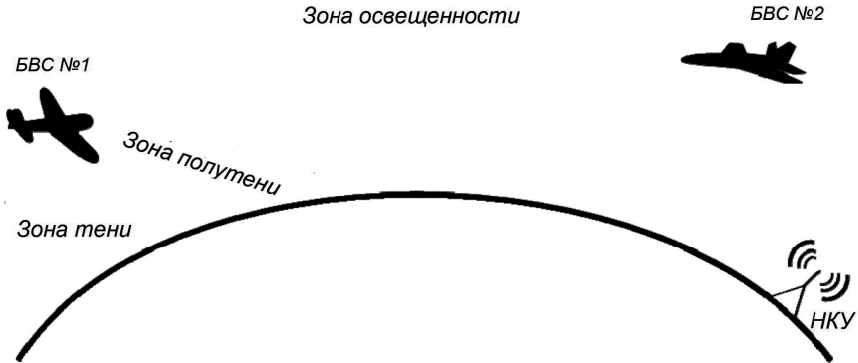


Рисунок 6.2 – Зоны освещенности, полутени и тени

Для обеспечения связи на больших расстояниях необходимо увеличивать расстояние до радиогоризонта для наземной и бортовой антенн. Максимальная дальность радиосвязи (без учета влияния различных видов атмосферной рефракции) будет определяться суммой дальностей радиогоризонта для антенны НКУ и БВС. При этом области воздушного пространства можно условно разделить на зону освещенности, зону полутени и зону тени (рисунок 6.2). Зона полутени (в ней находится БВС № 1) является переходной между зоной освещенности (БВС № 2), в которой еще возможен уверенный прием, и зоной тени, прием в которой может быть осуществлен только благодаря дифракции сигнала вокруг земного шара.

Максимальная дальность радиосвязи определяется следующим выражением:

$$r_0 = 3,57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (6.1)$$

где h_1 – высота подъема первой антенны, м; h_2 – высота подъема второй антенны, м; r_0 – максимальная дальность радиосвязи, км.

Как правило, антенна НКУ является мобильной и устанавливается на высоте не более 10 м. Зависимость максимальной дальности радиосвязи от высоты полета БВС при некоторых заданных высотах подъема антенны НКУ показана на рисунок 6.3. Зависимость максимальной дальности связи от высоты подъема антенны НКУ слабая, поэтому высота мачты для установки наземной антенны определяется необходимостью снижения влияния многолучевости, с учетом возможных препятствий на пути распространения сигнала (рельеф местности, строения).

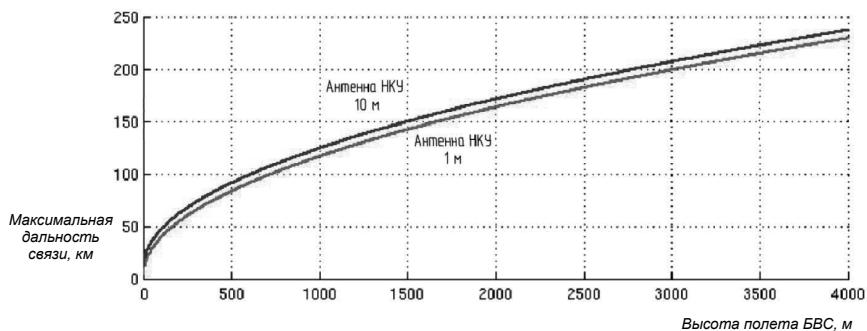


Рисунок 6.3 - Максимальная дальность связи в зависимости от высоты подъема антенн БВС и НКУ

В зависимости от рабочей дальности полетов БВС, в качестве антенны НКУ используются либо антенны с большим коэффициентом направленного действия (КНД), либо слабонаправленные антенны. Для антенн с большим КНД необходимо использование опорно-поворотного устройства и системы слежения за БВС, так как ширина основного лепестка диаграммы направленности (ДН) таких антенн, как правило, менее 10° .

Несмотря на то, что к наземному оборудованию не предъявляется жестких требований по массово-габаритным характеристикам, использование в качестве антенны НКУ сканирующей цифровой антенной решетки (АР) не всегда оправдано ввиду ее большой стоимости, за исключением случаев использования АР для одновременного слежения за несколькими ЛА.

Рассмотрим вопрос выбора вида модуляции сигнала в приеме-передатчике. При сравнении различных видов модуляции пользуются критериями спектральной и энергетической эффективности. При этом энергетическая эффективность определяется как энергия, которую необходимо затратить на передачу одного бита информации с заданной достоверностью, а спектральная эффективность определяется как полоса частот, которая необходима для передачи информации с определенной скоростью. Основным требованием при создании системы связи с БВС является обеспечение возможности передачи данных с заданной скоростью и вероятностью ошибки при больших расстояниях между ЛА и НКУ. Типовое значение необходимой скорости передачи телеметрических данных с борта на землю составляет 115200 бит/сек при вероятности битовой ошибки не более 10^{-8} . В некоторых случаях допустимо снижение скорости до 38400 бит/сек для поддержания вероятности битовой ошибки на том же уровне. Максимальное значение полосы частот, занимаемой радиосистемой, ограничивается требованиями Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) и зависит от рабочего диапазона частот и

типа работы (лицензионная, безлицензионная). Например, для диапазона частот 2,4 ГГц полоса занимаемых частот по уровню -3 дБ не должна превышать 15 МГц, а по нулям спектра – не более 22 МГц. Таким образом, целесообразным является полное использование разрешенного частотного диапазона с применением расширяющих спектр-методов (прямое расширение спектра, расширение спектра методом псевдослучайной перестройки несущей частоты). Для обеспечения максимальной дальности связи в этом случае необходимо использовать наиболее энергетически эффективные методы модуляции. Сравнение энергетической эффективности некоторых видов модуляции показано на рисунке 6.4.

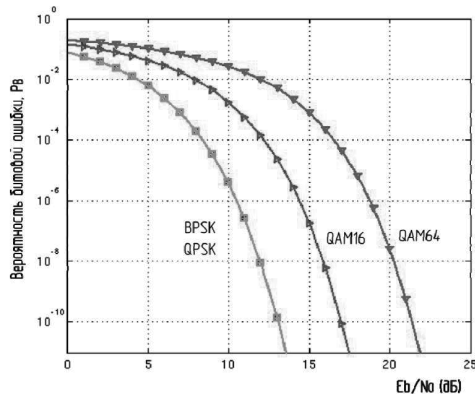


Рисунок 6.4 - Вероятности битовой ошибки для различных видов модуляции (когерентное детектирование, идеальная синхронизация, без кодирования)

С увеличением позиционности модуляции вероятность битовой ошибки увеличивается, т. е. для поддержания заданного уровня битовой ошибки необходимо увеличивать ОСШ на входе приемника. Поэтому целесообразным является использование многопозиционной модуляции только при малых расстояниях между ЛА и НКУ. Для обеспечения максимальной дальности связи необходимо использовать энергетически наиболее выгодные виды модуляции, такие как двоичная фазовая манипуляция (BPSK) и квадратурная фазовая манипуляция (QPSK). Стоит отметить, что при равной энергетической эффективности этих видов модуляции, QPSK в два раза спектрально эффективнее, чем BPSK (без учета межсимвольной интерференции). В общем случае, в условиях ограниченной полосы частот наиболее эффективным методом модуляции является квадратурная амплитудная манипуляция (QAM), что определяется наибольшими расстояниями между точками в сигнальном созвездии в отличие от чисто фазовой манипуляции или амплитудной

манипуляции. В большинстве случаев квадратурная амплитудная манипуляция более эффективна, чем различные виды частотной манипуляции [4]. Число уровней манипуляции определяется ОСШ на входе приемника, которое проще всего найти через оценку вероятности битовой ошибки по известной зависимости.

Для когерентного детектирования сигналов BPSK и QPSK необходимо применение схем восстановления несущего колебания в приемнике (схема с возведением сигнала в квадрат, петля Костаса и др.). При этом возникает проблема решения фазовой неоднозначности восстанавливаемого несущего колебания, которая может быть решена несколькими способами: использованием фазоразностной манипуляции (ФРМ); введением уникальной последовательности бит перед блоком данных, дающей острый автокорреляционный пик при приеме сигнала; использованием методов канального кодирования. Фазовая манипуляция в идеальных условиях имеет более высокую помехоустойчивость в сравнении с ФРМ (на ~3 дБ). Большое распространение систем с ФРМ объясняется их более простой реализацией, что на сегодняшний день не является принципиальным фактором.

Одной из актуальных задач на сегодня является создание сетевых систем связи с кодовым разделением, позволяющих передавать данные как между БВС и НКУ, так и транзитом через все доступные БВС. При этом для обеспечения устойчивой связи с удаленным БВС возможно использовать малые БВС в качестве ретрансляторов сигнала.

Список использованных источников

1. Никольский Б.А. Бортовые радиоэлектронные системы [электронный учебник]. – Самара, 2013, 417 с.
2. Боев Н.М. Анализ командно-телеметрической радиолинии связи с беспилотными летательными аппаратами // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2012. – Вып. 2 (42). – с. 86-91
3. Верба В. С., Меркулов В. И. Теоретические и прикладные проблемы разработки систем радиоуправления нового поколения // Радиотехника. 2014. № 5. С. 39-44.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М. : Вильямс, 2003.
5. Антипов В. Н., Горайнов В. Т., Культ А. И. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / под ред. В. Т. Горяинова. М.: Радио и связь. 1988. 304 с.
6. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. М : Радиотехника. 2007. 376 с.
7. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника. 2005. 368 с.
8. Ярлыков М.С., Богачев А.С., Меркулов В.И., Дрогалин В.В. Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением. Т. 1. Теоретические основы / Под ред. М.С. Ярлыкова. М.: Радиотехника. 2012.
9. Верба В.С., Меркулов В.И., Миляков Д.А., Чернов В. С. Интегрированные многодатчиковые комплексы мониторинга окружающего пространства // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 4.
10. Патрик Э. Основы теории распознавания образов. М.: Сов. радио. 1980.
11. Трифонов А.П., Шинаков Ю.С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь. 1985.