

Ю. Н. ПАНАСЮК, А. П. ПУДОВКИН, А. И. СУСТИН

# ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ



Тамбов  
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2026

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тамбовский государственный технический университет»**

**Ю. Н. ПАНАСЮК, А. П. ПУДОВКИН, А. И. СУСТИН**

**ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ  
В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ  
СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ  
ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ**

Рекомендовано Научно-техническим советом  
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»  
в качестве монографии

*Научное электронное издание*



---

Тамбов  
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2026

УДК 621.396.6.001.1:527.62

ББК 32.95

П88

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Теоретическая и экспериментальная физика»  
ФГБОУ ВО «ТГУ им. Г. Р. Державина»

*И. И. Пасечников*

Доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и  
микропроцессорных систем» ФГБОУ ВО «ТГТУ»

*Т. И. Чернышова*

П88 **Панасюк, Ю. Н.**

Обработка информации в информационно-измерительных системах управления воздушным движением [Электронный ресурс] : монография / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин, А. И. Сустин. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2026. – 1 электрон. опг. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium IV ; RAM 512 Mb ; необходимое место на HDD 3,4 Mb; Windows 7/8/10/11 ; дисковод CD-ROM ; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-8265-2988-1

Изложены принципы калмановской фильтрации, методы описания моделей воздушных судов. Проведены синтез и исследование алгоритмов оценки фазовых координат траекторного движения воздушных судов на основе вторичной и третичной обработки информации. Предложена методика оценки эффективности информационно-измерительных систем управления воздушным движением.

Предназначена для бакалавров, магистрантов, аспирантов, преподавателей вузов направления 11.00.00 «Электроника, радиотехника и системы связи».

УДК 621.396.6.001.1:527.62

ББК 32.95

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.  
Незаконное копирование и использование данного продукта запрещено.*

**ISBN 978-5-8265-2988-1**

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2026

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

---

АСЦ – автоматическое сопровождение целей  
БЗ – ближняя зона  
БПРМ – ближний приводной радиомаяк  
ВД – воздушное движение  
ВС – воздушное судно  
ВПП – взлетно-посадочная полоса  
ДН – диаграмма направленности  
ДПРМ – дальний приводной радиомаяк  
ЗГРЛС – загоризонтная радиолокационная станция  
ИИС – информационно-измерительная система  
КУР – курсовой угол радиостанции  
ЛВ – линия визирования  
МРМ – маркерный радиомаяк  
МПРЛС – многопозиционная радиолокационная станция  
НБП – нарушение безопасности полетов  
НП – непопадание в область безопасности  
ОБ – область безопасности  
ПКС – предупреждение конфликтных ситуаций  
ПОБ – пересечение области безопасности  
РЛИ – радиолокационная информация  
РЛС – радиолокационная станция  
РЭК – радиоэлектронный комплекс  
СКО – среднеквадратическая ошибка  
ССС – система со случайной скачкообразной структурой  
ТОИ – третичная обработка информации  
УВД – управление воздушным движением  
ФАР – фазированная антенная решетка  
ЭВМ – электронная вычислительная машин  
ICAO – International Civil Aviation Organization (Международная организация гражданской авиации)

## ВВЕДЕНИЕ

---

Перед современными информационно-измерительными системами управления воздушным движением (ИИС УВД) с точки зрения совершенствования входящих в них радиоэлектронных систем по сопровождению траекторий воздушных судов (ВС) необходимо решать следующие задачи [1, 2, 12, 20]:

- повышение точности и достоверности определения координат и параметров движения ВС (скорость, курс, высота), особенно для маневрирующих целей;

- использование третичной обработки информации (ТОИ), что позволяет улучшить оценку координат и прогнозирование движения ВС;

- синтез и анализ помехозащищенных высокоточных алгоритмов и оценка параметров радиолокационных сигналов для работы в сложных условиях помех и загруженного воздушного пространства;

- интеграция данных от радиолокационных станций (РЛС) и других источников информации о кинематических и динамических параметрах ВС, чтобы создать комплексную и достоверную картину воздушной обстановки;

- автоматизация процессов сопровождения и отображения информации о ВС для снижения нагрузки на диспетчеров и повышения оперативности принятия решений;

- разработка и внедрение новых моделей движения ВС и алгоритмов обработки, учитывающих современные требования к безопасности и эффективности полетов;

- соответствие международным и национальным стандартам и требованиям к радиотехническому обеспечению полетов, включая нормы международной организации гражданской авиации (International Civil Aviation Organization) ИКАО (ICAO).

Эти задачи направлены на обеспечение безопасности полетов, предотвращение столкновений и регулирование воздушного движения в соответствии с современными требованиями.

Повышение характеристик точности, достоверности и помехозащищенности ИИС УВД должно строиться на использовании комплексного подхода, объединяющего передовые методы обработки сигналов, современные технологии сбора и интеграции данных, а также интеллектуальные алгоритмы.

# 1. ВИДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

---

## 1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Информационно-измерительные системы управления воздушным движением (ИИС УВД) – это комплекс высокотехнологичных средств, которые автоматически собирают информацию о координатах и параметрах воздушных судов (ВС), обрабатывают информацию для решения основных задач авиадиспетчерами [12, 20]:

- обеспечение пропускной способности и безопасности воздушного движения;
- предупреждение столкновений ВС (обеспечение заданного расстояния между ВС в горизонтальной и вертикальной плоскостях);
- обмен информацией с летными экипажами для обеспечения заданной траектории ВС в воздушном пространстве и на аэродромах.

На современном рабочем месте авиадиспетчера отображается информация из разных источников [20, 30]:

- карта воздушного пространства;
- координатная радиолокационная информация в оцифрованном аналоговом виде;
- координатная радиолокационная информация в цифровом виде (метки ВС);
- полетная радиолокационная информация и оперативно вводимые данные по ВС в виде формуляров сопровождения;
- пеленгационная информация в виде линий радиопеленга;
- план полетов;
- справочная и нормативная информация.

Первоначально основными источниками информации ИИС УВД являлись диспетчерские и трассовые радиолокационные станции (РЛС). Обработка радиолокационной информации осуществлялась авиадиспетчером, который наблюдал за воздушной обстановкой на экране индикаторов, где отображалась радиолокационная информация в виде отметок от ВС. По отметкам от ВС на экране индикатора РЛС авиадиспетчером визуально проводилась оценка измерения дальности, угловых координат ВС относительно РЛС.

По мере развития электронных вычислительных машин (ЭВМ) появились возможности добавления функции автоматического сопровождения ВС, что обеспечило автоматическое измерение координат и параметров движения ВС.

В многопозиционных наземных РЛС обработка радиолокационной информации подразделяется на три этапа [20]:

- *первичная обработка* обеспечивает отдельной РЛС обнаружение сигнала ВС на фоне шумов и измерение ее координат и радиальной скорости;

– *вторичная обработка* предусматривает: объединение (отождествление) отметок от ВС, полученных в разные моменты времени (в разных обзорах РЛС), чтобы определить, принадлежат ли они одной и той же цели; сопровождение траекторий (определение и прогнозирование траекторий движения ВС на основе последовательности объединенных отметок); фильтрация сигналов после первичной обработки (уточнение параметров движения ВС (координат и радиальной скорости) путем статистической обработки данных; автоматический захват и сопровождение ВС; экстраполяция (прогнозирование) будущего положения ВС с учетом текущей и предыдущей информации ВС;

– *третичная обработка* объединяет параметры траекторий ВС, полученных от нескольких РЛС для повышения качества, непрерывности и достоверности информации для принятия решений авиадиспетчером для изменения траектории ВС (синхронизация параметров от ВС, поступающих от разных РЛС, отождествление координат и параметров ВС от разных источников информации, усреднение и фильтрация сигналов вторичной обработки для повышения точности определения местоположения и параметров движения ВС).

## 1.2. ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

На начальном этапе первичной обработки радиолокационной информации происходит обнаружение отраженных от ВС сигналов.

Процесс обнаружения основан на статистической теории принятия решений, поскольку принятый отраженный сигнал от ВС всегда является смесью полезного сигнала и случайного шум.

Принятый сигнал поступает на вход обнаружителя. В обнаружителе принятый сигнал проходит через согласованный фильтр (коррелятор), который позволяет увеличить отношение сигнал/шум. Затем обработанный сигнал поступает на пороговое устройство, где сравнивается с пороговым значением обнаружителя.

Если уровень сигнала превышает порог, принимается решение о наличии ВС. Если уровень сигнала ниже порога, принимается решение об отсутствии ВС.

Качество работы обнаружителя описывается двумя основными вероятностными характеристиками:

– вероятностью правильного обнаружения (вероятность того, что ВС будет обнаружено, если ВС действительно есть в зоне обнаружения);

– вероятностью ложной тревоги (вероятность того, что будет принято решение о наличии ВС, хотя на самом деле поступает на вход обнаружителя только шум или помеха).

Для повышения эффективности обнаружения используются различные методы [20, 24, 30]:

1. Согласованная фильтрация. Используется фильтр, «настроенный» на форму зондирующего сигнала, что обеспечивает максимальное отношение сигнал/шум на выходе.

2. Корреляционная обработка. Сравнение принятого сигнала с эталонным сигналом (опорным) с помощью коррелятора.

3. Межпериодное накопление. Накопление сигналов от нескольких зондирующих импульсов для увеличения энергии сигнала относительно шума, особенно актуально для обнаружения слабых или малозаметных ВС.

4. Адаптивные методы. Автоматическая подстройка порога или параметров фильтра в зависимости от меняющейся помеховой обстановки.

Измерение координат и радиальной скорости ВС – это следующий этап первичной обработки радиолокационной информации после обнаружения сигнала.

РЛС измеряет координаты ВС в полярной или сферической системе координат: дальность, азимут и угол места.

Измерение дальности основано на фиксации времени задержки между моментом излучения зондирующего сигнала и моментом прихода отраженного сигнала.

Измерение угловых координат (азимут и угол места) осуществляется направленными антеннами.

Для измерения радиальной скорости используется эффект Доплера.

Таким образом, первичная обработка информации позволяет обнаружить ВС и измерять его координаты и радиальную скорость для построения и сопровождения траекторий ВС.

### 1.3. ВТОРИЧНАЯ ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Главная задача вторичной обработки – это обнаружение и сопровождение траекторий движения ВС. Для обнаружения и сопровождения траекторий движения ВС используются отметки, которые формируются в устройстве первичной обработки информации.

Отметка – совокупность кодов дальности, азимута, угла места и радиальной скорости в определенный дискретный момент времени. Отметки, полученные в нескольких обзорах РЛС, позволяют сформировать траекторию движения ВС.

Вторичная обработка радиолокационной информации основывается на использовании методов математического аппарата и алгоритмов цифровой обработки информации.

Методы математического аппарата [16, 20, 30]:

– теория вероятности и математическая статистика используются для оценки параметров движения ВС, фильтрации случайных ошибок измерений, принятия решений об обнаружении и отождествлении отметок;

- теория случайных процессов применяется для моделирования сигналов, помех и динамики движения ВС;
- линейная алгебра и матричные вычисления используются при реализации алгоритмов калмановской фильтрации;
- теория оптимального оценивания и фильтрации извлекает максимально точную информацию о параметрах движения ВС из зашумленных и неполных измерений, поступающих от первичной обработки РЛС.

Алгоритмы цифровой вторичной обработки РЛС [17, 20, 30, 36]:

1. Алгоритмы траекторного сопровождения и фильтрации обеспечивают минимизацию ошибок измерений и формирование непрерывных, сглаженных траекторий движения целей:

- фильтр Калмана – наиболее распространенный алгоритм для линейных систем, оптимально оценивает текущее состояние ВС (координаты, скорость, ускорение) и предсказывает положение ВС между обзорами РЛС или в случае временной потери сигнала, используя динамическую модель движения ВС и данные измерений РЛС;

- расширенный фильтр Калмана предназначен для работы в системах, где модель движения ВС или модель измерения ВС описываются нелинейными математическими функциями;

- многомодельная фильтрация применяется для сопровождения маневрирующих целей, при этом используются параллельно несколько моделей движения ВС (модель прямолинейного движения, модель постоянного ускорения) и взвешенно объединяет результаты оценки параметров ВС этих моделей, выбирая наиболее вероятную модель в каждый момент времени.

2. Алгоритмы объединения данных решают задачу сопоставления новых радиолокационных отметок (измерений) с уже существующими траекториями ВС:

- метод стробов определяет «окно» (строб) вокруг прогнозируемого положения ВС, учитываются новые отметки для формирования траектории ВС, которые попали в этот строб;

- алгоритм совместного распределения вероятностей вычисляет вероятности принадлежности каждой новой отметки к каждой из существующих траекторий ВС и использует эти вероятности для взвешенного обновления состояния всех ВС;

- алгоритм многогипотезного сопровождения формирует и поддерживает несколько параллельных гипотез о возможных траекториях ВС, разрешая неоднозначности отождествления путем отслеживания всей истории развития событий.

3. Вспомогательные алгоритмы:

- алгоритмы прогнозирования служат для расчета упрежденного положения ВС на следующий цикл обзора РЛС;

- алгоритмы формирования новой траектории и прекращение сопровождения ВС;

- нейросетевые алгоритмы применяются для повышения достоверности, точности и автоматизации процессов, решая задачи, которые затруднено эффективно решать классическими методами;
- алгоритмы траекторного сопровождения объединяют (отождествляют) отметки от одного и того же ВС, полученные в разные моменты времени (обзоры), в единую траекторию;
- алгоритмы разрешения конфликтных ситуаций применяются, когда несколько отметок попадают в один строб или одна отметка может быть отнесена к разным траекториям;
- алгоритмы распознавания и классификации ВС позволяют класс объекта (самолет, вертолет, беспилотный летательный аппарат) на основе анализа его характеристик и параметров движения;
- алгоритмы обработки в многопозиционных системах отождествляют и объединяют информацию от нескольких разнесенных РЛС для повышения достоверности, точности и непрерывности сопровождения;
- адаптивные алгоритмы позволяют системе динамически подстраивать параметры обработки под изменяющиеся условия наблюдения ВС.

#### 1.4. ТРЕТИЧНАЯ ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

ИИС УВД, кроме рассмотренных выше задач по обработке информации, поступающей от одной РЛС, решают еще одну задачу, которая связана с объединением информации о ВС, полученных от нескольких РЛС или первичных постов обработки РЛИ, и созданием общей картины воздушной обстановки [20].

Обработку РЛИ, поступающей от нескольких источников, условимся называть третичной обработкой информации (ТОИ).

Ввиду того, что зоны обзора РЛС или зоны ответственности постов обычно перекрываются, сведения об одном и том же ВС могут поступать одновременно от нескольких станций. В идеальном случае такие отметки должны накладываться одна на другую. Однако на практике этого не наблюдается из-за систематических и случайных ошибок в измерении координат, различного времени локации, а также из-за ошибок пересчета координат между точками стояния источника и приемника информации.

Главной задачей третичной обработки является решение вопроса, сколько ВС находится в действительности в зоне ответственности. Для решения этой задачи необходимо выполнить следующие операции:

- произвести сбор донесений от источников;
- привести отметки к единой системе координат и единому времени отсчета;
- установить принадлежность отметок к целям, т.е. решить задачу отождествления отметок;
- выполнить укрупнение информации.

Для решения этих задач используются все характеристики ВС.

Устройства третичной обработки реализуются на специализированных ЭВМ с полной автоматизацией всех выполняемых операций. Однако иногда для упрощения автоматических устройств некоторые операции ТОИ могут производиться по командам и с участием оператора. В частности, таким образом выполняются операции отождествления и укрупнения.

Третичная обработка является завершающим этапом получения информации о воздушной обстановке.

*Донесением о целях* принято называть информацию, содержащую сведения о местоположении ВС, об их характеристиках, выдаваемую от источников по каналам связи для ее дальнейшей обработки и использования.

Задача *сбора донесений* заключается в том, чтобы принять возможно больше информации при минимальных потерях.

Каждое поступающее на вход донесение должно быть обработано, на что требуется некоторое время. Пусть в момент поступления донесения производится обработка предыдущего донесения. В этом случае поступившее донесение может либо покинуть систему необработанным, либо ждать своей очереди на обслуживание, пока система не освободится, либо ожидать обработки строго ограниченное время. В соответствии с этим все системы массового обслуживания разделяются на системы с отказами, системы с ожиданием и системы с ограниченным ожиданием (смешанного типа). На практике получили распространение системы смешанного типа с временем ожидания, выбранным из условия наилучшей обработки.

Координаты ВС измеряются в системе координат, обнаружившей их РЛС, поэтому при передаче данных на пункт ТОИ необходимо пересчитать их к точке пункта ТОИ относительно приемника информации. В качестве единой системы координат могут использоваться полярная или прямоугольная системы координат. Расчеты в этих системах достаточно просты и приемлемы для решения целого ряда практических задач.

В ИИС УВД передача координат ВС обычно осуществляется в прямоугольной системе координат. На пункте обработки также используется прямоугольная система. Следовательно, задача сводится к преобразованию прямоугольных координат ВС относительно точки размещения источника информации в прямоугольные координаты относительно точки пункта ТОИ.

К единому времени отсчета приводятся отметки, полученные на пункте ТОИ от разных источников. Единое время необходимо для того, чтобы определить положение обрабатываемых отметок по состоянию на какой-то один момент времени. Эта операция значительно облегчает задачу отождествления отметок.

Координаты отметок приводятся к единому времени путем определения для каждой отметки времени экстраполяции относительно заданного момента сравнения. В настоящее время, учитывая сравнительно высокий темп обновления информации, используется экстраполяция гипотезы равномерного и прямолинейного изменения координат.

Все источники РЛИ обрабатывают информацию автономно и независимо друг от друга. За счет перекрытия зон ответственности в составе донесе-

ний могут быть дублирующие донесения, полученные от нескольких источников по одному и тому же ВС.

В процессе *отождествления отметок целей* (ВС) вырабатывается решение, устанавливающее:

- сколько целей имеется в действительности, если донесения о них поступают от нескольких источников;

- как распределяются поступившие донесения по целям.

Обычно отождествление выполняется в два этапа. Сначала производится грубое отождествление или сравнение отметок, а затем проводится распределение отметок, позволяющее принять более точное решение на отождествление.

В основе этапа сравнения лежит предположение, что донесения об одной и той же цели должны содержать одинаковые характеристики. В силу этого решения о тождественности отметок принимаются на основании сравнения характеристик. Однако в действительности из-за различных ошибок полного совпадения характеристик не бывает. В результате возникает неопределенность, выражаемая двумя конкурирующими гипотезами:

1. Гипотеза  $H_1$  предполагает, что отметки от одной и той же цели, хотя произошло несовпадение.

2. Гипотеза  $H_2$  предполагает, что отметки от разных целей, поэтому произошло несовпадение.

Решение на выбор той или иной гипотезы принимается на основании оценки величины несовпадения и использования критерия минимума ошибки принятия решения.

На этапе распределения для группирования отметок по отдельным целям используются признаки их принадлежности к источникам информации нумерации целей в системе этих источников. Правила логического группирования отметок в соответствии с принадлежностью донесений о целях к источникам информации формулируются следующим образом.

1. Если в области допустимых отклонений получены отметки от одного того же источника, то число целей равно числу отметок, так как одна РЛС в один и тот же момент времени не может выдавать от одной цели несколько отметок.

2. Если в области допустимых отклонений от каждого источника получено по одной отметке, то считается, что эти отметки относятся к одной и той же цели.

3. Если от каждой станции получено по равному числу отметок, то очевидно, что число целей равно числу отметок, полученных от одной станции, ибо маловероятно, чтобы в пределах небольшой области станция обнаруживала только свои цели и не обнаруживала цель, которую наблюдает соседняя станция.

4. Если от нескольких источников поступило неодинаковое количество отметок, принимается, что источник, от которого получено наибольшее количество отметок, дает наиболее вероятную обстановку. При этом общее

количество целей определяется числом отметок, принятых от указанного источника.

Таким образом, обработка донесений в группе состоит в группировании отметок от нескольких источников к одной цели. Эта задача решается сравнительно просто при использовании первого и второго правила и значительно труднее при применении третьего и четвертого.

По гипотезе третьего правила имеем две цели, к каждой из которых относится по одному донесению от каждого источника. Необходимо определить, какие пары отметок относятся к каждой цели. Наиболее правдоподобный вариант выбирается в результате сравнения сумм квадратов расстояний между отметками. Принимается та комбинация, для которой эта сумма минимальна.

Приведенные правила сравнения и распределения отметок не единственные, и в зависимости от требуемой точности могут быть усложнены или упрощены.

После отождествления сведения о цели выражаются группой отметок, полученных от нескольких источников. Для формирования одной отметки с более точными характеристиками координаты и параметры траектории усредняются.

Простейший способ усреднения заключается в том, что вычисляется среднее арифметическое координат. Этот способ достаточно прост, но он не учитывает точностных характеристик источников информации. Более правильным является усреднение отметок целей с учетом коэффициента веса отметок, а коэффициент выбирается в зависимости от точности источника. И наконец, в качестве усредненных можно взять координаты отметки, полученные от одного источника, если имеются данные, что этот источник выдает наиболее точную информацию.

*Укрупнение (группирование) отметок целей* проводится в тех пунктах обработки, где не требуется информация по каждой цели или же плотность поступления отметок от целей оказывается выше рассчитанной пропускной способности. Обычно группирование производится на высших инстанциях системы управления.

Группирование осуществляется теми же способами, что и отождествление, и ведется по признаку близости координатных описаний группируемых объектов. Для этого формируется строб по тем координатам, которые назначаются как характерные для группы целей. Координаты центра сто́ба распространяются на всю группу. Обычно делается так, что центр сто́ба совпадает с отметкой головной цели в группе. Размеры сто́ба определяются исходя из навигационных и тактических требований. Обычно используется полуавтоматический метод укрупнения, который включает в себя следующие основные этапы:

1. Выделение компактных групп целей на основе близости координат  $x$ ,  $y$ ,  $H$ . Оператор визуально определяет компактную группу целей по координатам, выделяет головную цель, назначает один из сто́бов укрупнения и

вводит в ЭВМ номер строга и головной цели. На основе этой информации ЭВМ завершает процесс выделения компактной группы.

2. Селекция внутри выделенных групп по скорости. Цель остается в составе укрупненной цели, если:

$$|v_x - v_{xг}| \leq \Delta v; |v_y - v_{yг}| \leq \Delta v, \quad (1.2)$$

где  $v_x, v_y$  – составляющие скорости цели;  $v_{xг}, v_{yг}$  – составляющие скорости головной цели;  $\Delta v$  – порог селекции по скорости.

3. Определение характеристик укрупненной цели. Укрупненной цели присваивается количественный состав, и формируется обобщенный признак действия.

4. Корректировка решения оператора. Ввиду того что обстановка в воздухе меняется, имеется возможность скорректировать данные укрупненной цели путем ее укрупнения, разукрупнения.

5. Сопровождение укрупненной цели. Эта операция осуществляется автоматически ЭВМ. При этом производится корректировка координат, обеспечивается выбор головной цели при исчезновении информации о старой головной цели.

Таким образом, в процессе ТОИ производится сбор донесений от источников, приведение отметок к единой системе координат и единому времени отсчета, установление принадлежности отметок к целям (отождествление отметок) и выполнение укрупнения информации.

## 1.5. АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ И СОПРОВОЖДЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ

Для обнаружения ВС с требуемой вероятностью правильного обнаружения при заданной вероятности ложной тревоги и измерения параметров движения ВС необходимо проанализировать информацию, полученную за несколько периодов обзора РЛС. Именно так и поступает авиадиспетчер, наблюдающий за экраном индикатора отображения радиолокационной информации. Если в какой-либо точке экрана индикатора появляется отметка, оператор фиксирует ее как возможную воздушную цель. Если в следующие обзоры РЛС отметка появляется вновь и сдвигается на некоторое расстояние, то уже имеется основание для принятия решения об обнаружении ВС. По изменению положения отметок на экране индикатора можно определить направление и скорость движения цели. Операции, выполняемые авиадиспетчером, могут быть формализованы, а их выполнение возложено на специализированную ЭВМ.

В устройстве вторичной обработки на основе отметок  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , полученных в  $n$  соседних обзорах, решаются следующие основные задачи:

- обнаружение траекторий целей;
- сопровождение траекторий целей;

– траекторные расчеты в интересах потребителей радиолокационной информации.

Эти задачи включают в себя оценивание параметров траектории, задаваемой обычно векторной функцией, расчет сглаженных (интерполированных) и упрежденных (экстраполированных) координат, а также операцию стробирования отметок целей. Основными данными, определяющими траекторию движения ВС, являются пространственные координаты отметок ВС, изменение которых соответствует закону движения ВС в пространстве. Траектория движения ВС зависит от многих факторов и условий, таких как: тип ВС, высота полета, скорость, маневренные возможности и т.п. Кроме того, на траекторию полета оказывает влияние целый ряд случайных факторов, под которыми подразумеваются все причины, искажающие траекторию или затрудняющие ее обнаружение и воспроизведение.

Перечисленные и некоторые другие факторы вынуждают отнести движение ВС к категории процессов со случайно изменяющимися во времени параметрами. Очевидно, для статистического описания таких процессов необходимо знать законы распределения вероятности параметров, определяющих эти процессы. Однако практически таких законов получить не удастся, поэтому приходится задаваться некоторыми гипотезами о статистических характеристиках обрабатываемых сигналов, т.е. исходить из более или менее правдоподобной статистической модели движения ВС.

Если устройство предназначено для обработки траекторий ВС, то модели их движения представляют собой совокупность участков с прямолинейным и равномерным движением и участков маневра. Для такого рода устройств за основу может быть взята полиномиальная модель движения.

Процесс вторичной обработки разбивается на два самостоятельных этапа: обнаружение траекторий и сопровождение за траекториями ВС [20, 30].

*Автоматическое обнаружение* траекторий является начальным моментом вторичной обработки. Пусть появилась одиночная отметка № 1 от ВС. Она принимается за начальную отметку траектории. В следующем обзоре вторую отметку, принадлежащую той же траектории, следует искать в некоторой области  $S_1$  (рис. 1.1), заключенной внутри кольца и имеющей площадь

$$S_1 = \pi(R_{\max}^2 - R_{\min}^2) = \pi T_{\text{обз}}^2 (v_{\text{ц,max}}^2 - v_{\text{ц,min}}^2), \quad (1.1)$$

где  $T_{\text{обз}}$  – период обзора РЛС;  $v_{\text{ц,max}}$ ,  $v_{\text{ц,min}}$  – возможные минимальная и максимальная скорости цели.

В область  $S_1$  может попасть не одна, а несколько отметок, и каждую из них следует считать как возможное продолжение предполагаемой траектории. По двум отметкам вычисляются скорость и направление движения каждого из предполагаемого ВС, а затем экстраполируется положение отметки на следующий обзор. Вокруг экстраполируемых отметок образуются круговые области  $S_2$ . Если в какую-либо область  $S_2$  в третьем обзоре попала отметка, она считается принадлежащей к обнаруживаемой траектории, траектория продолжается, и отметка передается на сопровождение.

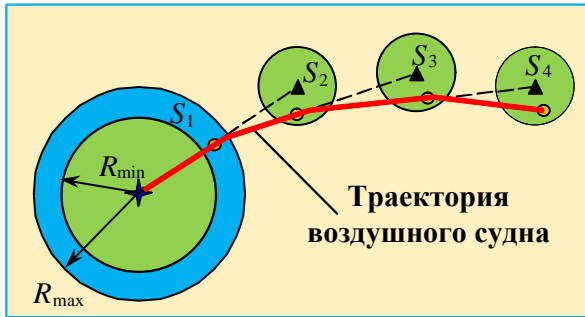


Рис. 1.1. Траектория воздушной цели

Операции, которые выполняются при автообнаружении, сводятся к экстраполяции координат, их сглаживанию и стробированию отметок.

Процесс экстраполяции состоит в том, что по координатам ранее полученных отметок вычисляются координаты будущей отметки.

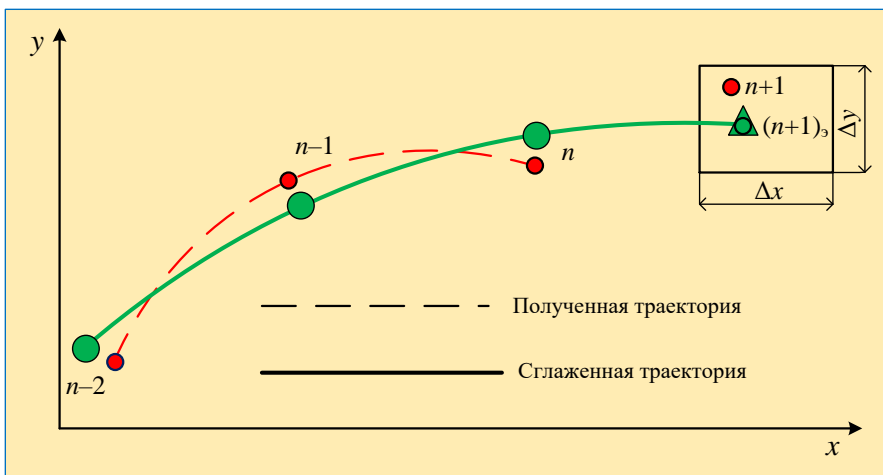
Экстраполяция требует знания закономерностей движения ВС, на основе которых прокладывается траектория.

При обнаружении траектории маневрирующего ВС размеры стробов должны рассчитываться с учетом возможного маневра. Размер строба непосредственно влияет на показатели качества обнаружения траектории. Его увеличение приводит к увеличению числа ложных отметок в стробе, в результате возрастает вероятность ложной тревоги  $P_{лт}$ . Уменьшение размера строба может привести к непопаданию истинной отметки в строб, при этом снижается вероятность правильного обнаружения  $P_{по}$ .

*Слежение за траекториями целей* заключается в непрерывной привязке вновь полученных отметок к своим траекториям, в сглаживании координат и вычислении параметров движения ВС. Если слежение производится автоматически, то его называют автосопровождением.

Пусть в  $n$  смежных обзорах РЛС получены отметки, создающие траекторию полета ВС (рис. 1.2). Сначала производится сглаживание координат и вычисление параметров траектории, которые выдаются потребителю.

Если в  $(n + 1)$ -м обзоре получено несколько отметок, то необходимо определить, какая из них принадлежит данной траектории. Используя данные известных  $(n - 2)$ ,  $(n - 1)$  и  $n$ -го обзоров и экстраполируя на один обзор вперед, можно предсказать положение  $(n + 1)$ -й отметки траектории  $(n + 1)$ . Как правило, эта рассчитанная отметка не совпадает ни с одной из вновь полученных. Если известны статистические характеристики ошибок измерения координат и заданы вероятностные характеристики степени достоверности полученного решения, то можно выделить вокруг экстраполированной отметки область, например в виде прямоугольника со сторонами  $\Delta x$  и  $\Delta y$ , которую принято называть стробом.



**Рис. 1.2. Траектория полета ВС**

Координаты центра строба совпадают с координатами экстраполированной отметки. Если размеры строба выбраны так, что вероятность попадания в него истинной отметки велика, то отметку, попавшую в строб, следует отнести к данной траектории.

Таким образом, в процессе автосопровождения выполняются следующие операции:

- сглаживание координат и определение параметров траектории;
- экстраполяция координат цели на следующий обзор или на несколько обзоров вперед;
- выделение строба, в котором с некоторой вероятностью ожидается появление новой отметки;
- сличение координат экстраполированной отметки с координатами отметок, попавших в строб, и выбор одной из них для продолжения траектории.

Стробирование может быть физическим и математическим. Физическое стробирование – это выделение предполагаемой области появления отметки, принадлежащей сопровождаемой траектории, путем непосредственного воздействия на приемное устройство РЛС. Математическое стробирование – это формирование предполагаемой области появления отметки в виде границ строба. Строб может задаваться в полярной и прямоугольной системах координат.

Задача селекции отметок, т.е. выбора единственной отметки из всех имеющихся в стробе, решается путем вычисления квадратов линейных отклонений отметок от центра и сравнения результатов с целью выбора минимального.

Таким образом, если при первичной обработке из смеси сигнала с шумом на основе статистического различия структуры сигнала и шума выделяется полезная информация, то вторичная обработка, используя различия в закономерностях появления ложных отметок и отметок от ВС, должна обеспечить выделение траекторий движущихся ВС.

## 1.6. ТРАЕКТОРНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ В РАЗЛИЧНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СРЕДСТВАХ

Траекторная обработка в радиолокации определяется типом РЛС, ее характеристиками, назначением, условиями функционирования. С точки зрения траектории обработки существенными факторами являются набор измеряемых РЛС параметров (состав вектора измерения), состав вектора состояния, периодичность получения измерений, типы сопровождаемых целей, интенсивность помех естественного и искусственного происхождения, влияние условий распространения радиоволн [20, 30, 36].

РЛС можно классифицировать на основе различных признаков:

- 1) по выполняемой функции выделяют обзорные, многофункциональные РЛС с фазированными антенными решетками (ФАР), РЛС сопровождения, вторичные РЛС;
- 2) по способу построения различают моностатические, бистатические, многопозиционные;
- 3) по способу использования электромагнитного излучения – активные, пассивные и полуактивные;
- 4) по принадлежности – военные и гражданские;
- 5) по месту размещения – наземные, морские, бортовые, космические;
- 6) по степени мобильности – стационарные, передвижные, мобильные;
- 7) по типу решаемой задачи – навигационные, контроля воздушного пространства, системы управления воздушным движением (УВД), метеорологические, загоризонтные, РЛС экологического мониторинга и др.

Рассмотрим особенности траекторного сопровождения в разных РЛС.

Обзорные РЛС осуществляют поиск, обнаружение и оценку параметров движения целей в заданном секторе пространства (если сектор равен  $360^\circ$ , имеет место режим кругового обзора). Такая РЛС производит обнаружение цели в процессе сканирования луча антенны, распределяя при этом энергетические ресурсы равномерно по зоне наблюдения. Таким образом, две основные задачи радиолокации – поиск целей и их сопровождение решаются в обзорной РЛС одновременно. Отметки от одной и той же цели поступают через одинаковые интервалы времени, равные периоду обзора  $T_{\text{обз}}$  (за исключением обзоров, где цель не была обнаружена).

Многофункциональные РЛС, оснащенные антеннами с ФАР, позволяют разделить задачи поиска и сопровождения благодаря возможности практиче-

ски мгновенного перенацеливания луча антенны на любой участок пространства [20, 36, 37].

В режиме поиска целей производится наблюдение тех областей пространства, где по результатам предыдущих зондирований нет оснований ожидать наличия целей (хотя они там вполне могут находиться). Этот режим используется для обнаружения новых целей, попадающих в зону ответственности РЛС.

В режиме сопровождения целей осуществляется наблюдение за уже обнаруженными целями, при этом осуществляется управление антенными ресурсами РЛС с ФАР с целью оптимизации процесса сопровождения радиолокационных целей.

Многофункциональные РЛС с ФАР обычно являются еще и многоканальными, т.е. способными выполнять свое назначение в полном объеме при одновременном обслуживании нескольких целей. Это означает, что каждая цель имеет свой собственный полноценный канал обработки от антенной системы, которая в этом случае является многоканальной, т.е. способной одновременно наводиться на несколько целей, до устройств первичной и вторичной обработки радиолокационной информации, реализующих параллельную обработку разных целей.

Отметим, что обычная обзорная РЛС не является многоканальной, несмотря на наличие в ней отдельных каналов по дальности и скорости: электромеханическое сканирующее антенное устройство является одноканальным, поэтому им в один момент времени может обслуживаться только одна цель (точнее столько, сколько находится в пределах луча диаграммы направленности (ДН) антенны).

Вторичные РЛС выполняют поиск и опознавание цели в режиме «запрос-ответ». Траекторная обработка в таких системах может осуществляться за счет дискретно-адресного запроса и моноимпульсного метода определения угловых координат либо не является необходимой.

У моностатической РЛС передатчик и приемник размещены на одной позиции, у бистатической – разнесены в пространстве на достаточное расстояние. Особенностью бистатических систем является измерение бистатических дальностей и радиальных скоростей, значения которых зависят не только от координат и скорости цели, но и от взаимного расположения передатчика и приемника.

Методы траекторной обработки в многопозиционных РЛС (МПРЛС) радиолокационных комплексах и системах существенно зависят от уровня объединения информации. В МПРЛС с объединением сигналов, осуществляющих обнаружение целей и измерение параметров по данным нескольких РЛС, траекторная обработка реализуется как в обычной эквивалентной по характеристикам однопозиционной (моностатической) РЛС. В МПРЛС с объединением отметок, т.е. результатов первичной обработки в отдельных РЛС, требуется использование специального алгоритма обнаружения траек-

тории, а в РЛС с объединением результатов вторичной обработки в отдельных РЛС – алгоритма объединения траекторий.

Траекторная обработка в пассивных и полуактивных РЛС во многом зависит от набора измеряемых данных. В пассивных и некогерентных полуактивных РЛС возможна ситуация, когда доступны только азимутальные измерения. В этом случае применяются особые методы преобразования координат, сопровождение в модифицированных полярных координатах, нелинейные траекторные фильтры и др. Кроме того, в полуактивных системах, работающих на одной частоте и излучающих в эфир один и тот же сигнал, возникает еще один вид неопределенности, заключающийся в необходимости определения принадлежности полученной отметки паре передатчик–цель, что требует соответствующей корректировки алгоритма отождествления.

Загоризонтные (ЗГ) РЛС коротковолнового диапазона (3...30 МГц) обладают возможностью обнаружения цели на дальних расстояниях – от нескольких сотен (в режиме поверхностной волны) до нескольких тысяч (в режиме пространственной волны) километров. Распространение пространственной волны происходит за счет отражения сигнала от ионосферы, при этом обычным является так называемое многолучевое распространение, когда сигнал, отраженный от цели, поступает на приемную антенну по нескольким трассам. Разность путей часто приводит к тому, что пришедшие по ним отражения разрешаются при обнаружении, в результате чего цель оказывается представлена несколькими отметками за один интервал наблюдения. В системе траекторной обработки, реализованной по традиционной схеме, многолучевые отметки будут восприняты как ложные, что может привести к снижению вероятности правильного отождествления, снижению точности оценки параметров движения цели вплоть до сброса сопровождения, к обнаружению и сопровождению нескольких траекторий для одной цели. Поэтому алгоритм отождествления в ЗГ РЛС должен учитывать возможность многолучевого распространения.

Наконец, особый вид радиотехнических систем представляет собой траекторные измерительные комплексы, предназначенные для расчета параметров и проведения корректировки орбит космических объектов, определения траекторий ракет на активных участках и точек падения ступеней ракетносителей, оценки тактико-технических характеристик ВС в ходе испытаний и т.д. Условия эксплуатации этих комплексов имеют ряд существенных отличий от традиционных радиолокационных систем:

- наблюдение ведется в основном за «своими» объектами, движущимися по детерминированным траекториям, а значит, имеется большой объем априорной информации о движении объекта;

- сами объекты оснащены ответчиками, что улучшает энергетику и облегчает поиск их в пространстве;

- совместно используется несколько разнесенных в пространстве измерительных систем, что обеспечивает избыточность информации.

По сути, траекторная обработка в таком комплексе сводится к отслеживанию соответствия реального движения объекта заданному и к корректировке известных либо определению неизвестных параметров априорной траектории по данным измерений, осуществляемых в определенные моменты времени.

С точки зрения состава вектора измерений выделяют двухкоординатные РЛС, оценивающие, например наклонную дальность и азимут цели, трехкоординатные (дальность, азимут, угол места или высоту), четырехкоординатные (дальность, азимут, угол места, радиальную скорость). В бистатических системах измеряют, соответственно, бистатическую дальность и бистатическую радиальную скорость.

Состав вектора состояния определяется типом сопровождаемых целей и может быть двумерным или трехмерным, содержать одну, две или более производных по каждой координате (скорость, ускорение и т.д.), включать дополнительные переменные (например, скорость поворота). Модели движения также определяются типом сопровождаемых целей, которые могут быть воздушными, надводными, наземными, маневрирующими и неманеврирующими, одиночными и групповыми и др.

Характеристики помех, порождающих ложные отметки, определяют выбор алгоритма отождествления и его параметры:

- в условиях слабых помех можно ограничиться простейшими методами отождествления или даже обойтись без них;
- в условиях сильных помех может потребоваться использование специальных алгоритмов.

Обычно при разработке алгоритмов отождествления помехи полагают равномерно распределенными по всей зоне наблюдения с известной постоянной интенсивностью.

## 1.7. ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКИ

Математическое моделирование сложных технических систем, к которым относится система траекторной обработки, начинается с создания модели, т.е. представления системы с помощью совокупности математических соотношений, определяющих ее структуру и описывающих ее поведение. Методы, используемые для анализа моделей, можно разделить на аналитические и статистические.

*Аналитические* методы, основанные на непосредственном анализе математического описания, дают полное представление о зависимости исследуемых характеристик от параметров и условий, поэтому при возможности следует стремиться к получению и использованию аналитической модели. Однако при ее создании часто возникают трудности, связанные с невозмож-

ностью получения аналитических решений в общем виде или для большинства реальных ситуаций, в результате чего построение аналитической модели системы оказывается возможным лишь при существенном ее упрощении. Если аналитическое представление математической модели затруднительно, а ее упрощение ведет к недопустимо грубым результатам, необходимо использовать другие методы анализа [20].

*Метод статистических испытаний* (метод Монте-Карло) свободен от каких-либо теоретических ограничений. В этом методе исследователем задается набор исходных данных и определяется реакция на него системы. Результат, получаемый при однократном моделировании отклика системы, является единичной реализацией случайного процесса; оценки искомых характеристик системы получают усреднением большого числа реализаций. Чем больше реализаций, тем точнее оценка, однако при исследовании достаточно сложных систем при большом числе входных воздействий получение точной оценки может быть затруднено необходимостью значительного объема вычислений [20].

Одним из условий успешного решения задачи проектирования системы траекторной обработки является наличие возможности оценивания эффективности выбранных методов. Обеспечение такой возможности обычно сводится к выбору соответствующих показателей качества функционирования алгоритмов траекторной обработки и системы в целом. Используется следующая классификация показателей эффективности системы траекторной обработки:

1. Показатели, определяющие возможности алгоритмов по полноте отображения обстановки в зоне обзора РЛС. Полнота отображения обстановки характеризуется в первую очередь вероятностью обнаружения траектории истинной цели на разных дальностях при фиксированных энергетических характеристиках РЛС, эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) цели и параметрах внешней среды. Кроме того, на этапе статистического моделирования системы обработки используются показатели, характеризующие среднюю длительность процесса обнаружения истинной траектории и длительность непрерывного сопровождения цели.

2. Показатели, определяющие возможности алгоритмов по достоверности отображения обстановки в зоне обзора РЛС. В системе траекторной обработки достоверность отображения обстановки характеризуется вероятностью обнаружения ложной траектории и количеством ложных траекторий, обнаруживаемых и передаваемых на сопровождение в течение обзора или в единицу времени.

3. Показатели, определяющие динамические характеристики алгоритмов траекторной обработки. К ним в первую очередь относят точностные характеристики получаемых оценок параметров траектории.

Набор исследуемых на этапе математического моделирования характеристик системы траекторной обработки может включать в себя:

- вероятность обнаружения истинной траектории;
- среднее время обнаружения истинной траектории;
- вероятность обнаружения ложной траектории и среднее число обнаружений ложных траекторий в единицу времени;
- точность оценивания координат и скорости цели при сопровождении неманеврирующих и маневрирующих целей;
- вероятностные и точностные характеристики отождествления отметки от цели с сопровождаемой траекторией в условиях помех для одиночной и групповой целей;
- вероятность срыва сопровождения траектории;
- среднюю продолжительность ложной траектории;
- среднюю продолжительность сопровождаемой траектории.

При математическом моделировании характеристик траекторной обработки можно использовать комбинацию аналитических и статистических методов. Для характеристик процесса обнаружения и срыва траектории вследствие необнаружения цели есть возможность получения аналитических выражений без существенного упрощения математической модели. При анализе точности сопровождения и отождествления обычно используют статистическое моделирование, поскольку существует необходимость учета большого количества факторов, аналитическое описание которых в общем случае отсутствует.

## 2. АЛГОРИТМЫ КАЛМАНОВСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

---

### 2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АЛГОРИТМАХ КАЛМАНОВСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

В связи с возрастающей сложностью ИИС УВД, с ростом требований, предъявляемых к ним, все более необходимой является разработка систем обработки информации путем решения задач синтеза на основе методов оптимальной линейной нестационарной фильтрации.

В настоящее время в современных ИИС УВД при вторичной обработке информации широкое применение получают оптимальные алгоритмы фильтрации (оценивания), базирующиеся на основе методов калмановской фильтрации в пространстве состояния.

Под вторичной обработкой информации методами калмановской фильтрации понимают выполняемую в вычислителях или ЭВМ обработку сигналов измерителей для обеспечения требуемой точности, достоверности, устойчивости, помехозащищенности ИИС УВД.

Оптимальная линейная калмановская фильтрация обладает рядом достоинств [20, 30]:

- практически реализует структуру системы, обеспечивающую несмещенные оценки и минимальные ошибки фильтрации;
- алгоритмы оптимальных фильтров имеют удобное для реализации в цифровой вычислительной машине (ЦВМ) представление в виде рекуррентных (повторяющихся) соотношений, что сокращает объем вычислений и повышает их точность;
- в оптимальных фильтрах данные измерений обрабатываются по мере их получения в реальном масштабе времени;
- имеется возможность решать задачи синтеза многомерных стационарных и нестационарных динамических систем в дискретном (разностные уравнения) и непрерывном (дифференциальные уравнения) вариантах.

Указанные выше достоинства фильтров Калмана обусловили их широкое применение для получения оптимальной оценки измеряемых параметров не только в ИИС УВД, но и в решении задач управления движением в космическом пространстве, определения параметров орбиты космических объектов, а также в ряде других областей науки и техники.

В методе оптимальной линейной фильтрации исходными являются предположения [20, 30, 34]:

- исследуемый процесс описывается системой линейных дифференциальных (разностных) уравнений;
- каждое наблюдение (измерение) является линейной функцией от процессов, подлежащих оцениванию (фильтрации);
- возмущающие воздействия и шум измерений гауссовские, белые и взаимно независимые.

Оптимальная обработка информации методом оптимальной линейной фильтрации в ИИС УВД рассматривается на задаче определения фазовых координат ВС (дальность, угловые координаты) и параметров движения ВС (скорость сближения, ускорение, угловые скорости линии визирования).

В методе оптимальной линейной фильтрации исходными являются предположения [20, 30]:

- исследуемый процесс описывается системой линейных дифференциальных (разностных) уравнений;
- каждое наблюдение (измерение) является линейной функцией от процессов, подлежащих оцениванию (фильтрации);
- возмущающие воздействия и шум измерений гауссовские, белые и взаимно независимые.

Оптимальная обработка информации методом оптимальной линейной фильтрации в ИИС УВД наведения рассматривается на задаче определения фазовых координат ВС (дальность, угловые координаты) и параметров движения ВС (скорость сближения, ускорение, угловые скорости линии визирования).

Движение ВС задается в виде математической модели в некотором пространстве состояний с помощью  $n$ -мерного вектора состояния

$$\mathbf{x}^T(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k)]. \quad (2.1)$$

Применительно к описанию параметров движения ВС вектор состояния будет иметь вид

$$\mathbf{x}^T(k) = [D(k), V(k), a(k), \varphi_T(k), \varphi_B(k)], \quad (2.2)$$

где  $D(k)$ ,  $V(k)$ , и  $a(k)$  – дальность, скорость и ускорение ВС;  $\varphi_T(k)$  и  $\varphi_B(k)$  – азимут и угол места ВС.

Выбор модели движения ВС определяется с учетом характера ее движения. В простейшем случае считают, что вектор скорости постоянен во времени (ВС не маневрирует).

Более сложными являются, например, предположения, что вектор скорости изменяется определенным образом во времени (ВС маневрирует) или вектор скорости является случайным (турбулентность атмосферы, неравномерная тяга двигателей и т.д.).

Векторно-матричное уравнение, которому удовлетворяет вектор состояния  $\mathbf{x}(k)$ , описывающее модель движения ВС, в общем случае имеет вид

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{\Phi}(k)\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k) + \mathbf{\Gamma}(k)\xi_x(k), \quad (2.3)$$

где  $\mathbf{\Phi}(k)$  – фундаментальная матрица перехода процесса (системы), которая воздействует на вектор состояния  $\mathbf{x}(k-1)$  в момент времени с дискретом  $k-1$ ;  $\mathbf{B}(k)$  – матрица управления, которая прикладывается к вектору управ-

ляющих воздействий  $\mathbf{u}(k)$ ;  $\mathbf{\Gamma}(k)$  – матрица возмущений, характеризующая зависимости между компонентами вектора возмущений и переменными вектора состояния;  $\xi_x(k)$  – случайный вектор возмущений, учитывающий влияние случайных фактов на изменение состояния объекта (движение цели), представляющий собой дискретный белый шум с математическим ожиданием, равным нулю, и матрицей дисперсии ошибок возмущений  $\mathbf{Q}(k)$ .

В момент  $k$  производится наблюдение (измерение)  $z_{и}(k)$  истинного вектора состояния  $\mathbf{x}(k)$ , которые связаны между собой уравнением

$$z_{и}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \xi_{и}(k), \quad (2.4)$$

где  $\mathbf{H}(k)$  – матрица измерений, которая связывает переменные состояния  $\mathbf{x}(k)$  и измерения (наблюдения)  $z_{и}(k)$ ;  $\xi_{и}(k)$  – вектор ошибок измерений, представляется вектором гауссовских белых шумов с нулевым математическим ожиданием и матрицей дисперсии ошибок измерений  $\mathbf{R}(k)$ .

При рассмотренных выше модели состояния (2.3) и модели наблюдения (2.4) задача оптимальной линейной фильтрации формируется следующим образом. Априорные сведения о векторах состояния  $\mathbf{x}(k-1)$  и управления  $\mathbf{u}(k)$ , характеризующиеся уравнением (2.3), и располагая данными о векторе наблюдения (измерения)  $z_{и}(k)$ , определяемыми соотношением (2.4), определяют наилучшую оценку  $\mathbf{x}_o(k)$  вектора состояния, удовлетворяющую определенному критерию качества, например минимуму дисперсии ошибки фильтрации или максимуму апостериорной плотности вероятности. Термин «наилучшая оценка» (или оптимальная оценка) при использовании метода Калмана означает, что искомая оценка должна быть несмещенной, а дисперсия ошибки фильтрации – минимальной:

$$\mathbf{M}\{\mathbf{x}(k) - \mathbf{x}_o(k)\}^T \{\mathbf{x}(k) - \mathbf{x}_o(k)\} = \min.$$

Результатом решения задачи оптимальной фильтрации (оптимального оценивания) является определенный алгоритм, позволяющий связать вектор  $\mathbf{x}_o(k)$  с вектором  $\mathbf{x}(k)$  при учете условий (2.3) и (2.4).

Алгоритм формирования оценки оптимальной по критерию минимума дисперсии ошибок фильтрации при использовании модели состояния (2.3) и наблюдения (2.4) имеет вид [20, 30]:

$$\mathbf{x}_o(k) = \mathbf{x}_o(k) + \mathbf{K}_ф(k)[z_{и}(k) - \mathbf{H}(k)\mathbf{x}_o(k)]; \quad (2.5)$$

$$\mathbf{x}_o(k) = \mathbf{\Phi}(k)\mathbf{x}_o(k-1), \quad \mathbf{x}_o(0) = \mathbf{x}_o(0); \quad (2.6)$$

$$\mathbf{P}_o(k) = \mathbf{\Phi}(k)\mathbf{P}_o(k-1)\mathbf{\Phi}^T(k) + \mathbf{Q}_x(k), \quad \mathbf{P}_o(0); \quad (2.7)$$

$$\mathbf{K}_\Phi(k) = \mathbf{P}_3(k) \mathbf{H}^T(k) \left\{ \mathbf{H}(k) \mathbf{P}_3(k) \mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k) \right\}^{-1}; \quad (2.8)$$

$$\mathbf{P}_0(k) = \mathbf{P}_3(k) - \mathbf{K}_\Phi(k) \mathbf{H}(k) \mathbf{P}_3(k), \quad (2.9)$$

где  $\mathbf{x}_3(k)$  – оценка прогноза (экстраполяция) вектора состояния  $\mathbf{x}(k)$ ;  $\mathbf{K}_\Phi(k)$  – матрица оптимальных коэффициентов передачи дискретного фильтра;  $\mathbf{P}_3(k)$  – апостериорная ковариационная матрица дисперсии ошибок фильтрации;  $\mathbf{P}_0(k)$  – априорная ковариационная матрица дисперсии ошибок фильтрации;  $\mathbf{R}(k)$  – матрица дисперсий измерения;  $\mathbf{Q}_x(k)$  – матрица дисперсий возмущений.

Структурная схема дискретного оптимального фильтра Калмана, соответствующая уравнениям (2.3) – (2.9) без учета вектора управляющих воздействий  $\mathbf{u}(k)$ , представлена на рис. 2.1.

Устройство, реализующее уравнение (2.5), которое использует в качестве входных сигналов компоненты вектора (2.4)  $z_{и}(k)$  и на выходе которого получаются сигналы  $\mathbf{x}_0(k)$ , называется оптимальным фильтром Калмана.

В процессе фильтрации выполняются две операции:

- прогноз оцениваемого процесса  $\mathbf{x}_3(k)$ ;
- коррекция результатов прогноза.

Прогнозирование оцениваемого процесса необходимо для того, чтобы учитывать изменение оценки вектора состояния  $\mathbf{x}_0(k)$  между измерениями  $z_{и}(k-1)$  и  $z_{и}(k)$ :

$$\mathbf{x}_3(k) = \mathbf{\Phi}(k) \mathbf{x}_0(k-1). \quad (2.10)$$

Предварительную оценку (2.10) называют априорной оценкой состояния, так как для ее получения не используются наблюдения текущего шага.

При коррекции результатов прогноза априорная оценка состояния (экстраполяция) дополняется соответствующими текущими измерениями для коррекции оценки:

$$\Delta_z(k) = \mathbf{K}_\Phi(k) [z_{и}(k) - \mathbf{H}(k) \mathbf{x}_3(k)]. \quad (2.11)$$

Скорректированная оценка называется апостериорной оценкой состояния либо просто оценкой вектора состояния:

$$\mathbf{x}_0(k) = \mathbf{x}_3(k) + \Delta_z(k) = \mathbf{\Phi}(k) \mathbf{x}_0(k-1) + \mathbf{K}_\Phi(k) [z_{и}(k) - \mathbf{H}(k) \mathbf{x}_3(k)]. \quad (2.12)$$

Обычно прогноз оцениваемого процесса и коррекция результатов прогноза чередуются: экстраполяция производится по результатам коррекции до следующего наблюдения, а коррекция производится совместно с доступными на следующем шаге наблюдениями  $z_{и}(k)$ , и т.д. Однако возможно и другое развитие событий, если по некоторой причине наблюдение оказалось

недоступным, то этап коррекции может быть пропущен и выполнена экстраполяция по нескорректированной оценке (априорной экстраполяции). В этом случае калмановский фильтр переходит в режим памяти.

В момент поступления измерения (рис. 2.1)  $z_{и}(k)$  полученная информация используется для уточнения экстраполированной оценки (коррекция прогноза) в соответствии с уравнением (2.12). Измеренное значение  $z_{и}(k)$  сравнивается с прогнозируемым значением вектора измерения (наблюдения) в момент времени  $k$ :

$$z_{пр}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}_3(k), \quad (2.13)$$

образуя невязку измерения

$$\Delta z(k) = z_{и}(k) - \mathbf{H}(k)\mathbf{x}_3(k). \quad (2.14)$$

Невязку измерения (2.14) называют обновляющим процессом. Невязка характеризует степень несоответствия результатов прогноза наблюдения  $z_{пр}(k)$  и конкретного значения  $z_{и}(k)$ .

Значение  $\mathbf{x}_0(k)$  хранится в устройстве задержки в течение дискрета времени  $\tau$  до получения очередного измерения  $z_{и}(k+1)$ .

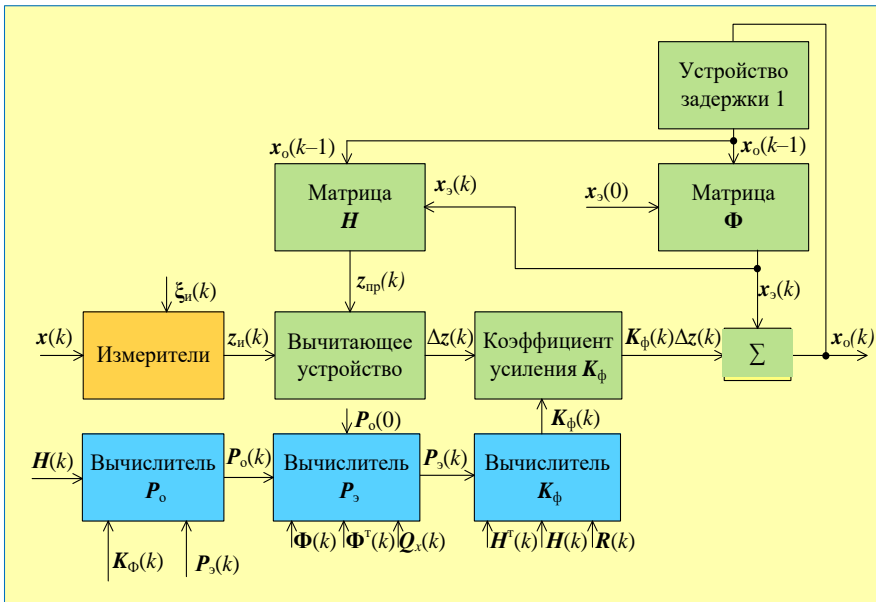


Рис. 2.1. Структурная схема дискретного оптимального фильтра Калмана

Процедура образования оценки является рекуррентной и очень удобной для реализации на ЭВМ.

Основные свойства линейного фильтра Калмана:

– элементы матриц дисперсий измерения  $\mathbf{R}(k)$ , дисперсий возмущений  $\mathbf{Q}_x(k)$ , перехода состояния  $\mathbf{\Phi}(k)$ , наблюдения  $\mathbf{H}(k)$  являются постоянными величинами, поэтому эти матрицы не зависят от номера дискрета  $k$  ( $k$  – временной интервал)  $\mathbf{R}(k) = \mathbf{R}$ ,  $\mathbf{Q}_x(k) = \mathbf{Q}_x$ ,  $\mathbf{\Phi}(k) = \mathbf{\Phi}$ ,  $\mathbf{H}(k) = \mathbf{H}$ ;

– коэффициенты усиления фильтров  $\mathbf{K}_\phi(k)$  могут быть рассчитаны заранее (не в реальном масштабе времени) с помощью решения разностных уравнений (2.7) – (2.9);

– априорные и апостериорные ковариационные матрицы дисперсии ошибок фильтрации  $\mathbf{P}_0(k)$  и  $\mathbf{P}_3(k)$  не зависят от оценки состояния  $\mathbf{x}_0(k)$  и результатов измерения  $z_n(k)$ , которые в течение времени изменяются, а определяются ковариациями формирующего шума  $\mathbf{Q}_x$ , шума измерения  $\mathbf{R}$  и матрицами моделей  $\mathbf{\Phi}$  и  $\mathbf{H}$  и начальными условиями матрицы  $\mathbf{P}_0(0)$  по выражениям (2.7) и (2.9).

Следует отметить, что даже если элементы  $\mathbf{\Phi}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{R}$  и  $\mathbf{Q}_x$  калмановского фильтра не зависят от времени, то ковариационные матрицы ошибок  $\mathbf{P}_0(k)$  и  $\mathbf{P}_3(k)$ , матрица коэффициента усиления  $\mathbf{K}_\phi(k)$  фильтра зависят от номера дискрета  $k$  и начальных условий  $\mathbf{P}_0(0)$ .

В этом случае фильтр Калмана является нестационарным, а его параметры  $\mathbf{K}_\phi(k)$ ,  $\mathbf{P}_0(k)$  и  $\mathbf{P}_3(k)$  сходятся к постоянным значениям по мере увеличения  $k$  (если система наблюдаема и управляема), достигая установившегося режима, когда  $\mathbf{K}_\phi(k)$ ,  $\mathbf{P}_0(k)$  и  $\mathbf{P}_3(k)$  становятся постоянными матрицами, не зависящими от времени.

При реализации фильтра Калмана важным представляется обеспечение устойчивости, т.е. достижение сходимости оценок фазовых координат (установившиеся значения ошибок фильтрации) системы, даже при наличии шумов, ошибок измерений или неточных начальных условий.

Отклонение реальных ошибок фильтра Калмана от расчетных обусловлено несоответствием между идеализированной математической моделью ВС и реальными условиями применения:

– неточность модели состояния ВС и измерений (фильтр Калмана основывается на предположении о линейности системы и гауссовом характере шумов. В реальности системы часто являются нелинейными, а шумы могут иметь другое распределение или быть коррелированными, что приводит к неадекватности модели и, как следствие, к расхождению ошибок);

- ошибки параметров формирующего шума  $Q_x$ , шума измерения  $R$ ;
- неучтенные систематические ошибки и возмущения (фильтр Калмана предполагает, что шумы являются случайными и если в системе присутствуют систематические ошибки или неожиданные внешние воздействия, фильтр не может их корректно обработать, что приводит к росту реальной ошибки, которая может превышать расчетную в разы);
- ошибки округления в ЭВМ;
- ошибки определения начальных оценок фазовых координат вектора состояния;
- ошибки задания начальных значений априорной ковариационной матрицы ошибок фильтрации  $P_0(k)$ .

В ряде случаев перечисленные выше ошибки могут привести к тому, что процесс фильтрации станет расходящимся.

Оптимальная линейная фильтрация Калмана обладает рядом достоинств [20]:

- практически реализует структуру системы, обеспечивающую несмещенные оценки и минимальные ошибки фильтрации;
- фильтр использует только предыдущую оценку состояния и текущее измерение, не требуя хранения всей истории данных, что экономит память и вычислительные ресурсы;
- алгоритмы оптимальных фильтров имеют удобное для реализации в ЭВМ представление в виде рекуррентных (повторяющихся) соотношений, что сокращает объем вычислений и повышает их точность;
- фильтр предсказывает состояние системы на следующий момент времени, а затем корректирует это предсказание на основе нового измерения, что позволяет отслеживать динамические процессы;
- в оптимальных фильтрах данные измерений обрабатываются по мере их получения в реальном масштабе времени;
- эффективная работа с шумами датчиков информации за счет более точной динамической модели состояния;
- имеется возможность решать задачи синтеза многомерных стационарных и нестационарных динамических систем с использованием расширенного фильтра Калмана.

Основные свойства нелинейного фильтра Калмана:

- матрицы перехода состояния  $\Phi(k)$  и (или) наблюдения  $H(k)$  зависят от оценки фазовых координат;
- коэффициенты  $K_f(k)$  не могут быть рассчитаны заранее путем решения разностных уравнений (2.7) – (2.9), так как ковариационные матрицы  $P_0(k)$  и  $P_3(k)$  зависят от оценки состояния фазовых координат  $x_0(k)$  и результатов измерения  $z_{и}(k)$ .

### **Порядок действий при реализации алгоритма (2.5) – (2.14):**

1. Вначале вводятся начальные условия ( $k=0$ ) элементы матриц формирующего шума  $\mathbf{Q}_x$ , шума измерения  $\mathbf{R}$ , перехода  $\mathbf{\Phi}(0)$ , измерения  $\mathbf{H}(0)$ , фазовые координаты вектора состояния  $\mathbf{x}_o(0)$ .

2. Далее вычисляются элементы матриц на 1-м шаге  $\mathbf{\Phi}(1)$  и  $\mathbf{\Phi}^T(1)$ ,  $\mathbf{H}(1)$  и  $\mathbf{H}^T(1)$  с учетом вектора  $\mathbf{x}_o(0)$ .

3. По рекуррентным выражениям (2.6) и (2.7) вычисляется экстраполированный вектор состояния  $\mathbf{x}_s(1)$  и априорная ковариационная матрица дисперсии  $\mathbf{P}_s(1)$ .

4. После вычисления матрицы  $\mathbf{P}_s(1)$  по соотношению (2.8) определяются элементы матрицы  $\mathbf{K}_\Phi(1)$ .

5. По выражению (2.9) вычисляются элементы апостериорной ковариационной матрицы дисперсии  $\mathbf{P}_o(1)$ .

6. По основному уравнению (2.5) вычисляются оценки фазовых координат вектора состояния  $\mathbf{x}_o(1)$ .

1-й шаг закончен. На 2-м шаге вычисляются элементы векторов и матриц  $\mathbf{\Phi}(2)$ ,  $\mathbf{\Phi}^T(2)$ ,  $\mathbf{H}(2)$ ,  $\mathbf{H}^T(2)$ ,  $\mathbf{P}_s(2)$ ,  $\mathbf{K}_\Phi(2)$ ,  $\mathbf{P}_o(2)$ ,  $\mathbf{x}_s(2)$ ,  $\mathbf{x}_o(2)$ , далее идут в том же порядке вычисления элементов векторов и матриц на следующем шаге и т.д.

## **2.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛГОРИТМОВ КАЛМАНОВСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ**

### **2.2.1. Исследование потенциальной точности**

В процессе анализа ИИС на точность в общем случае находят потенциальные и реальные ошибки функционирования с привлечением как аналитических методов, так и имитационного моделирования. На первом этапе анализа обычно определяют потенциальную точность.

Условием требуемой потенциальной точности является соответствие математической модели состояния и измерений воздушного объекта.

Характеристики шумов (дисперсии  $\mathbf{Q}_x$  и  $\mathbf{R}$ ) влияют на потенциальную точность калмановского фильтра ИИС.

Исследование потенциальной точности проводится в целях определения минимально возможных ошибок функционирования ИИС. Кроме того, потенциальная точность служит одним из необходимых признаков соответствия ИИС заданным требованиям. Если показатели потенциальной точности не соответствуют требованиям, то дальнейший анализ направлен на выявление причин такого несоответствия (выбор математической модели состояния

и измерений, характеристики шумов). Для оптимальных ИИС потенциальная точность характеризуется диагональными элементами априорной ковариационной матрицы ошибок фильтрации  $P_o(k)$ , представляющих собой дисперсии ошибок фильтрации компонентов вектора состояния (фазовых координат)  $P_{o11}(k), P_{o22}(k), \dots, P_{onn}(k)$ , которые позволяют судить о качестве функционирования оптимального фильтра и характеризуют точность оценки фазовых координат. Дисперсии ошибок фильтрации вычисляются в процессе решения уравнений Риккати (2.7) – (2.9).

При исследовании потенциальной точности калмановского фильтра не учитываются изменения динамики воздушного объекта и шумов измерения.

Если потенциальные ошибки соответствуют требованиям, то исследуется точность фильтрации в условиях, приближенных к реальным (в дальнейшем – реальная точность). Основным методом исследования реальной точности является имитационное моделирование на ЭВМ. В процессе этого моделирования определяются суммарные динамические и флуктационные ошибки в различных условиях применения ИИС, а также наличие расходимости процессов оценивания фазовых координат калмановского фильтра.

### 2.2.2. Исследование реальной точности

С помощью имитационного моделирования на ЭВМ проводятся исследования реальной точности оценок фазовых координат сопровождаемого воздушного объекта. Имитационное моделирование на ЭВМ представляет собой имитацию входных сигналов  $z_{in}(k)$  (2.4) и обработку этих сигналов с помощью алгоритма (2.5) – (2.9). Имитация входного сигнала  $z_{in}(k)$  представляет собой изменение истинных фазовых координат  $x(k)$  и шума наблюдения  $\xi_{in}(k)$ .

Шум наблюдения  $\xi_{in}(k)$  имитируется датчиками случайных чисел. Знание реальных ошибок фильтрации позволяет достоверно оценить работоспособность полученных алгоритмов фильтрации в условиях, приближенных к реальным. Реальная точность оценивается по величине среднеквадратической ошибки (СКО) оценок фазовых координат по количеству не менее 100 реализаций формулой [20]

$$\sigma_{x_p}(k) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (x(k) - x_{oj}(k))^2}{N-1}}, \quad (2.15)$$

где  $\sigma_{x_p}(k)$  – средняя квадратичная ошибка оценивания фазовой координаты цели;  $x(k)$  – истинные значения фазовых координат ВС;  $x_{oj}(k)$  – оценочные значения фазовых координат цели  $j$ -й реализации;  $N$  – количество реализаций.

В фильтре Калмана флуктуационные ошибки зависят от шумов измерения (наблюдения)  $\xi_n(k)$  и возмущения  $\xi_x(k)$ , которые характеризуются дисперсиями ошибок измерений  $R(k)$  и возмущений  $Q_x(k)$ .

Шумы  $\xi_n(k)$  и  $\xi_x(k)$  могут не подчиняться гауссовскому закону, поэтому флуктуационные ошибки увеличиваются.

Динамические ошибки зависят от неточности модели состояния ИИС реальным условиям применения ИИС (маневр ВС относительно РЛС), которые приводят к увеличению ошибок оценки фазовых координат.

## 2.3. ДИСКРЕТНЫЙ КАЛМАНОВСКИЙ ФИЛЬТР ОЦЕНКИ ДАЛЬНОСТИ И СКОРОСТИ ДАЛЬНОМЕРНОГО КАНАЛА

### 2.3.1. Выбор и обоснование исходных моделей состояния и наблюдения

В общем случае обработка информации в ИИС основана на использовании информации о входных сигналах и помехах, измерителях входной информации, а также характере движения ВС. Эта априорная информация описывается в виде математических моделей сигналов, помех и их измерителей.

Для простого случая на основе гипотезы изменения фазовых координат с постоянной скоростью для оценивания дальности и скорости с учетом уравнения состояния в общем виде

$$\mathbf{x}(k) = \Phi(k)\mathbf{x}(k-1) + \Gamma(k)\xi_x(k) \quad (2.16)$$

запишем линейную модель состояния в векторно-матричной форме:

$$\left. \begin{aligned} [\mathbf{X}(k)] &= [\Phi] \times [\mathbf{X}(k-1)] + [\Gamma] \times [\xi_x(k-1)] \\ \left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} D(k) \\ V(k) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & \tau \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} D(k-1) \\ V(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \xi_d(k-1) \\ 0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

в алгебраической форме:

$$\left. \begin{aligned} D(k) &= D(k-1) + V(k-1)\tau + \xi_d(k-1); \\ V(k) &= V(k-1), \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

где  $D(k)$  и  $V(k)$  – дальность до ВС и его скорость;  $\tau$  – интервал дискретизации;  $\xi_d(k)$  – шумы возмущения, учитывающие турбулентность атмосферы, неравномерность тяги двигателей ВС и т.д. с известной матрицей ковариаций шумов:

$$Q_x = M \left\{ \begin{bmatrix} \xi \\ \xi_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi^T \\ \xi_d^T \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} D_{D_x} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

Так как предполагается, что измеряется в дальномере только дальность, то с учетом выражения наблюдения в общем виде

$$z_n(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \xi_n(k) \quad (2.20)$$

уравнение наблюдения дальномера в векторно-матричной форме имеет вид

$$\begin{aligned} [\mathbf{Z}_n(k)] &= [\mathbf{H}] \times [\mathbf{X}(k)] + \xi_n(k); \\ [\mathcal{D}_n(k)] &= [1 \ 0] \times \begin{bmatrix} \mathcal{D}(k) \\ V(k) \end{bmatrix} + [\xi_{\mathcal{D}_n}(k)], \end{aligned} \quad (2.21)$$

в алгебраической форме

$$\mathcal{D}_n(k) = \mathcal{D}(k) + \xi_{\mathcal{D}_n}(k), \quad (2.22)$$

где  $\xi_{\mathcal{D}_n}(k)$  – дискретный белый шум измерителя дальности с известной дисперсией шумов измерений:

$$\mathbf{R}_d = M \left\{ \begin{matrix} \xi \\ \xi_{\mathcal{D}_n} \end{matrix} \begin{matrix} \xi^T \\ \xi_{\mathcal{D}_n}^T \end{matrix} \right\} = \mathbf{R}_{d_n}. \quad (2.23)$$

### 2.3.2. Алгоритм фильтрации для оценивания дальности и скорости

На основании модели состояния (2.18), модели наблюдения (2.22), дисперсии шумов возмущения (2.19), дисперсии шумов измерения (2.23) и учитывая рекуррентные уравнения в общем виде (2.5) – (2.9), получим алгоритм калмановской фильтрации для оценивания сопровождаемой дальности и радиальной скорости ВС:

$$\mathcal{D}_o(k) = \mathcal{D}_o(k-1) + K_{\phi_1}(k)\Delta\mathcal{D}(k); \quad (2.24)$$

$$V_o(k) = V_o(k-1) + K_{\phi_2}(k)\Delta V(k); \quad (2.25)$$

$$\mathcal{D}_o(k) = \mathcal{D}_o(k-1) + V_o(k-1)\tau, \quad \mathcal{D}_o(0) = \mathcal{D}_n(0); \quad (2.26)$$

$$V_o(k) = V_o(k-1), \quad V_o(0) = V_n(0); \quad (2.27)$$

$$\Delta\mathcal{D}(k) = \mathcal{D}_n(k) - \mathcal{D}_o(k); \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_o(k) &= \begin{bmatrix} P_{o11}(k) & P_{o12}(k) \\ P_{o21}(k) & P_{o22}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tau \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_{o11}(k-1) & P_{o12}(k-1) \\ P_{o21}(k-1) & P_{o22}(k-1) \end{bmatrix} \times \\ &\times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \tau & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{dx} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_\phi(k) &= \begin{bmatrix} K_{\phi_1}(k) \\ K_{\phi_2}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{o11}(k) & P_{o12}(k) \\ P_{o21}(k) & P_{o22}(k) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \\ &\times \left\{ [1 \ 0] \times \begin{bmatrix} P_{o11}(k) & P_{o12}(k) \\ P_{o21}(k) & P_{o22}(k) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R}_{d_n} \right\}^{-1}; \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$\mathbf{P}_o(k) = \begin{bmatrix} P_{o11}(k) & P_{o12}(k) \\ P_{o21}(k) & P_{o22}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\text{э}11}(k) & P_{\text{э}12}(k) \\ P_{\text{э}21}(k) & P_{\text{э}22}(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{\phi 1}(k) \\ K_{\phi 2}(k) \end{bmatrix} \times [1 \quad 0] \times \begin{bmatrix} P_{\text{э}11}(k) & P_{\text{э}12}(k) \\ P_{\text{э}21}(k) & P_{\text{э}22}(k) \end{bmatrix}. \quad (2.31)$$

**Порядок действий при реализации алгоритма (2.24) – (2.31):**

1. Вначале вводятся время дискретизации  $\tau$ , постоянные элементы матриц и векторов  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{H}^T$ ,  $\mathbf{R}_{\text{дн}}$ ,  $\mathbf{\Phi}$ ,  $\mathbf{\Phi}^T$ ,  $\mathbf{Q}_x$ :

$$\mathbf{H} = [1 \quad 0]; \quad \mathbf{H}^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Q}_x = M \begin{Bmatrix} \xi \\ \xi_{\text{д}} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi^T \\ \xi_{\text{д}}^T \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{\text{д}x} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R}_{\text{д}} = R_{\text{дн}};$$

$$\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} 1 & \tau \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{\Phi}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \tau & 1 \end{bmatrix}.$$

2. Затем вводятся начальные значения фазовых координат ( $k=0$ )  $D_o(0) = D_{\text{э}}(0) = D_{\text{и}}(0)$ ,  $V_o(0) = V_{\text{э}}(0)$  и элементы матрицы  $\mathbf{P}_o(0)$ :

$$\mathbf{P}_o(0) = \begin{bmatrix} P_{o11}(0) & P_{o12}(0) \\ P_{o21}(0) & P_{o22}(0) \end{bmatrix}.$$

3. По формуле (2.29) вычисляются на 1-м шаге элементы матрицы  $\mathbf{P}_{\text{э}}(1)$ :

$$\mathbf{P}_{\text{э}}(1) = \mathbf{\Phi} \mathbf{P}_o(0) \mathbf{\Phi}^T + \mathbf{Q}_x.$$

4. По формуле (2.30) вычисляется на 1-м шаге матрица коэффициентов усиления фильтра  $\mathbf{K}_{\phi}(1)$ :

$$\mathbf{K}_{\phi}(1) = \mathbf{P}_{\text{э}}(1) \mathbf{H}^T \left\{ \mathbf{H} \mathbf{P}_{\text{э}}(1) \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_{\text{д}} \right\}^{-1}.$$

5. По формулам (2.26) и (2.27) вычисляются на 1-м шаге составляющие вектора прогноза  $D_{\text{э}}(1)$  и  $V_{\text{э}}(1)$ :

$$D_{\text{э}}(1) = D_o(0) + V_o(0)\tau;$$

$$V_{\text{э}}(1) = V_o(0).$$

6. По формуле (2.28) вычисляется на 1-м шаге невязка измерения  $\Delta D(1)$

$$\Delta D(1) = D_{\text{и}}(1) - D_{\text{э}}(1).$$

7. По формулам (3.12) и (3.13) вычисляются на 1-м шаге составляющие вектора оценки фазовых координат  $D_o(1)$  и  $V_o(1)$ :

$$D_o(1) = D_3(1) + K_{\phi 1}(1)\Delta D(1);$$

$$V_o(1) = V_3(1) + K_{\phi 1}(1)\Delta D(1).$$

8. По формуле (2.31) вычисляется на 1-м шаге матрица  $P_o(1)$ :

$$P_o(1) = P_3(1) - K_{\phi}(1)HP_3(1).$$

Шаг закончен. Далее идут в том же порядке вычисления на следующем шаге  $P_3(2)$ ,  $K_{\phi}(2)$ ,  $D_3(2)$ ,  $V_3(2)$ ,  $\Delta D(2)$ ,  $D_o(2)$ ,  $V_o(2)$ ,  $P_o(2)$  и т.д.

На основании алгоритма {ХЕ} (2.24) – (2.31) разработана функциональная схема дальномерного канала ИИС, приведенная на рис. 2.2.

Функциональная схема включает в себя: фильтр отслеживаемого процесса; вычислитель коэффициентов усиления; измеритель дальности Д. Фильтр отслеживаемого процесса состоит из усилителей невязки  $\Delta D$  ( $K_{\phi 1}, K_{\phi 2}$ ), экстраполятора дальности (устройства задержки УЗ1, сумматора Сум.3, коэффициента умножения  $\tau$ ), экстраполятора скорости (устройства задержки УЗ2). Вычислитель коэффициентов усиления  $K_{\phi}$  состоит из вычислителя априорной ковариационной матрицы ошибок фильтрации  $P_o$ , вычислителя апостериорной ковариационной матрицы ошибок фильтрации  $P_3$ , вычислителя матрицы коэффициентов усиления  $K$ .

Входной сигнал  $D_{и}$  измеряется в РЛС. Выходные сигналы  $D_o(k)$  и  $V_o(k)$  могут использоваться для решения задач управления воздушным движением и используются для внутреннего потребления фильтра по вычислению экстраполированных сигналов  $D_3(k)$  и  $V_3(k)$ . Выходные сигналы на экстраполяторы подаются через устройства задержек, которые задерживают сигналы на время, равное одному шагу (время дискретизации  $\tau$ ).

В вычислителе коэффициентов усиления  $K$  имеется возможность рассчитать коэффициенты  $K_{\phi 1}$  и  $K_{\phi 2}$  заранее и хранить в запоминающем устройстве ЭВМ (на схеме не показано), так как  $K_{\phi 1}$  и  $K_{\phi 2}$  не зависят от результатов измерений.

Нестационарность устройства по отслеживанию фазовых координат обусловлена наличием в фильтрах переменных коэффициентов усиления невязок  $K_{\phi}$ , которые изменяются от своих наибольших значений в момент начала работы до меньших значений в установившемся режиме.

Такое изменение коэффициентов дает возможность быстро отработать начальные ошибки захвата ВС за счет широкой полосы пропускания фильтров. В то же время более узкая полоса в установившемся режиме позволяет обеспечить хорошее сглаживание случайных возмущений шумов.

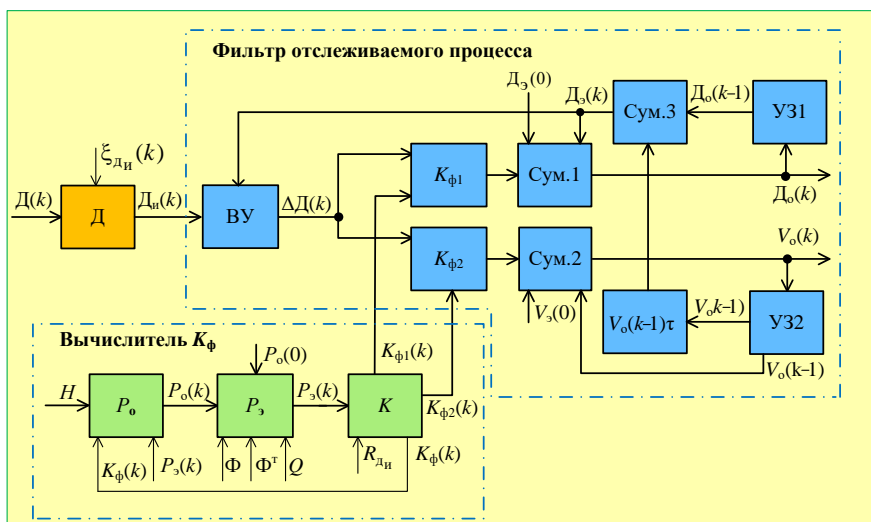


Рис. 2.2. Функциональная схема дальномерного канала

### 2.3.3. Исследование и анализ характеристик дальномерного канала

Для исследования характеристик дальномерного канала проводилось имитационное моделирование сигнала  $D_{дн}(k)$  на входе фильтра отслеживаемого процесса.

Входной сигнала  $D_{дн}(k)$  представляет собой изменение истинных фазовых координат  $D(k)$  и шума наблюдения  $\xi_{дн}(k)$ . Шум наблюдения  $\xi_{дн}(k)$  имитируется датчиками случайных чисел. Изменение дальности  $D(k)$  рассмотрим на примере сопровождения одной ВС при условии, что ВС не маневрирует (ускорение ВС относительно РЛС  $a=0$ ).

На рисунках 2.3 и 2.4 показано изменение коэффициентов усиления невязок  $K_{\Phi 1}$  и  $K_{\Phi 2}$  в зависимости от номера отсчета  $k$  (времени фильтрации).

На рисунках 2.5 и 2.6 показано изменение потенциальной точности фильтра (потенциальные средние квадратические ошибки по дальности  $\sigma_{дп} = \sqrt{P_{о11}}$  и скорости  $\sigma_{вп} = \sqrt{P_{о22}}$ ) в зависимости от номера отсчета  $k$ .

На рисунках 2.7 и 2.8 показано изменение реальной точности фильтра (реальные средние квадратические ошибки по дальности  $\sigma_{др}$  и скорости  $\sigma_{вр}$ , которые находятся согласно выражению (2.9) в зависимости от номера отсчета  $k$ ).

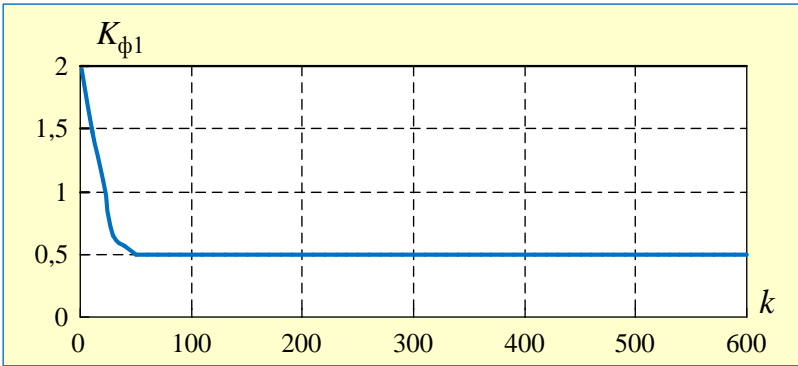


Рис. 2.3. Изменение коэффициента усиления невязки  $K_{\phi 1}$

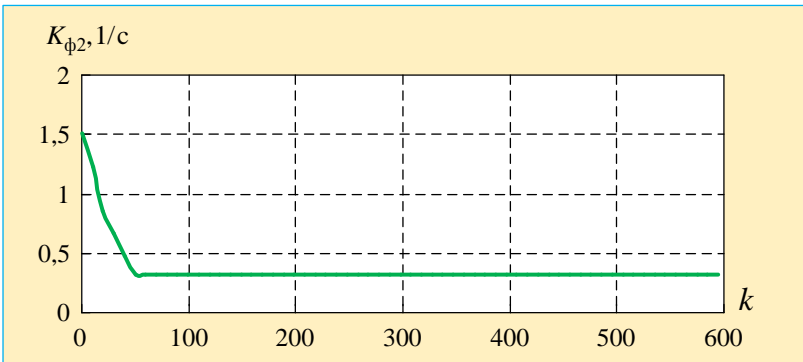


Рис. 2.4. Изменение коэффициента усиления невязки  $K_{\phi 2}$

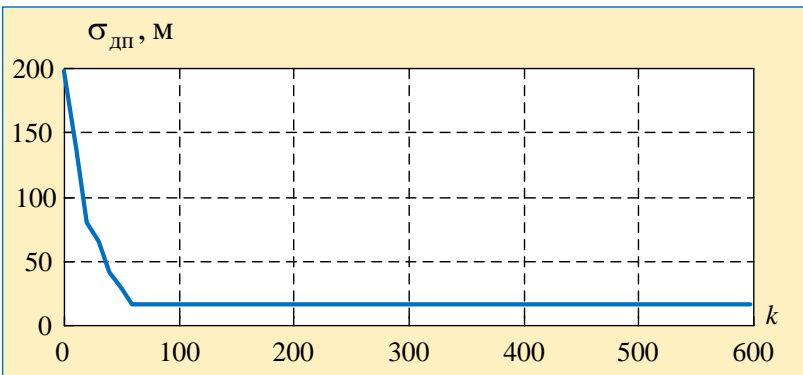


Рис. 2.5. Изменение потенциальной точности фильтра по дальности

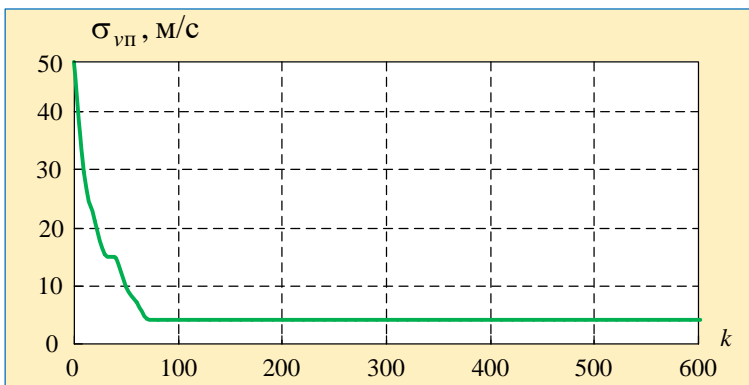


Рис. 2.6. Изменение потенциальной точности фильтра по скорости

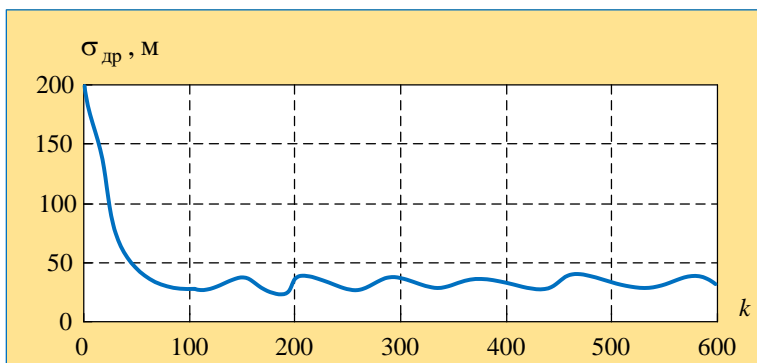


Рис. 2.7. Изменение реальной точности фильтра по дальности

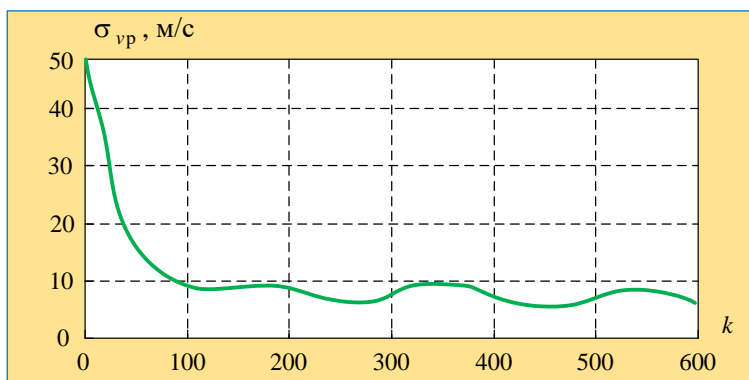


Рис. 2.8. Изменение реальной точности фильтра по скорости

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Сравнивая полученные реальные СКО (рис. 2.7 и 2.8) с потенциальными СКО (рис. 2.5 и 2.6), можно заметить, что реальные ошибки оценивания дальности и скорости отличаются незначительно от потенциальных.

2. Потенциальные СКО фильтрации (рис. 2.5 и 2.6) достаточно быстро достигают высокой точности оценки дальности и скорости, а первоначальная высокая ошибка быстро снижается. Это свидетельствует об устойчивости и хорошей сходимости алгоритма фильтрации.

3. Потенциальные СКО фильтрации (рис. 2.5 и 2.6) в установившемся режиме имеют постоянные величины. Это связано с тем, что потенциальные точностные характеристики не зависят от результатов измерений, а зависят от постоянных значений составляющих элементов дисперсий шумов измерений  $R_{дн}$  и шумов возмущений  $Q_x$  в уравнениях Риккати (2.29) – (2.31).

3. Реальные СКО фильтрации достаточно быстро уменьшают свои значения относительно начальных, но в установившемся режиме имеют непостоянные величины (рис. 2.7 и 2.8), потому что реальные точностные характеристики зависят от результатов измерений, в которых модель шума измерения  $\xi_{дн}(k)$  не полностью имитирует гауссовский закон.

Также влияет на колебания реальных СКО динамика ВС (дальность и скорость ВС меняются со временем), которая в алгоритме дальномера ИИС постоянно корректирует оценки дальности и скорости ВС.

4. В данном фильтре получены небольшие СКО, так как модель состояния (2.18) адекватна условиям изменения дальности и скорости ВС (ускорение  $a = 0$ ), в результате чего рассчитываются оптимальные коэффициенты усиления (рис. 2.3 и 2.4).

5. Если модель состояния (2.18) использовать для фильтрации фазовых координат ВС, которые изменяются по нелинейному закону относительно РЛС ИИС, то будут увеличиваться ошибки СКО, или фильтр будет склонен к расходимости (резко увеличиваются ошибки СКО). В этом случае можно говорить, что данный фильтр не оптимален к реальному движению ВС (маневрирование, изменение курса, высоты или скорости).

#### 2.4. ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ $\alpha$ - $\beta$ - И $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ -ФИЛЬТРАЦИИ ОЦЕНКИ ДАЛЬНОСТИ И СКОРОСТИ ДАЛЬНОМЕРНОГО КАНАЛА

Алгоритм  $\alpha$ - $\beta$ -фильтрации – это простой рекурсивный алгоритм оценивания, используемый для оценки координат и скорости движущихся объектов линейных систем. Он является упрощенной формой фильтра Калмана, но в отличие от него, использует постоянные коэффициенты усиления невязок. Фильтр работает на основе предположения, что объект движется с постоянной скоростью и проводит на каждом шаге экстраполяцию и коррекцию прогноза:

- альфа-коэффициент  $\alpha$  для коррекции прогноза координат объекта;
- бета-коэффициент  $\beta$  для коррекции скорости изменения координат объекта.

Алгоритм  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ -фильтрации используется для оценки координат, скорости изменения и ускорения движущихся объектов линейных систем.  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ -фильтр работает на основе гипотезы, что объект движется с постоянным ускорением, использует три постоянных коэффициента  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  для коррекции фазовых координат:

- $\alpha$  используется для коррекции прогноза координат объекта;
- $\beta$  корректирует скорость изменения координат объекта;
- $\gamma$  корректирует ускорение объекта.

Рассмотрим задачу сопровождения ВС по дальности в ИИС УВД для формирования оценки дальности  $D$  и скорости сближения  $V$  по алгоритму  $\alpha$ - $\beta$ -фильтрации [20]:

$$D_o(k) = D_o(k) + \alpha \Delta D(k); \quad (2.32)$$

$$V_o(k) = V_o(k) + \frac{\beta}{\tau} \Delta D(k); \quad (2.33)$$

$$D_o(k) = D_o(k-1) + V_o(k-1)\tau, \quad D_o(0) = D_{и}(0); \quad (2.34)$$

$$V_o(k) = V_o(k-1), \quad V_o(0) = V_{и}(0); \quad (2.35)$$

$$\Delta D(k) = D_{и}(k) - D_o(k), \quad (2.36)$$

а по алгоритму  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ -фильтрации – оценки дальности  $D_o$  скорости сближения  $V_o$ , ускорения  $a_o$  [20]:

$$D_o(k) = D_o(k) + \alpha \Delta D(k); \quad (2.37)$$

$$V_o(k) = V_o(k) + \frac{\beta}{\tau} \Delta D(k); \quad (2.38)$$

$$a_o(k) = a_o(k) + \frac{\gamma}{\tau^2} \Delta D(k); \quad (2.39)$$

$$D_o(k) = D_o(k-1) + V_o(k-1)\tau + 0,5a_o(k-1)\tau^2, \quad D_o(0) = D_{и}(0); \quad (2.40)$$

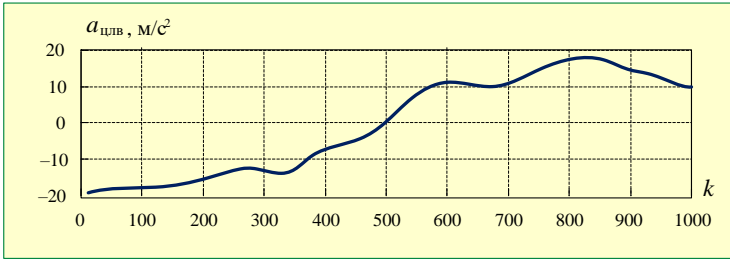
$$V_o(k) = V_o(k-1) + a_o(k-1)\tau, \quad V_o(0) = V_{и}(0); \quad (2.41)$$

$$a_o(k) = a_o(k-1), \quad a_o(0) = a_{и}(0); \quad (2.42)$$

$$\Delta D(k) = D_{и}(k) - D_o(k). \quad (2.43)$$

В выражениях (2.32) – (2.43):  $k$  – номер дискрета;  $\tau$  – интервал дискретизации;  $D_o$ ,  $V_o$ ,  $a_o$  – экстраполированные значения дальности, скорости и ускорения;  $D_{и}$  – дальность, измеренная первичным измерителем.

На основании выражений (2.32) – (2.36) и (2.37) – (2.43) проводилось имитационное моделирование движения ВС относительно РЛС ИИС. Изменение ускорения ВС относительно РЛС показано на рис. 2.9.



**Рис. 2.9.** Изменение ускорения ВС относительно РЛС

Результаты моделирования представлены на рис. 2.10 и 2.11, где представлены графики изменения во времени СКО оценки фильтрации дальности  $D$  и скорости  $V$  по линии визирования между РЛС ИИС и ВС.

Из графиков (рис. 2.10, 2.11) видно, что СКО по дальности и скорости меньше в  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ -фильтра по сравнению  $\alpha$ - $\beta$ -фильтром. Это связано с тем, что в алгоритме  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ -фильтра используется модель состояния на основе гипотезы изменения фазовых координат с постоянным ускорением:

$$D(k) = D(k-1) + V(k-1)\tau + 0,5a(k-1)\tau^2; \quad (2.44)$$

$$V(k) = V(k-1) + a(k-1)\tau; \quad (2.45)$$

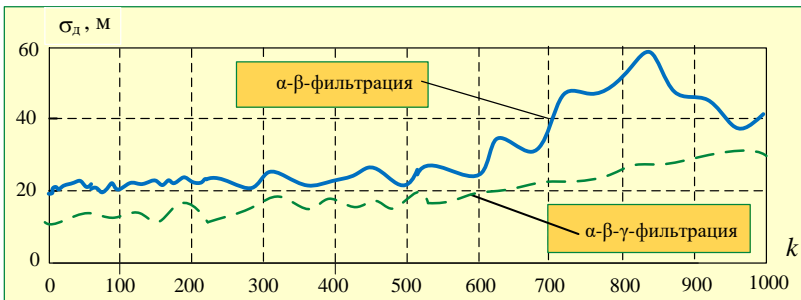
$$a(k) = a(k-1), \quad (2.46)$$

в алгоритме  $\alpha$ - $\beta$ -фильтра используется модель состояния на основе гипотезы изменения фазовых координат с постоянной скоростью:

$$D(k) = D(k-1) + V(k-1)\tau; \quad (2.47)$$

$$V(k) = V(k-1). \quad (2.48)$$

Модель состояния (2.44) – (2.46) более точно описывает модель движения ВС относительно РЛС по сравнению с моделью уравнений (2.47) и (2.48), что позволяет более точно осуществлять экстраполяцию в  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ -фильтре.



**Рис. 2.10.** Зависимость СКО дальности от времени

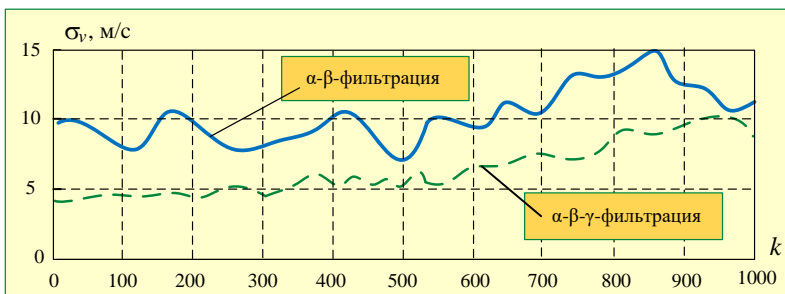


Рис. 2.11. Зависимость СКО скорости от времени

Анализ графиков (рис. 2.10 и 2.11) показывает, что СКО по дальности и скорости не отвечают современным требованиям по точности ИИС УВД.

## 2.5. ДИСКРЕТНЫЙ КАЛМАНОВСКИЙ ФИЛЬТР ЗИНГЕРОВСКОЙ МОДЕЛИ

### 2.5.1. Разработка алгоритма калмановского фильтра зингерской модели

Зингеровская модель в дальномерном канале позволяет проводить оценку дальности  $D$ , скорости  $V$  и ускорения  $a$  по линии визирования между ИИС и ВС. Ускорение в зингеровской модели описывается помощью стационарного процесса применительно к ансамблю всех возможных траекторий ВС [20]. Зингеровская модель состояния дальномерного канала имеет следующий вид:

$$D(k) = D(k-1) + V(k-1)\tau + 0,5a(k-1)\tau^2; \quad (2.49)$$

$$V(k) = V(k-1) + a(k-1)\tau; \quad (2.50)$$

$$a(k) = (1 - \alpha_\phi \tau)a(k-1) + \xi_a(k-1), \quad (2.51)$$

где  $\alpha_\phi$  – постоянная времени маневра;  $\xi_a(k-1)$  – центрированный гауссовский шум с известной дисперсией  $D_a$ .

Так как в модели (2.51) ускорение задается с учетом ансамбля всех возможных траекторий, то формируемый фильтр оптимален по отношению к ансамблю траекторий и неоптимален по отношению к одиночной траектории.

Для обеспечения наблюдаемости и устойчивости калмановского фильтра для зингеровской модели используем модель наблюдения, в которой используется информация об измерении дальности до ВС относительно РЛС ИИС:

$$D_n(k) = D(k) + \xi_{дн}(k), \quad (2.52)$$

где  $\xi_{\text{ди}}(k)$  – дискретный белый шум измерителя дальности с известной дисперсией шумов измерений  $R_{\text{ди}}$ .

Для получения алгоритма калмановского фильтра с использованием зингеровской модели воспользуемся общим алгоритмом калмановской фильтрации (2.5) – (2.9).

На основе модели состояния (2.49) – (2.51), модели наблюдения (2.52) и общего алгоритма калмановской фильтрации получен алгоритм фильтрации дальномерного канала ИИС:

$$D_o(k) = D_o(k) + K_{\phi 1} \Delta D(k); \quad (2.53)$$

$$V_o(k) = V_o(k) + K_{\phi 2} \Delta D(k); \quad (2.54)$$

$$a_o(k) = a_o(k) + K_{\phi 3} \Delta D(k); \quad (2.55)$$

$$D_o(k) = D_o(k-1) + V_o(k-1)\tau + a_o(k-1)\frac{\tau^2}{2}; \quad (2.56)$$

$$V_o(k) = V_o(k-1) + a_o(k-1)\tau; \quad (2.57)$$

$$a_o(k) = (1 - \alpha\tau)a_o(k-1); \quad (2.58)$$

$$D_{\text{и}}(k) = D(k) + \xi_{\text{ди}}(k); \quad (2.59)$$

$$\Delta D(k) = D_{\text{и}}(k) - D_o(k); \quad (2.60)$$

$$K_{\phi}(k) = \begin{bmatrix} K_{\phi 1}(k) \\ K_{\phi 2}(k) \\ K_{\phi 3}(k) \end{bmatrix} = P_o(k)H^T \{HP_o(k)H^T + R_{\text{ди}}\}^{-1}; \quad (2.61)$$

$$P_o(k) = \begin{bmatrix} P_{o11}(k) & P_{o12}(k) & P_{o13}(k) \\ P_{o21}(k) & P_{o22}(k) & P_{o23}(k) \\ P_{o31}(k) & P_{o32}(k) & P_{o33}(k) \end{bmatrix} = \Phi P_o(k-1)\Phi^T + Q_x; \quad (2.62)$$

$$P_o(k) = \begin{bmatrix} P_{o11}(k) & P_{o12}(k) & P_{o13}(k) \\ P_{o21}(k) & P_{o22}(k) & P_{o23}(k) \\ P_{o31}(k) & P_{o32}(k) & P_{o33}(k) \end{bmatrix} = P_o(k) - K_{\phi}(k)HP_o(k). \quad (2.63)$$

### Порядок действий при реализации алгоритма (2.53) – (2.63):

1. Вначале вводятся время дискретизации  $\tau$ , постоянная времени маневра  $\alpha_{\phi}$ , постоянные элементы матриц и векторов  $H$ ,  $H^T$ ,  $R_{\text{ди}}$ ,  $\Phi$ ,  $\Phi^T$ ,  $Q_x$ :

$$\mathbf{H} = [1 \ 0 \ 0]; \mathbf{H}^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{Q}_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{a,x} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_d = R_{d_i}; \mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} 1 & \tau & 0,5\tau^2 \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 1 - \alpha_\phi \tau \end{bmatrix}; \mathbf{\Phi}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \tau & 1 & 0 \\ 0,5\tau^2 & \tau & 1 - \alpha_\phi \tau \end{bmatrix}.$$

2. Вводим начальные значения фазовых координат ( $k=0$ )  $D_o(0) = D_\Delta(0) = D_{и}(0)$ ,  $V_o(0) = V_\Delta(0)$ ,  $a_o(0) = a_\Delta(0)$  и элементы матрицы  $\mathbf{P}_o(0)$ :

$$\mathbf{P}_o(0) = \begin{bmatrix} P_{o11}(0) & P_{o12}(0) & P_{o13}(0) \\ P_{o21}(0) & P_{o22}(0) & P_{o23}(0) \\ P_{o31}(0) & P_{o32}(0) & P_{o33}(0) \end{bmatrix}.$$

3. По формуле (2.62) вычисляются на 1-м шаге элементы матрицы  $\mathbf{P}_\Delta(1)$ :

$$\mathbf{P}_\Delta(1) = \mathbf{\Phi} \mathbf{P}_o(0) \mathbf{\Phi}^T + \mathbf{Q}_x.$$

4. По формуле (2.61) вычисляется на 1-м шаге матрица коэффициентов усиления фильтра  $\mathbf{K}_\phi(1)$ :

$$\mathbf{K}_\phi(1) = \mathbf{P}_\Delta(1) \mathbf{H}^T \left\{ \mathbf{H} \mathbf{P}_\Delta(1) \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_d \right\}^{-1}.$$

5. По формулам (2.56) – (2.58) вычисляются на 1-м шаге составляющие вектора прогноза  $D_\Delta(1)$ ,  $V_\Delta(1)$  и  $a_\Delta(1)$ :

$$D_\Delta(1) = D_o(0) + V_o(0)\tau + a_o(0)\frac{\tau^2}{2};$$

$$V_\Delta(1) = V_o(1) + a_o(1)\tau;$$

$$a_\Delta(1) = (1 - \alpha\tau)a_o(1).$$

6. По формуле (2.60) вычисляется на 1-м шаге невязка измерения  $\Delta D(1)$ :

$$\Delta D(1) = D_{и}(1) - D_\Delta(1).$$

7. По формулам (2.53) – (2.56) вычисляются на 1-м шаге составляющие вектора оценки фазовых координат  $D_o(1)$ ,  $V_o(1)$  и  $a_o(1)$ :

$$D_o(1) = D_3(1) + K_{\phi 1}(1)\Delta D(1);$$

$$V_o(1) = V_3(1) + K_{\phi 2}(1)\Delta D(1);$$

$$a_o(1) = a_3(1) + K_{\phi 3}(1)\Delta D(1).$$

8. По формуле (2.63) вычисляется на 1-м шаге матрица  $P_o(1)$ :

$$P_o(1) = P_3(1) - K_{\phi}(1)HP_3(1).$$

Шаг закончен. Далее идут в том же порядке вычисления на следующем шаге  $P_3(2)$ ,  $K_{\phi}(2)$ ,  $D_3(2)$ ,  $V_3(2)$ ,  $a_3(2)$   $\Delta D(2)$ ,  $D_o(2)$ ,  $V_o(2)$ ,  $a_o(2)$ ,  $P_o(2)$  и т.д.

### 2.5.2. Разработка функциональной схемы дальномерного канала ИИС

На основании алгоритма (2.24) – (2.31) разработана функциональная схема дальномерного канала ИИС, приведенная на рис. 2.12. Функциональная схема включает в себя: фильтр отслеживаемого процесса; вычислитель коэффициентов усиления; измеритель дальности Д. Фильтр отслеживаемого процесса состоит из усилителей невязки  $\Delta D$  ( $K_{\phi 1}, K_{\phi 2}, K_{\phi 3}$ ), экстраполятора дальности (устройства задержки УЗ1, сумматора Сум.4, коэффициентов умножения  $\tau$  и  $0,5 \tau$ ), экстраполятора скорости (устройства задержки УЗ2, коэффициента умножения  $\tau$ ), экстраполятора ускорения (устройства задержки УЗ3, коэффициента умножения  $1 - a_{\phi \tau}$ ).

Вычислитель коэффициентов усиления  $K_{\phi}$  состоит из вычислителя априорной ковариационной матрицы ошибок фильтрации  $P_o$ , вычислителя апостериорной ковариационной матрицы ошибок фильтрации  $P_3$ , вычислителя матрицы коэффициентов усиления  $K$ .

Входной сигнал  $D_n$  измеряется в РЛС ИИС. Выходные сигналы  $D_o(k)$ ,  $V_o(k)$  и  $a_o(k)$  могут использоваться для решения задач управления воздушным движением и используются для внутреннего потребления фильтра по вычислению экстраполированных сигналов  $D_3(k)$ ,  $V_3(k)$  и  $a_3(k)$ . Выходные сигналы на экстраполяторы подаются через устройства задержек, которые задерживают сигналы на время, равное одному шагу (время дискретизации  $\tau$ ).

В вычислителе коэффициентов усиления  $K$  имеется возможность рассчитать коэффициенты  $K_{\phi 1}$ ,  $K_{\phi 2}$  и  $K_{\phi 3}$  заранее и хранить в запоминающем устройстве ЭВМ (на схеме не показано).

$K_{\phi 1}$ ,  $K_{\phi 2}$  и  $K_{\phi 3}$  изменяются от своих наибольших значений в момент начала работы до меньших значений в установившемся режиме.

Такое изменение коэффициентов дает возможность быстро отработать начальные ошибки захвата ВС.

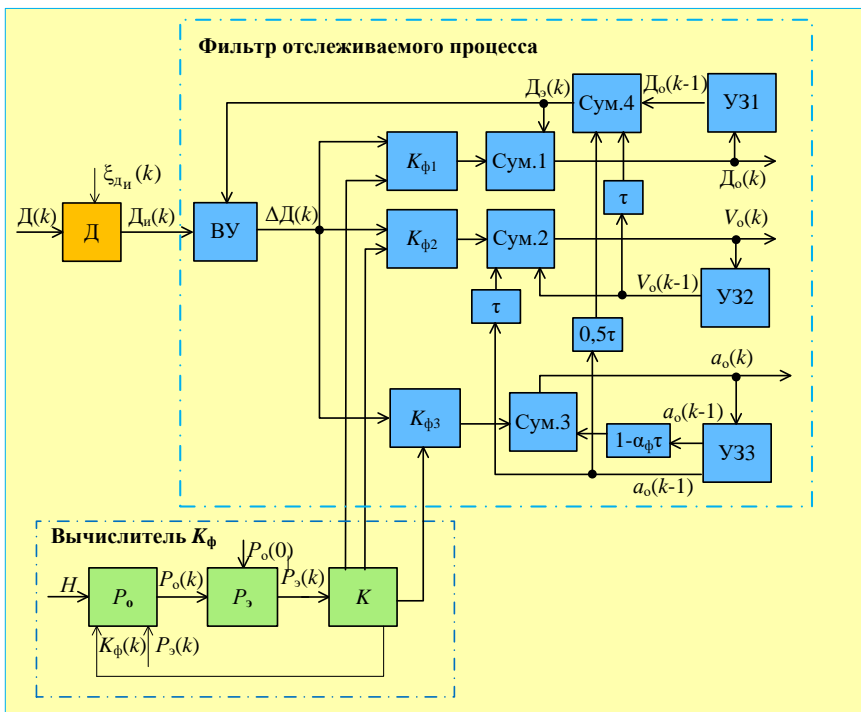


Рис. 2.12. Функциональная схема дальномерного канала

### 2.5.3. Исследование алгоритмов калмановского фильтра зингервской модели

На основании выражений (2.53) – (2.63) проводилось имитационное моделирование движения ВС относительно РЛС ИИС. Для имитационного моделирования движения ВС использовалось изменение ускорения ВС относительно РЛС как и по исследованию алгоритмов  $\alpha$ - $\beta$ - и  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ -фильтрации (рис. 2.9).

Результаты моделирования представлены на рис. 2.13 – графики изменения во времени СКО оценки фильтрации дальности ВС относительно РЛС ИИС для фильтра зингервской модели и для сравнения  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$  фильтра.

Из графиков (рис. 2.13) видно, что СКО по дальности меньше в фильтре зингервской модели по сравнению с  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ -фильтром.

Это связано с тем, что фильтр зингервской модели имеет преимущество при отслеживании в условиях более сложного маневра ВС (ускорение меняется с течением времени) по сравнению с  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ -фильтром, который лучше проводит фильтрацию по оценке фазовых координат с постоянным ускорением ВС.

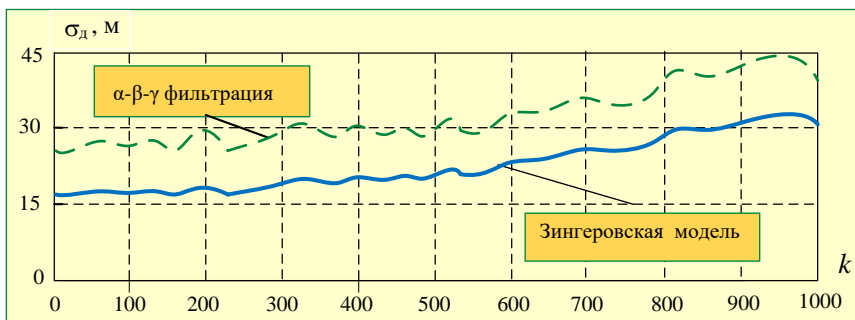


Рис. 2.13. Зависимость СКД дальности от времени

## 2.6. АДАПТИВНЫЙ КАЛМАНОВСКИЙ ФИЛЬТР

### 2.6.1. Анализ методов адаптивной фильтрации

Линейные алгоритмы калмановской фильтрации, которые используются для решения задач по оценке фазовых координат ВС, позволяют обеспечить оптимальную фильтрацию, если модели состояния динамической системы и наблюдения линейны, а статистические характеристики шумов гауссовские [20, 24]. Однако при синтезе линейного калмановского фильтра полагалось, что модель системы и наблюдений не меняется с течением времени. В реальных условиях фазовые координаты ВС изменяются по нелинейному закону (маневр ВС в процессе его полета, турбулентность атмосферы и т.д.), поэтому возникают динамические ошибки оценки фазовых координат. Смена погодных условий, замирания сигнала в канале распространения, изменение местоположения ВС на фоне плотных застроек городской среды и другие факторы приводят к значительным флуктуациям отношения сигнал/шум, что приводит к изменению дисперсии шумов измерений. Изменение дисперсии шумов измерений приводит к увеличению флуктуационных ошибок при оценке фазовых координат ВС.

Для уменьшения ошибок фильтрации необходимо осуществлять изменение параметров структуры линейного калмановского фильтра при изменении условий оценки фазовых координат. Для этого служат адаптивные калмановские фильтры.

Адаптивная система фильтрации – это система, которая автоматически изменяет свои параметры (коэффициенты фильтра) в реальном времени для оптимизации своей работы в условиях меняющейся внешней среды или при неизвестных заранее характеристиках входного сигнала.

В отличие от классических фильтров с фиксированными коэффициентами, адаптивные системы могут подстраиваться под динамически изменяющиеся условия.

Общая структура адаптивного фильтра показана на рис. 2.14.

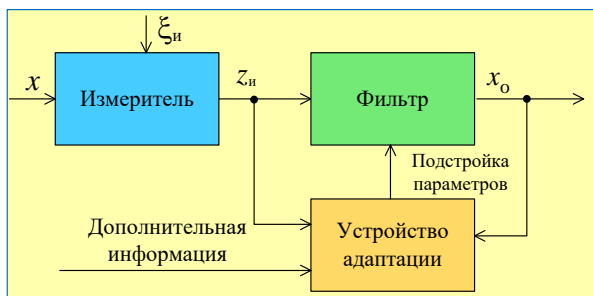


Рис. 2.14. Адаптивный фильтр

В адаптивных фильтрах априорная неопределенность статистических характеристик сигналов и помех преодолевается оцениванием их в процессе работы фильтра и использованием полученной информации для оптимизации фильтра. Задачей является выбор для случая синтеза канала слежения ИИС компонент вектора состояния, вектора наблюдения и параметров, подлежащих идентификации. Применение при синтезе ИИС алгоритмов теории идентификации позволяет, не изменяя кардинально модели, повысить точность и устойчивость слежения. Сущность идентификации заключается в оценивании параметров модели состояния, на основе чего производится адаптация системы к реальному характеру движения ВС. С этой целью в устройство адаптации (рис. 2.14) поступают измерительные сигналы  $z_{и}$ , выходные сигналы оценки фазовых координат  $x_o$  и сигналы дополнительной информации о свойствах объекта (кинематические и динамические характеристики). В устройстве адаптации формируются сигналы (подстройка параметров) для изменения коэффициентов усиления фильтра.

Существует несколько основных методов адаптивной фильтрации, получивших широкое распространение на практике.

1. Метод уточнения ковариации по обновляющему процессу. Данный подход основан на идее, что ковариационную матрицу шума наблюдений возможно вычислить по ковариационной матрице невязок:

$$\mathbf{R}_o(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=i_0}^k \Delta z(k) \Delta z^T(k) - \mathbf{H} P_3(k) \mathbf{H}^T; \quad (2.64)$$

$$\Delta z(k) = z_{и}(k) - z_{гр}(k), \quad (2.65)$$

где  $N$  – количество тактов усреднения в скользящем окне для формирования достаточной статистики;  $i_0 = k - N + 1$  – начальное положение скользящего окна;  $P_3(k)$  – предсказанное значение ковариационной матрицы ошибки вектора состояния.

Этот метод реализации адаптивного фильтра улучшает точностные характеристики при условии, если изменяется ковариация невязки шума наблюдения, а не шума вектора состояния или изменения модели динамической системы (маневрирование ВС). Основная проблема данного метода – это то, что он не учитывает маневренный характер ВС.

2. Адаптивный алгоритм с плавной подстройкой. Данный метод предназначен для адаптации к изменениям модели системы. Смысл данного алгоритма в том, чтобы в случае возрастания ковариации невязки наблюдений медленно повышать ковариационную матрицу вектора состояния.

$$\mathbf{P}_o(k) = \lambda(k)\mathbf{\Phi}(k)\mathbf{P}_o(k-1)\mathbf{\Phi}^T(k) + \mathbf{Q}_x(k), \quad (2.66)$$

где  $\lambda(k)$  – весовой коэффициент, который рассчитывается по формуле

$$\lambda(k) = \max \left\{ 1, \frac{\text{tr} \left[ \mathbf{C}_0(k) - \mathbf{R}(k) - \mathbf{H}\mathbf{Q}_x(k)\mathbf{H}^T \right]}{\text{tr} \left[ \mathbf{H}\mathbf{\Phi}\mathbf{P}_o(k)\mathbf{\Phi}^T\mathbf{H} \right]} \right\}; \quad (2.67)$$

$$\mathbf{C}_0(k) = \frac{\lambda(k-1)\Delta\mathbf{z}(k-1)\Delta\mathbf{z}^T(k-1)}{1 + \lambda(k-1)}, \quad (2.68)$$

где  $\text{tr}[\cdot]$  – операция нахождения следа матрицы.

Данный метод ориентирован на отслеживание изменения ковариационной матрицы состояния.

3. Гибридный алгоритм. Данный метод объединяет два предыдущих метода для одновременной адаптации к изменению ковариации шума наблюдений и изменению динамической системы. Это возможно за счет параллельного анализа обновляющей последовательности первого метода и регулировки ковариационной матрицы ошибки вектора состояний второго метода:

$$\mathbf{R}_o(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=i_0}^k \Delta\mathbf{z}(i)\Delta\mathbf{z}^T(i) - \mathbf{H}\mathbf{P}_{\text{зо}}(k)\mathbf{H}^T; \quad (2.69)$$

$$\mathbf{P}_{\text{зо}}(k) = \lambda(k)\mathbf{\Phi}(k)\mathbf{P}_o(k-1)\mathbf{\Phi}^T(k) + \mathbf{Q}_x(k); \quad (2.70)$$

$$\lambda(k) = \max \left\{ 1, \frac{\text{tr} \left[ \mathbf{C}_0(k) - \mathbf{R}_o(k) - \mathbf{H}\mathbf{Q}_x(k)\mathbf{H}^T \right]}{\text{tr} \left[ \mathbf{H}\mathbf{\Phi}\mathbf{P}_o(k)\mathbf{\Phi}^T\mathbf{H} \right]} \right\}; \quad (2.71)$$

$$\mathbf{C}_0(k) = \frac{\lambda(k-1)\Delta\mathbf{z}(k-1)\Delta\mathbf{z}^T(k-1)}{1 + \lambda(k-1)}; \quad (2.72)$$

$$\mathbf{K}_\Phi(k) = \mathbf{P}_o(k)\mathbf{H}^T \left\{ \mathbf{H}\mathbf{P}_{\text{зо}}(k)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}_o(k) \right\}^{-1}; \quad (2.73)$$

$$\mathbf{P}_o(k) = \mathbf{P}_{\text{зо}}(k) - \mathbf{K}_\Phi(k)\mathbf{H}\mathbf{P}_{\text{зо}}(k). \quad (2.74)$$

Таким образом, метод уточнения ковариации по обновляющему процессу улучшает точностные характеристики фильтра при условии, если изменяется ковариация невязки шума наблюдения, а метод адаптивного алгоритма с плавной подстройкой улучшает точностные характеристики фильтра, если изменяются динамические параметры модели системы.

В условиях неопределенности, когда неизвестны изменения шума наблюдения или динамических параметров модели системы, целесообразно использовать гибридный алгоритм.

### 2.6.2. Алгоритм дальномерного канала с адаптивной фильтрацией

Для разработки алгоритма дальномерного канала с адаптивной фильтрацией используем трехмерную модель состояния и одномерную модель наблюдения для оценки фазовых координат ВС [20]:

$$D(k) = D(k-1) + V(k-1)\tau + 0,5a(k-1)\tau^2; \quad (2.75)$$

$$V(k) = V(k-1) + a(k-1)\tau; \quad (2.76)$$

$$a(k) = (1 - \alpha_\phi T)a(k-1) + \xi_a(k-1); \quad (2.77)$$

$$D_{\text{и}}(k) = D(k) + \xi_{D_{\text{и}}}(k), \quad (2.78)$$

где  $D$ ,  $V$ ,  $a$  – дальность, скорость, ускорение ВС по линии визирования;  $\alpha_\phi$  – постоянная времени маневра;  $\xi_a(k-1)$  – гауссовский шум возмущения;  $\xi_{D_{\text{и}}}(k)$  – дискретный белый шум измерителя дальности;  $\tau$  – номер дискрета времени.

Для повышения точности оценки  $D$ ,  $V$ ,  $a$  целесообразно в алгоритме дальномерного канала использовать гибридный алгоритм (2.69) – (2.74) для оценки ковариационной матрицы невязок  $R_o(k)$  и ковариационной матрицы вектора состояния  $P_{\text{со}}(k)$ .

На основании модели состояния (2.75) – (2.77), модели измерения  $D_{\text{и}}$  (2.77), гибридного алгоритма (2.69) – (2.74) и с учетом выражений калмановской фильтрации [20] получен следующий алгоритм фильтрации дальномерного канала:

$$D_o(k) = D_s(k) + K_{\phi 11}(k)\Delta D; \quad (2.79)$$

$$V_o(k) = V_s(k) + K_{\phi 21}(k)\Delta D(k); \quad (2.80)$$

$$a_o(k) = a_s(k) + K_{\phi 31}(k)\Delta D; \quad (2.81)$$

$$\Delta D(k) = D_{\text{и}}(k) - D_s(k); \quad (2.82)$$

$$D_s(k) = D_o(k-1) + V_o(k)\tau + a_o(k)\tau^2 / 2; \quad (2.83)$$

$$V_s(k) = V_o(k-1) + a_o(k-1)\tau; \quad (2.84)$$

$$a_s(k) = (1 - \alpha_\phi \tau)a_o(k-1); \quad (2.85)$$

$$\mathbf{P}_{\text{зо}}(k) = \lambda(k)\mathbf{\Phi}\mathbf{P}_o(k-1)\mathbf{\Phi}^T + \mathbf{Q}_x; \quad (2.86)$$

$$\mathbf{C}_0(k) = \frac{\lambda(k-1)\Delta z(k-1)\Delta z^T(k-1)}{1 + \lambda(k-1)}; \quad (2.87)$$

$$\lambda(k) = \max\left\{1, \frac{\text{tr}[\mathbf{C}_0(k) - \mathbf{R}_{\text{до}}(k) - \mathbf{H}\mathbf{Q}_x(k-1)\mathbf{H}^T]}{\text{tr}[\mathbf{H}\mathbf{\Phi}\mathbf{P}_o(k-1)\mathbf{\Phi}^T\mathbf{H}]}\right\}; \quad (2.88)$$

$$\mathbf{R}_o(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=i_0}^k \Delta z(i)\Delta z^T(i) - \mathbf{H}\mathbf{P}_{\text{зо}}(k)\mathbf{H}^T; \quad (2.89)$$

$$\mathbf{K}_\phi(k) = \mathbf{P}_{\text{зо}}(k)\mathbf{H}^T \left\{ \mathbf{H}\mathbf{P}_{\text{зо}}(k)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}_{\text{до}}(k) \right\}^{-1}; \quad (2.90)$$

$$\mathbf{P}_o(k) = \mathbf{P}_{\text{зо}}(k) - \mathbf{K}_\phi(k)\mathbf{H}\mathbf{P}_{\text{зо}}(k). \quad (2.91)$$

Порядок действий при реализации алгоритма (2.53) – (2.63):

1. Вначале вводятся время дискретизации  $\tau$ , постоянная времени маневра  $\alpha_\phi$ , постоянные элементы матриц и векторов  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{H}^T$ ,  $\mathbf{\Phi}$ ,  $\mathbf{\Phi}^T$ ,  $\mathbf{Q}_x$ :

$$\mathbf{H} = [1 \ 0 \ 0]; \quad \mathbf{H}^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Q}_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{a,x} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} 1 & \tau & 0,5\tau^2 \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 1 - \alpha_\phi\tau \end{bmatrix}; \quad \mathbf{\Phi}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \tau & 1 & 0 \\ 0,5\tau^2 & \tau & 1 - \alpha_\phi\tau \end{bmatrix}.$$

2. Вводим начальные значения фазовых координат ( $k=0$ )  $D_o(0) = D_\text{з}(0) = D_\text{и}(0)$ ,  $V_o(0) = V_\text{з}(0)$ ,  $a_o(0) = a_\text{з}(0)$ , коэффициент  $\lambda(0)$ , элементы матрицы шумов измерения  $\mathbf{R}_{\text{до}}(0)$  и элементы матрицы  $\mathbf{P}_o(0)$ :

$$\mathbf{P}_o(0) = \begin{bmatrix} P_{o11}(0) & P_{o12}(0) & P_{o13}(0) \\ P_{o21}(0) & P_{o22}(0) & P_{o23}(0) \\ P_{o31}(0) & P_{o32}(0) & P_{o33}(0) \end{bmatrix}.$$

3. По формулам (2.87) – (2.89) вычисляются на 1-м шаге элементы матрицы  $\mathbf{P}_{\text{зо}}(1)$ :

$$\mathbf{C}_0(1) = \frac{\lambda(0)\Delta D_\text{и}^2(0)}{1 + \lambda(0)};$$

$$\lambda(1) = \max \left\{ 1, \frac{\text{tr}[\mathbf{C}_0(1) - \mathbf{R}_{\text{до}}(0) - \mathbf{H}\mathbf{Q}_x\mathbf{H}^T]}{\text{tr}[\mathbf{H}\mathbf{\Phi}\mathbf{P}_o(0)\mathbf{\Phi}^T\mathbf{H}]} \right\};$$

$$\mathbf{P}_{\text{зо}}(1) = \lambda(1)\mathbf{\Phi}\mathbf{P}_o(0)\mathbf{\Phi}^T + \mathbf{Q}_x.$$

4. По формуле (2.89) вычисляется на 1-м шаге дисперсия шумов измерения фильтра  $\mathbf{R}_{\text{до}}(1)$ :

$$\mathbf{R}_{\text{до}}(1) = \Delta\mathbf{D}_{\text{и}}^2(0) - \mathbf{H}\mathbf{P}_{\text{зо}}(1)\mathbf{H}^T.$$

5. По формуле (2.90) вычисляется на 1-м шаге матрица коэффициентов усиления фильтра  $\mathbf{K}_{\phi}(1)$ :

$$\mathbf{K}_{\phi}(1) = \mathbf{P}_{\text{з}}(1)\mathbf{H}^T \left\{ \mathbf{H}\mathbf{P}_{\text{з}}(1)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}_{\text{до}}(0) \right\}^{-1}.$$

6. По формулам (2.83) – (2.84) вычисляются на 1-м шаге составляющие вектора прогноза  $\mathbf{D}_{\text{з}}(1)$ ,  $V_{\text{з}}(1)$  и  $a_{\text{з}}(1)$ :

$$\mathbf{D}_{\text{з}}(1) = \mathbf{D}_o(0) + V_o(0)\tau + a_o(0)\frac{\tau^2}{2};$$

$$V_{\text{з}}(1) = V_o(1) + a_o(1)\tau;$$

$$a_{\text{з}}(1) = (1 - \alpha\tau)a_o(1).$$

7. По формуле (2.82) вычисляется на 1-м шаге невязка измерения  $\Delta\mathbf{D}(1)$ :

$$\Delta\mathbf{D}(1) = \mathbf{D}_{\text{и}}(1) - \mathbf{D}_{\text{з}}(1).$$

8. По формулам (2.79) – (2.81) вычисляются на 1-м шаге составляющие вектора оценки фазовых координат  $\mathbf{D}_o(1)$ ,  $V_o(1)$  и  $a_o(1)$ :

$$\mathbf{D}_o(1) = \mathbf{D}_{\text{з}}(1) + \mathbf{K}_{\phi 1}(1)\Delta\mathbf{D}(1);$$

$$V_o(1) = V_{\text{з}}(1) + \mathbf{K}_{\phi 2}(1)\Delta\mathbf{D}(1);$$

$$a_o(1) = a_{\text{з}}(1) + \mathbf{K}_{\phi 3}(1)\Delta\mathbf{D}(1).$$

9. По формуле (2.74) вычисляется на 1-м шаге матрица  $\mathbf{P}_o(1)$ :

$$\mathbf{P}_o(1) = \mathbf{P}_{\text{зо}}(1) - \mathbf{K}_{\phi}(1)\mathbf{H}\mathbf{P}_{\text{зо}}(1).$$

Шаг закончен. Далее идут в том же порядке вычисления на следующем шаге  $\mathbf{P}_{\text{зо}}(2)$ ,  $\mathbf{R}_{\text{до}}(2)$ ,  $\mathbf{K}_{\phi}(2)$ ,  $\mathbf{D}_{\text{з}}(2)$ ,  $V_{\text{з}}(2)$ ,  $a_{\text{з}}(2)$ ,  $\Delta\mathbf{D}(2)$ ,  $\mathbf{D}_o(2)$ ,  $V_o(2)$ ,  $a_o(2)$ ,  $\mathbf{P}_o(2)$  и т.д.

### 2.6.3. Разработка функциональной схемы дальномерного канала с адаптивной фильтрацией ИИС

На основании алгоритма (2.79) – (2.74) разработана функциональная схема дальномерного канала ИИС, приведенная на рис. 2.15.

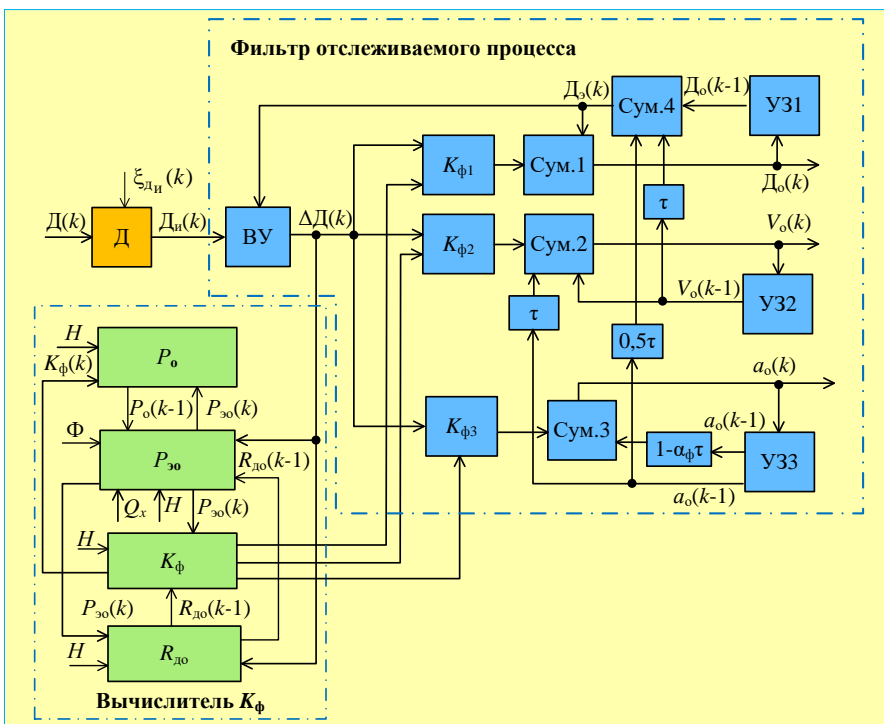


Рис. 2.15. Функциональная схема дальномерного канала с адаптивной фильтрацией

Функциональная схема включает в себя: фильтр отслеживаемого процесса; вычислитель коэффициентов усиления; измеритель дальности  $D$ . Фильтр отслеживаемого процесса состоит из усилителей невязки  $\Delta D$  ( $K_{\phi 1}, K_{\phi 2}, K_{\phi 3}$ ), экстраполятора дальности (устройства задержки УЗ1, сумматора Сум.4, коэффициентов умножения  $\tau$  и  $0,5\tau$ ), экстраполятора скорости (устройства задержки УЗ2, коэффициента умножения  $\tau$ ), экстраполятора ускорения (устройства задержки УЗ3, коэффициента умножения  $1 - \alpha_{\phi}\tau$ ).

Вычислитель коэффициентов усиления  $K_{\phi}$  состоит из вычислителя априорной ковариационной матрицы ошибок фильтрации  $P_0$ , вычислителя апостериорной ковариационной матрицы ошибок фильтрации  $P_3$ , вычислителя матрицы коэффициентов усиления  $K_{\phi}$ . На вычислитель поступают сигналы невязки  $\Delta D$ , которые позволяют рассчитать оптимальные коэффициенты усиления в зависимости от изменения ковариации шума наблюдений и изменения динамической системы.

Входной сигнал  $D_n$  измеряется в РЛС ИИС. Выходные сигналы  $D_o(k)$ ,  $V_o(k)$  и  $a_o(k)$  могут использоваться для решения задач управления воздушным движением и используются для внутреннего потребления фильтра по вычислению экстраполированных сигналов  $D_3(k)$ ,  $V_3(k)$  и  $a_3(k)$ . Выходные сигналы на экстраполяторы подаются через устройства задержек, которые задерживают сигналы на время, равное одному шагу (время дискретизации  $\tau$ ).

В вычислителе коэффициентов усиления  $K_\phi$  рассчитываются коэффициенты  $K_{\phi 1}$ ,  $K_{\phi 2}$  и  $K_{\phi 3}$  на каждом шаге фильтрации. В начальный момент времени  $K_{\phi 1}$ ,  $K_{\phi 2}$  и  $K_{\phi 3}$  изменяются от своих наибольших значений в момент начала работы до меньших значений, а затем происходит их подстройка по алгоритму (2.86) – (2.91).

#### 2.6.4. Исследование алгоритмов калмановского фильтра с адаптивной фильтрацией

На основании полученного алгоритма (2.79) – (2.91) проводилось имитационное моделирование движения ВС относительно РЛС ИИС. Для имитационного моделирования движения ВС использовался маневр ВС «большая коробочка». Результаты моделирования представлены на рис. 2.16 – графики изменения во времени СКО оценки фильтрации дальности ВС относительно РЛС ИИС для адаптивного фильтра и неадаптивного фильтра.

Таким образом, использование алгоритма дальномерного канала с адаптивной фильтрацией позволяет повысить точность оценки дальности по сравнению с фильтром без адаптации.

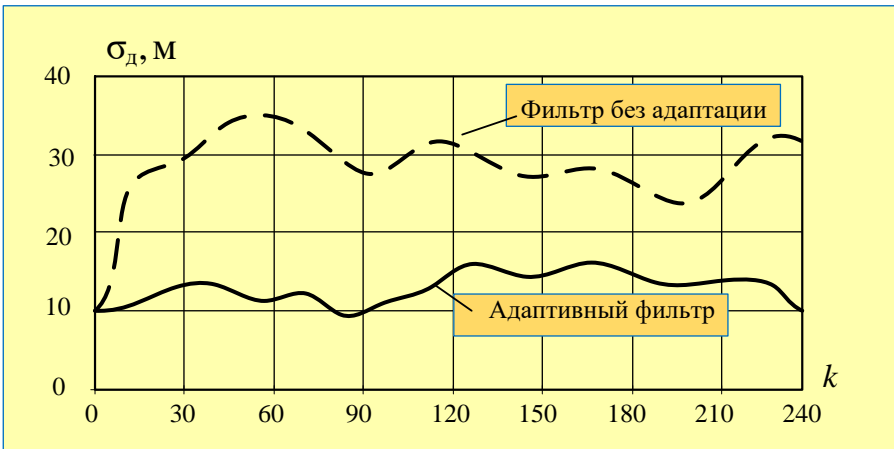


Рис. 2.16. Зависимость СКО дальности от времени

## 2.7. КАЛМАНОВСКИЙ ФИЛЬТР СО СЛУЧАЙНОЙ СТРУКТУРОЙ

### 2.7.1. Общие сведения о системе со случайной структурой

Система со случайной структурой – это стохастические (случайные, вероятностные) динамические системы, у которых их структура (параметры, уравнения движения, режимы работы) может внезапно и непредсказуемо меняться в случайные моменты времени. Эти изменения обычно описываются случайным процессом (марковским процессом) с определенным количеством структур динамических систем. Марковский процесс описывает случайный переход динамической системы из одного состояния в другое. Последующее состояние системы зависит только от ее текущего состояния.

Такие системы используются в качестве математических моделей, описывающих объекты, процессы и явления, подверженные резким, внезапным, скрытым изменениям их внутренних свойств и характеристик.

Важной особенностью математических моделей систем со случайной структурой является учет случайных факторов и неопределенностей через вероятностные распределения и статистические методы (например, метод Монте-Карло), в отличие от детерминированных моделей, где все параметры фиксированы, а результатом является однозначный прогноз. Это позволяет описывать и анализировать системы, где поведение элементов и связей не предопределено, но подчиняется законам вероятности.

Динамические системы со случайной структурой позволяют решать задачи фильтрации, сглаживания, идентификации и управления, где одновременно происходит распознавание структуры, оценивание фазовых координат и параметров, совместное управление структурой и фазовыми координатами.

Функциональная схема со случайной структурой представлена в виде объекта управления и информационно-измерительной и управляющей системы (рис. 2.17).

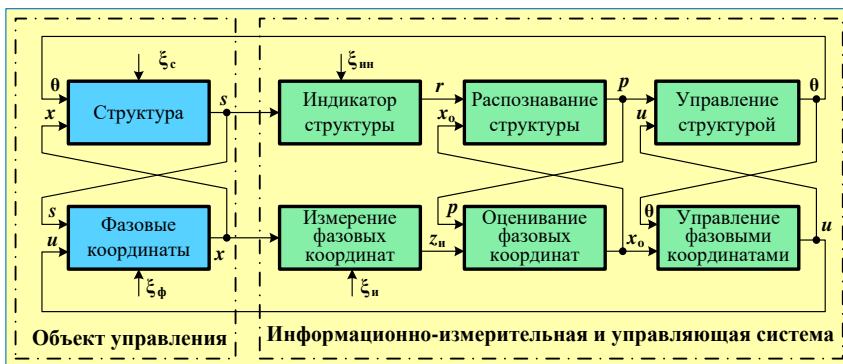


Рис. 2.17. Функциональная схема системы со случайной структурой

Состояние динамического объекта характеризуется индексом структуры  $s$  и значениями вектора фазовых координат объекта  $x$ . На объект управления действуют неуправляемые воздействия (шум  $\xi_s$  на структуру) и (шум  $\xi_\Phi$  на фазовые координаты) со стороны окружающей среды (тurbulentность, помехи).

Индекс структуры – мгновенное значение случайного процесса (интенсивность изменения движения ВС относительно РЛС ИИС), имеющего конечное число возможных состояний  $s$ , сменяющих друг друга в случайные моменты времени с некоторой вероятностью.

Фазовые координаты объекта  $x$  (координаты и параметры ВС) описывают его положение в фазовом пространстве.

Фазовое пространство представляет множество всех состояний системы в фиксированный момент времени.

Состояние динамического объекта  $s$  наблюдается с помощью индикатора структуры с выходом  $r$  с учетом принятых помех  $\xi_{ин}$ , измерителей фазовых координат с выходом  $z_n$  с учетом шумов измерения  $\xi_n$ .

Обработка информации состоит из распознавания структуры и оценивания фазовых координат, в результате чего определяются оценки состояния структуры  $p$  и оценка вектора фазовых координат  $x_b$ . На основании результатов обработки информации формируются сигналы управления структурой  $\theta$  и фазовыми координатами  $u$ .

Структура объекта и его фазовые координаты взаимосвязаны, так же как и устройства, относящиеся к структуре и фазовым координатам в каждой из систем: наблюдения (измерения), обработки информации и управления. Между составными частями каждой из информационно-измерительных и управляющих систем кроме прямых связей, есть и обратные связи.

Управляющие сигналы  $\theta$  и  $u$  могут непосредственно влиять на наблюдение и обработку информации.

Для марковских систем справедливо условие

$$F(x_{k+1} | x_k, x_{k-1}, x_{k-2}, \dots, x_0) = F(x_{k+1} | x_k),$$

где  $k$  – дискретный момент времени,  $k = 1, 2, 3, \dots$ ;  $x_k$  – случайный процесс (случайная последовательность фазовых координат);  $F(\bullet)$  – функция распределения  $x_{k+1}$  при фиксированных значениях  $x_k, x_{k-1}, x_{k-2}, \dots, x_0$ .

Физический смысл марковской системы: для каждого момента времени состояние системы в будущем  $x_{k+1}$  зависит только от ее состояния в настоящем  $x_k$  и не зависит от прошлого  $x_{k-1}, x_{k-2}, \dots, x_0$  («будущее» процесса не зависит от «прошлого» при известном «настоящем»).

### 2.7.2. Выбор и обоснование математической модели движения ВС с учетом изменяющейся структуры

Выбор и обоснование математической модели движения ВС с учетом изменяющейся структуры зависит от конкретных задач по обеспечению точ-

ности и устойчивости калмановских фильтров, требуемой адекватности модели системы в зависимости от условий изменения фазовых координат ВС.

Для решения задачи по обеспечению точности и устойчивости калмановских фильтров синтез квазиоптимальных алгоритмов оценивания стохастических процессов, структура которых изменяется скачком в случайные моменты времени [20]. К данному классу задач относятся фильтрация параметров движения маневрирующей цели. Широкое применение при решении таких задач находят дискретные модели со случайной структурой, которые также называют моделями с переключениями. Рассмотрим линейные дискретные модели со случайной структурой вида:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{\Phi}_n(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{\Gamma}_n(k)\xi_{xn}(k), \quad (n = \overline{1, N}; k = 0, 1, \dots); \quad (2.92)$$

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{H}_m(k)\mathbf{x}(k) + \xi_{zm}(k) \quad (m = \overline{1, M}; k = 0, 1, \dots), \quad (2.93)$$

где  $\mathbf{\Phi}_n(k)$  – матрица перехода  $n$ -й структуры, которая характеризует связь между переменными вектора состояния  $\mathbf{x}(k)$ , например зависимости между дальностью, скоростью, ускорением и т.п.;  $\xi_{xn}(k)$  – случайный вектор возмущений  $n$ -й структуры, учитывающий влияние случайных факторов на движение ВС, представляющий собой дискретный белый шум с математическим ожиданием, равным нулю и матрицей дисперсии ошибок возмущений  $n$ -й структуры  $\mathbf{Q}_{xn}(k)$ ;  $\mathbf{\Gamma}_n(k)$  – матрица возмущений  $n$ -й структуры, характеризующая зависимости между компонентами вектора возмущений и переменными вектора состояния  $\mathbf{x}(k)$ ;  $\mathbf{H}_m(k)$  – матрица измерений размерностью, которая связывает переменные состояния  $\mathbf{x}(k)$  и измерения (наблюдения)  $\mathbf{z}(k)$ ;  $\xi_{zm}$  – вектор ошибок измерений, представляется вектором гауссовских белых шумов с математическим ожиданием, равным нулю и матрицей дисперсии ошибок измерений  $\mathbf{R}_m(k)$ ;  $N$  – количество структур в модели состояния;  $M$  – количество измерителей в модели наблюдения.

Уравнение (2.92) описывает модель формирования процесса со случайной структурой  $\mathbf{x}(k)$  в виде дискретной динамической системы, а выражение (2.93) – механизм образования измерений, доступных наблюдению, которые также имеют случайную структуру. Тип и смена структуры уравнений (2.92), (2.93) определяются с помощью цепей Маркова матрицами вероятностей переходов [20, 30].

Для решения задачи фильтрации процесса со случайной структурой  $\mathbf{x}(k)$  по наблюдению  $\mathbf{z}(k)$  в настоящее время применяется байесовский метод адаптивного оценивания [20]. Однако синтезируемый на его основе оптимальный фильтр относится к классу устройств с растущим числом каналов и является практически нереализуемым, а квазиоптимальные фильтры получают путем ограничения числа каналов оптимального устройства.

Большое число задач статистического синтеза оптимальных систем может быть решено на основе теории условных марковских процессов [20].

Таким образом, для повышения точности траекторной обработки информации является синтез оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов оценивания стохастических процессов, структура которых изменяется скачком в случайные моменты времени, на основе теории условных марковских процессов.

### 2.7.3. Выбор и обоснование математической модели движения ВС угломерного канала в вертикальной плоскости для двух фильтров в дискретном виде

Рассмотрим модели состояния и наблюдения угломерного канала в вертикальной плоскости для двух фильтров: трехмерная модель состояния, двухмерная модель состояния и одномерная модель наблюдения. Предлагаемые модели позволят на основе положений теории систем со случайной структурой объединить оценки фазовых координат, полученные при использовании двух моделей состояния, путем весового суммирования. Веса вычисляются исходя из анализа работы каждой из структур фильтра.

Трехмерная модель движения ВС в непрерывном виде будет иметь вид

$$\dot{\varphi}_B(t) = \omega_B(t), \quad \varphi_B(0); \quad (2.94)$$

$$\dot{\omega}_B(t) = \beta_B(t), \quad \omega_B(0); \quad (2.95)$$

$$\dot{\beta}_B(t) = 0, \quad \beta_B(0), \quad (2.96)$$

где  $\varphi_B$  – угол места;  $\omega_B$  – скорость изменения угла места;  $\beta_B$  – ускорение угла места.

Система дифференциальных уравнений (2.94) – (2.96) описывает изменение угла места в различных видах движения ВС. В действительности эта модель не полна, так как ВС совершает и некоторые непредсказуемые эволюции, носящие случайный характер (порывы ветра, атмосферная турбулентность, управляющие действия рулей ВС и т.п.).

Их обычно учитывают введением случайной составляющей в модель движения ВС:

$$\dot{\beta}_B(t) = -\alpha\beta_B(t) + \alpha n_a(t), \quad (2.97)$$

где  $\alpha$  – величина, обратная времени средней случайной эволюции (постоянная маневра) ВС;  $n_a$  – белый шум.

Тогда с учетом выражения (2.97) трехмерная модель состояния угломерного канала (2.94) – (2.96) примет вид

$$\dot{\varphi}_B(t) = \omega_B(t), \quad \varphi_B(0); \quad (2.98)$$

$$\dot{\omega}_B(t) = \beta_B(t), \quad \omega_B(0); \quad (2.99)$$

$$\dot{\beta}_B(t) = -\alpha\beta_B(t) + \alpha n_a(t), \quad \beta_B(0). \quad (2.100)$$

Используя преобразование Лапласа для (2.98) – (2.100), получим трехмерную модель состояния системы угломерного канала в дискретном виде:

$$\varphi_{B1}(k) = \varphi_{B1}(k-1) + \omega_{B1}(k-1)\tau + 0,5\beta_{B1}(k-1)\tau^2; \quad (2.101)$$

$$\omega_{B1}(k) = \omega_{B1}(k-1) + \beta_{B1}(k-1)\tau; \quad (2.102)$$

$$\beta_{B1}(k) = (1 - \alpha_{\phi}\tau)\beta_{B1}(k-1) + \xi_a(k-1). \quad (2.103)$$

Двумерная модель состояния угломерного канала в дискретном виде

$$\varphi_{B2}(k) = \varphi_{B2}(k-1) + \omega_{B2}(k-1)\tau; \quad (2.104)$$

$$\omega_{B2}(k) = (1 - \alpha_{\phi}\tau)\omega_{B2}(k-1) + \xi_v(k-1). \quad (2.105)$$

Модель наблюдения системы угломерного канала в дискретном виде

$$\varphi_{Bn}(k) = \varphi_B(k) + \xi_n(k). \quad (2.106)$$

С учетом выражения (2.92) получаем модель системы со случайной структурой при использовании двух моделей (2.101) – (2.103) и (2.104), (2.105):

$$\varphi_B(k) = \sum_{m=1}^2 W_m(k-1)\varphi_{Bm}(k-1), \quad m=1, 2; \quad k=1, 2, \dots, \quad (2.107)$$

где  $W_m$  – весовые коэффициенты трехмерной и двухмерной моделей.

#### **2.7.4. Алгоритмы функционирования угломерного канала в вертикальной плоскости со случайной структурой**

Алгоритмы функционирования фильтров сопровождения со случайной структурой зависят от модели состояния и наблюдения.

На основании модели состояния (2.101) – (2.103) модели наблюдения (2.106) и с учетом выражений калмановской фильтрации (2.5) – (2.9) получен следующий алгоритм функционирования первого фильтра для оценки угла места, угловой скорости и углового ускорения:

$$\varphi_{oB1}(k+1) = \varphi_{эB1}(k+1) + K_{\phi B11}\Delta\varphi(k+1); \quad (2.108)$$

$$\omega_{oB1}(k+1) = \omega_{эB1}(k+1) + K_{\phi B12}\Delta\varphi(k+1); \quad (2.109)$$

$$\beta_{oB1}(k+1) = \beta_{эB1}(k+1) + K_{\phi B13}\Delta\varphi(k+1); \quad (2.110)$$

$$\varphi_{\text{эВ1}}(k+1) = \varphi_{\varphi_{\text{об1}}}(k) + \omega_{\text{об1}}(k)\tau + 0,5\beta_{\text{об1}}(k)\tau^2; \quad (2.111)$$

$$\omega_{\text{эВ1}}(k+1) = \omega_{\text{об1}}(k) + \beta_{\text{об1}}(k)\tau; \quad (2.112)$$

$$\beta_{\text{эВ1}}(k+1) = (1 - \alpha_{\varphi}\tau)\beta_{\text{об1}}(k); \quad (2.113)$$

$$\Delta\varphi_{\text{В1}}(k+1) = \varphi_{\text{н}}(k+1) - \varphi_{\text{эВ1}}(k+1). \quad (2.114)$$

$$\mathbf{K}_{\varphi_1}(k) = \begin{bmatrix} K_{\text{фВ11}}(k) \\ K_{\text{фВ12}}(k) \\ K_{\text{фВ13}}(k) \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{\varphi_1}(k)\mathbf{H}_1^T \left\{ \mathbf{H}_1\mathbf{P}_{\varphi_1}(k)\mathbf{H}_1^T + \mathbf{R}_{\text{дн}} \right\}^{-1}; \quad (2.115)$$

$$\mathbf{P}_{\varphi_1}(k) = \begin{bmatrix} P_{\varphi_11}(k) & P_{\varphi_12}(k) & P_{\varphi_13}(k) \\ P_{\varphi_21}(k) & P_{\varphi_22}(k) & P_{\varphi_23}(k) \\ P_{\varphi_31}(k) & P_{\varphi_32}(k) & P_{\varphi_33}(k) \end{bmatrix} = \mathbf{\Phi}_1\mathbf{P}_{\varphi_1}(k-1)\mathbf{\Phi}_1^T + \mathbf{Q}_{x1}; \quad (2.116)$$

$$\mathbf{P}_{\varphi_1}(k) = \begin{bmatrix} P_{\varphi_11}(k) & P_{\varphi_12}(k) & P_{\varphi_13}(k) \\ P_{\varphi_21}(k) & P_{\varphi_22}(k) & P_{\varphi_23}(k) \\ P_{\varphi_31}(k) & P_{\varphi_32}(k) & P_{\varphi_33}(k) \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{\varphi_1}(k) - \mathbf{K}_{\varphi_1}(k)\mathbf{H}_1\mathbf{P}_{\varphi_1}(k). \quad (2.117)$$

С учетом модели состояния (2.104) и (2.105) модели наблюдения (2.106) и выражений калмановской фильтрации (2.5) – (2.9) получен следующий алгоритм функционирования второго фильтра для оценки угла места и угловой скорости:

$$\varphi_{\text{об2}}(k+1) = \varphi_{\text{эВ2}}(k+1) + K_{\text{фВ21}}\Delta\varphi(k+1); \quad (2.118)$$

$$\omega_{\text{об2}}(k+1) = \omega_{\text{эВ2}}(k+1) + K_{\text{фВ22}}\Delta\varphi(k+1); \quad (2.119)$$

$$\varphi_{\text{эВ2}}(k+1) = \varphi_{\varphi_{\text{об1}}}(k) + \omega_{\text{об1}}(k)\tau; \quad (2.120)$$

$$\omega_{\text{эВ2}}(k+1) = (1 - \alpha_{\varphi}\tau)\omega_{\text{об2}}(k); \quad (2.121)$$

$$\Delta\varphi_{\text{В2}}(k+1) = \varphi_{\text{н}}(k+1) - \varphi_{\text{эВ2}}(k+1); \quad (2.122)$$

$$\mathbf{K}_{\varphi_2}(k) = \begin{bmatrix} K_{\text{фВ21}}(k) \\ K_{\text{фВ22}}(k) \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{\varphi_2}(k)\mathbf{H}_2^T \left\{ \mathbf{H}_2\mathbf{P}_{\varphi_2}(k)\mathbf{H}_2^T + \mathbf{R}_{\text{дн}} \right\}^{-1}; \quad (2.123)$$

$$\mathbf{P}_{\varphi_2}(k) = \begin{bmatrix} P_{\varphi_21}(k) & P_{\varphi_22}(k) \\ P_{\varphi_31}(k) & P_{\varphi_32}(k) \end{bmatrix} = \mathbf{\Phi}_2\mathbf{P}_{\varphi_2}(k-1)\mathbf{\Phi}_2^T + \mathbf{Q}_{x2}; \quad (2.124)$$

$$\mathbf{P}_{o1}(k) = \begin{bmatrix} P_{o11}(k) & P_{o12}(k) \\ P_{o21}(k) & P_{o22}(k) \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{s2}(k) - \mathbf{K}_{\Phi 2}(k) \mathbf{H}_2 \mathbf{P}_{s2}(k). \quad (2.125)$$

Совместная оценка двух фильтров с учетом (2.107) имеет вид

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{во}}(k+1) &= W_1(k)\Phi_{\text{об1}}(k) + W_2(k)\Phi_{\text{об2}}(k); \\ W_1(k) + W_2(k) &= 1. \end{aligned} \quad (2.126)$$

### 2.7.5. Оценка весовых коэффициентов угломерного канала в вертикальной плоскости со случайной структурой

Применение метода оптимальной фильтрации в системах со случайной структурой позволяет определить весовые коэффициенты для двух моделей движения воздушного судна при вторичной обработке информации:

$$\hat{x}_k = \frac{\sum_{j=1}^2 W_k^{(j)} \hat{x}_k^{(j)}}{\sum_{j=1}^2 t(j) (2\pi A_k^{(j)})^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{(v_k^{(j)})^2}{2A_k^{(j)}}\right\} (1 - W_{k-1}^{(j)})} \hat{x}_k^{(j)}, \quad (2.127)$$

где  $\hat{x}_k$  – оцененное значение параметра движения ВС методом оптимальной фильтрации;  $\hat{x}_k^{(j)}$  – значение частных оценок параметра движения воздушного судна;  $j=1, 2$  – условия, определяемые различными моделями движения воздушного судна;  $W_k^{(j)}$  – значения апостериорных вероятностей номеров структур системы (веса частных оценок) с учетом различных оценок параметра движения воздушного судна;  $t(j)$  – интервал времени, определяющий использование той или иной модели движения ВС;  $A_k^{(j)}$  – значение дисперсии невязки системы;  $v_k^{(j)}$  – значение невязки системы.

По условиям моделирования двух моделей состояния угломерного канала в вертикальной плоскости со случайной структурой ИИС используется одна РЛС, поэтому параметр  $t(j)$  не требуется при вычислении.

Основное условие определения весовых коэффициентов при обработке радиолокационной информации описывается выражением

$$W_1(k) + W(k) = 1. \quad (2.128)$$

С учетом выражений (2.126 – 2.128) оценка угла места при использовании двух моделей состояния, полученная от РЛС, примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{Bo}}(k+1) = & \frac{\frac{(1-W_1(k))}{\sqrt{2\pi D_1(k+1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\text{B1}}(k+1))^2}{2D_1(k+1)}\right\}}{\frac{(1-W_1(k))}{\sqrt{2\pi D_1(k+1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\text{B1}}(k+1))^2}{2D_1(k+1)}\right\} + \frac{(1-W_2(k))}{\sqrt{2\pi D_2(k+1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\text{B2}}(k+1))^2}{2D_2(k+1)}\right\}} + \\ & + \frac{\frac{(1-W_2(k))}{\sqrt{2\pi D_2(k+1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\text{B2}}(k+1))^2}{2D_2(k+1)}\right\}}{\frac{(1-W_1(k))}{\sqrt{2\pi D_1(k+1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\text{B1}}(k+1))^2}{2D_1(k+1)}\right\} + \frac{(1-W_2(k))}{\sqrt{2\pi D_2(k+1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\text{B2}}(k+1))^2}{2D_2(k+1)}\right\}}}; \end{aligned} \quad (2.129)$$

$$\begin{aligned} W_1(k+1) = & \frac{\frac{(1-W_1(k))}{\sqrt{2\pi D_1(k+1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\text{B1}}(k+1))^2}{2D_1(k+1)}\right\}}{\frac{(1-W_1(k))}{\sqrt{2\pi D_1(k+1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\text{B1}}(k+1))^2}{2D_1(k+1)}\right\} + \frac{(1-W_2(k))}{\sqrt{2\pi D_2(k+1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\text{B2}}(k+1))^2}{2D_2(k+1)}\right\}}}; \end{aligned} \quad (2.130)$$

$$\begin{aligned} W_2(k+1) = & \frac{\frac{(1-W_2(k))}{\sqrt{2\pi D_1(k+1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\text{B2}}(k+1))^2}{2D_1(k+1)}\right\}}{\frac{(1-W_1(k))}{\sqrt{2\pi D_1(k+1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\text{B1}}(k+1))^2}{2D_1(k+1)}\right\} + \frac{(1-W_2(k))}{\sqrt{2\pi D_2(k+1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\text{B2}}(k+1))^2}{2D_2(k+1)}\right\}}}; \end{aligned} \quad (2.131)$$

$$\Delta\varphi_{\text{B1}}(k+1) = \varphi_{\text{B1}}(k+1) - \varphi_{\text{B31}}(k+1); \quad (2.132)$$

$$\Delta\varphi_{\text{B2}}(k+1) = \varphi_{\text{B1}}(k+1) - \varphi_{\text{B32}}(k+1); \quad (2.133)$$

$$D_1(k+1) = H_1 P_{\text{O1}}(k+1) H_1^T + R_1(k+1); \quad (1.134)$$

$$D_2(k+1) = H_2 P_{\text{O2}}(k+1) H_2^T + R_2(k+1); \quad (2.135)$$

$$R_1(k+1) = \Delta\varphi_{\text{B1}}^2(k+1) - H_1 P_{\text{31}}(k+1) H_1^T; \quad (2.136)$$

$$R_2(k+1) = \Delta\varphi_{\text{B2}}^2(k+1) - H_2 P_{\text{32}}(k+1) H_2^T, \quad (2.137)$$

где  $D_1(k)$  и  $D_2(k)$  – дисперсии невязки первой и второй модели РЛС соответственно;  $\Delta\varphi_{\text{B1}}(k)$  и  $\Delta\varphi_{\text{B2}}(k)$  – значение невязок первой и второй модели РЛС соответственно;  $\varphi_{\text{B1}}(k)$  – измеренное значение угла места;  $\varphi_{\text{B31}}(k)$  и  $\varphi_{\text{B32}}(k)$  – экстраполированные значения угла места;  $H_1$  и  $H_2$  – матрицы

наблюдения;  $H_1^T$  и  $H_2^T$  – транспонированные матрицы наблюдения;  $P_{31}(k)$  и  $P_{32}(k)$  – апостериорные ковариационные матрицы ошибок фильтрации;  $R_1(k)$  и  $R_2(k)$  – дисперсии шумов измерений;  $P_{10}(k)$  и  $P_{23}(k)$  – прогнозируемые значения ковариационной матрицы ошибок вектора состояния для РЛС1 и РЛС2;  $P_3(k)$  – апостериорная ковариационная матрица дисперсии ошибок фильтрации;  $P_{01}(k)$  и  $P_{02}(k)$  – априорные ковариационные матрицы дисперсии ошибок фильтрации.

**Порядок действий при реализации алгоритма (2.108) – (2.126):**

1. Вначале вводятся время дискретизации  $\tau$ , постоянная времени маневра  $\alpha_\phi$ , весовые коэффициенты  $W_1(0)$  и  $W_2(0)$ , постоянные элементы матриц и векторов  $H_1$ ,  $H_1^T$ ,  $\Phi_1$ ,  $\Phi_1^T$ ,  $Q_{x1}$ ,  $H_2$ ,  $H_2^T$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_2^T$ ,  $R_{\text{ди}}$ ,  $Q_{x1}$ :

$$H_1 = [1 \ 0 \ 0]; \quad H_1^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad Q_{x1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{a2} \end{bmatrix};$$

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} 1 & \tau & 0,5\tau^2 \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 1 - \alpha_\phi \tau \end{bmatrix}; \quad \Phi_1^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \tau & 1 & 0 \\ 0,5\tau^2 & \tau & 1 - \alpha_\phi \tau \end{bmatrix};$$

$$H_2 = [1 \ 0]; \quad H_2^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad Q_{x2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & D_{a2} \end{bmatrix};$$

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} 1 & \tau \\ 0 & 1 - \alpha_\phi \tau \end{bmatrix}; \quad \Phi_2^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \tau & 1 - \alpha_\phi \tau \end{bmatrix}.$$

2. Вводим начальные значения фазовых координат ( $k=0$ )  $\varphi_{0в1}(0) = \varphi_{эв1}(0) = \varphi_{ив1}(0)$ ,  $\omega_{0в1}(0) = \omega_{эв1}(0)$ ,  $\beta_{0в1}(0) = \beta_{эв1}(0)$  и элементы матрицы  $P_{01}(0)$  и  $P_{02}(0)$ :

$$P_{01}(0) = \begin{bmatrix} P_{011}(0) & P_{012}(0) & P_{013}(0) \\ P_{021}(0) & P_{022}(0) & P_{023}(0) \\ P_{031}(0) & P_{032}(0) & P_{033}(0) \end{bmatrix};$$

$$P_{02}(0) = \begin{bmatrix} P_{011}(0) & P_{012}(0) \\ P_{021}(0) & P_{022}(0) \end{bmatrix}.$$

3. По формулам (2.116) и (2.124) вычисляются на 1-м шаге элементы матрицы  $P_{\varphi 1}(1)$  и  $P_{\varphi 2}(1)$ :

$$P_{\varphi 1}(1) = \Phi_1 P_{\varphi 1}(0) \Phi_1^T + Q_{x1};$$

$$P_{\varphi 2}(1) = \Phi_1 P_{\varphi 2}(0) \Phi_1^T + Q_{x2}.$$

4. По формуле (2.61) вычисляется на 1-м шаге матрица коэффициентов усиления фильтра  $K_{\varphi 1}(1)$  и  $K_{\varphi 2}(1)$ :

$$K_{\varphi 1}(1) = P_{\varphi 1}(1) H_1^T \left\{ H_1 P_{\varphi 1}(1) H_1^T + R_{\varphi 1} \right\}^{-1};$$

$$K_{\varphi 2}(1) = P_{\varphi 2}(1) H_2^T \left\{ H_2 P_{\varphi 2}(1) H_2^T + R_{\varphi 2} \right\}^{-1}.$$

5. По формулам (2.111) – (2.113) и (2.120), (2.121) вычисляются на 1-м шаге составляющие вектора прогноза  $\varphi_{\varphi \text{в}1}(1)$ ,  $\omega_{\varphi \text{в}1}(1)$ ,  $\beta_{\varphi \text{в}1}(1)$  и  $\varphi_{\varphi \text{в}2}(1)$ ,  $\omega_{\varphi \text{в}2}(1)$ :

$$\varphi_{\varphi \text{в}1}(1) = \varphi_{\varphi \text{ов}1}(0) + \omega_{\varphi \text{ов}1}(0) \tau + 0,5 \beta_{\varphi \text{ов}1}(0) \tau^2;$$

$$\omega_{\varphi \text{в}1}(1) = \omega_{\varphi \text{ов}1}(0) + \beta_{\varphi \text{ов}1}(0) \tau;$$

$$\beta_{\varphi \text{в}1}(1) = (1 - \alpha_{\varphi} \tau) \beta_{\varphi \text{ов}1}(0);$$

$$\varphi_{\varphi \text{в}2}(1) = \varphi_{\varphi \text{ов}2}(0) + \omega_{\varphi \text{ов}2}(0) \tau;$$

$$\omega_{\varphi \text{в}2}(1) = (1 - \alpha_{\varphi} \tau) \omega_{\varphi \text{ов}2}(0).$$

6. По формулам (2.114) и (2.122) вычисляются на 1-м шаге невязки измерений  $\Delta \varphi_{\text{в}1}(1)$  и  $\Delta \varphi_{\text{в}2}(1)$ :

$$\Delta \varphi_{\text{в}1}(1) = \varphi_{\text{и}}(1) - \varphi_{\varphi \text{в}1}(1);$$

$$\Delta \varphi_{\text{в}2}(1) = \varphi_{\text{и}}(1) - \varphi_{\varphi \text{в}2}(1).$$

7. По формулам (2.108) – (2.110) и (2.118), (2.119) вычисляются на 1-м шаге составляющие вектора оценки фазовых координат  $\varphi_{\text{ов}1}(1)$ ,  $\omega_{\text{ов}1}(1)$ ,  $\beta_{\text{ов}1}(1)$  и  $\varphi_{\text{ов}2}(1)$ ,  $\omega_{\text{ов}2}(1)$ :

$$\varphi_{\text{ов}1}(1) = \varphi_{\varphi \text{в}1}(1) + K_{\varphi \text{в}11} \Delta \varphi_{\text{в}1}(1);$$

$$\omega_{\text{ов}1}(1) = \omega_{\varphi \text{в}1}(1) + K_{\varphi \text{в}12} \Delta \varphi_{\text{в}1}(1);$$

$$\beta_{\text{ов}1}(1) = \beta_{\varphi \text{в}1}(1) + K_{\varphi \text{в}13} \Delta \varphi_{\text{в}1}(1);$$

$$\varphi_{\text{ов}2}(1) = \varphi_{\varphi \text{в}2}(1) + K_{\varphi \text{в}21} \Delta \varphi_{\text{в}2}(1);$$

$$\omega_{\text{ов}2}(1) = \omega_{\varphi \text{в}2}(1) + K_{\varphi \text{в}22} \Delta \varphi_{\text{в}2}(1).$$

8. По формулам (2.117) и (2.125) вычисляются на 1-м шаге матрицы  $P_{o1}(1)$  и  $P_{o2}(1)$ :

$$P_{o1}(1) = P_{\phi1}(1) - K_{\phi1}(1)H_1P_{\phi1}(1);$$

$$P_{o2}(1) = P_{\phi2}(1) - K_{\phi2}(1)H_2P_{\phi2}(1).$$

9. Шаг закончен. Далее идут в том же порядке вычисления на следующем шаге  $P_{\phi1}(2)$ ,  $P_{\phi2}(2)$ ,  $P_{o1}(2)$ ,  $P_{o2}(2)$ ,  $K_{\phi1}(2)$ ,  $K_{\phi2}(2)$ ,  $\varphi_{\phi1}(2)$ ,  $\omega_{\phi1}(2)$ ,  $\beta_{\phi1}(2)$ ,  $\varphi_{\phi2}(2)$ ,  $\omega_{\phi2}(2)$ ,  $\Delta\varphi_{\phi1}(2)$ ,  $\Delta\varphi_{\phi2}(2)$ ,  $\varphi_{o1}(2)$ ,  $\omega_{o1}(2)$ ,  $\beta_{o1}(2)$ ,  $\varphi_{o2}(2)$ ,  $\omega_{o2}(2)$ ,  $P_{o1}(2)$  и  $P_{o2}(2)$  и т.д.

**Порядок действий при реализации алгоритма (2.129) – (2.137):**

1. Вначале вводятся весовые коэффициенты  $W_1(0)$  и  $W_1(0)$ .

2. По формулам (2.136) и (2.137) вычисляются на 1-м шаге значения  $R_1(1)$  и  $R_2(1)$ :

$$R_1(1) = \Delta\varphi_{\phi1}^2(1) - H_1P_{\phi1}(1)H_1^T;$$

$$R_2(1) = \Delta\varphi_{\phi2}^2(1) - H_2P_{\phi2}(1)H_2^T.$$

3. По формулам (2.134) и (2.135) вычисляются на 1-м шаге значения  $D_1(1)$  и  $D_2(1)$ :

$$D_1(1) = H_1P_{o1}(1)H_1^T + R_1(1);$$

$$D_2(1) = H_2P_{o2}(1)H_2^T + R_2(1).$$

4. По формулам (2.130) и (2.131) вычисляются на 1-м шаге весовые коэффициенты  $W_1(1)$  и  $W_2(1)$ :

$$W_1(1) = \frac{\frac{(1 - W_1(0))}{\sqrt{2\pi D_1(k+1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\phi1}(1))^2}{2D_1(k+1)}\right\}}{\frac{(1 - W_1(0))}{\sqrt{2\pi D_1(1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\phi1}(1))^2}{2D_1(1)}\right\} + \frac{(1 - W_2(0))}{\sqrt{2\pi D_2(1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\phi2}(1))^2}{2D_2(k+1)}\right\}};$$

$$W_2(1) = \frac{\frac{(1 - W_2(0))}{\sqrt{2\pi D_1(1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\phi2}(1))^2}{2D_1(1)}\right\}}{\frac{(1 - W_1(0))}{\sqrt{2\pi D_1(k)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\phi1}(k+1))^2}{2D_1(1)}\right\} + \frac{(1 - W_2(0))}{\sqrt{2\pi D_2(1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\phi2}(1))^2}{2D_2(1)}\right\}}.$$

5. По формуле (2.129) проводится оценка угла места  $\varphi_{\phi0}(1)$  на 1-м шаге с учетом весовой обработки на основании двух моделей состояния с изменяющейся структурой

$$\varphi_{\text{во}}(1) = \frac{\frac{(1-W_1(0))}{\sqrt{2\pi D_1(k+1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\text{в1}}(1))^2}{2D_1(k+1)}\right\} \varphi_{\text{во1}}(1)}{\frac{(1-W_1(0))}{\sqrt{2\pi D_1(1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\text{в1}}(1))^2}{2D_1(1)}\right\} + \frac{(1-W_2(0))}{\sqrt{2\pi D_2(1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\text{в2}}(1))^2}{2D_2(1)}\right\}} + \frac{\frac{(1-W_2(0))}{\sqrt{2\pi D_2(k+1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\text{в2}}(1))^2}{2D_2(k+1)}\right\} \varphi_{\text{во2}}(1)}{\frac{(1-W_1(0))}{\sqrt{2\pi D_1(1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\text{в1}}(1))^2}{2D_1(1)}\right\} + \frac{(1-W_2(0))}{\sqrt{2\pi D_2(1)}} \exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{\text{в2}}(1))^2}{2D_2(1)}\right\}}.$$

б. Шаг закончен. Далее идут в том же порядке вычисления на следующем шаге  $R_1(2)$ ,  $R_2(2)$ ,  $D_1(2)$ ,  $D_2(2)$ ,  $W_1(2)$ ,  $W_2(1)$ ,  $\varphi_{\text{во}}(1)$  и т.д.

### 2.7.6. Разработка функциональной схемы угломерного канала в вертикальной плоскости со случайной структурой

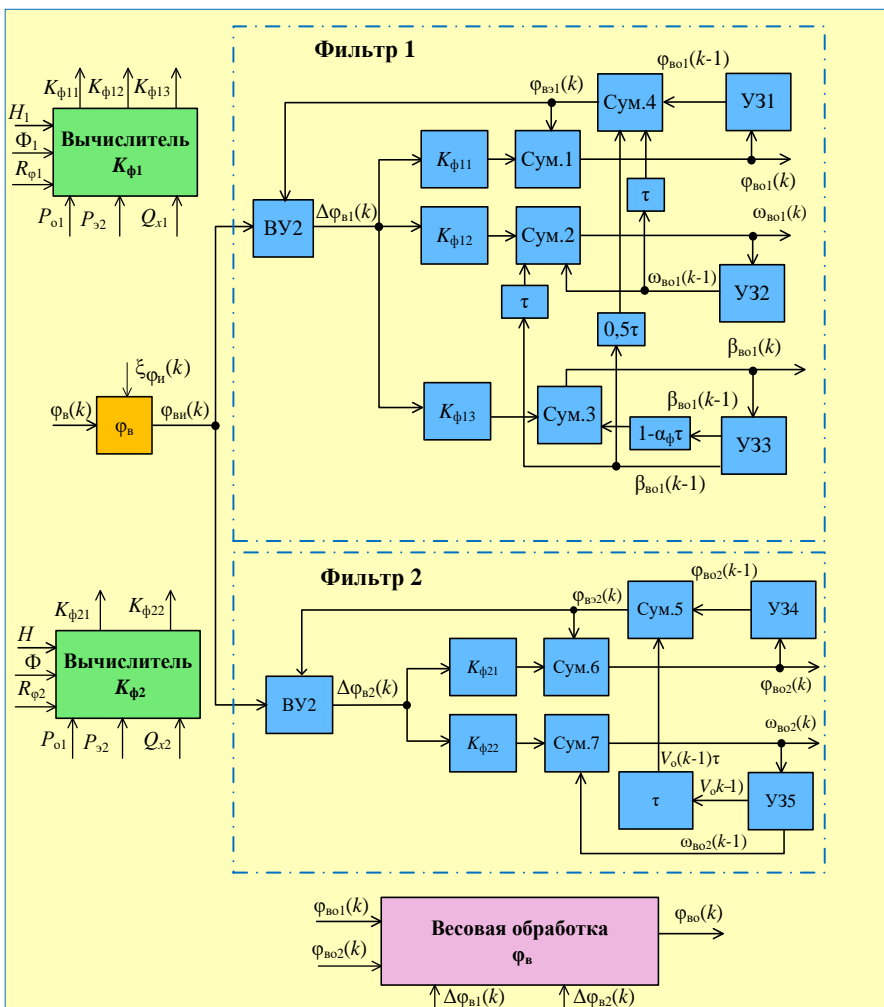
На основании алгоритмов (2.108) – (2.126) и (2.129) – (2.137) была разработана функциональная схема следящей системы угломера, приведенная на рис. 2.18. Функциональная схема включает в себя: фильтр 1, фильтр 2.

Фильтр 1 состоит из устройства вычитания (ВУ1), усилителей невязки  $\Delta\varphi_{\text{в1}}$  ( $K_{\text{ф11}}$ ,  $K_{\text{ф12}}$ ,  $K_{\text{ф13}}$ ), устройств задержки (УЗ1, УЗ2, УЗ3,), сумматоров (Сум.1, Сум.2, Сум.3, Сум.4).

Фильтр 2 состоит из устройства вычитания (ВУ2), усилителей невязки  $\Delta\varphi_{\text{в2}}$  ( $K_{\text{ф21}}$ ,  $K_{\text{ф22}}$ ), устройств задержки (УЗ4, УЗ5), сумматоров (Сум.5, Сум.6, Сум.7).

В рассматриваемой структурной схеме устройство по отслеживанию фазовых координат представляет собой многомерную нестационарную многоконтурную систему. Многомерность обусловлена наличием входного сигнала ( $\varphi(k)$ ,  $\xi_{\text{фн}}(k)$ ) и выходных сигналов ( $\varphi_{\text{во1}}(k)$ ,  $\omega_{\text{во1}}(k)$ ,  $\beta_{\text{во1}}(k)$ ,  $\varphi_{\text{во2}}(k)$ ,  $\omega_{\text{во2}}(k)$ ).

Входные сигналы  $\varphi(k)$  и  $\xi_{\text{фн}}(k)$  измеряются РЛС ИИС. Выходные сигналы  $\varphi_{\text{во1}}(k)$ ,  $\omega_{\text{во1}}(k)$ ,  $\beta_{\text{во1}}(k)$  используются для вычисления экстраполированных сигналов  $\varphi_{\text{вэ1}}(k)$ ,  $\omega_{\text{вэ1}}(k)$ ,  $\beta_{\text{вэ1}}(k)$ . Выходные сигналы  $\varphi_{\text{во2}}(k)$  и  $\omega_{\text{во2}}(k)$  используются при вычислении экстраполированных сигналов  $\varphi_{\text{вэ2}}(k)$  и  $\omega_{\text{вэ2}}(k)$ . Выходные сигналы на экстраполяторы подаются через устройства задержки, которые задерживают сигналы на время, равное одному шагу вычисления  $\tau$ . Выходные сигналы по оценке угла места  $\varphi_{\text{во1}}(k)$  и  $\varphi_{\text{во2}}(k)$ , невязки  $\Delta\varphi_{\text{в1}}(k)$  и  $\Delta\varphi_{\text{в2}}(k)$  от двух фильтров поступают в устройство весовой обработки  $\varphi_{\text{в}}$ , где реализован алгоритм оценки угла места  $\varphi_{\text{во}}(k)$  со случайной структурой. Оценка угла места  $\varphi_{\text{во}}(k)$  поступает к потребителям информации для реализации алгоритмов управления воздушным движением.



**Рис. 2.18. Функциональная схема угломерного канала в вертикальной плоскости со случайной структурой**

Нестационарность устройства отслеживания фазовых координат обусловлена наличием в фильтрах переменных коэффициентов усиления невязок  $K_{\Phi 1}(k)$  и  $K_{\Phi 2}(k)$ , которые изменяются от своих наибольших значений в момент начала работы до меньших значений в установившемся режиме. В данном фильтре коэффициенты усиления не зависят от оценок фазовых координат.

В вычислителях коэффициентов усиления  $K_{\phi 1}$  и  $K_{\phi 2}$  рассчитываются коэффициенты  $K_{\phi 11}(k)$ ,  $K_{\phi 12}(k)$ ,  $K_{\phi 13}(k)$  и  $K_{\phi 21}(k)$ ,  $K_{\phi 22}(k)$  на каждом шаге фильтрации.

**2.7.7. Исследование алгоритмов функционирования угломерного канала в вертикальной плоскости со случайной структурой**

Основным методом исследования реальной точности является имитационное моделирование на ЭВМ. В процессе этого моделирования определяются суммарные динамические и флуктуационные ошибки во всем поле возможных условий применения, а также наличие расходимости процессов оценивания.

Получена зависимость угла места от времени при маневре ВС «большая коробочка» (рис. 2.19).

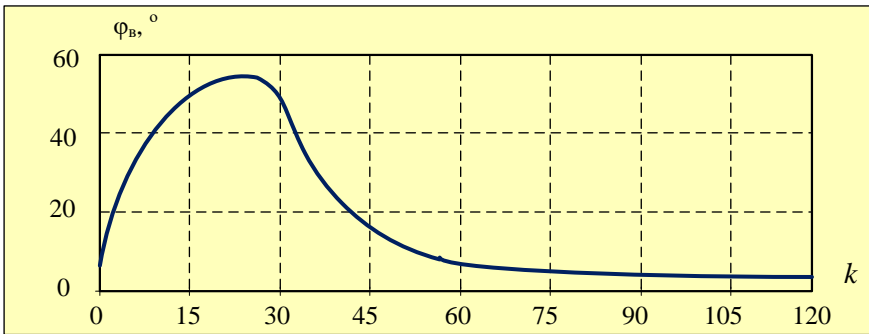


Рис. 2.19. Изменение угла места

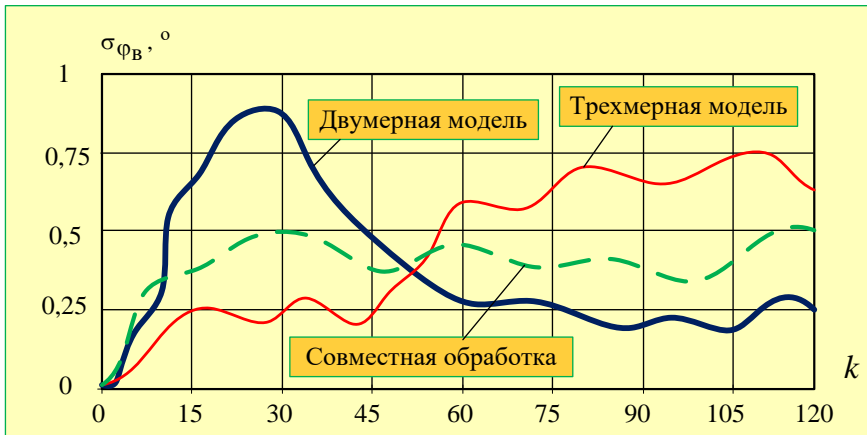


Рис. 2.20. Зависимость СКО угла места от времени

На основании алгоритмов (2.108) – (2.126), (2.129) – (2.137) и рис. 2.19 было проведено имитационное моделирование:

1. В угломерном канале по углу места использовалась модель состояния трехмерного фильтра (фильтр 1 на рис. 2.18).

2. В угломерном канале по углу места использовалась модель состояния двумерного фильтра (фильтр 2 на рис. 2.18).

3. В угломерном канале по углу места использовалась совместная обработка фильтра 1 и фильтра 2 (весовая обработка на рис. 2.18).

Результаты моделирования представлены на рис. 2.20, где представлены графики изменения во времени СКО оценки фильтрации угла места ВС относительно РЛС ИИС.

Таким образом, использование двух фильтров со случайной структурой угломерного канала позволяет повысить точность траекторной обработки информации при обработке воздушных судов на всех этапах маневра «большая коробочка».

**Выводы по калмановской фильтрации.** Известно, что в соответствии с тем или иным алгоритмом калмановской фильтрации обработка радиолокационной информации производится по следующей схеме: оценка вектора состояния и прогноз его изменения, сравнение оптимального выходного эффекта фильтра с реально наблюдаемым и коррекцию вектора состояния на основе критерия минимума СКО. Модель системы, используемая в фильтре Калмана, включающая уравнения состояния, уравнения наблюдения и статистические характеристики шумов, неадекватна реальному изменению координат ВС при маневрах. Это происходит как из-за плохого знания характеристик системы (априорная неопределенность), так и из-за преднамеренного упрощения уравнений системы в целях уменьшения объема вычислений, необходимых для реализации фильтра.

Так как задача сопровождения ВС решается, как правило, в условиях априорной неопределенности, то кроме оценивания вектора состояния необходимо параллельно производить оценку априорно неизвестных параметров системы и фильтра, таких как неизвестные элементы ковариационных матриц шума системы и ошибок измерения.

Так как фильтр Калмана по существу является рекурсивным фильтром, то в результате возрастания ошибок аппроксимации алгоритм фильтрации проявляет тенденцию к расходимости. Во избежание расходимости фильтров разрабатываются адаптивные алгоритмы фильтрации. Сравнение неадаптивного алгоритма с алгоритмами адаптивной фильтрации показывает, что точностные характеристики последних улучшаются на 10...30%, что недостаточно для ИИС УВД.

Усовершенствованные принципы ИИС УВД требуют оценки текущего ускорения ВС [20, 30]. Однако маневры самолетов, являющихся целью,

характеризуются высоким поперечным ускорением и низким, часто незначительным продольным ускорением. Эта информация может использоваться для создания модели состояния ВС. При этом сокращается неопределенность относительного перемещения ВС. Оценку поведения ВС при маневре можно основывать на том, что ее кинематические параметры (скорость, ускорение) коррелированы во времени. Но обычно РЛС ИИС позволяет измерять только координаты цели (дальность, углы азимута и места). Для того чтобы иметь информацию об ускорении цели, необходимо знать кинематические и динамические характеристики цели: скорость, угол наклона, путевой угол, перегрузки.

Предпочтительным вариантом повышения точности по оценке фазовых координат ВС является синтез ИИС УВД с использованием информации о пространственной ориентации ВС, который позволит более точно выбрать модель системы с учетом маневров ВС, по сравнению с существующими моделями систем. Наличие ускорения ВС в модели системы, которая может достаточно точно описать маневренные свойства цели, позволит обеспечить высокую надежность и помехоустойчивость.

### 3. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

---

#### 3.1. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ИИС УВД

ИИС УВД в процессе применения испытывают влияние различных факторов [1, 2]:

- рельеф местности;
- метеобстановка;
- помеховая обстановка;
- динамика полета ВС.

Рельеф местности влияет на формирование зоны обзора в районе аэродрома и распространение радиоволн, отраженных от ВС и объектов на земле на малой дальности от РЛС.

Метеобстановка создает различные условия при излучении зондирующих сигналов и приеме отраженных сигналов от ВС для работы РЛС ИИС. В условиях гидрометеоров создаются пассивные помехи, которые отображаются на экранах индикаторов ИИС. Изменение параметров атмосферы влияет на надежность и изменение тактико-технических характеристик элементов РЛС.

Помеховая обстановка включает в себя преднамеренные активные и пассивные помехи и непреднамеренные пассивные помехи. Помехи, поступившие на вход РЛС, уменьшают дальность обнаружения ВС. Это влияет на пропускную способность и безопасность организации воздушного движения.

Динамичность полета ВС связана с маневрированием ВС в районе аэродрома. В этом случае координаты и параметры ВС изменяются по нелинейному закону относительно РЛС.

В районе аэродрома можно выделить следующие типовые маневры:

- большая коробочка;
- малая коробочка;
- заход на посадку с прямой.

Схема построения маневра «большая коробочка» показана на рис. 3.1.

При маневре «большая коробочка» ВС осуществляет движение по траектории: равномерное движение по времени  $T_p = 1,0 \dots 1,5$  мин; 1-й разворот  $90^\circ$  влево, если на аэродроме принят левый круг; равномерное движение; 2-й разворот на  $90^\circ$  при курсовом угле радиостанции КУР =  $240^\circ$  относительно дальнего приводного радиомаяка (ДПРМ); равномерное движение; 3-й разворот на  $90^\circ$  при КУР =  $240^\circ$ ; равномерное движение; 3-й разворот на  $90^\circ$  при КУР =  $290^\circ$ ; движение в режиме планирования в сторону взлетно-посадочной полосы с расчетом пройти ДПРМ на высоте 200 м, а ближнего приводного радиомаяка (БПРМ) – на высоте 50...70 м.

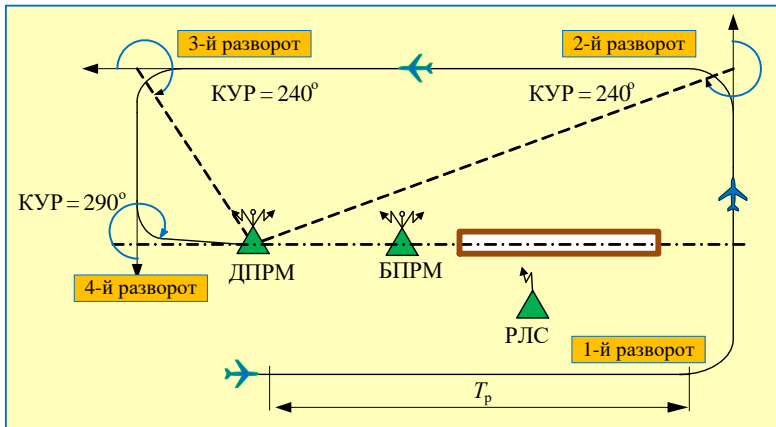


Рис. 3.1. Маневр «большая коробочка»

При построении маневра «малая коробочка» ВС перемещается по траектории после пролета над ДПРМ (рис. 3.2): равномерное движение по времени; 1-й разворот  $90^\circ$  влево; 2-й разворот на  $90^\circ$  при курсовом угле радиостанции  $KУР = 240^\circ$ ; равномерное движение; 3-й разворот на  $90^\circ$  при  $KУР = 240^\circ$ ; равномерное движение; 3-й разворот на  $90^\circ$  при  $KУР = 290^\circ$ ; движение в режиме планирования в сторону взлетно-посадочной полосы с расчетом пройти ДПРМ на высоте 200 м, а БПРМ – на высоте 50...70 м.

Анализ условий применения ИИС при основных маневрах ВС «большая коробочка» и «малая коробочка» показывает, что координаты ВС (дальность, углы азимута и места) и радиальная скорость ВС изменяются по нелинейному закону.

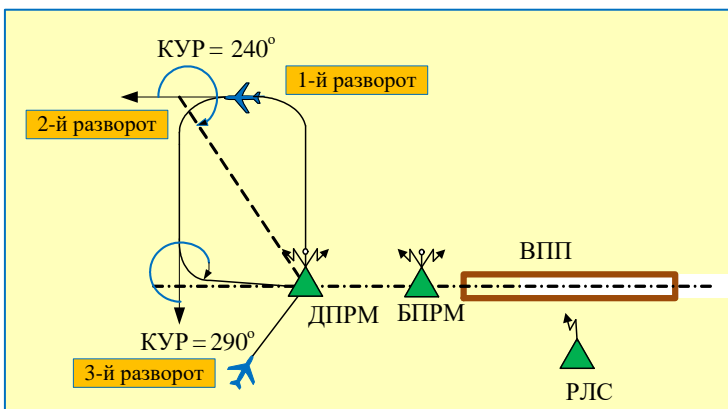


Рис. 3.2. Маневр «малая коробочка»

Нелинейный закон движения ВС (целей) обусловлен прежде всего изменением пространственного положения цели (вектор цели относительно ИИС УВД; модуль вектора скорости  $V_{ц}$ , угол наклона  $\theta_{ц}$ , путевой угол  $\varphi_{ц}$ ) и изменением координат ВС в горизонтальной и вертикальной плоскостях  $\varphi_{Г}$  и  $\varphi_{В}$ . Нелинейный закон изменения координат ВС может вносить значительную динамическую ошибку слежения координат ВС в системах автосопровождения или привести к срыву автосопровождения.

### 3.2. ВЕКТОР СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО СУДНА В РАЙОНЕ АЭРОДРОМА

В настоящее время наличие на борту современных ВС высокоточных датчиков параметров полета и контрольно-записывающей аппаратуры (КЗА) для регистрации информации об этих параметрах и их изменении в течение всего полета, а также возможность автоматизированной обработки позволяют говорить о наличии достаточной материальной базы для проведения летных исследований (экспериментов) [12, 20].

На рисунке 3.3 представлены в виде графиков основные динамические и кинематические параметры полета ВС (маневр «вираж») в зависимости от времени.

Параметры полета ВС:  $\beta$  – угол скольжения;  $n_x$  – продольная (касательная) перегрузка;  $n_y$  – нормальная перегрузка;  $n_z$  – боковая перегрузка;  $H_б$  – барометрическая высота;  $V_{пр}$  – приборная скорость;  $\alpha$  – угол атаки;  $\gamma$  – угол крена;  $\psi$  – угол рыскания;  $\vartheta$  – угол тангажа; РУД – положение ручки управления двигателем.

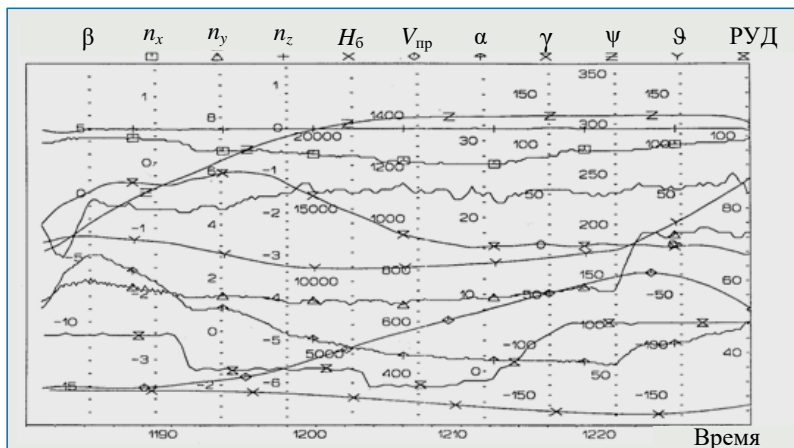


Рис. 3.3. Динамические и кинематические параметры полета ВС

На основе графиков (рис. 3.3) и дифференциальных уравнений [12]

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= g(n_x \cos \beta + n_z \sin \beta - \sin \theta); \\ \frac{d\theta}{dt} &= \frac{g}{V}(n_y \cos \gamma + n_x \sin \beta \sin \gamma - n_z \cos \beta \sin \gamma - \cos \theta); \\ \frac{d\varphi}{dt} &= -\frac{g}{V}(n_y \sin \gamma - n_x \sin \beta \cos \gamma + n_z \cos \beta \cos \gamma) \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

были получены зависимости путевого угла  $\varphi$ , угла наклона  $\theta$  ВС и их угловых скоростей  $\omega_\varphi$  и  $\omega_\theta$  от времени (от номера дискрета  $k$ ), которые представлены на рис. 3.4 – 3.7.

Из графиков (рис. 3.4 – 3.7) видно, что кинематические параметры ВС (путевой угол  $\varphi$ , угол наклона  $\theta$ , угловая скорость путевого угла  $\omega_\varphi$ , угловая скорость угла наклона  $\omega_\theta$ ) изменяются по нелинейным законам и имеют большие производные. Следовательно, при сопровождении по оценке координат и параметров ВС с помощью РЛС ИИС, где обработка информации осуществляется обычными и адаптивными калмановскими фильтрами, будут возникать большие ошибки фильтрации, что недопустимо для современных ИИС УВД.

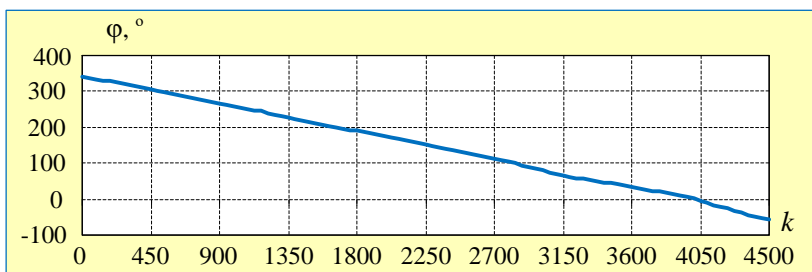


Рис. 3.4. Зависимость путевого угла  $\varphi$  ВС от времени

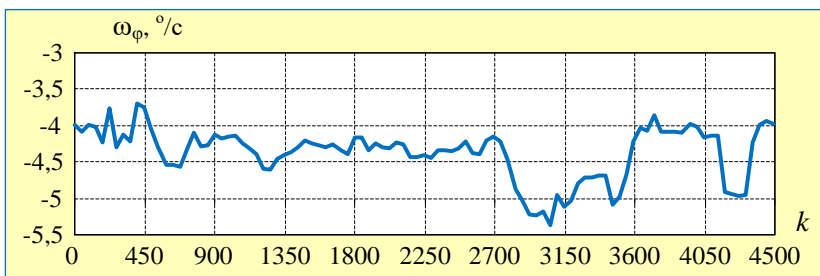
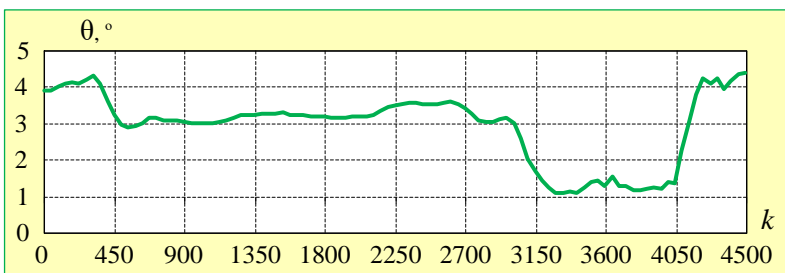
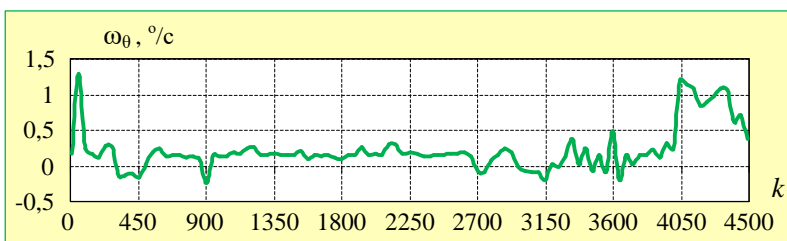


Рис. 3.5. Зависимость угловой скорости путевого угла  $\omega_\varphi$  ВС от времени



**Рис. 3.6.** Зависимость угла наклона  $\theta$  ВС от времени



**Рис. 3.7.** Зависимость угловой скорости угла наклона  $\omega_{\theta}$  ВС от времени

Для решения задачи сопровождения с помощью РЛС целесообразно использовать кинематические параметры  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\omega_{\varphi}$ ,  $\omega_{\theta}$  ВС для определения положения (координат), скоростей, ускорений и т.д. Кинематические параметры описывают движение ВС с геометрической точки зрения без рассмотрения действующих на них сил. РЛС и другие устройства наблюдения ИИС не позволяют определять динамические характеристики целей. Кинематические параметры  $\varphi$  и  $\theta$  полностью определяют направление вектора скорости ВС. Зная направление вектора скорости ВС, можно достаточно точно прогнозировать траекторию ВС по оценке его фазовых координат, в частности, дальности, скорости, ускорения по линии визирования.

### 3.3. МОДЕЛЬ УСКОРЕНИЯ ВОЗДУШНОГО СУДНА С УЧЕТОМ ЕГО КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Для разработки модели ускорения ВС (цели) необходимо знать кинематические параметры ВС [12, 20, 30]: скорость  $V_{ц}$ , угол наклона  $\theta$ , путевой угол  $\varphi$ . Параметры  $V_{ц}$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$  имеют жесткую связь между ориентацией ВС и его ускорением. Для оценки ускорения движения ВС необходимо выбрать систему координат. Для расчета ускорения движения ВС используется

траекторная система координат  $Ox_T Y_T Z_T$  (рис. 3.8). Траекторная система координат является подвижной, ее начало помещается в центре масс ВС. Ось  $Ox_T$  (рис. 3.8) направлена по касательной траектории ВС и совпадает с вектором скорости  $V_{ц}$ . Ось  $Oy_T$  направлена по перпендикуляру к оси  $Ox_T$  и лежит в вертикальной плоскости. Ось  $Oz_T$  образует правую систему координат.

Система координат  $Ox_T Y_T Z_T$  повернута относительно нормальной системы координат  $X_g OY_g$  на угол  $\varphi$  вокруг оси  $OY_g$  и угол  $\theta$  вокруг оси  $Oz_T$ . Угол  $\theta$  заключен между вектором скорости ВС  $V_{ц}$  и его проекцией на горизонтальную плоскость  $X_g OY_g$ . Угол  $\varphi$  заключен между проекцией вектора скорости  $V_{ц}$  на горизонтальную плоскость и осью  $Ox_g$ . В нормальной системе координат  $Ox_g Y_g Z_g$  (рис. 3.8) начало координат совпадает с центром масс ВС. Ось  $Ox_g$  направлена к северу параллельно касательной к меридиану. Ось  $Oy_g$  направлена вверх по местной вертикали. Ось  $Oz_g$  лежит в плоскости параллели и направлена на восток, образуя с осями  $Ox_g$  и  $Oy_g$  правую систему координат.

Необходимо отметить, что система координат  $Ox_g Y_g Z_g$  является неподвижной. Связь между траекторной и нормальной системами координат приведена в табл. 3.1.

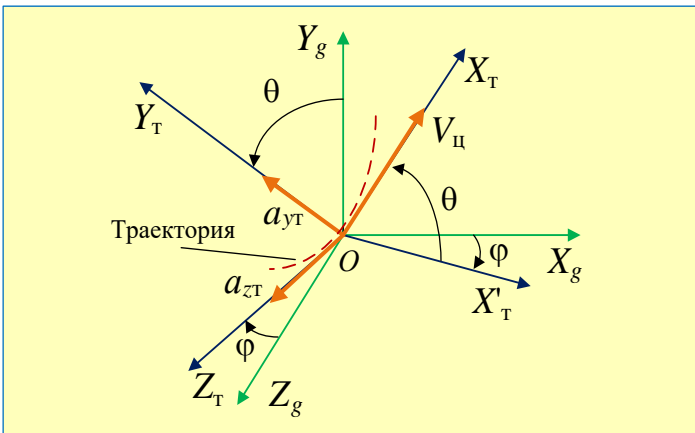


Рис. 3.8. Траекторная и нормальная системы координат

### 3.1. Связь между траекторной и нормальной системами координат

Нормальная система координат	Траекторная система координат		
	$OX_T$	$OY_T$	$OZ_T$
$OX_g$	$\cos\theta\cos\varphi$	$-\sin\theta\cos\varphi$	$\sin\varphi$
$OY_g$	$\sin\theta$	$\cos\theta$	$0$
$OZ_g$	$-\sin\varphi\cos\theta$	$\sin\varphi\sin\theta$	$\cos\varphi$

Проекции ускорения на оси траекторной системы координат имеют следующий вид [12]:

$$\left. \begin{aligned} a_{xT} &= \frac{dV_x}{dt} + \omega_{yT}V_z - \omega_{zT}V_y; \\ a_{yT} &= \frac{dV_y}{dt} + \omega_{zT}V_x - \omega_{xT}V_z; \\ a_{zT} &= \frac{dV_z}{dt} + \omega_{xT}V_y - \omega_{yT}V_x. \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Траекторная система координат является скоростной (вектор скорости ВС  $V_{ц}$  направлен по оси  $OX_T$ ), следовательно:  $V_x = V_{ц}$ ;  $V_y \equiv 0$ ;  $V_z \equiv 0$ .

Так как траекторная система координат  $OX_T Y_T Z_T$  повернута относительно нормальной системы координат на угол  $\varphi$  вокруг оси  $OY_g$  и угол  $\theta$  вокруг оси  $OZ_g$ , то вектор угловой скорости  $\omega_0$  совпадает с направлением оси  $OZ_T$ :

$$\omega_{zT} = \omega_0. \quad (3.3)$$

Вектор угловой скорости  $\omega_\varphi$  направлен вверх и отклонен от оси  $OY_g$  на угол  $\theta$ :

$$\omega_{yT} = \omega_\varphi \cos\theta. \quad (3.4)$$

С учетом выражений (3.3) и (3.4) получим проекции ускорения на оси траекторной системы координат:

$$\left. \begin{aligned} a_{xT} &= \frac{dV_{ц}}{dt} = \dot{V}_{ц}; \\ a_{yT} &= V_{ц}\omega_\theta; \\ a_{zT} &= -V_{ц}\omega_\varphi \cos\theta. \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Из выражений (3.5) видно, что ускорение по оси  $X_T$  зависит только от изменения модуля скорости цели  $\dot{V}_ц$ , по оси  $Y_T$  – от модуля скорости цели  $V_ц$  и скорости угла наклона  $\omega_\theta$ , по оси  $Z_T$  – от проекции вектора скорости  $V_ц$  на горизонтальную плоскость и скорости путевого угла  $\omega_\varphi$ . Используя рис. 3.8 и табл. 3.1, запишем проекции ускорения ВС в нормальной системе координат  $OX_g Y_g Z_g$ :

$$\left. \begin{aligned} a_{xg} &= a_{xT} \cos \theta \cos \varphi - a_{yT} \sin \theta \cos \varphi + a_{zT} \sin \varphi; \\ a_{yg} &= a_{xT} \sin \theta + a_{yT} \cos \theta; \\ a_{zg} &= -a_{xT} \cos \theta \sin \varphi + a_{yT} \sin \theta \sin \varphi + a_{zT} \cos \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

Подставив уравнения (3.5) в уравнения (3.6), получим проекции ускорения ВС с учетом  $\dot{V}_ц$ ,  $V_ц$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ ,  $\omega_\theta$ ,  $\omega_\varphi$ :

$$\left. \begin{aligned} a_{xg} &= \dot{V}_ц \cos \theta \cos \varphi - V_ц \omega_\theta \sin \theta \cos \varphi - V_ц \omega_\varphi \cos \theta \sin \varphi; \\ a_{yg} &= \dot{V}_ц \sin \theta + V_ц \omega_\theta \cos \theta; \\ a_{zg} &= -\dot{V}_ц \cos \theta \sin \varphi + V_ц \omega_\theta \sin \theta \sin \varphi - V_ц \omega_\varphi \cos \theta \cos \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

Используя рис. 3.1, получим проекции вектора скорости  $V_ц$  на оси координат  $OX_g Y_g Z_g$ :

$$\left. \begin{aligned} V_{xg} &= V_ц \cos \theta \cos \varphi; \\ V_{yg} &= V_ц \sin \theta; \\ V_{zg} &= -V_ц \cos \theta \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

Если в уравнениях (3.8) взять производную по времени от  $V_{xg}, V_{yg}, V_{zg}$ , то получим уравнения (3.7).

РЛС измеряет фазовые координаты ВС (дальность, скорость, угол места, азимут) по линии визирования (ЛВ) в лучевой системе координат  $OX_L Y_L Z_L$  (рис. 3.9). Ось  $OX_L$  направлена по линии визирования, ось  $OZ_L$  лежит в горизонтальной плоскости и перпендикулярна оси  $OX_L$ . Ось  $OY_L$  образует с осями  $OX_L$  и  $OZ_L$  правую систему координат. Лучевая система координат связана с  $OX_g Y_g Z_g$  углами линии визирования в вертикальной и горизонтальной плоскостях  $\varepsilon_B$  и  $\varepsilon_r$  (рис. 3.9).

Связь между лучевой  $OX_L Y_L Z_L$  и нормальной  $OX_g Y_g Z_g$  системами координат приведена в табл. 3.2.

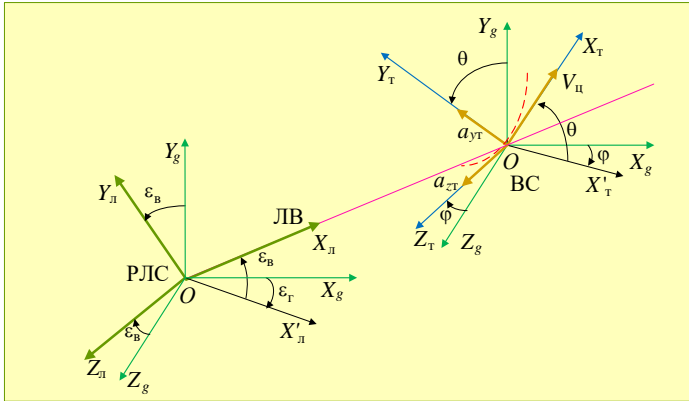


Рис. 3.9. Траекторная, нормальная, лучевая системы координат

### 3.2. Связь между лучевой и нормальными системами координат

Нормальная система координат	Траекторная система координат		
	$OX_{л}$	$OY_{л}$	$OZ_{л}$
$OX_{г}$	$\cos \epsilon_{в} \cos \epsilon_{г}$	$-\sin \epsilon_{в} \cos \epsilon_{г}$	$\sin \epsilon_{г}$
$OY_{г}$	$\sin \epsilon_{в}$	$\cos \epsilon_{в}$	0
$OZ_{г}$	$-\sin \epsilon_{в} \cos \epsilon_{г}$	$\sin \epsilon_{в} \sin \epsilon_{г}$	$\cos \epsilon_{г}$

Для вычисления ускорения цели по линии визирования необходимо:

1. Составляющие вектора скорости  $V_{ц}$  (3.8) спроецировать на линию визирования и с учетом табл. 4.2 скорость BC по линии визирования:

$$V_{цлв} = V_{ц} \cos \theta \cos \varphi \cos \epsilon_{в} \cos \epsilon_{г} + V_{ц} \sin \theta \sin \epsilon_{в} + V_{ц} \cos \theta \sin \varphi \cos \epsilon_{в} \sin \epsilon_{г}. \quad (3.9)$$

2. Взять производную по времени в выражении (3.9), считая, что модуль  $V_{ц}$  не меняется ( $\dot{V}_{ц} = 0$ ), получим ускорение цели по линии визирования

$$a_{цлв} = -V_{ц} (\sin \theta \cos \varphi \cos \epsilon_{в} \cos \epsilon_{г} \omega_{\theta} + \cos \theta \sin \varphi \cos \epsilon_{в} \cos \epsilon_{г} \omega_{\varphi} + \cos \theta \cos \varphi \sin \epsilon_{в} \cos \epsilon_{г} \omega_{\epsilon_{в}} + \cos \theta \cos \varphi \sin \epsilon_{г} \cos \epsilon_{в} \omega_{\epsilon_{г}}) + V_{ц} (\cos \theta \sin \epsilon_{в} \omega_{\theta} + \sin \theta \cos \epsilon_{в} \omega_{\epsilon_{в}}) + V_{ц} (-\sin \theta \sin \varphi \cos \epsilon_{в} \sin \epsilon_{г} \omega_{\theta} + \cos \theta \cos \varphi \cos \epsilon_{в} \sin \epsilon_{г} \omega_{\varphi} + \cos \theta \sin \varphi \cos \epsilon_{в} \cos \epsilon_{г} \omega_{\epsilon_{в}} - \cos \theta \sin \varphi \sin \epsilon_{г} \sin \epsilon_{в} \omega_{\epsilon_{г}}). \quad (3.10)$$

После приведения выражения (3.10) получим

$$a_{цлв} = V_{ц} (\cos\theta \sin \varepsilon_B (\omega_\theta - \omega_B \cos(\varphi - \varepsilon_r)) + \sin \theta \cos \varepsilon_B (\omega_B - \omega_\theta \cos(\varphi - \varepsilon_r))) + \cos\theta \cos \varepsilon_B \sin(\varphi - \varepsilon_r) (\omega_r - \omega_\varphi). \quad (3.11)$$

Таким образом, ускорение ВС по линии визирования зависит от модуля скорости цели  $V_{ц}$ , путевого угла  $\varphi$ , угла наклона  $\theta$ , угловой скорости путевого угла  $\omega_\varphi$ , угловой скорости угла наклона  $\omega_\theta$ , углов линии визирования в вертикальной и горизонтальной плоскостях  $\varepsilon_B$  и  $\varepsilon_r$ , скоростей линий визирования в вертикальной и горизонтальной плоскостях  $\omega_B$  и  $\omega_r$ .

### 3.4. СИНТЕЗ ДАЛЬНОМЕРНОГО КАНАЛА ИИС С УЧЕТОМ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОГО СУДНА

**3.4.1. Модель состояния дальномерного канала ИИС с учетом кинематических параметров ВС.** Для разработки модели необходимо учесть, что движение ВС имеет нелинейный характер, причем ускорение ВС на различных этапах полета в районе аэродрома меняется постоянно.

Была получена модель ускорения ВС по линии визирования (3.11), которая достаточно точно описывает эволюции движения ВС относительно РЛС.

С учетом модели ускорения (3.11) и трехмерной модели калмановского фильтра (2.49) – (2.51) получена модель состояния дальномерного канала в дискретном времени для оценивания фазовых координат ВС по линии визирования: дальности  $D$ , скорости сближения  $V$  и ускорения  $a$ :

$$\left. \begin{aligned} D(k+1) &= D(k) + V(k)T + 0,5a(k)\tau^2; \\ V(k+1) &= V(k) + a(k)\tau; \\ a(k+1) &= V_{ц}(k)(\sin \varepsilon_B(k) \cos \theta(k)(\omega_\theta(k) - \omega_B(k) \cos(\varphi(k) - \varepsilon_r(k))) + \\ &\quad + \sin \theta(k) \cos \varepsilon_B(k)(\omega_B(k) - \omega_\theta(k) \cos(\varphi(k) - \varepsilon_r(k)) + \\ &\quad + \cos \varepsilon_B(k) \cos \theta(k) \sin(\varphi(k) - \varepsilon_r(k))(\omega_r(k) - \omega_\varphi(k)) + \xi_a(k); \\ V_{ц}(k+1) &= V_{ц}(k) + a_{ц}(k)\tau; \\ a_{ц}(k+1) &= (1 - \alpha_{\phi 1})a_{ц}(k) + \xi_{a_{ц}}(k) \\ \theta(k+1) &= \theta(k) + \omega_\theta(k)\tau; \\ \omega_\theta(k+1) &= (1 - \alpha_{\phi 2})\omega_\theta(k) + \xi_{\omega_\theta}(k); \\ \varphi(k+1) &= \varphi(k) + \omega_\varphi(k)\tau; \\ \omega_\varphi(k+1) &= (1 - \alpha_{\phi 3})\omega_\varphi(k) + \xi_{\omega_\varphi}(k); \\ \varepsilon_B(k+1) &= \varepsilon_B(k) + \omega_B(k)\tau; \\ \omega_B(k+1) &= (1 - \alpha_{\phi 4})\omega_B(k) + \xi_{\omega_B}(k); \\ \varepsilon_r(k+1) &= \varepsilon_r(k) + \omega_r(k)\tau; \\ \omega_r(k+1) &= (1 - \alpha_{\phi 5})\omega_r(k) + \xi_{\omega_r}(k). \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

В выражениях (3.12) центрированные гауссовские шумы:  $\xi_a$  – ускорения ВС по линии визирования;  $\xi_{a_{ц}}$  – ускорения ВС;  $\xi_{\omega_0}$  – угловой скорости наклона;  $\xi_{\omega_\phi}$  – скорости путевого угла;  $\xi_{\omega_b}$  – скорости линии визирования в вертикальной плоскости;  $\xi_{\omega_r}$  – скорости линии визирования в горизонтальной плоскости с известными дисперсиями  $D_a$ ,  $D_{a_{ц}}$ ,  $D_{\omega_0}$ ,  $D_{\omega_\phi}$ ,  $D_{\omega_b}$ ,  $D_{\omega_r}$  соответственно; постоянные маневра:  $\alpha_{\phi 1}$  – ускорения ВС,  $\alpha_{\phi 2}$  – угловой скорости наклона;  $\alpha_{\phi 3}$  – скорости путевого угла;  $\alpha_{\phi 4}$  – скорость линии визирования в вертикальной плоскости;  $\alpha_{\phi 5}$  – скорости линии визирования в горизонтальной плоскости.

Вектор состояния дальномерного канала

$$X = [D \ V \ a \ V_{ц} \ a_{ц} \ \theta_{ц} \ \varphi_{ц} \ \omega_{\theta_{ц}} \ \omega_{\varphi_{ц}} \ \varepsilon_b \ \omega_b \ \varepsilon_r \ \omega_r]^T. \quad (3.13)$$

### 3.4.2. Модель наблюдения дальномерного канала ИИС с учетом кинематических параметров ВС

Состав и вид измерителей, используемых для формирования оценок фазовых координат, определяется из необходимости условий наблюдаемости [20], а также обеспечения устойчивости формирования оценок.

Выполнение условия наблюдаемости по формированию оценки фазовых координат определяется по критерию наблюдаемости. Для обеспечения оценки фазовых координат (4.10) должны измеряться дальность  $D_{ц}$ , скорость цели  $V_{ц}$ , угол наклона  $\theta_{ц}$ , путевой угол  $\varphi_{ц}$ , угол линии визирования в вертикальной плоскости  $\varepsilon_{вн}$ , угол линии визирования в горизонтальной плоскости  $\varepsilon_{гн}$ .

Вектор наблюдения дальномерного канала

$$z = [D_{ц} \ V_{ц} \ \theta_{ц} \ \varphi_{ц} \ \varepsilon_{вн} \ \varepsilon_{гн}]^T. \quad (3.14)$$

### 3.4.3. Декомпозированная модель состояния и наблюдения дальномерного канала ИИС с учетом кинематических параметров ВС

Модель состояния дальномерного канала (3.12) описана нелинейными уравнениями. Для реализации калмановской фильтрации на основе моделей состояния (3.13) и наблюдения (3.14) необходимо линеаризовать нелинейные функции модели состояния с использованием разложения в ряд Тейлора первого порядка и матрицы Якобиана (матрицы частных производных). Фильтры, где используются линеаризованные функции, требуют больших вычислительных затрат. Необходимо отметить, что дальность и скорость ВС по линии визирования слабо коррелированы с кинематическими параметрами ВС. Поэтому могут возникать большие ошибки фильтрации фазовых координат дальномерного канала.

Декомпозиция вектора состояния (3.13) и наблюдения (3.14) позволит получить отдельные линейные модели систем фильтров дальномерного канала.

Декомпозиция векторов состояния (3.13) и наблюдения (3.14) позволит получить модели систем фильтров дальномерного канала:

- модель системы по оценке дальности, скорости и ускорения:

$$\left. \begin{aligned} D(k+1) &= D(k) + V(k)\tau + 0,5a(k)\tau^2; \\ V(k+1) &= V(k) + a(k)\tau; \\ a(k+1) &= V_{\Pi}(k)(\cos\theta(k)\sin\varepsilon_B(k)(\omega_\theta(k) - \omega_B(k)\cos(\varphi(k) - \varepsilon_r(k))) + \\ &+ \sin\theta(k)\cos\varepsilon_B(k)(\omega_B(k) - \omega_\theta(k)\cos(\varphi(k) - \varepsilon_r(k))) + \\ &+ \cos\theta(k)\cos\varepsilon_B(k)\sin(\varphi(k) - \varepsilon_r(k))(\omega_r(k) - \omega_\varphi(k))) + \xi_a(k); \end{aligned} \right\} (3.15)$$

$$D_{\Pi}(k+1) = D(k+1) + \xi_{D_{\Pi}}(k+1); \quad (3.16)$$

- модель системы по оценке скорости и ускорения ВС:

$$\left. \begin{aligned} V_{\Pi}(k+1) &= V_{\Pi}(k) + a_{\Pi}(k)\tau; \\ a_{\Pi}(k+1) &= (1 - \alpha_{\Phi}\tau)a_{\Pi}(k) + \xi_{a_{\Pi}}(k); \end{aligned} \right\} (3.17)$$

$$V_{\Pi\Pi}(k+1) = V_{\Pi}(k+1) + \xi_{V_{\Pi\Pi}}(k+1); \quad (3.18)$$

- модель системы по оценке угла наклона и угловой скорости наклона ВС:

$$\left. \begin{aligned} \theta(k+1) &= \theta(k) + \omega_\theta(k)\tau; \\ \omega_\theta(k+1) &= (1 - \alpha_{\Phi 2})\omega_\theta(k) + \xi_{\omega_\theta}(k); \end{aligned} \right\} (3.19)$$

$$\theta_{\Pi}(k+1) = \theta(k+1) + \xi_{\theta_{\Pi}}(k+1); \quad (3.20)$$

- модель системы по оценке путевого угла и угловой скорости путевого угла ВС:

$$\left. \begin{aligned} \varphi(k+1) &= \varphi(k) + \omega_\varphi(k)\tau; \\ \omega_\varphi(k+1) &= (1 - \alpha_{\Phi 3})\omega_\varphi(k) + \xi_{\omega_\varphi}(k); \end{aligned} \right\} (3.21)$$

$$\varphi_{\Pi}(k+1) = \varphi(k+1) + \xi_{\varphi_{\Pi}}(k+1); \quad (3.22)$$

- модель системы по оценке угла и скорости линии визирования в вертикальной плоскости:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_B(k+1) &= \varepsilon_B(k) + \omega_B(k)\tau; \\ \omega_B(k+1) &= (1 - \alpha_{\Phi 4})\omega_B(k) + \xi_{\omega_B}(k); \end{aligned} \right\} (3.23)$$

$$\varepsilon_{B\Pi}(k+1) = \varepsilon_B(k+1) + \xi_{\varepsilon_{B\Pi}}(k+1); \quad (3.24)$$

– модель системы по оценке угла и скорости линии визирования в горизонтальной плоскости:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\Gamma}(k+1) &= \varepsilon_{\Gamma}(k) + \omega_{\Gamma}(k)\tau; \\ \omega_{\Gamma}(k+1) &= (1 - \alpha_{\phi 5})\omega_{\Gamma}(k) + \xi_{\omega_{\Gamma}}(k); \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

$$\varepsilon_{\Gamma}(k+1) = \varepsilon_{\Gamma}(k+1) + \xi_{\varepsilon_{\Gamma}}(k+1). \quad (3.26)$$

### 3.4.4. Алгоритмы функционирования фильтров дальномерного канала

Для получения фильтров дальномерного канала ИИС с учетом кинематических параметров ВС используем декомпозированные модели состояния и наблюдения (3.15) – (3.26) и общий алгоритм калмановской фильтрации (2.5) – (2.9).

В результате получены следующие алгоритмы фильтрации:

– алгоритм фильтрации для оценки дальности, скорости и ускорения:

$$D_o(k+1) = D_s(k+1) + K_{д11}(k+1)\Delta D(k+1); \quad (3.27)$$

$$V_o(k+1) = V_s(k+1) + K_{д21}(k+1)\Delta D(k+1); \quad (3.28)$$

$$a_o(k+1) = a_s(k+1) + K_{д31}(k+1)\Delta D(k+1); \quad (3.29)$$

$$D_s(k+1) = D_o(k) + V_o(k)\tau + 0,5a_o(k)\tau^2; \quad (3.30)$$

$$V_s(k+1) = V_o(k) + a_o(k)\tau; \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} a_s(k+1) &= V_{цo}(k)(\cos\theta_o(k)\sin\varepsilon_{Bo}(k)(\omega_{\theta o}(k) - \omega_{Bo}(k)\cos(\varphi_o(k) - \\ &\quad - \varepsilon_{го}(k))) + \sin\theta_o(k)\cos\varepsilon_{Bo}(k)(\omega_{Bo}(k) - \omega_{\theta o}(k)\cos(\varphi_o(k) - \\ &\quad - \varepsilon_{го}(k))) + \cos\theta_o(k)\cos\varepsilon_{Bo}(k)\sin(\varphi_o(k) - \varepsilon_{го}(k)) \times \\ &\quad \times (\omega_{го}(k) - \omega_{\varphi o}(k))); \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$\Delta D(k+1) = D_{и}(k+1) - D_s(k+1); \quad (3.33)$$

– алгоритм фильтрации для оценки скорости и ускорения цели:

$$V_{цo}(k+1) = V_{цs}(k+1) + K_{v_{и1}}(k+1)\Delta V_{и}(k+1); \quad (3.34)$$

$$a_{цo}(k+1) = a_{цs}(k+1) + K_{v_{и2}}(k+1)\Delta V_{и}(k+1); \quad (3.35)$$

$$V_{цs}(k+1) = V_{цo}(k) + a_{цo}(k)\tau; \quad (3.36)$$

$$a_{цs}(k+1) = (1 - \alpha_{\phi 1\tau})a_{цo}(k); \quad (3.37)$$

$$\Delta V_{и}(k+1) = V_{иц}(k+1) - V_{цs}(k+1); \quad (3.38)$$

– алгоритм фильтрации для оценки угла и угловой скорости наклона:

$$\theta_o(k+1) = \theta_s(k+1) + K_{\theta 11}(k+1)\Delta\theta(k+1); \quad (3.39)$$

$$\omega_{\theta o}(k+1) = \omega_{\theta s}(k+1) + K_{\theta 21}(k+1)\Delta\theta(k+1); \quad (3.40)$$

$$\theta_3(k+1) = \theta_0(k) + \omega_{\theta_0}(k)\tau; \quad (3.41)$$

$$\omega_{\theta_3}(k+1) = (1 - \alpha_{\phi_2}\tau)\omega_{\theta_0}(k); \quad (3.42)$$

$$\Delta\theta(k+1) = \theta_{\text{ин}}(k+1) - \theta_{\text{из}}(k+1); \quad (3.43)$$

– алгоритм фильтрации для оценки путевого угла и угловой скорости путевого угла:

$$\varphi_0(k+1) = \varphi_3(k+1) + K_{\varphi_{01}}(k+1)\Delta\varphi(k+1); \quad (3.44)$$

$$\omega_{\varphi_0}(k+1) = \omega_{\varphi_3}(k+1) + K_{\varphi_{21}}(k+1)\Delta\varphi(k+1); \quad (3.45)$$

$$\varphi_3(k+1) = \varphi_0(k) + \omega_{\varphi_0}(k)\tau; \quad (3.46)$$

$$\omega_{\varphi_3}(k+1) = (1 - \alpha_{\phi_3}\tau)\omega_{\varphi_0}(k); \quad (3.47)$$

$$\Delta\varphi(k+1) = \varphi_{\text{и}}(k+1) - \varphi_3(k+1); \quad (3.48)$$

– алгоритм фильтрации для оценки угла и скорости линии визирования в вертикальной плоскости:

$$\varepsilon_{\text{в}0}(k+1) = \varepsilon_{\text{в}3}(k+1) + K_{\varepsilon_{\text{в}11}}(k+1)\Delta\varepsilon_{\text{в}}(k+1); \quad (3.49)$$

$$\omega_{\text{в}0}(k+1) = \omega_{\text{в}3}(k+1) + K_{\varepsilon_{\text{в}21}}(k+1)\Delta\varepsilon_{\text{в}}(k+1); \quad (3.50)$$

$$\varepsilon_{\text{в}3}(k+1) = \varepsilon_{\text{в}0}(k) + \omega_{\varepsilon_{\text{в}0}}(k)\tau; \quad (3.51)$$

$$\omega_{\text{в}3}(k+1) = (1 - \alpha_{\phi_4}\tau)\omega_{\text{в}0}(k); \quad (3.52)$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{в}}(k+1) = \varepsilon_{\text{вн}}(k+1) - \varepsilon_{\text{в}3}(k+1); \quad (3.53)$$

– алгоритм фильтрации для оценки угла и скорости линии визирования в горизонтальной плоскости:

$$\varepsilon_{\text{г}0}(k+1) = \varepsilon_{\text{г}3}(k+1) + K_{\varepsilon_{\text{г}11}}(k+1)\Delta\varepsilon_{\text{г}}(k+1); \quad (3.54)$$

$$\omega_{\text{г}0}(k+1) = \omega_{\text{г}3}(k+1) + K_{\varepsilon_{\text{г}21}}(k+1)\Delta\varepsilon_{\text{г}}(k+1); \quad (3.55)$$

$$\varepsilon_{\text{г}3}(k+1) = \varepsilon_{\text{г}0}(k) + \omega_{\varepsilon_{\text{г}0}}(k)\tau; \quad (3.56)$$

$$\omega_{\text{г}3}(k+1) = (1 - \alpha_{\phi_5}\tau)\omega_{\text{г}0}(k); \quad (3.57)$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{г}}(k+1) = \varepsilon_{\text{гн}}(k+1) - \varepsilon_{\text{г}3}(k+1). \quad (3.58)$$

**Порядок действий при реализации алгоритма базового фильтра (3.27) – (3.33):**

1. Вначале вводятся время дискретизации  $\tau$ , постоянная времени маневра  $\alpha_{\phi}$ , постоянные элементы матриц и векторов  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{H}^T$ ,  $\mathbf{R}_{\text{дн}}$ ,  $\Phi$ ,  $\Phi^T$ ,  $\mathbf{Q}_x$ :

$$\mathbf{H} = [1 \quad 0 \quad 0]; \quad \mathbf{H}^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Q}_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{a_x} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_д = R_{дн}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} 1 & \tau & 0,5\tau^2 \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \Phi^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \tau & 1 & 0 \\ 0,5\tau^2 & \tau & 0 \end{bmatrix}.$$

2. Вводим начальные значения фазовых координат ( $k=0$ )  $D_o(0)=D_э(0)=D_{и}(0)$ ,  $V_o(0)=V_э(0)$ ,  $a_o(0)=a_э(0)$  и элементы матрицы  $\mathbf{P}_o(0)$ :

$$\mathbf{P}_o(0) = \begin{bmatrix} P_{o11}(0) & P_{o12}(0) & P_{o13}(0) \\ P_{o21}(0) & P_{o22}(0) & P_{o23}(0) \\ P_{o31}(0) & P_{o32}(0) & P_{o33}(0) \end{bmatrix}.$$

3. Находим на 1-м шаге элементы матрицы  $\mathbf{P}_э(1)$ :

$$\mathbf{P}_э(1) = \Phi \mathbf{P}_o(0) \Phi^T + \mathbf{Q}_x.$$

4. Вычисляем на 1-м шаге матрицу коэффициентов усиления фильтра  $\mathbf{K}_\Phi(1)$ :

$$\mathbf{K}_\Phi(1) = \mathbf{P}_э(1) \mathbf{H}^T \{ \mathbf{H} \mathbf{P}_э(1) \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_д \}^{-1}.$$

5. По формулам (3.30) – (3.32) вычисляем на 1-м шаге составляющие вектора прогноза  $D_э(1)$ ,  $V_э(1)$  и  $a_э(1)$ :

$$D_э(1) = D_o(0) + V_o(0)\tau + a_o(0)\frac{\tau^2}{2};$$

$$V_э(1) = V_o(0) + a_o(0)\tau;$$

$$a_э(1) = V_{\text{цo}}(0)(\cos\theta_o(0)\sin\varepsilon_{\text{bo}}(0)(\omega_{\theta_o}(0) - \omega_{\text{bo}}(0)\cos(\varphi_o(0) - \varepsilon_{\text{го}}(0))) + \sin\theta_o(0)\cos\varepsilon_{\text{bo}}(0)(\omega_{\text{bo}}(0) - \omega_{\theta_o}(0)\cos(\varphi_o(0) - \varepsilon_{\text{го}}(0))) + \cos\theta_o(0)\cos\varepsilon_{\text{bo}}(0)\sin(\varphi_o(0) - \varepsilon_{\text{го}}(0)) \times (\omega_{\text{го}}(0) - \omega_{\varphi_o}(0))).$$

6. По формуле (3.33) вычисляем на 1-м шаге невязку измерения  $\Delta D(1)$ :

$$\Delta D(k+1) = D_{и}(k+1) - D_э(k+1).$$

7. По формулам (3.27) – (3.29) вычисляем на 1-м шаге составляющие вектора оценки фазовых координат  $D_o(1)$ ,  $V_o(1)$  и  $a_o(1)$ :

$$D_o(1) = D_э(1) + K_{\Phi 1}(1)\Delta D(1);$$

$$V_o(1) = V_o(1) + K_{\phi 2}(1)\Delta D(1);$$

$$a_o(1) = a_o(1) + K_{\phi 3}(1)\Delta D(1).$$

8. Вычисляем на 1-м шаге матрицу  $P_o(1)$ :

$$P_o(1) = P_o(1) - K_{\phi}(1)HP_o(1).$$

Шаг закончен. Далее идут в том же порядке вычисления на следующем шаге  $P_o(2)$ ,  $K_{\phi}(2)$ ,  $D_o(2)$ ,  $V_o(2)$ ,  $a_o(2)$   $\Delta D(2)$ ,  $D_o(2)$ ,  $V_o(2)$ ,  $a_o(2)$ ,  $P_o(2)$  и т.д.

**Порядок действий при реализации алгоритмов фильтров 1 – 5 (3.34) – (3.56):**

1. Вначале вводятся время дискретизации  $\tau$ , постоянные элементы матриц и векторов  $H$ ,  $H^T$ ,  $R_n$ ,  $\Phi$ ,  $\Phi^T$ ,  $Q_x$ :

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}; H^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; Q_x = \begin{bmatrix} D_x & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} 1 & \tau \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \Phi^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \tau & 1 \end{bmatrix}.$$

2. Затем вводятся начальные значения фазовых координат ( $k=0$ )

$$\begin{aligned} V_{\text{ц0}}(0) = V_{\text{ц0}}(0) = V_{\text{цн}}(0), \quad a_{\text{ц0}}(0) = a_{\text{ц0}}(0), \quad \theta_o(0) = \theta_o(0) = \theta_n(0), \\ \omega_{\theta o}(0) = \omega_{\theta o}(0), \quad \varphi_o(0) = \varphi_o(0) = \varphi_n(0), \quad \omega_{\varphi o}(0) = \omega_{\varphi o}(0), \\ \varepsilon_{\text{в0}}(0) = \varepsilon_{\text{в0}}(0) = \varepsilon_{\text{вн}}(0), \quad \omega_{\text{в0}}(0) = \omega_{\text{в0}}(0), \quad \varepsilon_{\text{г0}}(0) = \varepsilon_{\text{г0}}(0) = \varepsilon_{\text{гн}}(0), \\ \omega_{\text{г0}}(0) = \omega_{\text{г0}}(0) \text{ и элементы матрицы } P_o(0): \end{aligned}$$

$$P_o(0) = \begin{bmatrix} P_{o11}(0) & P_{o12}(0) \\ P_{o21}(0) & P_{o22}(0) \end{bmatrix}.$$

3. Вычисляем на 1-м шаге элементы матрицы  $P_o(1)$ :

$$P_o(1) = \Phi P_o(0)\Phi^T + Q_x.$$

4. Вычисляем на 1-м шаге матрицу коэффициентов усиления фильтра  $K_{\phi}(1)$ :

$$K_{\phi}(1) = P_o(1)H^T \{HP_o(1)H^T + R_n\}^{-1}.$$

5. По формулам (3.36), (3.37), (3.41), (3.42), (3.46), (3.47), (3.51), (3.52), (3.56) и (3.57) вычисляются на 1-м шаге составляющие векторов прогноза  $V_{\text{ц1}}(1)$ ,  $a_{\text{ц1}}(1)$ ,  $\theta_o(1)$ ,  $\omega_{\theta o}(1)$ ,  $\varphi_o(1)$ ,  $\omega_{\varphi o}(1)$ ,  $\varepsilon_{\text{в1}}(1)$ ,  $\omega_{\text{в1}}(1)$ ,  $\varepsilon_{\text{г1}}(1)$ ,  $\omega_{\text{г1}}(1)$ :

$$V_{\text{ц1}}(1) = V_{\text{ц0}}(0) + a_{\text{ц0}}(0)\tau; \quad a_{\text{ц1}}(1) = (1 - \alpha_{\phi 1}\tau)a_{\text{ц0}}(0); \quad \theta_o(1) = \theta_o(0) + \omega_{\theta o}(0)\tau;$$

$$\begin{aligned}\omega_{\theta_3}(1) &= (1 - \alpha_{\phi_2} \tau) \omega_{\theta_0}(0); \quad \varphi_3(1) = \varphi_0(0) + \omega_{\varphi_0}(0) \tau; \quad \omega_{\varphi_3}(1) = (1 - \alpha_{\phi_3} \tau) \omega_{\varphi_0}(0); \\ \varepsilon_{\text{вз}}(1) &= \varepsilon_{\text{во}}(0) + \omega_{\varepsilon_{\text{во}}}(0) \tau; \quad \omega_{\text{вз}}(1) = (1 - \alpha_{\phi_4} \tau) \omega_{\text{во}}(0); \quad \varepsilon_{\text{гз}}(1) = \varepsilon_{\text{го}}(0) + \omega_{\varepsilon_{\text{го}}}(0) \tau; \\ \omega_{\text{гз}}(1) &= (1 - \alpha_{\phi_5} \tau) \omega_{\text{го}}(0).\end{aligned}$$

6. По формулам (3.38), (3.43), (3.48), (3.53) и (3.58) вычисляются на 1-м шаге невязки измерений  $\Delta V_{\text{цн}}(1)$ ,  $\Delta \theta(1)$ ,  $\Delta \varphi(1)$ ,  $\Delta \varepsilon_{\text{ви}}(1)$ ,  $\Delta \varepsilon_{\text{ги}}(1)$ :

$$\begin{aligned}\Delta V_{\text{цн}}(1) &= V_{\text{цн}}(1) - V_{\text{цз}}(1); \quad \Delta \theta(1) = \theta_{\text{иц}}(1) - \theta_{\text{цз}}(1); \quad \Delta \varphi(1) = \varphi_{\text{и}}(1) - \varphi_3(1); \\ \Delta \varepsilon_{\text{в}}(1) &= \varepsilon_{\text{ви}}(1) - \varepsilon_{\text{вз}}(1); \quad \Delta \varepsilon_{\text{г}}(1) = \varepsilon_{\text{ги}}(1) - \varepsilon_{\text{гз}}(1).\end{aligned}$$

7. По формулам (3.34), (3.35), (3.39), (3.40), (3.44), (3.45), (3.49), (3.50), (3.54) и (3.55) вычисляются на 1-м шаге составляющие вектора оценки фазовых координат  $V_{\text{цо}}(1)$ ,  $a_{\text{цо}}(1)$ ,  $\theta_0(1)$ ,  $\omega_{\theta_0}(1)$ ,  $\varphi_0(1)$ ,  $\omega_{\varphi_0}(1)$ ,  $\varepsilon_{\text{во}}(1)$ ,  $\omega_{\text{во}}(1)$ ,  $\varepsilon_{\text{го}}(1)$  и  $\omega_{\text{го}}(1)$ :

$$\begin{aligned}V_{\text{цо}}(1) &= V_{\text{цз}}(1) + K_{v_{\text{цн}}11}(1) \Delta V_{\text{цн}}(1); \quad a_{\text{цо}}(1) = a_{\text{цз}}(1) + K_{v_{\text{цн}}21}(1) \Delta V_{\text{цн}}(1); \\ \theta_0(1) &= \theta_3(1) + K_{\theta 011}(1) \Delta \theta(1); \quad \omega_{\theta_0}(1) = \omega_{\theta_3}(1) + K_{\theta 021}(1) \Delta \theta(1); \\ \varphi_0(1) &= \varphi_3(1) + K_{\varphi 011}(1) \Delta \varphi(1); \quad \omega_{\varphi_0}(1) = \omega_{\varphi_3}(1) + K_{\varphi 021}(1) \Delta \varphi(1); \\ \varepsilon_{\text{во}}(1) &= \varepsilon_{\text{вз}}(1) + K_{\varepsilon_{\text{в}}11}(1) \Delta \varepsilon_{\text{в}}(1); \quad \omega_{\text{во}}(1) = \omega_{\text{вз}}(1) + K_{\varepsilon_{\text{в}}21}(1) \Delta \varepsilon_{\text{в}}(1); \\ \varepsilon_{\text{го}}(1) &= \varepsilon_{\text{гз}}(1) + K_{\varepsilon_{\text{г}}11}(1) \Delta \varepsilon_{\text{г}}(1); \quad \omega_{\text{го}}(1) = \omega_{\text{гз}}(1) + K_{\varepsilon_{\text{г}}21}(1) \Delta \varepsilon_{\text{г}}(1).\end{aligned}$$

8. Вычисляем на 1-м шаге матрицу  $P_0(1)$

$$P_0(1) = P_3(1) - K_{\phi}(1) H P_3(1).$$

Шаг закончен. Далее идут в том же порядке вычисления на следующем шаге и т.д.

### 3.4.5. Функциональная схема дальномерного канала с учетом кинематических параметров

Функциональная схема дальномерного канала разработана в соответствии с алгоритмами (3.27) – (3.58), приведенная на рис. 3.10. Функциональная схема включает в себя: базовый фильтр, фильтр 1, фильтр 2, фильтр 3, фильтр 4 и фильтр 5.

Базовый фильтр состоит из устройства вычитания (УВ1), усилителей невязки  $\Delta D$  ( $K_{\text{д}11}, K_{\text{д}21}, K_{\text{д}31}$ ), экстраполятора дальности (ЭД), экстраполятора скорости (ЭС), экстраполятора ускорения (ЭУ), устройств задержки (УЗ1, УЗ2, УЗ3), сумматоров (СУМ.1, СУМ.2, СУМ.3).

Фильтр 1 состоит из устройства вычитания (УВ2), усилителей невязки  $\Delta V_{\text{цн}}$  ( $K_{v_{\text{цн}}11}, K_{v_{\text{цн}}21}$ ), экстраполятора скорости ВС (ЭСЦ), экстраполятора ускорения ВС (ЭУЦ), устройств задержки (УЗ4, УЗ5), сумматоров (СУМ.4, СУМ.5).

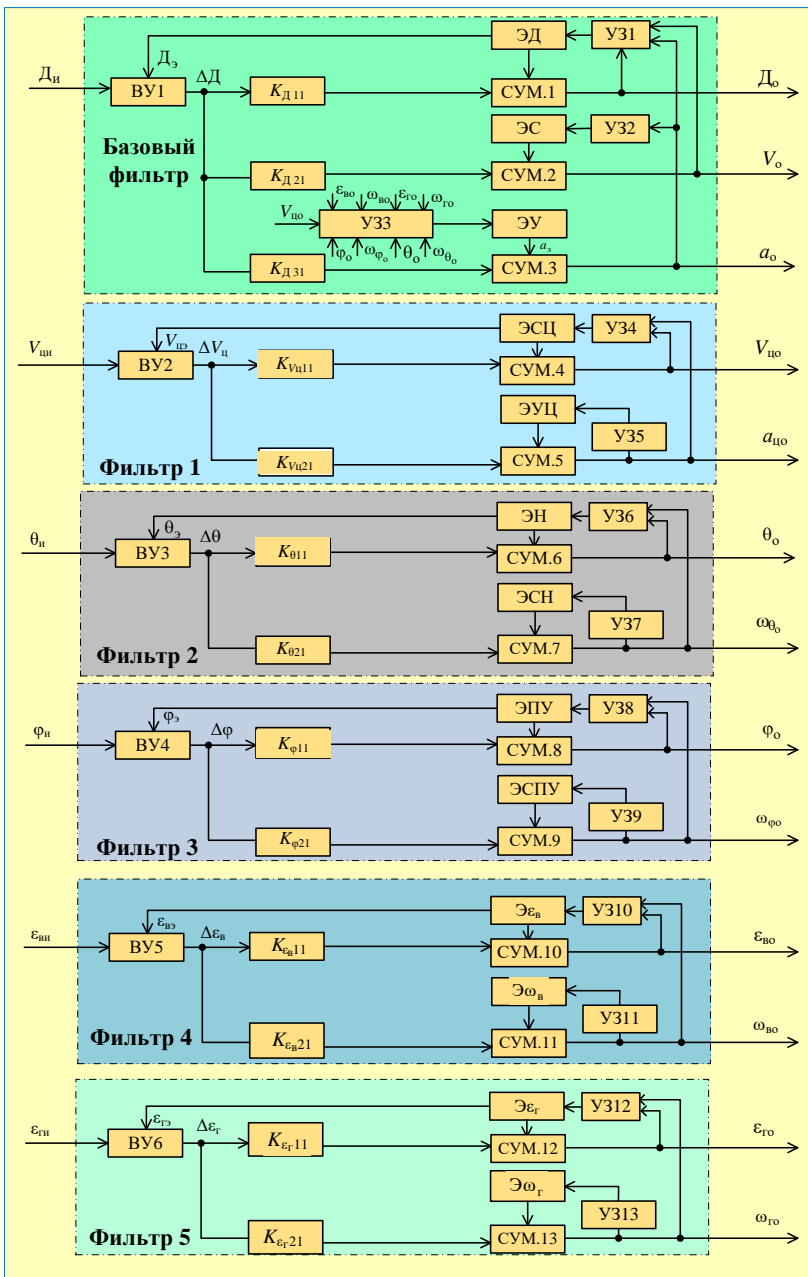


Рис. 3.10. Функциональная схема дальномерного канала

Фильтр 2 состоит из устройства вычитания (УВ3), усилителей невязки  $\Delta\theta$  ( $K_{\theta 11}, K_{\theta 21}$ ), экстраполятора угла наклона (ЭУН), экстраполятора угловой скорости наклона (ЭУСН), устройств задержки (УЗ6, УЗ7), сумматоров (СУМ.6, СУМ.7).

Фильтр 3 состоит из устройства вычитания (УВ3), усилителей невязки  $\Delta\varphi$  ( $K_{\varphi 11}, K_{\varphi 21}$ ), экстраполятора путевого угла (ЭПУР), экстраполятора скорости путевого угла (ЭСПУ), устройств задержки (УЗ8, УЗ9), сумматоров (СУМ.8, СУМ.9).

Фильтр 4 состоит из устройства вычитания (УВ4), усилителей невязки  $\Delta\varepsilon_{\text{во}}$  ( $K_{\text{в}11}, K_{\text{в}21}$ ), экстраполяторов угла и скорости линии визирования в вертикальной плоскости ( $\varepsilon_{\text{в}}$ ,  $\omega_{\text{в}}$ ), устройств задержки (УЗ10, УЗ11), сумматоров (СУМ.10, СУМ.11).

Фильтр 5 состоит из устройства вычитания (УВ5), усилителей невязки  $\Delta\varepsilon_{\text{г}}$  ( $K_{\text{г}11}, K_{\text{г}21}$ ), экстраполяторов угла и скорости линии визирования в горизонтальной плоскости ( $\varepsilon_{\text{г}}$ ,  $\omega_{\text{г}}$ ) устройств задержки (УЗ12, УЗ13), сумматоров (СУМ.12, СУМ.13).

В рассматриваемой функциональной схеме устройство по отслеживанию фазовых координат представляет собой многомерную нестационарную многоконтурную систему входными сигналами  $D_{\text{и}}$ ,  $\theta_{\text{и}}$ ,  $\varphi_{\text{и}}$ ,  $\varepsilon_{\text{ви}}$ ,  $\varepsilon_{\text{ги}}$ ,  $V_{\text{ши}}$  и выходными сигналами  $D_{\text{о}}$ ,  $V_{\text{о}}$ ,  $a_{\text{о}}$ ,  $\theta_{\text{о}}$ ,  $\omega_{\theta_{\text{о}}}$ ,  $\varphi_{\text{о}}$ ,  $\omega_{\varphi_{\text{о}}}$ ,  $\varepsilon_{\text{во}}$ ,  $\omega_{\text{во}}$ ,  $\varepsilon_{\text{го}}$ ,  $\omega_{\text{го}}$ ,  $V_{\text{цо}}$ . Входные сигналы  $D_{\text{и}}$ ,  $\varepsilon_{\text{ви}}$ ,  $\varepsilon_{\text{ги}}$  измеряются РЛС, сигналы  $\theta_{\text{и}}$ ,  $\varphi_{\text{и}}$ ,  $V_{\text{ши}}$  поступают от бортовых датчиков. Выходные сигналы  $D_{\text{о}}$ ,  $V_{\text{о}}$ ,  $a_{\text{о}}$  используются для базового фильтра при вычислении экстраполированных сигналов  $D_{\text{з}}$ ,  $V_{\text{з}}$ . Выходные сигналы  $\theta_{\text{о}}$ ,  $\omega_{\theta_{\text{о}}}$ ,  $\varphi_{\text{о}}$ ,  $\omega_{\varphi_{\text{о}}}$ ,  $\varepsilon_{\text{во}}$ ,  $\omega_{\text{во}}$ ,  $\varepsilon_{\text{го}}$ ,  $\omega_{\text{го}}$ ,  $V_{\text{цо}}$  предназначены для вычисления экстраполированного ускорения ВС по линии визирования  $a_{\text{з}}$ . Выходные сигналы на экстраполяторы подаются через устройства задержки, которые задерживают сигналы на время, равное одному шагу вычисления  $\tau$ . Выходные сигналы  $D_{\text{о}}$ ,  $V_{\text{о}}$ ,  $a_{\text{о}}$  поступают к потребителям информации для реализации алгоритмов ИИС УВД.

Нестационарность устройства отслеживания фазовых координат обусловлена наличием в фильтрах переменных коэффициентов усиления невязок, которые изменяются от своих наибольших значений в момент начала работы до меньших значений в установившемся режиме. В данном фильтре коэффициенты усиления не зависят от оценок фазовых координат.

### 3.4.6. Имитационное моделирование движения ВС для типового маневра «большая коробочка»

Имитационное моделирование движения ВС для типового маневра «большая коробочка» проведено при следующих условиях: исследуется участок от начала маневра до окончания 1-го разворота на  $90^\circ$ , измерение дальности производится относительно РЛС (рис. 3.1), скорость ВС на линейных участках маневра 300 м/с, радиус разворота 5000 м, период дискретизации  $\tau = 0,1$  с.

На рисунках 3.11 – 3.13 получены в результате моделирования зависимости дальности  $D$ , скорости  $V$  и ускорения  $a$  по линии визирования от времени полета ВС.

Из рисунков 3.11 – 3.13 видно, что зависимости дальности, скорости и ускорения по линии визирования имеют нелинейный характер, что усложняет их оценку существующими методами калмановской фильтрации без учета кинематических характеристик ВС.

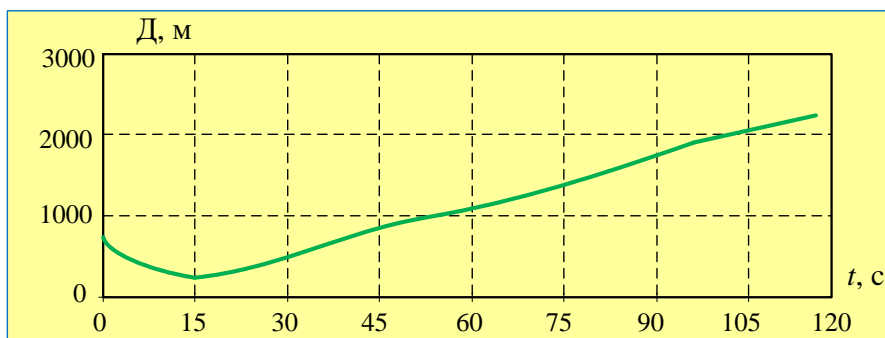


Рис. 3.11. Изменение дальности по линии визирования

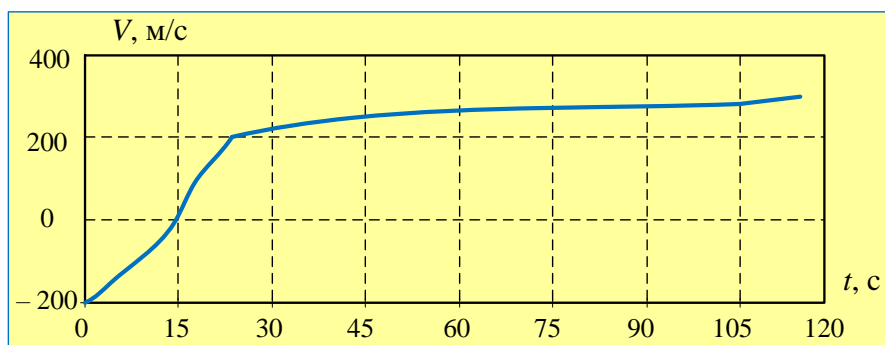
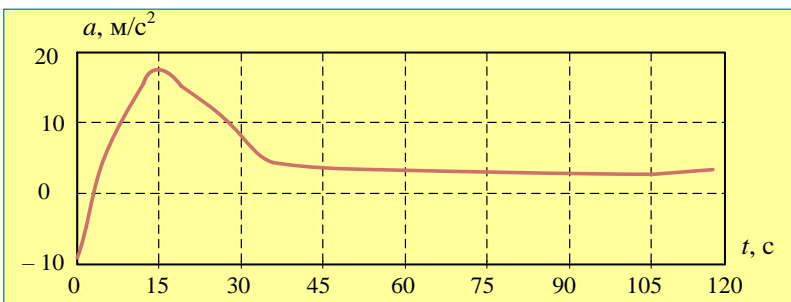
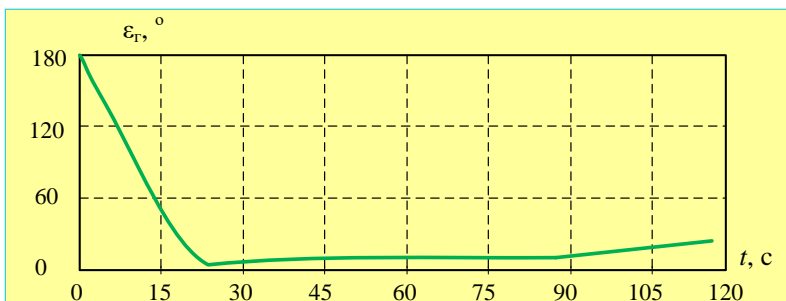


Рис. 3.12. Изменение скорости по линии визирования

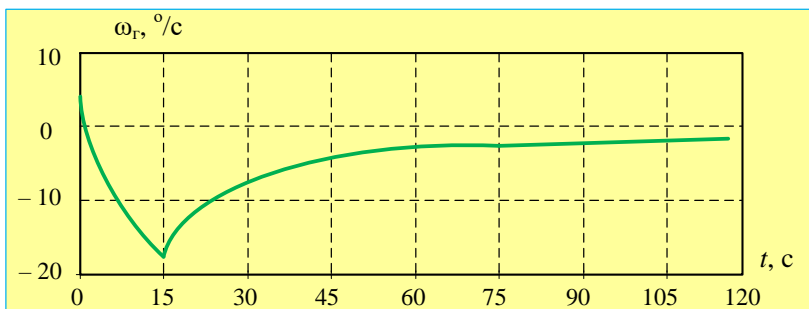


**Рис. 3.13. Изменение ускорения по линии визирования**

Для оценки фазовых координат на основе алгоритмов, учитывающих кинематические характеристики ВС, необходимы углы и скорости линии визирования в горизонтальной и вертикальной плоскостях. В ходе моделирования были получены зависимости угла  $\varepsilon_{\Gamma}$  и скорости  $\omega_{\Gamma}$  линии визирования в горизонтальной плоскости от времени, графики которых приведены на рис. 3.14, 3.15.



**Рис. 3.14. Изменение угла линии визирования в горизонтальной плоскости**



**Рис. 3.15. Изменение скорости линии визирования в горизонтальной плоскости**

В ходе моделирования были получены зависимости угла  $\varepsilon_{\text{в}}$  и скорости  $\omega_{\text{в}}$  линии визирования в вертикальной плоскости от времени, графики которых приведены на рис. 3.16, 3.17.

Из полученных зависимостей (рис. 3.16, 3.17) видно, что законы изменения углов и скоростей линии визирования в горизонтальной и вертикальной плоскостях носят нелинейный характер и влияют на оценку фазовых координат дальномерного канала ИИС (3.27) – (3.33).

Ориентацию ВС в пространстве можно характеризовать углом наклона и путевым углом поворота траектории. При прохождении маневра «большая коробочка» угол наклона траектории не изменяется ( $\theta = 0$ ,  $\omega_{\theta} = 0$ ). Путевой угол  $\varphi$  поворота траектории ВС для маневра «большая коробочка» изменяется. На рисунках 3.18, 3.19 приведены зависимости путевого угла  $\varphi$  и скорости его изменения  $\omega_{\varphi}$  от времени.

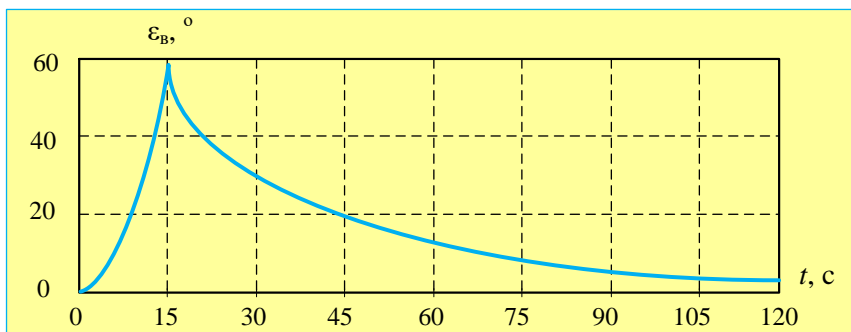


Рис. 3.16. Изменение угла линии визирования в вертикальной плоскости

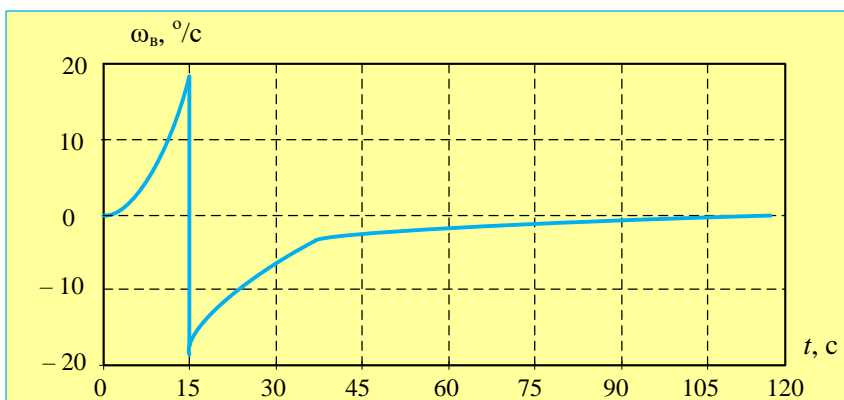


Рис. 3.17. Изменение скорости линии визирования в вертикальной плоскости

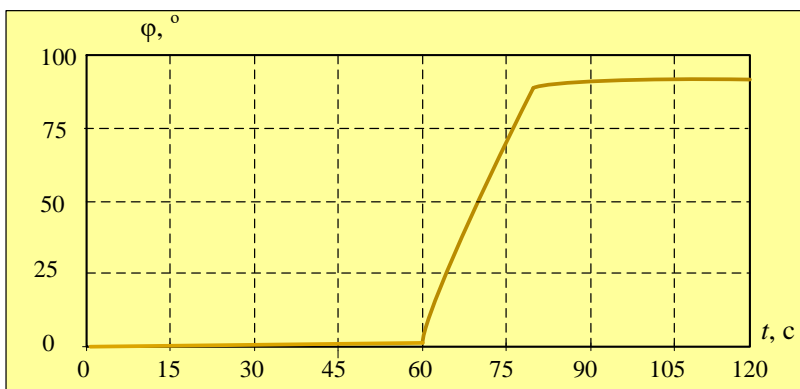


Рис. 3.18. Изменение путевого угла

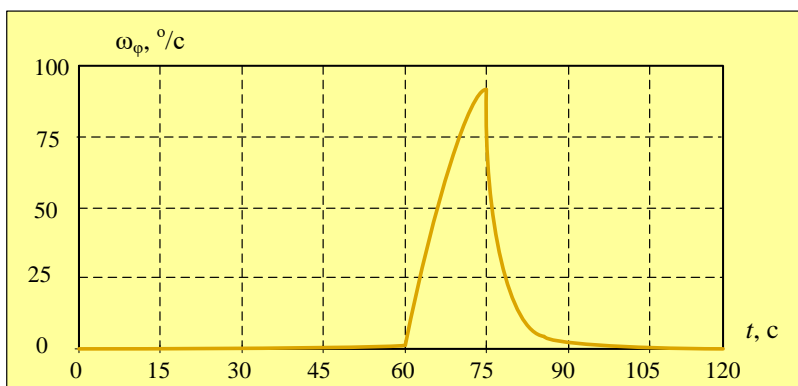


Рис. 3.19. Изменение скорости путевого угла

Из полученных зависимостей (рис. 3.18, 3.19) видно, что законы изменения путевого угла  $\varphi$  и скорости его изменения  $\omega_\varphi$  имеют нелинейный характер и влияют на оценку фазовых координат дальнего канала ИИС (3.27) – (3.33).

Нелинейный закон изменения фазовых координат ВС может вносить значительную ошибку слежения координат и параметров ВС в калмановском фильтре, где не предусмотрено использование кинематических параметров.

### 3.4.7. Исследование точностных характеристик алгоритмов функционирования дальнего канала с учетом кинематических параметров

Основным методом исследования реальной точности является имитационное моделирование на ЭВМ. Имитационное моделирование на ЭВМ представляет собой имитацию входных сигналов  $D_{и}$ ,  $V_{ци}$ ,  $\theta_{ци}$ ,  $\varphi_{ци}$ ,  $\varepsilon_{ви}$ ,  $\varepsilon_{ги}$  и

обработку этих сигналов с помощью алгоритма (3.27) – (3.58). Имитация сигналов  $D$ ,  $V_{цн}$ ,  $\theta_{цн}$ ,  $\varphi_{цн}$ ,  $\varepsilon_{вн}$ ,  $\varepsilon_{гн}$  представляет собой изменение истинных фазовых координат  $D$ ,  $V_{ц}$ ,  $\theta_{ц}$ ,  $\varphi_{ц}$ ,  $\varepsilon_{в}$ ,  $\varepsilon_{г}$  и шумов наблюдения  $\xi_{Dн}$ ,  $\xi_{V_{цн}}$ ,  $\xi_{\theta_{н}}$ ,  $\xi_{\varphi_{н}}$ ,  $\xi_{\varepsilon_{вн}}$ ,  $\xi_{\varepsilon_{гн}}$  соответственно. Шумы наблюдения  $\xi_{Dн}$ ,  $\xi_{V_{цн}}$ ,  $\xi_{\theta_{н}}$ ,  $\xi_{\varphi_{н}}$ ,  $\xi_{\varepsilon_{вн}}$ ,  $\xi_{\varepsilon_{гн}}$  имитируются датчиками случайных чисел.

В процессе этого моделирования определяются суммарные динамические и флуктуационные ошибки, а также наличие расходимости процессов оценивания. Реальная точность оценивалась по величине СКО оценок фазовых координат по 100 реализациям по формуле (2.15).

Имитационное моделирование проводилось для двух случаев. В первом случае в дальномерном канале используется зингерская модель движения ВС относительно РЛС (2.49) – (2.51). Во втором случае в дальномерном используется модель состояния с учетом кинематических параметров ВС: скорости цели  $V_{ц}$ , ускорения цели  $a_{ц}$ , угла наклона  $\theta$ , угловой скорости наклона  $\omega_{\theta}$ , путевого угла  $\varphi$ , скорости путевого угла  $\omega_{\varphi}$ , угла линии визирования в вертикальной плоскости  $\varepsilon_{в}$ , скорости линии визирования в вертикальной плоскости  $\omega_{в}$ , угла линии визирования в горизонтальной плоскости  $\varepsilon_{г}$ , скорости линии визирования горизонтальной плоскости  $\omega_{г}$ .

На рисунках 3.20 – 3.22 приведены графики изменения во времени СКО оценки фильтрации дальности  $D$ , скорости  $V$  и ускорения  $a$  по линии визирования между РЛС и ВС. Как видно из рисунков, при совершении целью маневра «большая коробочка», СКО оценки  $D$ ,  $V$  и  $a$  значительно меньше при использовании информации кинематических параметров, чем при использовании зингерской модели.

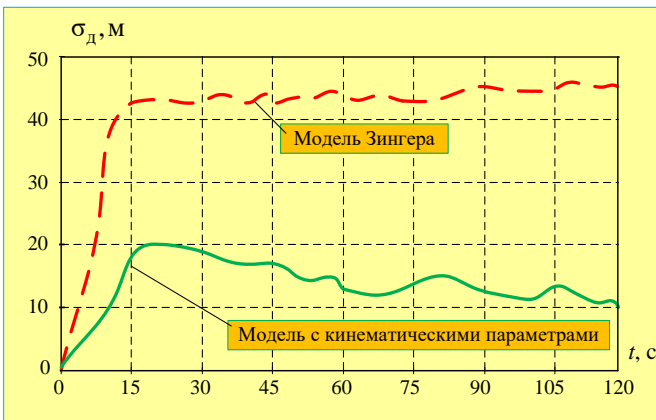


Рис. 3.20. СКО оценки фильтрации дальности

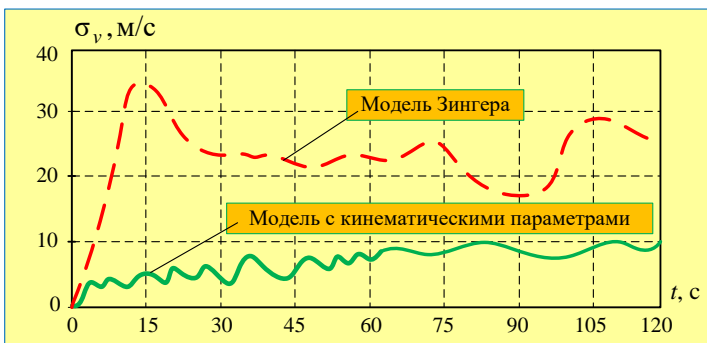


Рис. 3.21. СКО оценки фильтрации скорости

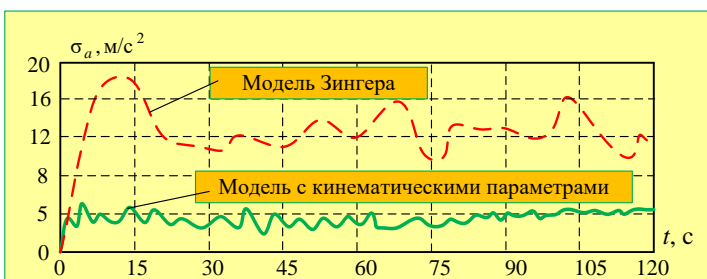


Рис. 3.22. СКО оценки фильтрации ускорения

Экстраполяция ускорения ВС на основе данных о кинематических параметрах ВС позволяет получить весьма важную информацию о движении ВС. Кроме того, учитывая разные источники поступления информации скорости ВС  $V_{ц}$ , угла наклона  $\theta$ , путевого угла  $\varphi$  от бортовых датчиков и дальности, угловых координат от РЛС, можно сделать вывод о возможности значительного повышения помехозащищенности РЛС.

Применение синтезированных алгоритмов (2.49) – (2.51) позволит более качественно выполнять задачи системы УВД по увеличению пропускной способности при заданном уровне безопасности.

### 3.5. СИНТЕЗ ДАЛЬНОМЕРНОГО КАНАЛА ИИС С УЧЕТОМ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОГО СУДНА

Для улучшения точностных характеристик ИИС целесообразно в качестве дополнительной информации использовать не только кинематические, но и динамические параметры ВС, а именно, перегрузки, испытываемые ВС [20, 26, 27].

Перегрузки, испытываемые ВС (в сочетании с информацией о пространственном положении ВС), могут быть использованы для вычисления ускорения ВС относительно РЛС.

Модель ускорения ВС с учетом кинематических и динамических параметров получим следующим образом. Известно, что вектор перегрузки  $\vec{n}$  определяется формулой

$$\vec{n} = \frac{\vec{a}}{g}, \quad (3.59)$$

откуда вектор ускорения

$$\vec{a} = \vec{n}g. \quad (3.60)$$

Проекцию вектора перегрузки на ось  $OX_{л}$  лучевой системы координат можно определить выражением, используя рис. 3.23 и табл. 3.1, 3.2.

$$\begin{aligned} n_{X_{л}} = & n_x \sin \varepsilon_B \sin \theta + n_x \cos \varepsilon_B \cos \theta \cos(\varepsilon_{\Gamma} - \varphi) + n_y \sin \varepsilon_{\Gamma} \sin \gamma_v \cos \varepsilon_B + \\ & + n_y \sin \varepsilon_B \cos \gamma_v \cos \theta - n_y \sin \theta \cos \varepsilon_{\Gamma} \cos \varepsilon_B \cos \gamma_v + \\ & + n_z \sin \varepsilon_B \sin \gamma_v + n_z \sin(\varepsilon_{\Gamma} - \varphi) \cos \varepsilon_B \cos \gamma_v, \end{aligned} \quad (3.61)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $n_y$  – нормальная перегрузка;  $n_x$  – продольная перегрузка;  $n_z$  – боковая перегрузка;  $\theta$  – угол наклона;  $\varphi$  – путевой угол;  $\gamma_v$  – угол скоростного крена;  $\varepsilon_{\Gamma}$  – угол линии визирования в горизонтальной плоскости;  $\varepsilon_B$  – угол линии визирования в вертикальной плоскости.

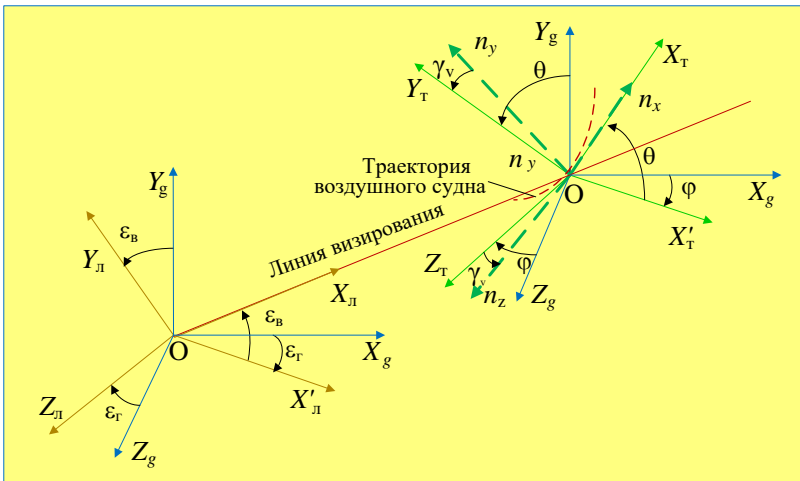


Рис. 3.23. Нормальная, траекторная и лучевая системы координат

С учетом выражений (3.60) и (3.61) математическая модель ускорения ВС, которая учитывает кинематические параметры ВС ( $\theta$  – угол наклона  $\varphi$  – путевой угол;  $\gamma_v$  – угол скоростного крена;  $\varepsilon_\Gamma$  – угол линии визирования в горизонтальной плоскости;  $\varepsilon_B$  – угол линии визирования в вертикальной плоскости;  $\gamma_{ви}$  – угол скоростного крена) и динамические параметры ( $n_{хи}$  – продольная перегрузка;  $n_{yh}$  – нормальная перегрузка;  $n_{yh}$  – боковая перегрузка  $n_{zh}$ ), определяется следующим образом:

$$\begin{aligned}
 a(k+1) = & g(n_x(k) \sin \varepsilon_B(k) \sin \theta(k) + \\
 & + n_x(k) \cos \varepsilon_B(k) \cos \theta(k) \cos(\varepsilon_\Gamma(k) - \varphi(k)) + \\
 & + n_y(k) \sin \varepsilon_\Gamma(k) \sin \gamma_v(k) \cos \varepsilon_B(k) + \\
 & + n_y(k) \sin \varepsilon_B(k) \cos \gamma_v(k) \cos \theta(k) - \\
 & - n_y(k) \sin \theta(k) \cos \varepsilon_\Gamma(k) \cos \varepsilon_B(k) \cos \gamma_v(k) + \\
 & + n_z(k) \sin \varepsilon_B(k) \sin \gamma_v(k) + \\
 & + n_z(k) \sin \varepsilon_\Gamma(k) (\varepsilon_\Gamma(k) - \varphi(k)) \cos \varepsilon_B(k) \cos \gamma_v(k)).
 \end{aligned} \tag{3.62}$$

### 3.5.1. Модель состояния дальномерного канала ИИС с учетом кинематических и динамических параметров ВС

Используя модель ускорения (3.62) и трехмерную модель калмановского фильтра (2.49) – (2.51), получим модели состояния и наблюдения дальномерного канала для оценки фазовых координат ВС:

– модель системы по оценке дальности  $D$ , скорости  $V$  и ускорения  $a$ :

$$\left. \begin{aligned}
 D(k+1) &= D(k) + V(k)T + 0,5a(k)\tau^2; \\
 V(k+1) &= V(k) + a(k)\tau; \\
 a(k+1) &= g(n_x(k) \sin \varepsilon_B(k) \sin \theta(k) + \\
 & + n_x(k) \cos \varepsilon_B(k) \cos \theta(k) \cos(\varepsilon_\Gamma(k) - \varphi(k)) + \\
 & + n_y(k) \sin \varepsilon_\Gamma(k) \sin \gamma_v(k) \cos \varepsilon_B(k) + \\
 & + n_y(k) \sin \varepsilon_B(k) \cos \gamma_v(k) \cos \theta(k) - \\
 & - n_y(k) \sin \theta(k) \cos \varepsilon_\Gamma(k) \cos \varepsilon_B(k) \cos \gamma_v(k) + \\
 & + n_z(k) \sin \varepsilon_B(k) \sin \gamma_v(k) + \\
 & + n_z(k) \sin \varepsilon_\Gamma(k) (\varepsilon_\Gamma(k) - \varphi(k)) \cos \varepsilon_B(k) \cos \gamma_v(k));
 \end{aligned} \right\} \tag{3.63}$$

$$D_{и}(k+1) = D(k+1) + \xi_{ди}(k+1); \tag{3.64}$$

– модель системы по оценке нормальной перегрузки  $n_y$  и скорости ее изменения  $V_{n_y}$  :

$$\left. \begin{aligned} n_y(k+1) &= n_y(k) + V_{n_y}(k)\tau; \\ V_{n_y}(k+1) &= (1 - \alpha_{\phi 1}\tau)V_{n_y}(k) + \xi_{V_{n_y}}(k); \end{aligned} \right\} \quad (3.65)$$

$$n_{yи}(k+1) = n_y(k+1) + \xi_{n_y}(k+1); \quad (3.66)$$

– модель системы по оценке боковой перегрузки  $n_z$  и скорости ее изменения  $V_{n_z}$  :

$$\left. \begin{aligned} n_z(k+1) &= n_z(k) + V_{z_y}(k)\tau; \\ V_{z_y}(k+1) &= (1 - \alpha_{\phi 2}\tau)V_{n_z}(k) + \xi_{V_{n_z}}(k); \end{aligned} \right\} \quad (3.67)$$

$$n_{zи}(k+1) = n_z(k+1) + \xi_{n_z}(k+1); \quad (3.68)$$

– модель системы по оценке продольной перегрузки  $n_x$  и скорости ее изменения  $V_{n_x}$  :

$$\left. \begin{aligned} n_x(k+1) &= n_x(k) + V_{n_x}(k)\tau; \\ V_{n_x}(k+1) &= (1 - \alpha_{\phi 3}\tau)V_{n_x}(k) + \xi_{V_{n_x}}(k); \end{aligned} \right\} \quad (3.69)$$

$$n_{xи}(k+1) = n_x(k+1) + \xi_{n_x}(k+1); \quad (3.70)$$

– модель системы по оценке угла скоростного крена  $\gamma_v$  и угловой скорости скоростного крена  $\omega_{\gamma_v}$  :

$$\left. \begin{aligned} \gamma_v(k+1) &= \gamma_v(k) + \omega_{\gamma_v}(k)\tau; \\ \omega_{\gamma_v}(k+1) &= (1 - \alpha_{\phi 4}\tau)\omega_{\gamma_v}(k) + \xi_{\omega_{\gamma_v}}(k); \end{aligned} \right\} \quad (3.71)$$

$$\gamma_{vи}(k+1) = \gamma_v(k+1) + \xi_{\gamma_v}(k+1); \quad (3.72)$$

– модель системы по оценке угла наклона и угловой скорости наклона ВС:

$$\left. \begin{aligned} \theta(k+1) &= \theta(k) + \omega_{\theta}(k)\tau; \\ \omega_{\theta}(k+1) &= (1 - \alpha_{\phi 5})\omega_{\theta}(k) + \xi_{\omega_{\theta}}(k); \end{aligned} \right\} \quad (3.73)$$

$$\theta_{и}(k+1) = \theta(k+1) + \xi_{\theta_{и}}(k+1); \quad (3.74)$$

– модель системы по оценке путевого угла и угловой скорости путевого угла ВС:

$$\left. \begin{aligned} \varphi(k+1) &= \varphi(k) + \omega_{\varphi}(k)\tau; \\ \omega_{\varphi}(k+1) &= (1 - \alpha_{\phi 6})\omega_{\varphi}(k) + \xi_{\omega_{\varphi}}(k); \end{aligned} \right\} \quad (3.75)$$

$$\varphi_{\text{н}}(k+1) = \varphi(k+1) + \xi_{\varphi_{\text{н}}}(k+1); \quad (3.76)$$

– модель системы по оценке угла и скорости линии визирования в вертикальной плоскости:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\text{в}}(k+1) &= \varepsilon_{\text{в}}(k) + \omega_{\text{в}}(k)\tau; \\ \omega_{\text{в}}(k+1) &= (1 - \alpha_{\phi 7})\omega_{\text{в}}(k) + \xi_{\omega_{\text{в}}}(k); \end{aligned} \right\} \quad (3.77)$$

$$\varepsilon_{\text{в}}(k+1) = \varepsilon_{\text{в}}(k+1) + \xi_{\varepsilon_{\text{вн}}}(k+1); \quad (3.78)$$

– модель системы по оценке угла и скорости линии визирования в горизонтальной плоскости:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\text{г}}(k+1) &= \varepsilon_{\text{г}}(k) + \omega_{\text{г}}(k)\tau; \\ \omega_{\text{г}}(k+1) &= (1 - \alpha_{\phi 8})\omega_{\text{г}}(k) + \xi_{\omega_{\text{г}}}(k); \end{aligned} \right\} \quad (3.79)$$

$$\varepsilon_{\text{г}}(k+1) = \varepsilon_{\text{г}}(k+1) + \xi_{\varepsilon_{\text{гн}}}(k+1). \quad (3.80)$$

### 3.5.2. Алгоритмы функционирования фильтров дальномерного канала с учетом кинематических и динамических параметров ВС

Для получения фильтров дальномерного канала ИИС с учетом кинематических и динамических параметров ВС используем модели состояния и наблюдения (3.63) – (3.80) и общий алгоритм калмановской фильтрации (2.5) – (2.9).

В результате получены следующие алгоритмы фильтрации:

– алгоритм фильтрации для оценки дальности, скорости и ускорения:

$$D_o(k+1) = D_o(k) + K_{d11}(k+1)\Delta D(k+1); \quad (3.81)$$

$$V_o(k+1) = V_o(k) + K_{d21}(k+1)\Delta D(k+1); \quad (3.82)$$

$$a_o(k+1) = a_o(k) + K_{d31}(k+1)\Delta D(k+1); \quad (3.83)$$

$$D_o(k+1) = D_o(k) + V_o(k)\tau + 0,5A_o(k)\tau^2; \quad (3.84)$$

$$V_o(k+1) = V_o(k) + A_o(k)\tau; \quad (3.85)$$

$$\begin{aligned}
a_3(k+1) = & g(n_{x0}(k) \sin \varepsilon_{Bo}(k) \sin \theta_0(k) + \\
& + n_{x0}(k) \cos \varepsilon_{Bo}(k) \cos \theta_0(k) \cos(\varepsilon_{r0}(k) - \varphi_0(k)) + \\
& + n_{y0}(k) \sin \varepsilon_{r0}(k) \sin \gamma_{v0}(k) \cos \varepsilon_{Bo} + \\
& + n_{y0}(k) \sin \varepsilon_{Bo}(k) \cos \gamma_{v0}(k) \cos \theta_0(k) - \\
& - n_{y0}(k) \sin \theta_0(k) \cos \varepsilon_{r0}(k) \cos \varepsilon_{Bo}(k) \cos \gamma_{v0}(k) + \\
& + n_{z0}(k) \sin \varepsilon_{Bo}(k) \sin \gamma_{v0}(k) + \\
& + n_{z0}(k) \sin \varepsilon_{r0}(\varepsilon_{r0}(k) - \varphi_0(k)) \cos \varepsilon_{Bo}(k) \cos \gamma_{v0}(k));
\end{aligned} \tag{3.86}$$

$$\Delta \mathbb{D}(k+1) = \mathbb{D}_{\text{н}}(k+1) - \mathbb{D}_3(k+1); \tag{3.87}$$

– алгоритм фильтрации оценки нормальной перегрузки:

$$n_{y3}(k+1) = n_{y3}(k+1) + K_{n_y,11}(k+1) \Delta n_y(k+1); \tag{3.88}$$

$$V_{n_{y_o}}(k+1) = V_{n_{y_3}}(k+1) + K_{n_y,21}(k+1) \Delta n_y(k+1); \tag{3.89}$$

$$n_{y3}(k+1) = n_{y0}(k) + V_{n_{y_o}}(k) \tau; \tag{3.90}$$

$$V_{n_{y_3}}(k+1) = (1 - \alpha_{\phi 1} \tau) V_{n_{y_o}}(k); \tag{3.91}$$

$$\Delta n_y(k+1) = n_{y\text{н}}(k+1) - n_{y3}(k+1); \tag{3.92}$$

– алгоритм фильтрации оценки боковой перегрузки:

$$n_{z0}(k+1) = n_{z3}(k+1) + K_{n_z,11}(k+1) \Delta n_z(k+1); \tag{3.93}$$

$$V_{n_{z_o}}(k+1) = V_{n_{z_3}}(k+1) + K_{n_z,21}(k+1) \Delta n_z(k+1); \tag{3.94}$$

$$n_{z3}(k+1) = n_{z0}(k) + V_{n_{z_o}}(k) \tau; \tag{3.95}$$

$$V_{n_{z_3}}(k+1) = (1 - \alpha_{\phi 2} \tau) V_{n_{z_o}}(k); \tag{3.96}$$

$$\Delta n_z(k+1) = n_{z\text{н}}(k+1) - n_{z3}(k+1); \tag{3.97}$$

– алгоритм фильтрации оценки продольной перегрузки:

$$n_{x0}(k+1) = n_{x3}(k+1) + K_{n_x,11}(k+1) \Delta n_x(k+1); \tag{3.98}$$

$$V_{n_{x_o}}(k+1) = V_{n_{x_3}}(k+1) + K_{n_x,21}(k+1) \Delta n_x(k+1); \tag{3.99}$$

$$n_{x3}(k+1) = n_{x0}(k) + V_{n_{x_o}}(k) \tau; \tag{3.100}$$

$$V_{n_{x\vartheta}}(k+1) = (1 - \alpha_{\phi 3} \tau) V_{n_{x\vartheta}}(k); \quad (3.101)$$

$$\Delta n_x(k+1) = n_{xn}(k+1) - n_{x\vartheta}(k+1); \quad (3.102)$$

– алгоритм фильтрации оценки угла и угловой скорости скоростного крена:

$$\gamma_{v\vartheta}(k+1) = \gamma_{v\vartheta}(k) + K_{\gamma_{v11}}(k+1) \Delta \gamma_v(k+1); \quad (3.103)$$

$$\omega_{\gamma_{v\vartheta}}(k+1) = \omega_{\gamma_{v\vartheta}}(k) + K_{\gamma_{v21}}(k+1) \Delta \gamma_v(k+1); \quad (3.104)$$

$$\gamma_{v\vartheta}(k+1) = \gamma_{v\vartheta}(k) + \omega_{\gamma_{v\vartheta}}(k) \tau; \quad (3.105)$$

$$\omega_{\gamma_{v\vartheta}}(k+1) = (1 - \alpha_{\phi 4} \tau) \omega_{\gamma_{v\vartheta}}(k); \quad (3.106)$$

$$\Delta \gamma_v(k+1) = \gamma_{vn}(k+1) - \gamma_{v\vartheta}(k+1), \quad (3.107)$$

– алгоритм фильтрации для оценки угла и угловой скорости наклона:

$$\theta_o(k+1) = \theta_o(k) + K_{\theta_{o11}}(k+1) \Delta \theta(k+1); \quad (3.108)$$

$$\omega_{\theta_o}(k+1) = \omega_{\theta_o}(k) + K_{\theta_{o21}}(k+1) \Delta \theta(k+1); \quad (3.109)$$

$$\theta_o(k+1) = \theta_o(k) + \omega_{\theta_o}(k) \tau; \quad (3.110)$$

$$\omega_{\theta_o}(k+1) = (1 - \alpha_{\phi 5} \tau) \omega_{\theta_o}(k); \quad (3.111)$$

$$\Delta \theta(k+1) = \theta_{in}(k+1) - \theta_o(k+1); \quad (3.112)$$

– алгоритм фильтрации для оценки путевого угла и угловой скорости путевого угла:

$$\varphi_o(k+1) = \varphi_o(k) + K_{\varphi_{o11}}(k+1) \Delta \varphi(k+1); \quad (3.113)$$

$$\omega_{\varphi_o}(k+1) = \omega_{\varphi_o}(k) + K_{\varphi_{o21}}(k+1) \Delta \varphi(k+1); \quad (3.114)$$

$$\varphi_o(k+1) = \varphi_o(k) + \omega_{\varphi_o}(k) \tau; \quad (3.115)$$

$$\omega_{\varphi_o}(k+1) = (1 - \alpha_{\phi 6} \tau) \omega_{\varphi_o}(k); \quad (3.116)$$

$$\Delta \varphi(k+1) = \varphi_{in}(k+1) - \varphi_o(k+1); \quad (3.117)$$

– алгоритм фильтрации для оценки угла и скорости линии визирования в вертикальной плоскости:

$$\varepsilon_{bo}(k+1) = \varepsilon_{bo}(k) + K_{\varepsilon_{b11}}(k+1) \Delta \varepsilon_b(k+1); \quad (3.118)$$

$$\omega_{\varepsilon_{bo}}(k+1) = \omega_{\varepsilon_{bo}}(k) + K_{\varepsilon_{b21}}(k+1) \Delta \varepsilon_b(k+1); \quad (3.119)$$

$$\varepsilon_{\text{вз}}(k+1) = \varepsilon_{\text{во}}(k) + \omega_{\varepsilon_{\text{во}}}(k)\tau; \quad (3.120)$$

$$\omega_{\text{вз}}(k+1) = (1 - \alpha_{\text{ф}7}\tau)\omega_{\text{во}}(k); \quad (3.121)$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{в}}(k+1) = \varepsilon_{\text{ви}}(k+1) - \varepsilon_{\text{вз}}(k+1); \quad (3.122)$$

– алгоритм фильтрации для оценки угла и скорости линии визирования в горизонтальной плоскости:

$$\varepsilon_{\text{го}}(k+1) = \varepsilon_{\text{гз}}(k+1) + K_{\varepsilon_{\text{г}11}}(k+1)\Delta\varepsilon_{\text{г}}(k+1); \quad (3.123)$$

$$\omega_{\text{го}}(k+1) = \omega_{\text{гз}}(k+1) + K_{\varepsilon_{\text{г}21}}(k+1)\Delta\varepsilon_{\text{г}}(k+1); \quad (3.124)$$

$$\varepsilon_{\text{гз}}(k+1) = \varepsilon_{\text{го}}(k) + \omega_{\text{го}}(k)\tau; \quad (3.125)$$

$$\omega_{\text{гз}}(k+1) = (1 - \alpha_{\text{ф}8}\tau)\omega_{\text{го}}(k); \quad (3.126)$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{г}}(k+1) = \varepsilon_{\text{ги}}(k+1) - \varepsilon_{\text{гз}}(k+1). \quad (3.127)$$

**Порядок действий при реализации алгоритма базового фильтра (3.81) – (3.88):**

1. Вначале вводятся время дискретизации  $\tau$ , постоянная времени маневра  $\alpha_{\text{ф}}$ , постоянные элементы матриц и векторов  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{H}^T$ ,  $\mathbf{R}_{\text{дн}}$ ,  $\Phi$ ,  $\Phi^T$ ,  $\mathbf{Q}_x$ :

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{H}^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Q}_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{\text{а.х}} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_{\text{д}} = \mathbf{R}_{\text{дн}}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} 1 & \tau & 0,5\tau^2 \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \Phi^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \tau & 1 & 0 \\ 0,5\tau^2 & \tau & 0 \end{bmatrix}.$$

2. Вводим начальные значения фазовых координат ( $k=0$ )  $D_{\text{o}}(0) = D_{\text{з}}(0) = D_{\text{н}}(0)$ ,  $V_{\text{o}}(0) = V_{\text{з}}(0)$ ,  $a_{\text{o}}(0) = a_{\text{з}}(0)$  и элементы матрицы  $\mathbf{P}_{\text{o}}(0)$ :

$$\mathbf{P}_{\text{o}}(0) = \begin{bmatrix} P_{\text{o}11}(0) & P_{\text{o}12}(0) & P_{\text{o}13}(0) \\ P_{\text{o}21}(0) & P_{\text{o}22}(0) & P_{\text{o}23}(0) \\ P_{\text{o}31}(0) & P_{\text{o}32}(0) & P_{\text{o}33}(0) \end{bmatrix}.$$

3. Находим на 1-м шаге элементы матрицы  $\mathbf{P}_{\text{з}}(1)$ :

$$\mathbf{P}_{\text{з}}(1) = \Phi\mathbf{P}_{\text{o}}(0)\Phi^T + \mathbf{Q}_x.$$

4. Вычисляем на 1-м шаге матрицу коэффициентов усиления фильтра  $\mathbf{K}_\Phi(1)$ :

$$\mathbf{K}_\Phi(1) = \mathbf{P}_3(1) \mathbf{H}^\top \left\{ \mathbf{H} \mathbf{P}_3(1) \mathbf{H}^\top + \mathbf{R}_d \right\}^{-1}.$$

5. По формулам (3.84) – (3.86) вычисляем на 1-м шаге составляющие вектора прогноза  $\mathbf{D}_3(1)$ ,  $V_3(1)$  и  $a_3(1)$ :

$$\mathbf{D}_3(1) = \mathbf{D}_0(0) + V_0(0)\tau + a_0(0) \frac{\tau^2}{2};$$

$$V_3(1) = V_0(0) + a_0(0)\tau;$$

$$\begin{aligned} a_3(1) = & g(n_{x_0}(0) \sin \varepsilon_{B_0}(0) \sin \theta_0(0) + \\ & + n_{x_0}(0) \cos \varepsilon_{B_0}(0) \cos \theta_0(0) \cos(\varepsilon_{r_0}(0) - \varphi_0(0)) + \\ & + n_{y_0}(0) \sin \varepsilon_{r_0}(0) \sin \gamma_{v_0}(0) \cos \varepsilon_{B_0}(0) + \\ & + n_{y_0}(0) \sin \varepsilon_{B_0}(0) \cos \gamma_{v_0}(0) \cos \theta_0(0) - \\ & - n_{y_0}(0) \sin \theta_0(0) \cos \varepsilon_{r_0}(0) \cos \varepsilon_{B_0}(0) \cos \gamma_{v_0}(0) + \\ & + n_{z_0}(0) \sin \varepsilon_{B_0}(0) \sin \gamma_{v_0}(0) + \\ & + n_{z_0}(0) \sin \varepsilon_{r_0}(0) (\varepsilon_{r_0}(0) - \varphi_0(0)) \cos \varepsilon_{B_0}(0) \cos \gamma_{v_0}(0)); \end{aligned}$$

6. По формуле (3.87) вычисляем на 1-м шаге невязку измерения  $\Delta \mathbf{D}(1)$ :

$$\Delta \mathbf{D}(k+1) = \mathbf{D}_n(k+1) - \mathbf{D}_3(k+1).$$

7. По формулам (3.81) – (3.83) вычисляем на 1-м шаге составляющие вектора оценки фазовых координат  $\mathbf{D}_0(1)$ ,  $V_0(1)$  и  $a_0(1)$ :

$$\mathbf{D}_0(1) = \mathbf{D}_3(1) + \mathbf{K}_{\Phi 1}(1) \Delta \mathbf{D}(1);$$

$$V_0(1) = V_3(1) + \mathbf{K}_{\Phi 2}(1) \Delta \mathbf{D}(1);$$

$$a_0(1) = a_3(1) + \mathbf{K}_{\Phi 3}(1) \Delta \mathbf{D}(1).$$

8. Вычисляем на 1-м шаге матрицу  $\mathbf{P}_0(1)$ :

$$\mathbf{P}_0(1) = \mathbf{P}_3(1) - \mathbf{K}_\Phi(1) \mathbf{H} \mathbf{P}_3(1).$$

Шаг закончен. Далее идут в том же порядке вычисления на следующем шаге  $\mathbf{P}_3(2)$ ,  $\mathbf{K}_\Phi(2)$ ,  $\mathbf{D}_3(2)$ ,  $V_3(2)$ ,  $a_3(2)$ ,  $\Delta \mathbf{D}(2)$ ,  $\mathbf{D}_0(2)$ ,  $V_0(2)$ ,  $a_0(2)$ ,  $\mathbf{P}_0(2)$  и т.д.

**Порядок действий при реализации алгоритмов фильтров 1 – 8 (3.88) – (3.127):**

1. Вначале вводятся время дискретизации  $\tau$ , постоянные элементы матриц и векторов  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{H}^T$ ,  $\mathbf{R}_n$ ,  $\Phi$ ,  $\Phi^T$ ,  $\mathbf{Q}_x$ :

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{H}^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{Q}_x = \begin{bmatrix} D_x & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} 1 & \tau \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \Phi^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \tau & 1 \end{bmatrix}.$$

2. Затем вводятся начальные значения фазовых координат ( $k=0$ )

$$n_{y_0}(0) = n_{y_3}(0), V_{n_{y_0}}(0) = V_{n_{y_3}}(0), n_{z_0}(0) = n_{z_3}(0), V_{n_{z_0}}(0) = V_{n_{z_3}}(0),$$

$$n_{x_0}(0) = n_{x_3}(0), V_{n_{x_0}}(0) = V_{n_{x_3}}(0), \gamma_{v_0}(0) = \gamma_{v_3}(0), \omega_{\gamma_{v_0}}(0) = \omega_{\gamma_{v_3}}(0),$$

$$\theta_0(0) = \theta_3(0) = \theta_n(0), \omega_{\theta_0}(0) = \omega_{\theta_3}(0), \varphi_0(0) = \varphi_3(0) = \varphi_n(0),$$

$$\omega_{\varphi_0}(0) = \omega_{\varphi_3}(0), \varepsilon_{v_0}(0) = \varepsilon_{v_3}(0) = \varepsilon_{v_n}(0), \omega_{v_0}(0) = \omega_{v_3}(0),$$

$\varepsilon_{\tau_0}(0) = \varepsilon_{\tau_3}(0) = \varepsilon_{\tau_n}(0)$ ,  $\omega_{\tau_0}(0) = \omega_{\tau_3}(0)$  и элементы матрицы  $\mathbf{P}_0(0)$ :

$$\mathbf{P}_0(0) = \begin{bmatrix} P_{011}(0) & P_{012}(0) \\ P_{021}(0) & P_{022}(0) \end{bmatrix}.$$

3. Вычисляем на 1-м шаге элементы матрицы  $\mathbf{P}_3(1)$ :

$$\mathbf{P}_3(1) = \Phi \mathbf{P}_0(0) \Phi^T + \mathbf{Q}_x.$$

4. Вычисляем на 1-м шаге матрицу коэффициентов усиления фильтра  $\mathbf{K}_\Phi(1)$ :

$$\mathbf{K}_\Phi(1) = \mathbf{P}_3(1) \mathbf{H}^T \left\{ \mathbf{H} \mathbf{P}_3(1) \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_n \right\}^{-1}.$$

5. По формулам (3.90), (3.91), (3.95), (3.96), (3.100), (3.101), (3.105), (3.106), (3.110), (3.111), (3.115), (3.116), (3.120), (3.121), (3.125) и (3.126) вычисляются на 1-м шаге составляющие векторов прогноза  $n_{y_3}(1)$ ,  $V_{n_{y_3}}(1)$ ,  $n_{z_3}(1)$ ,  $V_{n_{z_3}}(1)$ ,  $n_{x_3}(1)$ ,  $V_{n_{x_3}}(1)$ ,  $\gamma_{v_3}(1)$ ,  $\omega_{\gamma_{v_3}}(1)$ ,  $\theta_3(1)$ ,  $\omega_{\theta_3}(1)$ ,  $\varphi_3(1)$ ,  $\omega_{\varphi_3}(1)$ ,  $\varepsilon_{v_3}(1)$ ,  $\omega_{v_3}(1)$ ,  $\varepsilon_{\tau_3}(1)$ ,  $\omega_{\tau_3}(1)$ :

$$n_{y_3}(1) = n_{y_0}(0) + V_{n_{y_0}}(0)\tau; V_{n_{y_3}}(1) = (1 - \alpha_{\Phi 1}\tau)V_{n_{y_0}}(0);$$

$$n_{z_3}(1) = n_{z_0}(0) + V_{n_{z_0}}(0)\tau; V_{n_{z_3}}(1) = (1 - \alpha_{\Phi 2}\tau)V_{n_{z_0}}(0);$$

$$n_{x_3}(1) = n_{x_0}(0) + V_{n_{x_0}}(0)\tau; V_{n_{x_3}}(1) = (1 - \alpha_{\Phi 3}\tau)V_{n_{x_0}}(0);$$

$$\begin{aligned}
\gamma_{v\varepsilon}(1) &= \gamma_{v0}(0) + \omega_{\gamma v0}(0)\tau; \quad \omega_{\gamma v\varepsilon}(1) = (1 - \alpha_{\phi 4}\tau)\omega_{\gamma v0}(0); \\
\theta_3(1) &= \theta_0(0) + \omega_{\theta_0}(0)\tau; \quad \omega_{\theta_3}(1) = (1 - \alpha_{\phi 5}\tau)\omega_{\theta_0}(0); \\
\varphi_3(1) &= \varphi_0(0) + \omega_{\varphi_0}(0)\tau; \quad \omega_{\varphi_3}(1) = (1 - \alpha_{\phi 6}\tau)\omega_{\varphi_0}(0); \\
\varepsilon_{B\varepsilon}(1) &= \varepsilon_{B0}(0) + \omega_{\varepsilon_{B0}}(0)\tau; \quad \omega_{B\varepsilon}(1) = (1 - \alpha_{\phi 7}\tau)\omega_{B0}(0); \\
\varepsilon_{\Gamma\varepsilon}(1) &= \varepsilon_{\Gamma 0}(0) + \omega_{\varepsilon_{\Gamma 0}}(0)\tau; \quad \omega_{\Gamma\varepsilon}(1) = (1 - \alpha_{\phi 8}\tau)\omega_{\Gamma 0}(0).
\end{aligned}$$

6. По формулам (3.92), (3.97), (3.102), (3.107), (3.112), (3.117), (3.122), и (3.127) вычисляются на 1-м шаге невязки измерений  $\Delta n_y(1)$ ,  $\Delta n_z(1)$ ,  $\Delta n_x(1)$ ,  $\Delta \gamma_v(1)$ ,  $\Delta \theta(1)$ ,  $\Delta \varphi(1)$ ,  $\Delta \varepsilon_B(1)$  и  $\Delta \varepsilon_\Gamma(1)$ :

$$\begin{aligned}
\Delta n_y(1) &= n_{yH}(1) - n_{y\varepsilon}(1); \quad \Delta n_z(1) = n_{zH}(1) - n_{z\varepsilon}(1) \quad \Delta n_x(1) = n_{xH}(1) - n_{x\varepsilon}(1); \\
\Delta \gamma_v(k+1) &= \gamma_{vH}(k+1) - \gamma_{v\varepsilon}(k+1); \quad \Delta \theta(1) = \theta_{H\theta}(1) - \theta_{\varepsilon\theta}(1); \quad \Delta \varphi(1) = \varphi_H(1) - \varphi_\varepsilon(1); \\
\Delta \varepsilon_B(1) &= \varepsilon_{BH}(1) - \varepsilon_{B\varepsilon}(1); \quad \Delta \varepsilon_\Gamma(1) = \varepsilon_{\Gamma H}(1) - \varepsilon_{\Gamma\varepsilon}(1).
\end{aligned}$$

7. По формулам (3.88), (3.89), (3.93), (3.94), (3.98), (3.99), (3.103), (3.104), (3.108), (3.109), (3.113), (3.114), (3.118), (3.119), (3.123) и (3.127) вычисляются на 1-м шаге составляющие вектора оценки фазовых координат  $n_{y0}(1)$ ,  $V_{n_{y0}}(1)$ ,  $n_{z0}(1)$ ,  $V_{n_{z0}}(1)$ ,  $n_{x0}(1)$ ,  $V_{n_{x0}}(1)$ ,  $\gamma_{v0}(1)$ ,  $\omega_{\gamma_{v0}}(1)$ ,  $\theta_0(1)$ ,  $\omega_{\theta_0}(1)$ ,  $\varphi_0(1)$ ,  $\omega_{\varphi_0}(1)$ ,  $\varepsilon_{B0}(1)$ ,  $\omega_{B0}(1)$ ,  $\varepsilon_{\Gamma 0}(1)$  и  $\omega_{\Gamma 0}(1)$ :

$$\begin{aligned}
n_{y0}(1) &= n_{y\varepsilon}(1) + K_{n_y 11}(1)\Delta n_y(1); \quad V_{n_{y0}}(1) = V_{n_{y\varepsilon}}(1) + K_{n_y 21}(1)\Delta n_y(1); \\
n_{z0}(1) &= n_{z\varepsilon}(1) + K_{n_z 11}(1)\Delta n_z(1); \quad V_{n_{z0}}(1) = V_{n_{z\varepsilon}}(1) + K_{n_z 21}(1)\Delta n_z(1); \\
n_{x0}(1) &= n_{x\varepsilon}(1) + K_{n_x 11}(1)\Delta n_x(1); \quad V_{n_{x0}}(1) = V_{n_{x\varepsilon}}(1) + K_{n_x 21}(1)\Delta n_x(1); \\
\gamma_{v0}(1) &= \gamma_{v\varepsilon}(1) + K_{\gamma_v 11}(1)\Delta \gamma_v(1); \quad \omega_{\gamma_{v0}}(1) = \omega_{\gamma_{v\varepsilon}}(1) + K_{\gamma_v 21}(1)\Delta \gamma_v(1); \\
\theta_0(1) &= \theta_\varepsilon(1) + K_{\theta 11}(1)\Delta \theta(1); \quad \omega_{\theta_0}(1) = \omega_{\theta_\varepsilon}(1) + K_{\theta 21}(1)\Delta \theta(1); \\
\varphi_0(1) &= \varphi_\varepsilon(1) + K_{\varphi 11}(1)\Delta \varphi(1); \quad \omega_{\varphi_0}(1) = \omega_{\varphi_\varepsilon}(1) + K_{\varphi 21}(1)\Delta \varphi(1); \\
\varepsilon_{B0}(1) &= \varepsilon_{B\varepsilon}(1) + K_{\varepsilon_B 11}(1)\Delta \varepsilon_B(1); \quad \omega_{B0}(1) = \omega_{B\varepsilon}(1) + K_{\varepsilon_B 21}(1)\Delta \varepsilon_B(1); \\
\varepsilon_{\Gamma 0}(1) &= \varepsilon_{\Gamma\varepsilon}(1) + K_{\varepsilon_\Gamma 11}(1)\Delta \varepsilon_\Gamma(1); \quad \omega_{\Gamma 0}(1) = \omega_{\Gamma\varepsilon}(1) + K_{\varepsilon_\Gamma 21}(1)\Delta \varepsilon_\Gamma(1).
\end{aligned}$$

8. Вычисляем на 1-м шаге матрица  $P_0(1)$ :

$$P_0(1) = P_0(1) - K_f(1)HP_0(1).$$

Шаг закончен. Далее идут в том же порядке вычисления на следующем шаге и т.д.

### 3.5.3. Функциональная схема дальномерного канала с учетом кинематических и динамических параметров

На рисунке 3.24 представлена функциональная схема реализации дальномерного канала для оценки дальности до маневрирующего воздушного судна на основе использования его кинематических и динамических характеристик по алгоритмам (3.81) – (3.127).

В структуре дальномерного канала следует выделить основные элементы: воздушное судно; наземная радиолокационная станция (РЛС).

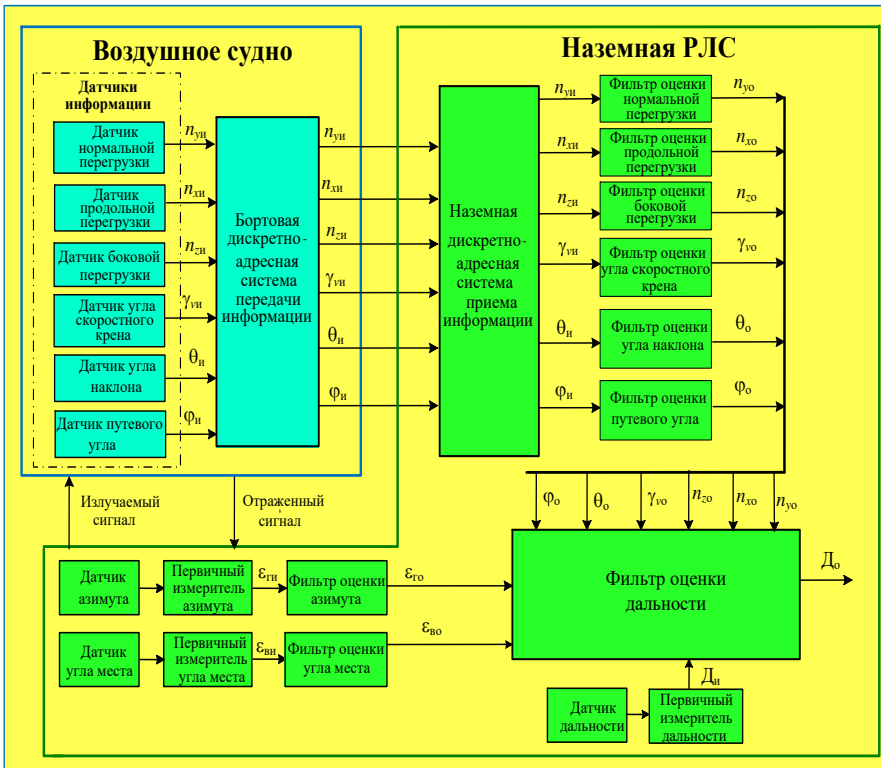


Рис. 3.24. Функциональная схема дальномерного канала с учетом кинематических и динамических параметров

В состав воздушного судна входят датчики информации: датчик продольной перегрузки  $n_{хи}$ ; датчик нормальной перегрузки  $n_{уи}$ ; датчик боковой перегрузки  $n_{зи}$ ; датчик угла наклона траектории  $\theta_{и}$ ; датчик путевого угла траектории  $\phi_{и}$ ; датчик угла скоростного крена  $\gamma_{ви}$  и бортовая дискретно-адресная система передачи информации. В качестве датчиков информации используются акселерометры, гировертикаль, курсовая система, гироскопы.

В состав наземной РЛС входят наземная дискретно-адресная система передачи информации, фильтр продольной перегрузки, фильтр нормальной перегрузки, фильтр боковой перегрузки, фильтр угла наклона траектории, фильтр угла поворота траектории, фильтр угла скоростного крена, датчик азимута, первичный измеритель азимута, фильтр оценки азимута, датчик угла места, первичный измеритель угла места, фильтр оценки угла места, датчик дальности, первичный измеритель дальности, фильтр оценки дальности.

Измеренные динамические и кинематические параметры  $n_{хи}$ ,  $n_{уи}$ ,  $n_{зи}$ ,  $\theta_{и}$ ,  $\phi_{и}$ ,  $\gamma_{ви}$  воздушного судна передаются с помощью бортовой дискретно-адресной системы передачи информации на наземную дискретно-адресную систему приема информации.

С выхода наземной дискретно-адресной системы приема информации измеренные значения параметров  $n_{хи}$ ,  $n_{уи}$ ,  $n_{зи}$ ,  $\theta_{и}$ ,  $\phi_{и}$ ,  $\gamma_{ви}$  подаются на входы фильтров оценки продольной перегрузки, нормальной перегрузки боковой перегрузки, угла наклона траектории, угла поворота траектории, угла скоростного крена, где происходит оценка этих параметров  $n_{хо}$ ,  $n_{yo}$ ,  $n_{zo}$ ,  $\theta_o$ ,  $\phi_o$ ,  $\gamma_{yo}$  по алгоритму калмановской фильтрации (3.88) – (3.167).

Фильтр оценки нормальной перегрузки реализуется алгоритмом (3.98) – (3.102), фильтр оценки продольной перегрузки – алгоритмом (3.87) – (3.92), фильтр оценки боковой перегрузки – алгоритмом (3.93) – (3.97), фильтр оценки угла наклона траектории – алгоритмом (3.108) – (3.112), фильтр оценки путевого угла траектории – алгоритмом (3.113) – (3.117), фильтр оценки угла скоростного крена – алгоритмом (3.103) – (3.107).

С выхода этих фильтров оценки параметров  $n_{хо}$ ,  $n_{yo}$ ,  $n_{zo}$ ,  $\theta_o$ ,  $\phi_o$ ,  $\gamma_{yo}$  поступают на фильтр оценки дальности для реализации его алгоритма (3.81) – (3.87).

Для измерения координат воздушного судна дальности  $D_{и}$ , угла места (угол линии визирования в вертикальной плоскости)  $\varepsilon_{ви}$  и азимута (угол линии визирования в вертикальной плоскости)  $\varepsilon_{ги}$  в наземной РЛС используется излучаемый сигнал, который отражается от воздушного судна. Отраженный сигнал поступает на датчики угла места, азимута и дальности.

С выхода датчика угла места сигнал поступает на первичный измеритель угла места, где происходит первичное измерение угла места  $\varepsilon_{\text{вн}}$ . Измеренное значение  $\varepsilon_{\text{вн}}$  поступает на фильтр оценки угла места, где происходит его оценка  $\varepsilon_{\text{во}}$  по алгоритму (3.118) – (3.122).

С выхода датчика азимута сигнал поступает на первичный измеритель азимута, где происходит первичное измерение азимута  $\varepsilon_{\text{гн}}$ . Измеренное значение  $\varepsilon_{\text{гн}}$  поступает на фильтр оценки азимута, где происходит его оценка  $\varepsilon_{\text{го}}$  по алгоритму (3.123) – (3.127).

С выхода датчика дальности сигнал поступает на первичный измеритель дальности, где происходит первичное измерение дальности  $D_{\text{н}}$ .

С выхода фильтров оценки нормальной перегрузки, продольной перегрузки боковой перегрузки угла наклона траектории, путевого угла траектории, угла скоростного крена, угла места, азимута сигналы ( $n_{x_0}, n_{y_0}, n_{z_0}, \theta_0, \varphi_0, \gamma_{v_0}, \varepsilon_{\text{во}}, \varepsilon_{\text{го}}$ ) и измеренное значение дальности  $D_{\text{н}}$  поступают на фильтр оценки дальности для реализации его алгоритма (3.81) – (3.97), где происходит оценка дальности до ВС.

### **3.5.4. Исследование точностных характеристик алгоритмов функционирования дальномерного канала с учетом кинематических и динамических параметров**

Имитационное моделирование на ЭВМ представляет собой имитацию входных сигналов  $D_{\text{н}}, n_{x\text{н}}, n_{y\text{н}}, n_{z\text{н}}, \theta_{\text{н}}, \varphi_{\text{н}}, \gamma_{v\text{н}}, \varepsilon_{\text{вн}}, \varepsilon_{\text{гн}}$  и обработку этих сигналов с помощью алгоритма (3.63) – (3.127).

Имитация сигналов  $D_{\text{н}}, n_{x\text{н}}, n_{y\text{н}}, n_{z\text{н}}, \theta_{\text{н}}, \varphi_{\text{н}}, \gamma_{v\text{н}}, \varepsilon_{\text{вн}}, \varepsilon_{\text{гн}}$  представляет собой изменение истинных фазовых координат  $D, n_x, n_y, n_z, \theta, \varphi, \gamma_v, \varepsilon_v, \varepsilon_\Gamma$  и шумов наблюдения  $\xi_{D_{\text{н}}}, \xi_{n_{x\text{н}}}, \xi_{n_{y\text{н}}}, \xi_{n_{z\text{н}}}, \xi_{\gamma_{v\text{н}}}, \xi_{\theta_{\text{н}}}, \xi_{\varphi_{\text{н}}}, \xi_{\varepsilon_{\text{вн}}}, \xi_{\varepsilon_{\text{гн}}}$  соответственно.

Шумы наблюдения  $\xi_{D_{\text{н}}}, \xi_{n_{x\text{н}}}, \xi_{n_{y\text{н}}}, \xi_{n_{z\text{н}}}, \xi_{\gamma_{v\text{н}}}, \xi_{\theta_{\text{н}}}, \xi_{\varphi_{\text{н}}}, \xi_{\varepsilon_{\text{вн}}}, \xi_{\varepsilon_{\text{гн}}}$  имитируются датчиками случайных чисел.

В процессе моделирования определяются суммарные динамические и флуктуационные ошибки. Реальная точность оценивалась по величине СКО оценок фазовых координат по 100 реализациям по формуле (2.15).

Имитационное моделирование проводилось для двух случаев.

В первом случае в дальномерном канале используется модель движения ВС относительно РЛС с учетом только кинематических параметров ВС: скорости цели  $V_{\text{ц}}$ , ускорения цели  $a_{\text{ц}}$ , угла наклона  $\theta$ , угловой скорости

наклона  $\omega_\theta$ , путевого угла  $\varphi$ , скорости путевого угла  $\dot{\omega}_\varphi$ , угла линии визирования в вертикальной плоскости  $\varepsilon_B$ , скорости линии визирования в вертикальной плоскости  $\dot{\omega}_B$ , угла линии визирования в горизонтальной плоскости  $\varepsilon_T$ , скорости линии визирования в горизонтальной плоскости  $\dot{\omega}_T$ .

Во втором случае в дальномерном канале используется модель состояния с учетом кинематических параметров ВС (угла наклона  $\theta$ , путевого угла  $\varphi$ , угла линии визирования в вертикальной плоскости  $\varepsilon_B$ , угла линии визирования в горизонтальной плоскости  $\varepsilon_T$ , угла скоростного крена  $\gamma_v$ ) и динамических параметров ВС (продольная перегрузка  $n_x$ , нормальная перегрузка  $n_y$ , боковая перегрузка  $n_z$ ).

На рисунке 3.25 приведены графики изменения во времени СКО оценки фильтрации дальности  $D$  по линии визирования между РЛС и ВС для двух моделей (модель с кинематическими параметрами ВС, модель с кинематическими и динамическими параметрами ВС).

Как видно из рис. 3.25, при совершении ВС маневра «большая коробочка», СКО оценки  $D$  меньше при использовании информации кинематических и динамических параметров ВС, чем при использовании информации только кинематических параметров ВС в дальномерном канале ИИС.

Уменьшение СКО оценки  $D$  при использовании информации кинематических и динамических параметров ВС связано с тем, что динамические параметры ВС улучшают точность экстраполяции ускорения ВС в модели состояния дальномерного канала. Точность экстраполяции ускорения ВС влияет на экстраполяцию и оценку дальности ВС относительно РЛС.

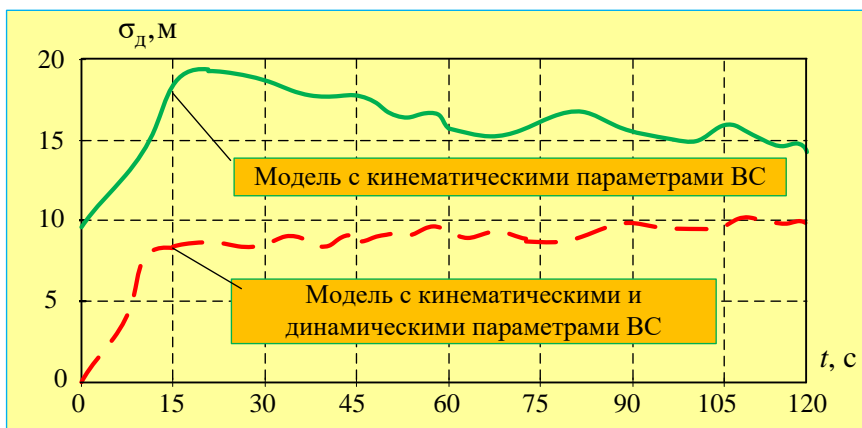


Рис. 3.25. СКО оценки фильтрации дальности

## 4. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ С ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКОЙ ИНФОРМАЦИИ

---

### 4.1. ИИС С ПРИМЕНЕНИЕМ ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Обработку информации, поступающей от нескольких источников радиолокационной информации после вторичной обработки информации в ИИС, принято называть третичной обработкой радиолокационной информации [20, 22].

Главная задача третичной обработки радиолокационной информации в ИИС является обеспечение высокой точности определения координат и достоверности маневрирующих ВС в зоне ответственности системы ИИС УВД.

Основные этапы третичной обработки радиолокационной информации в ИИС УВД:

- 1) сбор радиолокационной информации после вторичной обработки информации от наземных РЛС;
- 2) приведение полученной радиолокационной информации к единой системе координат и единому времени отсчета;
- 3) отождествление отметок;
- 4) укрупнение отметок, полученных по результатам третичной обработки информации.

Зоны обзора наземных РЛС системы ИИС перекрываются, поэтому РЛС обнаруживают и следят за ВС одновременно. В идеальных условиях отметки от нескольких РЛИ, которые поступают на устройства отображения радиолокационной информации командного диспетчерского пункта УВД должны совпадать. В реальных условиях обеспечить точное совпадение отметок на устройствах отображения от нескольких РЛС затруднено.

Задача сбора радиолокационной информации после вторичной обработки информации от наземных РЛС заключается в объединении оценки фазовых координат ВС от нескольких РЛС для формирования единой трассовой картины воздушной обстановки.

Фазовые координаты маневрирующих ВС измеряются в системе координат относительно наземных РЛС, поэтому при передаче данных диспетчеру системой ИИС необходимо произвести пересчет координат к точке расположения диспетчерского пункта ИИС. В качестве единой системы координат может использоваться геодезическая, прямоугольная (декартова) либо полярная. Чаще всего в системах УВД используются полярная либо прямоугольная (декартова) системы координат.

Приведение полученной радиолокационной информации к единой временной линии включает синхронизацию времени между несколькими РЛС (приведение к единому отсчету времени) и приведение координат к единой системе, чтобы корректно объединять метки ВС, отслеживать их движение, устранять расхождения и формировать целостную картину воздушной обстановки, что важно для точного сопровождения ВС в зоне аэродрома.

Отождествление (корреляция или слияние) отметок ВС – это процесс определения принадлежности отметок от ВС, полученные от нескольких РЛС, одному и тому же объекту.

Отождествление отметок целей происходит в два этапа: грубого отождествления и точного отождествления.

Грубое отождествление отметок – это приближенная оценка, которая позволяет сузить круг возможных совпадений для последующего, более точного анализа. «Грубым» оно называется из-за использования широких допусков или упрощенных моделей, что может приводить к ошибкам, но позволяет существенно ускорить процесс обработки данных. Обычно грубое отождествление отметок представляет собой попарное сравнение координатных и скоростных составляющих отметок ВС от нескольких РЛС.

Точное отождествление – это процесс установления полной идентичности (тождества) ВС, что две или более отметок от ВС не имеют различий. Для этого используются алгоритмы фильтрации, методы статистической оценки параметров отраженных сигналов от ВС (несущая частота, длительность импульса, период повторения импульса) для предсказания и уточнения положения ВС, выбора правильной отметки для продления траектории.

После отождествления радиолокационная информация о ВС представляется в виде набора отметок, сгруппированных в определенной области, полученных от нескольких РЛС.

Для получения одной отметки от ВС с более точными характеристиками его траектории используется набор отметок от ВС, которые усредняют.

Процесс усреднения – это математическое вычисление средних значений координат и параметров ВС (дальность, азимут, угол места, скорость) для уменьшения погрешности отдельных РЛС.

Основные методы усреднения информации от ВС:

1. Математическое усреднение координат предполагает вычисление среднего значения координат ВС на основе данных от всех РЛС. Он относительно прост в реализации, но может быть менее точным при наличии значительных расхождений точностных характеристик различных РЛС. Применение данного метода имеет смысл при одинаковых технических характеристиках источников радиолокационной информации.

2. Весовая обработка информации является более сложной и точной при обработке радиолокационной информации. Весовая обработка информации основана на использовании весовых коэффициентов, которые присваиваются данным от каждой РЛС. Весовые коэффициенты определяются

исходя из точностных характеристик (например, дисперсии ошибок) каждой конкретной РЛС. Чем выше точность оценки фазовых координат ВС, тем больший вес имеют его данные при формировании обобщенной информации.

3. Инверсная нейросетевая координатная аппроксимация – это современный, более сложный метод, который может использоваться для повышения точности и эффективности усреднения фазовых координат ВС в сложных условиях.

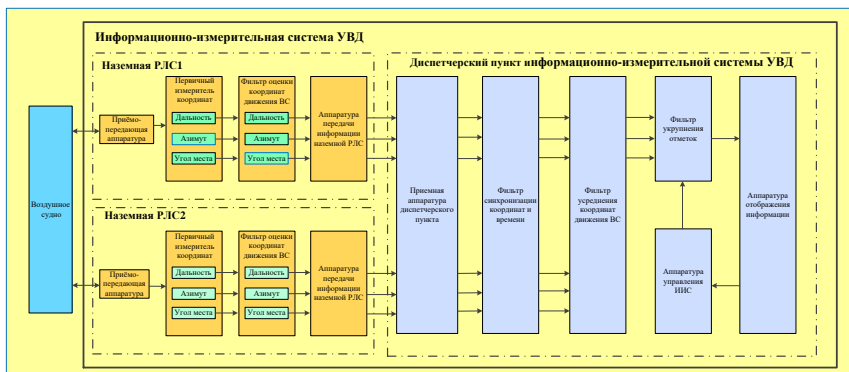
Третичная обработка информации ИИС выполняет задачи для получения информации о фазовых координатах ВС, которая необходима диспетчеру для УВД. ИИС УВД включает в себя от двух и более наземных РЛС, в которых происходит первичная и вторичная обработка информации. После вторичной обработки информации отфильтрованные сигналы о параметрах движения ВС поступают в диспетчерский пункт, где происходит третичная обработка информации. Влияние на точность определения параметров движения ВС оказывает пространственное разнесение наземных РЛС одного назначения [22]. Поскольку производные изменений фазовых координат маневрирования ВС в процессе оценки будут различными для каждой из разнесенных наземных РЛС, усреднение координат маневрирования от пространственно-разнесенных РЛС даст более точный результат, чем в случае их пространственного совмещения.

**ИИС третичной обработки информации с математическим усреднением координат ВС.** В ИИС с математическим усреднением координат ВС оценка координат движения в диспетчерском пункте системы производится нахождением среднего арифметического значения информации, полученной от каждой из двух РЛС, согласно выражению

$$X_{\text{ТОИ}m}(k) = \frac{X_{1m}(k) + X_{2m}(k)}{2}, \quad (4.1)$$

где  $X_{\text{ТОИ}m}(k)$  – значение фазовой  $m$ -координаты движения ВС, полученное в результате третичной обработки информации в момент времени  $k$ ;  $X_{1m}(k)$ ,  $X_{2m}(k)$  – значения фазовой  $m$ -координаты движения ВС, полученные в результате вторичной обработки информации в наземных РЛС1 и РЛС2 соответственно в момент времени  $k$ .

Достоинством ИИС с применением третичной обработки радиолокационной информации, в которых оценка параметров маневрирования ВС производится методом математического усреднения, является простота реализации, поскольку не требуются никакие дополнительные сведения о точности и погрешностях измерений наземных РЛС системы. Однако точность оценки фазовых координат движения ВС при использовании данного метода не способна обеспечить безопасное движение ВС, поскольку при использовании метода математического усреднения не учитываются априорные и апостериорные точностные характеристики РЛС, входящих в состав ИИС, а также параметры маневрирования ВС.



**Рис. 4.1. Функциональная схема ИИС с третичной обработкой радиолокационной информации методом математического усреднения**

Функциональная схема ИИС УВД с применением третичной обработки информации, основанной на методе математического усреднения, представлена на рис. 4.1.

В наземных РЛС1 и РЛС2 производится первичная, затем вторичная обработка информации, результаты которой поступают в диспетчерский пункт системы, где в ЭВМ диспетчерского пункта сначала синхронизируются координаты и время в соответствующем фильтре. Затем в фильтре усреднения производится усреднение параметров движения ВС согласно выражению (4.1). Далее усредненная радиолокационная информация поступает в фильтр оценки количества отметок, где проверяется количество отметок, полученных после усреднения. В случае, если число их превышает допустимые нормы работы ИИС, третичная обработка радиолокационной информации подвергается укрупнению [20, 22, 33].

### **ИИС третичной обработки информации с весовой обработкой информации координат ВС**

Более точными, но сложными в реализации третичной обработки информации являются методы весовой обработки информации, где оценка проводится согласно выражению

$$X_{ТОИм}(k) = b_1(k)X_1(k) + b_2(k)X_2(k), \quad (4.2)$$

где  $b_1(k)$ ,  $b_2(k)$  – значения весовых коэффициентов фазовых для координат движения ВС, поступающих от РЛС1 и РЛС2 соответственно [32].

Для метода математического усреднения координат ВС (4.1) весовые коэффициенты равны  $b_1 = b_2 = 0,5$ .

Весовые коэффициенты, используемые в существующих ИИС УВД для третичной обработки информации, являются априорными, зависят от дисперсии фазовых координат РЛС и не изменяются в процессе маневрирования ВС:

$$X_{\text{ТОИм}}(k) = \frac{\sigma_2^2 X_1(k) + \sigma_1^2 X_2(k)}{\sigma_2^2 + \sigma_1^2}, \quad (4.3)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  – априорные значения среднеквадратических ошибок фазовых координат маневрирования ВС, не изменяющиеся в процессе маневрирования ВС.

Из выражения (4.3) следует, что весовые коэффициенты определяются для оценки фазовых координат РЛС1 и РЛС2 соответственно:

$$b_1 = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}; \quad b_2 = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}. \quad (4.4)$$

Для метода весовых коэффициентов третичной обработки информации (4.1) сумма весовых коэффициентов РЛС1 и РЛС2 равна

$$b_1 + b_2 = 1.$$

Функциональная схема ИИС УВД с применением метода априорной весовой обработки при оценке фазовых координат представлена на рис. 4.2.

Отличием от структуры ИИС с третичной обработкой радиолокационной информации методом математического усреднения (рис. 4.1) является наличие фильтра оценки координат движения в аппаратуре диспетчерского пункта (рис. 4.2), где учитываются априорные точностные характеристики РЛС1 и РЛС2 (4.2, 4.3).

Современные ИИС УВД должны обеспечивать улучшенные точностные характеристики по оценке фазовых координат ВС.

Для улучшения точностных характеристик ИИС УВД по оценке фазовых координат ВС необходимо использовать апостериорную информацию измерителей фазовых координат РЛС1 и РЛС2 для расчета динамических весовых коэффициентов при третичной обработке информации. Такой информацией могут служить невязки РЛС1 и РЛС2, которые зависят от пространственного положения ВС относительно каждой РЛС.

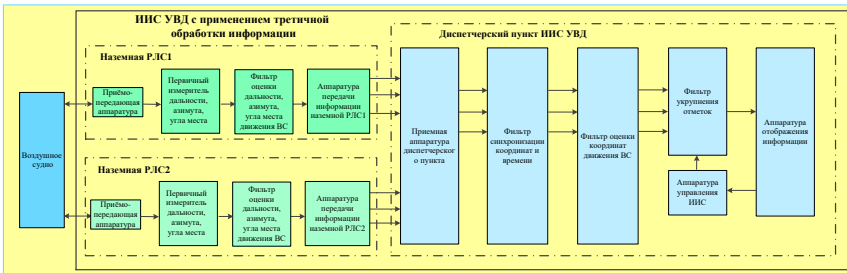


Рис. 4.2. Функциональная схема ИИС с применением весовой третичной обработки радиолокационной информации

На рисунке 4.3 приведена функциональная схема дальномерного канала ИИС УВД, где производится расчет динамических весовых коэффициентов при третичной обработке информации. Наземные РЛС1 и РЛС2 идентичны.

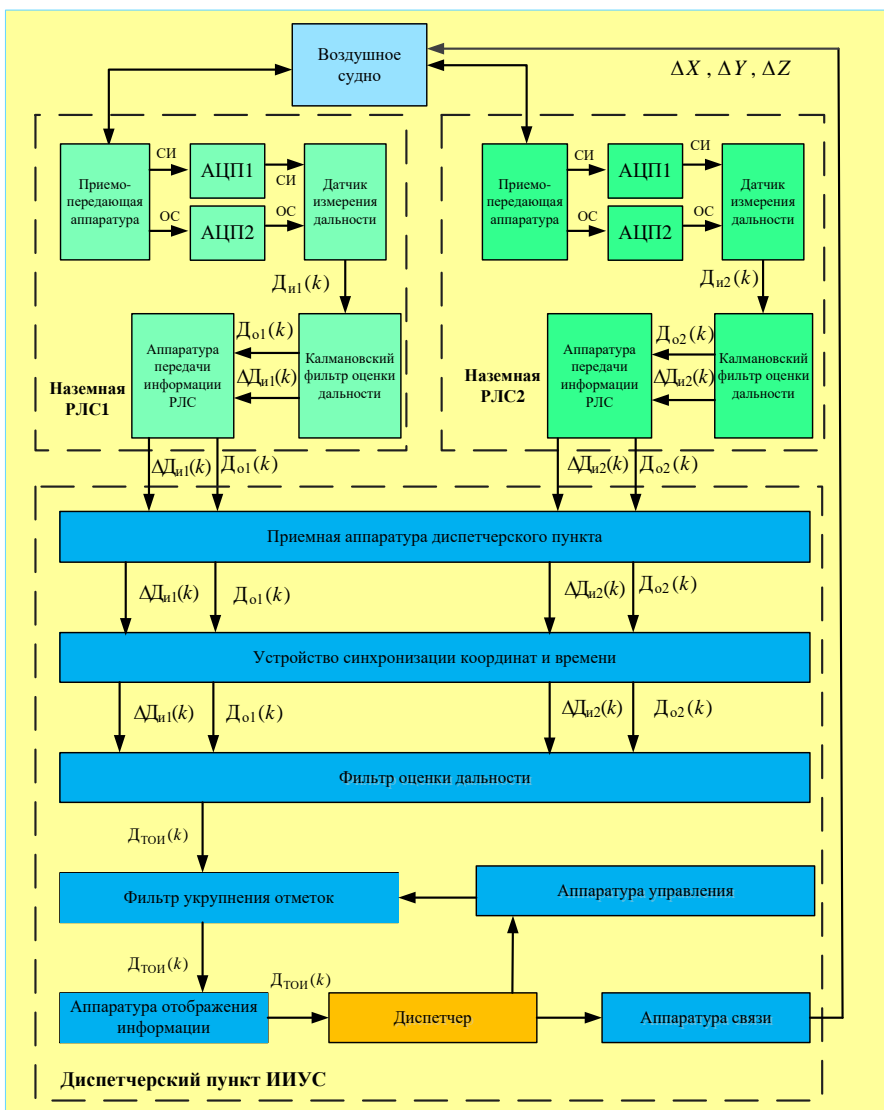


Рис. 4.3. Функциональная схема ИИС с применением динамической весовой третичной обработки радиолокационной информации

Каждая РЛС состоит из приемо-передающей аппаратуры, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) дальности, датчика измерения дальности, калмановского фильтра оценки дальности и аппаратуры передачи информации РЛС. Приемо-передающая аппаратура формирует зондирующий сигнал, который излучается в пространство в сторону ВС. Отраженный сигнал (ОС) от ВС поступает на вход приемо-передающей аппаратуры, где происходит его обнаружение. Отраженный сигнал и синхронизирующий импульс (СИ) с выхода приемо-передающей аппаратуры поступают на АЦП для преобразования аналоговых сигналов в цифровые. Затем цифровые сигналы ОС и СИ поступают на датчик измерения дальности, который регистрирует значение дальности до ВС методом измерения задержки по времени ОС относительно СИ. С выхода датчика измерения дальности полученное значение  $D_n(k)$  поступает на калмановский фильтр оценки дальности, где осуществляется вторичная обработка  $D_n(k)$ . С выхода калмановского фильтра оценки дальности оцененное значение дальности  $D_o(k)$  и невязка дальности  $\Delta D_n(k)$  поступают в аппаратуру передачи информации РЛС. Аппаратура передачи информации РЛС передает информацию  $D_o(k)$  и  $\Delta D_n(k)$  в приемную аппаратуру диспетчерского пункта.

Диспетчерский пункт ИИС УВД (рис. 4.3) состоит из диспетчера, приемной аппаратуры, устройства синхронизации координат и времени, фильтра усреднения дальности, фильтра укрупнения отметок (дальности), аппаратуры отображения информации, аппаратуры управления ИИС, аппаратуры связи.

Информация о дальности  $D_o(k)$  до ВС и невязке дальности  $\Delta D_n(k)$  с приемной аппаратуры диспетчерского пункта поступает в устройство синхронизации координат и времени, в котором информация от РЛС1 и РЛС2 приводится к единой системе координат и времени.

В фильтре усреднения дальности проводится третичная оценка дальности до ВС с учетом радиолокационной информации от РЛС1 и РЛС2. Третичная оценка дальности  $D_{ТОИ}(k)$  через фильтр укрупнения дальности поступает на аппаратуру отображения информации, где отображается информация о дальности до ВС. Диспетчер использует информацию дальности до ВС для формирования команды об укрупнении радиолокационной информации либо об изменении пространственного положения ВС при потенциальной вероятности конфликтной ситуации. Аппаратура управления диспетчерского пункта системы сигнализирует диспетчеру о пересечении областей обеспечения безопасности маневрирующих ВС по эшелонам (вертикальному, продольному или боковому). При необходимости диспетчер подает команду пилоту ВС о смене эшелона через аппаратуру связи.

Величины изменения горизонтального, бокового и вертикального эшелон обозначены как  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  соответственно [32, 33].

## 4.2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО СУДНА В ИИС С ПРИМЕНЕНИЕМ ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

### 4.2.1. Исследование кинематических характеристик движения ВС при маневрировании в районе аэродрома

Третичная обработка радиолокационной информации производится в диспетчерском пункте ИИС и базируется на результатах вторичной обработки информации, которая передается от наземных РЛС системы в диспетчерский пункт. При вторичной обработке информации в дальномерном канале определяются значения дальности, скорости и ускорения ВС относительно наземной РЛС. Значение дальности  $D_o(k)$  передается в диспетчерский пункт. Также для третичной обработки информации в дальномерном канале ИИС необходимы значения невязок дальности  $\Delta D_{и}(k)$  на каждом шаге, которые передаются от РЛС.

При маневрировании ВС вектор скорости изменяется во времени. Вектор скорости характеризуется модулем скорости  $V$ , углом наклона траектории  $\theta$  и путевым углом траектории  $\varphi$ .

Траектория пространственного маневрирования ВС описывается динамическими и кинематическими уравнениями [12]:

$$\frac{dV}{dt} = g(n_x \cos \beta + n_z \sin \beta - \sin \theta); \quad (4.5)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{g}{V}(n_y \cos \gamma + n_x \sin \beta \sin \gamma - n_z \cos \beta \sin \gamma - \cos \theta); \quad (4.6)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{g}{V}(n_y \sin \gamma + n_x \sin \beta \cos \gamma - n_z \cos \beta \cos \gamma); \quad (4.7)$$

$$\frac{dX_g}{dt} = V \cos \theta \cos \varphi; \quad (4.8)$$

$$\frac{dY_g}{dt} = V \sin \theta; \quad (4.9)$$

$$\frac{dZ_g}{dt} = -V \cos \theta \sin \varphi; \quad (4.10)$$

где  $dV$  – производная скорости движения ВС;  $g$  – ускорение свободного падения;  $n_x$  – значение продольной перегрузки ВС;  $\beta$  – угол скольжения ВС;  $n_z$  – значение боковой перегрузки ВС;  $d\theta$  – изменение угла наклона траек-

тории ВС;  $n_y$  – значение нормальной перегрузки;  $\gamma$  – угол крена;  $d\varphi$  – производная путевого угла траектории ВС;  $X_g, Y_g, Z_g$  – декартова нормальная система координат.

Перегрузка есть вектор, представляющий собой отношение суммарного вектора всех поверхностных сил, действующих на ВС, к весу ВС

$$\vec{n} = \frac{\vec{P} + \vec{R}}{G}, \quad (4.11)$$

где  $\vec{P}$  – вектор силы тяги;  $\vec{R}$  – вектор полной аэродинамической силы;  $G$  – вес ВС.

Уравнения (4.5) – (4.7) описывают динамику центра масс ВС, уравнения (4.8) – (4.10) – кинематику ВС, в которых  $X_g, Y_g, Z_g$  – координаты движения ВС в нормальной системе координат.

Из уравнений (4.5) – (4.11) видно, что изменение вектора скорости  $(V, \theta, \varphi)$  в каждый данный момент зависит от величины сил, действующих на ВС (подъемная сила, лобовое сопротивление, тяга двигателя, вес летательного аппарата). Этими же факторами определяется и возможность изменения положения центра масс в каждый данный момент.

Используя уравнения (4.5) – (4.10), получим изменение координат ВС (дальности  $D$ , угла места  $\varepsilon_B$ , азимута  $\varepsilon_T$ ) относительно РЛС для маневра ВС «большая коробочка».

Маневр «большая коробочка» относится к горизонтальным маневрам. В процессе движения ВС по траекториям горизонтальных маневров «большая коробочка» угол наклона траектории  $\theta = 0$ , угол скольжения  $\beta = 0$ , значение боковой и продольной перегрузок  $n_z = n_x = 0$ .

В этом случае траектория ВС для маневра «большая коробочка» описывается системой уравнений:

$$\frac{dV}{dt} = g(n_x \cos \beta + n_z \sin \beta - \sin \theta) = 0; \quad (4.12)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{g}{V}(n_y \cos \gamma + n_x \sin \beta \sin \gamma - n_z \cos \beta \sin \gamma - \cos \theta) = 0; \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dt} &= -\frac{g}{V}(n_y \sin \gamma + n_x \sin \beta \cos \gamma - n_z \cos \beta \cos \gamma) = \\ &= \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{g}{V}n_y \sin \gamma; \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\frac{dX_g}{dt} = V \cos \theta \cos \varphi = V \cos \varphi; \quad (4.15)$$

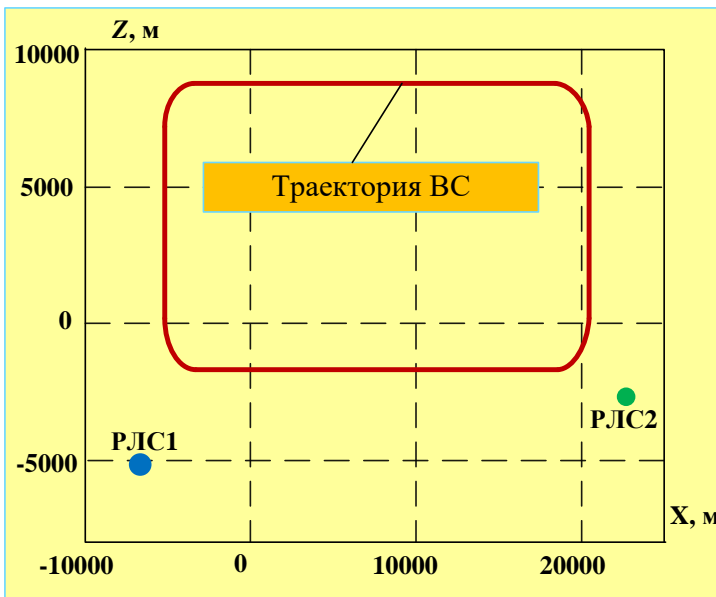
$$\frac{dY_g}{dt} = V \sin \theta = 0; \quad (4.16)$$

$$\frac{dZ_g}{dt} = -V \cos \theta \sin \varphi = -V \sin \varphi. \quad (4.17)$$

Проводилось моделирование маневра «большая коробочка» для следующих условий полета ВС: скорость –  $V = 300$  км/ч, высота полета –  $H = 500$  м, длительность сопровождения ВС с помощью РЛС –  $T_c = 852$  с, период обзора РЛС –  $\tau = 1$  с.

Оценка параметров движения ВС производилась относительно двух пространственно-разнесенных наземных станций РЛС1 и РЛС2. Оценивались такие параметры, как дальность, скорость, ускорение ВС относительно РЛС по линии визирования.

Траектория движения ВС в горизонтальной плоскости в процессе выполнения маневра «большая коробочка» в декартовой системе координат, полученная в результате моделирования, представлена на рис. 4.4, где обозначены траектория движения ВС и расположение наземных РЛС1 и РЛС2 соответственно.



**Рис. 4.4. Траектория движения ВС в горизонтальной плоскости в процессе выполнения маневра «большая коробочка» с учетом расположения наземных РЛС1 и РЛС2**

При моделировании дальность до наземных РЛС определяется геометрическими методами. Поскольку моделирование проводилось на основе горизонтального маневра «большая коробочка», высота ВС при маневрировании не изменялась [22, 34]. К тому же высоты наземных РЛС1 и РЛС2 по условиям моделирования одинаковы, значения дальностей до РЛС1  $D_1(k)$  и РЛС2  $D_2(k)$  определяются как:

$$D_1(k) = \sqrt{X_1^2(k) + Y_1^2(k) + Z_1^2(k)}; \quad (4.18)$$

$$D_2(k) = \sqrt{X_{g2}^2(k) + Y_{g2}^2(k) + Z_{g2}^2(k)}; \quad (4.19)$$

$$X_{g1}(k) = |X_{gBC}(k) - X_{gРЛС1}|; \quad (4.20)$$

$$X_{g2}(k) = |X_{gBC}(k) - X_{gРЛС2}|; \quad (4.21)$$

$$Y_{g1}(k) = |Y_{gBC}(k) - Y_{gРЛС1}|; \quad (4.22)$$

$$Y_{g2}(k) = |Y_{gBC}(k) - Y_{gРЛС2}|; \quad (4.23)$$

$$Z_{g1}(k) = |Z_{gBC}(k) - Z_{gРЛС1}|; \quad (4.24)$$

$$Z_{g2}(k) = |Z_{gBC}(k) - Z_{gРЛС2}|, \quad (4.25)$$

где  $X_{g1}(k)$ ,  $Y_{g1}(k)$ ,  $Z_{g1}(k)$ ,  $X_{g2}(k)$ ,  $Y_{g2}(k)$ ,  $Z_{g2}(k)$  – координаты ВС относительно РЛС1 и РЛС2 в нормальной системе координат соответственно;  $X_{gBC}(k)$ ,  $Y_{gBC}(k)$ ,  $Z_{gBC}(k)$  – координаты ВС в нормальной системе координат соответственно;  $X_{gРЛС1}(k)$ ,  $Y_{gРЛС1}(k)$ ,  $Z_{gРЛС1}(k)$ ,  $X_{gРЛС2}(k)$ ,  $Y_{gРЛС2}(k)$ ,  $Z_{gРЛС2}(k)$  – координаты РЛС1 и РЛС2 в нормальной системе координат соответственно.

Скорости ВС относительно РЛС1 и РЛС2  $V_1(k)$  и  $V_2(k)$  определяются как изменение значений дальностей за время обзора  $\tau$ :

$$V_1(k) = \frac{D_1(k) - D_1(k-1)}{\tau}; \quad (4.26)$$

$$V_2(k) = \frac{D_2(k) - D_2(k-1)}{\tau}. \quad (4.27)$$

Ускорения ВС относительно РЛС1 и РЛС2  $a_1(k)$  и  $a_2(k)$  определяется как изменение скоростей за время обзора  $\tau$ :

$$a_1(k) = \frac{V_1(k) - V_1(k-1)}{\tau}; \quad (4.28)$$

$$a_2(k) = \frac{V_2(k) - V_2(k-1)}{\tau}. \quad (4.29)$$

Проводилось математическое моделирование по изменению дальности, скорости и ускорения относительно двух пространственно-разнесенных наземных радиолокационных станций РЛС1 и РЛС2 во времени по выражениям (4.18) – (4.29). Результаты моделирования для РЛС1 и РЛС2 представлены на рис. 4.5 – 4.7.

Результаты моделирования параметров изменения дальности, скорости, ускорения ВС относительно наземных РЛС1 и РЛС2, представленных на рис. 4.5 – 4.7, позволяют сделать вывод о различном нелинейном характере в изменениях фазовых координат маневрирования ВС относительно наземных РЛС.

На временных отрезках (рис. 4.7) в точках 350...380 с, 700...710 с и 790...820 с имеют место большие производные (нелинейности) при изменении дальности до РЛС1.

На временных отрезках (рис. 4.7) в точках 280...320 с, 390...410 с, а также 690...720 с имеют место большие производные при изменении дальности до РЛС2.

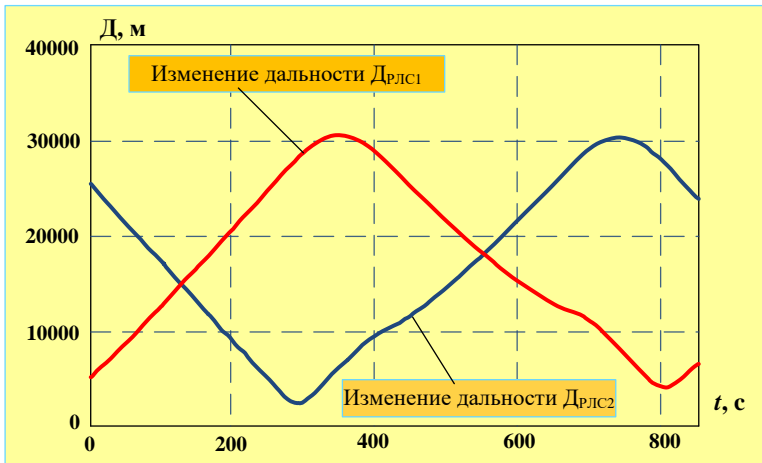


Рис. 4.5. Графики изменения дальности до ВС от РЛС1 и РЛС2 в процессе выполнения маневра «большая коробочка»

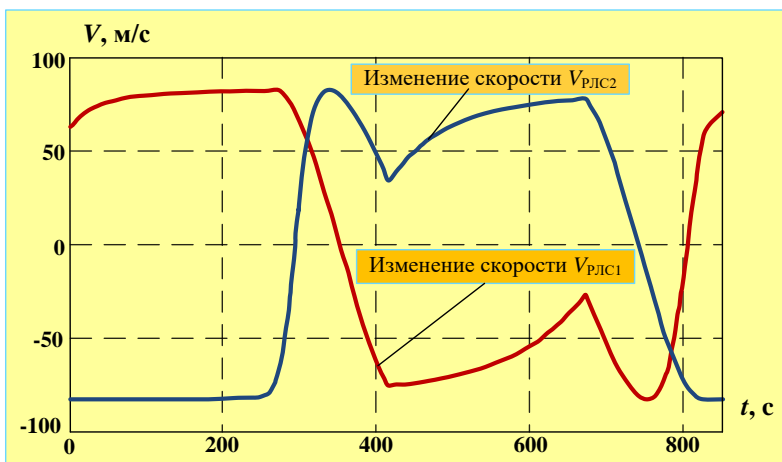


Рис. 4.6. Графики изменения скорости ВС от РЛС1 и РЛС2 в процессе выполнения маневра «большая коробочка»

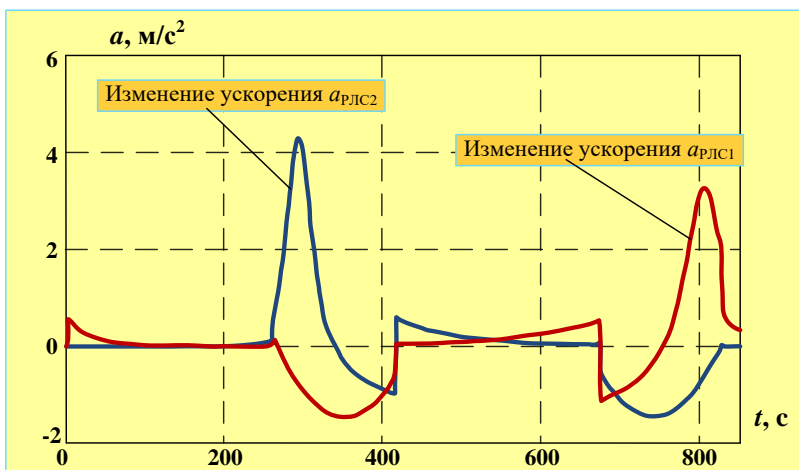


Рис. 4.7. Графики изменения ускорения ВС от РЛС1 и РЛС2 в процессе выполнения маневра «большая коробочка»

Увеличение производных скорости и ускорения относительно РЛС1 можно увидеть на временных отрезках (рис. 4.7, 4.8) в точках 350...380 с, 700...710 с и 790...820 с.

Увеличение производных скорости и ускорения относительно РЛС2 происходит на временных отрезках (рис. 4.7, 4.8) 280...320 с, 390...410 с, а также 690...720 с.

Анализ результатов моделирования движения ВС по траектории маневра «большая коробочка» относительно пространственно-разнесенных наземных РЛС1 и РЛС2 показывает, что параметры движения ВС, такие как дальность, скорость, ускорение, относительно РЛС изменяются по нелинейному закону. Причем нелинейный характер изменения параметров движения ВС относительно наземных РЛС1 и РЛС2 различный. Это связано с тем, что РЛС1 и РЛС2 размещены относительно траектории ВС при маневре «большая коробочка» в различных местах аэродрома, поэтому нелинейный характер изменения дальности, скорости и ускорения ВС относительно РЛС1 и РЛС2 различный.

Эту особенность различного нелинейного характера изменения дальности, скорости и ускорения ВС относительно РЛС1 и РЛС2 можно использовать в ИИС УВД с третичной обработкой информации, где используют динамические весовые коэффициенты, которые зависят от точности оценки фазовых координат в калмановской фильтрации.

#### **4.2.2. Обоснование и выбор модели движения ВС относительно РЛС1 и РЛС2, применяемой в ИИС**

Третичная обработка радиолокационной информации производится в диспетчерском пункте ИИС. Исходными данными является информация от наземных РЛС, поступающая после вторичной обработки радиолокационной информации. Поэтому точность определения параметров движения при вторичной обработке информации непосредственно влияет на точность оценки координат движения ВС при третичной обработке радиолокационной информации.

Модели состояния и наблюдения должны адекватно отражать физические процессы изменения траектории ВС для обеспечения требуемой точности фильтрации параметров движения ВС при вторичной обработке информации, обеспечение наблюдаемости и устойчивости работы калмановских фильтров.

*Обоснование и выбор метода оценки параметров движения ВС при третичной обработке радиолокационной информации.* Поскольку существующие методы третичной обработки информации в ИИС (ИИС третичной обработки информации с математическим усреднением координат ВС и ИИС третичной обработки информации с априорной весовой обработкой информации координат ВС) не способны обеспечить требуемую точность оценки радиолокационной информации, рассмотрим метод весовой оценки параметров движения ВС в ИИС с третичной обработкой информации, применяющий апостериорные параметры движения ВС. Таким параметром является невязка дальности в дальномерном канале, которая представляет собой разность между измеренным значением дальности до ВС в процессе маневрирования и экстраполированным значением дальности до ВС в фиксированный момент времени.

За счет изменения невязки дальности в процессе маневрирования ВС весовые коэффициенты также будут изменяться. Изменения невязки дальности можно использовать для вычисления апостериорных весовых коэффициентов. Это позволяет динамически корректировать весовой коэффициент каждой отдельной оценки дальности от РЛС1 и РЛС2 исходя из значения ее невязки. Чем меньше невязка, тем больше весовой коэффициент в оценке дальности, и наоборот. В результате повышается точность оценки дальности и параметров движения в условиях маневра.

Использование изменения невязки для вычисления апостериорных весовых коэффициентов в третичной обработке информации основано на способе оптимальной фильтрации в системах со случайной структурой.

Согласно способу оптимальной фильтрации в системах со случайной структурой оптимальная по критерию минимума среднеквадратической погрешности оценка параметра движения ВС  $X^j_{k|k}$  будет иметь вид

$$\begin{aligned}
 X^j_{k|k} &= \sum_{i=1}^M W_k(\Theta_{k-1} = i) x^{ij}_{k|k} = \\
 &= \frac{\sum_{i=1}^M \sqrt{\frac{1}{2\pi V^{ij}_k}} \sum_{i=1}^M \exp\left\{-\frac{v_k^{(i)^2}}{2v^{ij}_k}\right\} W_{k-1}(\Theta_{k-1} = i) x^{ij}_{k|k}}{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^M \sqrt{\frac{1}{2\pi V^{ij}_k}} \exp\left\{-\frac{v_k^{(i)^2}}{2v^{ij}_k}\right\} W_{k-1}(\Theta_{k-1} = i)}, \quad (4.30)
 \end{aligned}$$

где  $W_k(\Theta_k = i)$  – значение апостериорных вероятностей номеров структур системы;  $x^{ij}_{k|k}$  – значение параметра движения ВС состояния  $i, j = \overline{1, M}$  условной марковской цепи;  $V^{ij}_k$  – значение дисперсии невязки системы;  $v_k^{(i)}$  – значение невязки системы.

Исходя из выражения (4.30) апостериорные вероятности номеров структур  $W_k(\Theta_k = i)$  имеют вид

$$\begin{aligned}
 W_k(\Theta_k = i) &= \frac{\sum_{i=1}^M \sqrt{\frac{1}{2\pi V^{ij}_k}} \sum_{i=1}^M \exp\left\{-\frac{v_k^{(i)^2}}{2v^{ij}_k}\right\} W_{k-1}(\Theta_{k-1} = i)}{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^M \sqrt{\frac{1}{2\pi V^{ij}_k}} \exp\left\{-\frac{v_k^{(i)^2}}{2v^{ij}_k}\right\} W_{k-1}(\Theta_{k-1} = i)}. \quad (4.31)
 \end{aligned}$$

Известен алгоритм сопровождения ВС по скорости с использованием модели со случайной структурой, описанной в работе [20]. Данный алгоритм

основан на использовании двух моделей состояния движения ВС. По условию рассматриваемого алгоритма искомый параметр движения  $\hat{x}_k$  определяется как

$$\hat{x}_k = \frac{\sum_{j=1}^2 W_k^{(j)} x_k^{(j)}}{\sum_{i=1}^2 \tau(j) \frac{1}{\sqrt{2\pi A_k^{(i)}}} \exp\left\{-\frac{(v_k^{(i)})^2}{2A_k^{(i)}}\right\} W_{k-1}^{(i)}}, \quad (4.32)$$

где  $W_k^{(j)}$  – апостериорные значения вероятностей номеров структур системы, представляющие собой веса частных оценок;  $x_k^{(j)}$  – значение частных оценок фазовых координат маневрирования ВС;  $i, j=1, 2$  – некоторые условия, определяемые использованием двух моделей;  $\tau(j)$  – интервал времени, определяющий использование той или иной модели движения ВС;  $A_k^{(i)}$  – значение дисперсии невязки системы;  $v_k^{(i)}$  – значение невязки системы.

Исходя из выражения (4.32), апостериорные вероятности номеров структур  $W_k(\Theta_k = i)$  имеют вид

$$W_k^{(j)} = \frac{\sum_{i=1}^2 \tau(j) \frac{1}{\sqrt{2\pi A_k^{(i)}}} \exp\left\{-\frac{(v_k^{(i)})^2}{2A_k^{(i)}}\right\} W_{k-1}^{(i)}}{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^M \tau(j) \frac{1}{\sqrt{2\pi A_k^{(i)}}} \exp\left\{-\frac{(v_k^{(i)})^2}{2A_k^{(i)}}\right\} W_{k-1}^{(i)}}. \quad (4.33)$$

Рассмотрим возможность применения способа оптимальной фильтрации со случайной структурой в третичной обработке информации для определения весовых коэффициентов.

По условиям моделирования для ИИС с применением третичной обработки радиолокационной информации используются одинаковые тактико-технические характеристики РЛС1 и РЛС2. Отсюда следует, что интервал времени  $\tau(j)$ , определяющий использование той или иной модели движения ВС (в РЛС1 и РЛС2 используется только одна модель состояния), не требуется при определении весовых коэффициентов в третичной обработке информации. В РЛС1 и РЛС2 используется только одна модель состояния с применением третичной обработки информации, поэтому система третичной обработки информации использует только два основных состояния, следовательно  $i = 1, 2$ .

На основании выражений (4.30) – (4.33) оценка дальности от двух наземных РЛС методом третичной обработки информации с использованием апостериорных параметров движения ВС (невязки) будет иметь вид

$$D_{\text{ТОИ}}(k) = b_1(k)D_1(k) + b_2(k)D_2(k); \quad (4.34)$$

$$\begin{aligned} D_{\text{ТОИ}}(k) &= \frac{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_1}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_1(k))^2}{2D_1}\right\} (1-b_1(k-1)) D_{o1}(k)}{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_1}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_1(k))^2}{2D_1}\right\} (1-b_1(k-1)) + \sqrt{\frac{1}{2\pi D_2}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_2(k))^2}{2D_2}\right\} (1-b_2(k-1))} = \\ &= \frac{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_2}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_2(k))^2}{2D_2}\right\} (1-b_2(k-1)) D_{o2}(k)}{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_1}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_1(k))^2}{2D_1}\right\} (1-b_1(k-1)) + \sqrt{\frac{1}{2\pi D_2}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_2(k))^2}{2D_2}\right\} (1-b_2(k-1))}. \end{aligned} \quad (4.35)$$

Значения весовых коэффициентов для оценки дальности до маневрирующего ВС будут иметь вид:

$$b_1(k) = \frac{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_1}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_1(k))^2}{2D_1}\right\} (1-b_1(k-1))}{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_1}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_1(k))^2}{2D_1}\right\} (1-b_1(k-1)) + \sqrt{\frac{1}{2\pi D_2}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_2(k))^2}{2D_2}\right\} (1-b_2(k-1))}; \quad (4.36)$$

$$b_2(k) = \frac{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_2}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_2(k))^2}{2D_2}\right\} (1-b_2(k-1))}{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_1}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_1(k))^2}{2D_1}\right\} (1-b_1(k-1)) + \sqrt{\frac{1}{2\pi D_2}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_2(k))^2}{2D_2}\right\} (1-b_2(k-1))}. \quad (4.37)$$

$$\Delta D_1(k) = D_{\text{н1}}(k) - D_{\text{н1}}(k); \quad (4.38)$$

$$\Delta D_2(k) = D_{\text{н2}}(k) - D_{\text{н2}}(k); \quad (4.39)$$

$$D_{\text{н1}}(k) = D_1(k) + \xi_{\text{дн1}}(k); \quad (4.40)$$

$$D_{\text{н2}}(k) = D_2(k) + \xi_{\text{дн2}}(k), \quad (4.41)$$

где  $D_1$  и  $D_2$  – дисперсии невязки по дальности для наземных РЛС1 и РЛС2 соответственно;  $\Delta D_1(k)$  и  $\Delta D_2(k)$  – значения невязок дальности для назем-

ных РЛС1 и РЛС2 соответственно;  $D_1(k)$  и  $D_2(k)$  – истинные (действительные) значения дальности до наземных РЛС1 и РЛС2 соответственно;  $D_{н1}(k)$  и  $D_{н2}(k)$  – измеренные значения дальности до наземных РЛС1 и РЛС2 соответственно;  $D_{о1}(k)$  и  $D_{о2}(k)$  – оцененные значения дальности;  $D_{э1}(k)$ ,  $D_{э2}(k)$  – экстраполированные значения дальности;  $\xi_{дн1}(k)$  и  $\xi_{дн2}(k)$  – значения шумов измерения дальности для наземных РЛС1 и РЛС2 соответственно.

Таким образом, на основе метода оптимальной фильтрации в системах со случайной структурой вычисляются динамические (апостериорные) весовые коэффициенты, которые зависят от значений невязки на каждом шаге измерения ИИС.

Достоинством представленного метода весовой обработки с динамическими весовыми коэффициентами является повышенная точность оценки дальности по сравнению с методами третичной обработки информации с априорными (статическими) весовыми коэффициентами за счет вычисления весовых коэффициентов невязок дальности, которые изменяются на каждом шаге калмановской фильтрации при маневрировании ВС.

#### **4.2.3. Обоснование и выбор модели состояния при определении координат движения ВС при вторичной обработке радиолокационной информации**

При выборе модели состояния ВС, которая используется при вторичной обработке радиолокационной информации в наземных РЛС, следует учитывать, что используемая модель должна обладать достаточной простотой, чтобы повысить быстродействие системы за счет уменьшения времени обработки и фильтрации обрабатываемых данных, но в то же время обладать достаточной сложностью, чтобы адекватно описывать реальную траекторию маневрирования ВС относительно РЛС и обеспечивать требуемую точность для решения поставленных задач оценки фазовых координат маневрирования ВС.

Для простого случая на основе гипотезы изменения фазовых координат ВС с постоянной скоростью для оценивания дальности  $D(k)$  и скорости  $V(k)$  модель состояния и наблюдения дальномерного канала имеет вид

$$\left. \begin{aligned} D(k) &= D(k-1) + V(k-1)\tau; \\ V(k) &= V(k-1); \end{aligned} \right\} \quad (4.42)$$

$$D_{н}(k) = D(k) + \xi_{дн}(k). \quad (4.43)$$

Алгоритм фильтрации для оценивания дальности и скорости на основании модели состояния (4.42), модели наблюдения (4.43) будет осуществлять калмановскую фильтрацию по оценке дальности и скорости при маневриро-

вании ВС «большая коробочка» с большими погрешностями. Это связано с тем, что модель состояния (4.42) неадекватно описывает динамику движения ВС относительно РЛС1 и РЛС2 на всех участках траектории «большая коробочка» (рис. 4.6). На рисунке 4.6 показаны графики изменения скорости ВС относительно РЛС1 и РЛС2, которые на всех участках траектории «большая коробочка» имеют нелинейный характер.

Для случая на основе гипотезы изменения фазовых координат ВС с постоянным ускорением для оценивания дальности  $D(k)$ , скорости  $V(k)$  и ускорения  $a(k)$  модель состояния и наблюдения дальномерного канала имеет вид

$$\begin{aligned} D(k) &= D(k-1) + V(k-1)\tau + 0,5a(k-1)\tau^2; \\ V(k) &= V(k-1) + a(k-1)\tau; \\ a(k) &= a(k-1); \end{aligned} \tag{4.44}$$

$$D_n(k) = D(k) + \xi_{D_n}(k). \tag{4.45}$$

Алгоритм фильтрации для оценивания дальности, скорости и ускорения на основании модели состояния (4.44), модели наблюдения (4.45) будет осуществлять калмановскую фильтрацию по оценке дальности, скорости и ускорения при маневрировании ВС «большая коробочка» с большими погрешностями. Это связано с тем, что модель состояния (4.44) неадекватно описывает динамику движения ВС относительно РЛС1 и РЛС2 практически на всех участках траектории «большая коробочка» (рис. 4.7). На рисунке 4.7 показаны графики изменения ускорения ВС относительно РЛС1 и РЛС2, которые только на временных отрезках в точках 50...220 с и 420...650 с близки к линейной функции, на остальных участках траектории «большая коробочка» ускорение изменяется по линейному закону.

Использование модели состояния для дальномерного канала ИИС с нелинейным изменением ускорения способно дать более точные результаты оценки фазовых координат ВС ввиду приближенности к реальному движению ВС относительно РЛС. Одной из таких моделей является модель состояния ВС третьего порядка, особенностью которой является моделирование ускорения с помощью стационарного процесса и применительной к ансамблю всех возможных траекторий [13, 20]. Трехмерная модель состояния и наблюдения дальномерного канала имеет вид

$$\left. \begin{aligned} D(k) &= D(k-1) + V(k-1)\tau + 0,5a(k-1)\tau^2; \\ V(k) &= V(k-1) + a(k-1)\tau; \\ a(k) &= (1 - \alpha_a\tau)a(k-1) + \xi_a(k-1), \end{aligned} \right\} \tag{4.46}$$

$$D_{\text{н}}(k) = D(k) + \xi_{\text{дн}}(k), \quad (4.47)$$

где  $\alpha_{\text{ф}}$  – постоянная времени маневра;  $\xi_{\text{дн}}$  – центрированный гауссовский шум с известной дисперсией.

Так как в модели (4.46) ускорение задается с учетом ансамбля всех возможных траекторий, то формируемый фильтр оптимален по отношению к ансамблю траекторий и неоптимален по отношению к одиночной траектории. Исследования показали, что трехмерная модель состояния и наблюдения дальномерного канала имеет приемлемые оценки по дальности, скорости, ускорению, если ВС движется равноускоренно.

Усовершенствованные принципы ИИС УВД требуют описания модели ускорения ВС относительно РЛС с учетом изменения вектора скорости ВС, детальной оценки текущего ускорения ВС. Для этого необходимо знать информацию о кинематических параметрах ВС (скорость  $V_{\text{ц}}$ , угол наклона  $\theta$ , путевой угол  $\varphi$ ).

Модель ускорения ВС по линии визирования относительно РЛС имеет вид

$$a_{\text{цв}} = V_{\text{ц}} (\cos\theta \sin \varepsilon_{\text{в}} (\omega_{\theta} - \omega_{\text{в}} \cos(\varphi - \varepsilon_{\text{г}})) + \sin\theta \cos \varepsilon_{\text{в}} (\omega_{\text{в}} - \omega_{\theta} \cos(\varphi - \varepsilon_{\text{г}})) + \cos\theta \cos \varepsilon_{\text{в}} \sin(\varphi - \varepsilon_{\text{г}}) (\omega_{\text{г}} - \omega_{\varphi})), \quad (4.48)$$

где ускорение ВС по линии визирования зависит от модуля скорости цели;  $\omega_{\varphi}$  – угловая скорость путевого угла;  $\omega_{\theta}$  – угловая скорость угла наклона;  $\varepsilon_{\text{в}}$  и  $\varepsilon_{\text{г}}$  – углы линии визирования в вертикальной и горизонтальной плоскостях;  $\omega_{\text{в}}$  и  $\omega_{\text{г}}$  – скорости линий визирования в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Учет кинематических характеристик движения ВС значительно повышает точность оценки фазовых координат траектории ВС, поскольку ускорение  $a(k+1)$  достаточно точно описывает изменение движения ВС по линии визирования РЛС.

Однако для реализации калмановской фильтрации в дальномерном канале с учетом кинематических характеристик движения ВС требуется отдельный канал связи между ВС и ИИС УВД для передачи измерительной информации скорости  $V_{\text{цн}}$ , угла наклона  $\theta_{\text{цн}}$  и путевого угла  $\varphi_{\text{цн}}$  ВС, а также дополнительные фильтры по оценке скорости и ускорения ВС, угла и угловой скорости наклона ВС, путевого угла и угловой скорости ВС, угла и скорости линии визирования в вертикальной плоскости, угла и скорости линии визирования в горизонтальной плоскости.

С учетом выражения (4.48) модель состояния дальномерного канала ИИС с учетом кинематических параметров ВС для оценки дальности  $D$ , скорости сближения  $V$  и ускорения  $a$  имеет вид

$$\left.
\begin{aligned}
D(k+1) &= D(k) + V(k)T + 0,5a(k)\tau^2; \\
V(k+1) &= V(k) + a(k)\tau; \\
a(k+1) &= V_{\Pi}(k)(\sin \varepsilon_B(k) \cos \theta(k)(\omega_{\theta}(k) - \omega_B(k) \cos(\varphi(k) - \varepsilon_r(k))) + \\
&\quad + \sin \theta(k) \cos \varepsilon_B(k)(\omega_B(k) - \omega_{\theta}(k) \cos(\varphi(k) - \varepsilon_r(k))) + \\
&\quad + \cos \varepsilon_B(k) \cos \theta(k) \sin(\varphi(k) - \varepsilon_r(k))(\omega_r(k) - \omega_{\varphi}(k)) + \xi_a(k); \\
V_{\Pi}(k+1) &= V_{\Pi}(k) + a_{\Pi}(k)\tau; \\
a_{\Pi}(k+1) &= (1 - \alpha_{\phi 1})a_{\Pi}(k) + \xi_{a_{\Pi}}(k) \\
\theta(k+1) &= \theta(k) + \omega_{\theta}(k)\tau; \\
\omega_{\theta}(k+1) &= (1 - \alpha_{\phi 2})\omega_{\theta}(k) + \xi_{\omega_{\theta}}(k); \\
\varphi(k+1) &= \varphi(k) + \omega_{\varphi}(k)\tau; \\
\omega_{\varphi}(k+1) &= (1 - \alpha_{\phi 3})\omega_{\varphi}(k) + \xi_{\omega_{\varphi}}(k); \\
\varepsilon_B(k+1) &= \varepsilon_B(k) + \omega_B(k)\tau; \\
\omega_B(k+1) &= (1 - \alpha_{\phi 4})\omega_B(k) + \xi_{\omega_B}(k); \\
\varepsilon_r(k+1) &= \varepsilon_r(k) + \omega_r(k)\tau; \\
\omega_r(k+1) &= (1 - \alpha_{\phi 5})\omega_r(k) + \xi_{\omega_r}(k).
\end{aligned}
\right\} (4.49)$$

Сложность модели состояния дальномерного канала (4.49) требует больших затрат на обработку информации по сравнению с моделями (4.42), (4.44) и (4.46).

Анализ результатов моделирования для РЛС1 и РЛС2, представленных на рис. 4.5 – 4.7, показывает, что оптимальное размещение на аэродроме РЛС1 и РЛС2 позволит получить большие производные (скорость изменения дальности, скорости и ускорения ВС по линии визирования) на временных отрезках, разнесенные по времени для РЛС1 и РЛС2. На рисунке 4.5 (график изменения дальности до ВС от РЛС1 и РЛС2 в процессе выполнения маневра «большая коробочка») видно, что на временном отрезке в точках 350...380 с и 720...760 с для РЛС1 изменение дальности до ВС дальности до ВС имеет большую производную, а на временном отрезке в точках 350...380 с и 720...760 с для РЛС2 изменение дальности до ВС близко к линейному закону. На временном отрезке в точках 280...320 с и 780...840 с для РЛС2 изменение дальности до ВС дальности до ВС имеет большую производную, а на временном отрезке в точках 280...320 с и 780...840 с для РЛС1 изменение дальности до ВС близко к линейному закону.

Из анализа результатов моделирования для РЛС1 и РЛС2 (рис. 4.5) следует, что для получения большой точности оценки дальности в трегичной обработке информации ИИС целесообразно использовать трехмерную

модель дальномерного канала (4.46), которая по сравнению с моделями (4.42) и (4.44) учитывает в калмановском фильтре нелинейный характер изменения ускорения ВС относительно РЛС.

### 4.3. АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДАЛЬНОМЕРНОГО КАНАЛА ИИС С ПРИМЕНЕНИЕМ ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Для оценки дальности в дальномерном канале ИИС УВД с применением третичной обработки радиолокационной информации до маневрирующего ВС используется информация о дальности до ВС от двух РЛС с известными позициями. РЛС1 и РЛС2 по структуре являются идентичными, где происходит первичная и вторичная обработка радиолокационной информации.

Алгоритмы дальномерного канала ИИС для РЛС1 и РЛС2 с третичной обработкой информации получен исходя из модели состояния (4.46) и наблюдения (4.47), уравнений калмановской фильтрации (2.5) – (2.9) и уравнений (4.34) – (4.38).

Алгоритм дальномерного канала РЛС1:

$$D_{o1}(k) = D_{\phi1}(k) + K_{\phi11}\Delta D_1(k); \quad (4.50)$$

$$V_{o1}(k) = V_{\phi1}(k) + K_{\phi12}\Delta D_1(k); \quad (4.51)$$

$$a_{o1}(k) = a_{\phi1}(k) + K_{\phi13}\Delta D(k); \quad (4.52)$$

$$D_{\phi1}(k) = D_{o1}(k-1) + V_{o1}(k-1)\tau + a_{o1}(k-1)\frac{\tau^2}{2}; \quad (4.53)$$

$$V_{\phi1}(k) = V_{o1}(k-1) + a_{o1}(k-1)\tau; \quad (4.54)$$

$$a_{\phi1}(k) = (1 - \alpha\tau)a_{o1}(k-1); \quad (4.55)$$

$$D_{\phi1}(k) = D_1(k) + \xi_{D_{\phi1}}(k); \quad (4.56)$$

$$\Delta D_1(k) = D_{\phi1}(k) - D_{o1}(k); \quad (4.57)$$

$$\mathbf{K}_{\phi1}(k) = \begin{bmatrix} K_{\phi1}(k) \\ K_{\phi2}(k) \\ K_{\phi3}(k) \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{\phi1}(k) \mathbf{H}_1^T \left\{ \mathbf{H}_1 \mathbf{P}_{\phi1}(k) \mathbf{H}_1^T + \mathbf{R}_{D_{\phi1}} \right\}^{-1}; \quad (4.58)$$

$$\mathbf{P}_{\phi1}(k) = \begin{bmatrix} P_{\phi11}(k) & P_{\phi12}(k) & P_{\phi13}(k) \\ P_{\phi21}(k) & P_{\phi22}(k) & P_{\phi23}(k) \\ P_{\phi31}(k) & P_{\phi32}(k) & P_{\phi33}(k) \end{bmatrix} = \Phi_1 \mathbf{P}_{o1}(k-1) \Phi_1^T + \mathbf{Q}_{\phi1}; \quad (4.59)$$

$$\mathbf{P}_{o1}(k) = \begin{bmatrix} P_{o11}(k) & P_{o12}(k) & P_{o13}(k) \\ P_{o21}(k) & P_{o22}(k) & P_{o23}(k) \\ P_{o31}(k) & P_{o32}(k) & P_{o33}(k) \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{\phi1}(k) - \mathbf{K}_{\phi1}(k) \mathbf{H} \mathbf{P}_s(k). \quad (4.60)$$

Алгоритм дальномерного канала РЛС2:

$$\mathcal{D}_{o2}(k) = \mathcal{D}_{\phi2}(k) + \mathbf{K}_{\phi21} \Delta \mathcal{D}(k); \quad (4.61)$$

$$V_{o2}(k) = V_{\phi2}(k) + \mathbf{K}_{\phi22} \Delta \mathcal{D}(k); \quad (4.62)$$

$$a_{o2}(k) = a_{\phi2}(k) + \mathbf{K}_{\phi23} \Delta \mathcal{D}(k); \quad (4.63)$$

$$\mathcal{D}_{\phi2}(k) = \mathcal{D}_{o2}(k-1) + V_{o2}(k-1)\tau + a_{o2}(k-1) \frac{\tau^2}{2}; \quad (4.64)$$

$$V_{\phi2}(k) = V_{o2}(k-1) + a_{o2}(k-1)\tau; \quad (4.65)$$

$$a_{\phi2}(k) = (1 - \alpha\tau)a_{o2}(k-1); \quad (4.66)$$

$$\mathcal{D}_{\text{и}2}(k) = \mathcal{D}_2(k) + \xi_{\text{д}\text{и}2}(k); \quad (4.67)$$

$$\Delta \mathcal{D}_2(k) = \mathcal{D}_{\text{и}2}(k) - \mathcal{D}_{\phi2}(k); \quad (4.68)$$

$$\mathbf{K}_{\phi2}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\phi1}(k) \\ \mathbf{K}_{\phi2}(k) \\ \mathbf{K}_{\phi3}(k) \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{\phi2}(k) \mathbf{H}_2^T \left\{ \mathbf{H}_2 \mathbf{P}_{\phi2}(k) \mathbf{H}_2^T + \mathbf{R}_{\text{и}2} \right\}^{-1}; \quad (4.69)$$

$$\mathbf{P}_{\phi2}(k) = \begin{bmatrix} P_{\phi11}(k) & P_{\phi12}(k) & P_{\phi13}(k) \\ P_{\phi21}(k) & P_{\phi22}(k) & P_{\phi23}(k) \\ P_{\phi31}(k) & P_{\phi32}(k) & P_{\phi33}(k) \end{bmatrix} = \mathbf{\Phi}_2 \mathbf{P}_{o2}(k-1) \mathbf{\Phi}_2^T + \mathbf{Q}_{x2}; \quad (4.70)$$

$$\mathbf{P}_{o2}(k) = \begin{bmatrix} P_{o11}(k) & P_{o12}(k) & P_{o13}(k) \\ P_{o21}(k) & P_{o22}(k) & P_{o23}(k) \\ P_{o31}(k) & P_{o32}(k) & P_{o33}(k) \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{\phi2}(k) - \mathbf{K}_{\phi2}(k) \mathbf{H}_2 \mathbf{P}_{\phi2}(k). \quad (4.71)$$

Алгоритм дальномерного канала с третичной обработкой информации ИИС:

$$\mathcal{D}_{\text{ТОИ}}(k) = b_1(k) \mathcal{D}_{o1}(k) + b_2(k) \mathcal{D}_{o2}(k); \quad (4.72)$$

$$b_1(k) = \frac{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_1}} \exp\left\{-\frac{(\Delta \mathcal{D}_1(k))^2}{2D_1}\right\} (1 - b_1(k-1))}{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_1}} \exp\left\{-\frac{(\Delta \mathcal{D}_1(k))^2}{2D_1}\right\} (1 - b_1(k-1)) + \sqrt{\frac{1}{2\pi D_2}} \exp\left\{-\frac{(\Delta \mathcal{D}_2(k))^2}{2D_2}\right\} (1 - b_2(k-1))}; \quad (4.73)$$

$$b_2(k) = \frac{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_2}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_2(k))^2}{2D_2}\right\} (1-b_2(k-1))}{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_1}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_1(k))^2}{2D_1}\right\} (1-b_1(k-1)) + \sqrt{\frac{1}{2\pi D_2}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_2(k))^2}{2D_2}\right\} (1-b_2(k-1))}; \quad (4.74)$$

$$D_1 = \mathbf{H}_1 \mathbf{P}_{\text{э}1} (1) \mathbf{H}_1^T; \quad (4.75)$$

$$D_2 = \mathbf{H}_2 \mathbf{P}_{\text{э}2} (1) \mathbf{H}_2^T; \quad (4.76)$$

$$b_1(0) = b_2(0) = 0,5, \quad (4.77)$$

где  $\mathbf{P}_{\text{э}1}$  и  $\mathbf{P}_{\text{э}2}$  – апостериорные ковариационные матрицы ошибок фильтрации для РЛС1 и РЛС2;  $\mathbf{H}_1$  и  $\mathbf{H}_2$  – матрицы измерений РЛС1 и РЛС2;  $\mathbf{H}_1^T$  и  $\mathbf{H}_2^T$  – транспонированные матрицы измерений РЛС1 и РЛС2;  $D_1$  и  $D_2$  – дисперсии невязок измерений РЛС1 и РЛС2.

$D_1$  и  $D_2$  являются скалярными величинами.

**Порядок действий при реализации алгоритма (4.50) – (4.71):**

1. Вначале вводятся в фильтр1 дальномерного канала РЛС1 и фильтр2 дальномерного канала РЛС2 время дискретизации  $\tau$ , постоянная времени маневра  $\alpha_\phi$ , постоянные элементы матриц и векторов  $\mathbf{H}_1$ ,  $\mathbf{H}_1^T$ ,  $\mathbf{R}_{\text{дн}1}$ ,  $\Phi_1$ ,  $\Phi_1^T$ ,  $\mathbf{Q}_{x1}$ ,  $\mathbf{H}_2$ ,  $\mathbf{H}_2^T$ ,  $\mathbf{R}_{\text{дн}2}$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_2^T$ ,  $\mathbf{Q}_{x2}$ :

$$\mathbf{H}_1 = \mathbf{H}_2 = [1 \quad 0 \quad 0]; \quad \mathbf{H}_1^T = \mathbf{H}_2^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{Q}_{x1} = \mathbf{Q}_{x2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{ax} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_{\text{д}} = \mathbf{R}_{\text{дн}1} = \mathbf{R}_{\text{дн}2}; \quad \Phi_1 = \begin{bmatrix} 1 & \tau & 0,5\tau^2 \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 1 - \alpha_\phi \tau \end{bmatrix};$$

$$\Phi_1^T = \Phi_2^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \tau & 1 & 0 \\ 0,5\tau^2 & \tau & 1 - \alpha_\phi \tau \end{bmatrix}.$$

2. Вводим начальные значения фазовых координат ( $k=0$ )  
 $D_{o1}(0) = D_{s1}(0) = D_{и1}(0)$ ,  $V_{o1}(0) = V_{s1}(0)$ ,  $a_{o1}(0) = a_{s1}(0)$ ,  
 $D_{o2}(0) = D_{s2}(0) = D_{и2}(0)$ ,  $V_{o2}(0) = V_{s2}(0)$ ,  $a_{o2}(0) = a_{s2}(0)$ , элементы матрицы  
 $P_{o1}(0)$  и  $P_{o2}(0)$ :

$$P_{o1}(0) = \begin{bmatrix} P_{o11}(0) & P_{o12}(0) & P_{o13}(0) \\ P_{o21}(0) & P_{o22}(0) & P_{o23}(0) \\ P_{o31}(0) & P_{o32}(0) & P_{o33}(0) \end{bmatrix};$$

$$P_{o2}(0) = \begin{bmatrix} P_{o11}(0) & P_{o12}(0) & P_{o13}(0) \\ P_{o21}(0) & P_{o22}(0) & P_{o23}(0) \\ P_{o31}(0) & P_{o32}(0) & P_{o33}(0) \end{bmatrix}.$$

3. По формулам (4.59) и (4.70) вычисляют на 1-м шаге элементы матриц  
 $P_{s1}(1)$   $P_{s2}(1)$ :

$$P_{s1}(1) = \Phi_1 P_{o1}(k-1) \Phi_1^T + Q_{x1};$$

$$P_{s2}(1) = \Phi_2 P_{o2}(k-1) \Phi_2^T + Q_{x2}.$$

4. По формулам (4.58) и (4.69) вычисляют на 1-м шаге матрицы коэффициентов усиления фильтра  $K_{\phi 1}(1)$  и  $K_{\phi 2}(1)$ :

$$K_{\phi 1}(1) = P_{s1}(k) H_1^T \left\{ H_1 P_{s1}(k) H_1^T + R_{дн1} \right\};$$

$$K_{\phi 2}(1) = P_{s2}(k) H_2^T \left\{ H_2 P_{s2}(k) H_2^T + R_{дн2} \right\}.$$

5. По формулам (4.53) – (4.55) и (4.64) – (4.66) вычисляют на 1-м шаге составляющие вектора прогноза  $D_{s1}(1)$ ,  $V_{s1}(1)$ ,  $a_{s1}(1)$  и  $D_{s2}(1)$ ,  $V_{s2}(1)$ ,  $a_{s2}(1)$ :

$$D_{s1}(1) = D_{o1}(0) + V_{o1}(0)\tau + a_{o1}(0) \frac{\tau^2}{2};$$

$$V_{s1}(1) = V_{o1}(0) + a_{o1}(0)\tau;$$

$$a_{s1}(1) = (1 - \alpha\tau)a_{o1}(0);$$

$$D_{s2}(1) = D_{o2}(0) + V_{o2}(0)\tau + a_{o2}(0) \frac{\tau^2}{2};$$

$$V_{32}(1) = V_{02}(1) + a_{02}(1)\tau;$$

$$a_{32}(1) = (1 - \alpha\tau)a_{02}(1).$$

6. По формулам (4.57) и (4.68) вычисляются на 1-м шаге невязки измерений  $\Delta D_1(1)$  и  $\Delta D_2(1)$ :

$$\Delta D_1(1) = D_{н1}(1) - D_{31}(1); \quad \Delta D_2(1) = D_{н2}(1) - D_{32}(1).$$

7. По формулам (4.50) – (4.52) и (4.61) – (4.63) вычисляются на 1-м шаге составляющие вектора оценки фазовых координат  $D_{01}(1)$ ,  $V_{01}(1)$ ,  $a_{01}(1)$  и  $D_{02}(1)$ ,  $V_{02}(1)$ ,  $a_{02}(1)$ :

$$D_{01}(1) = D_{31}(1) + K_{\phi 11}(1)\Delta D_1(1);$$

$$V_{01}(1) = V_{31}(1) + K_{\phi 21}(1)\Delta D_1(1);$$

$$a_{01}(1) = a_{31}(1) + K_{\phi 31}(1)\Delta D_1(1);$$

$$D_{02}(1) = D_{32}(1) + K_{\phi 12}(1)\Delta D_2(1);$$

$$V_{02}(1) = V_{32}(1) + K_{\phi 22}(1)\Delta D_2(1);$$

$$a_{02}(1) = a_{32}(1) + K_{\phi 32}(1)\Delta D_2(1).$$

8. По формулам (4.60) и (4.71) вычисляются на 1-м шаге матрицы  $P_{01}(1)$  и  $P_{02}(1)$ :

$$P_{01}(1) = P_{31}(1) - K_{\phi 1}(1)H_1P_{31}(1);$$

$$P_{02}(1) = P_{32}(1) - K_{\phi 2}(1)H_2P_{32}(1).$$

Шаг закончен. Далее идут в том же порядке вычисления на следующем шаге  $P_{31}(2)$ ,  $P_{32}(2)$ ,  $K_{\phi 1}(2)$ ,  $K_{\phi 2}(2)$ ,  $D_{31}(1)$ ,  $V_{31}(1)$ ,  $a_{31}(1)$ ,  $D_{32}(1)$ ,  $V_{32}(1)$ ,  $a_{32}(1)$ ,  $\Delta D_1(2)$ ,  $\Delta D_2(2)$ ,  $D_{01}(2)$ ,  $V_{01}(2)$ ,  $a_{01}(2)$ ,  $D_{02}(2)$ ,  $V_{02}(2)$ ,  $a_{02}(2)$ ,  $P_{01}(2)$ ,  $P_{02}(2)$  и т.д.

**Порядок действий при реализации алгоритма дальномерного канала с третичной обработкой информации ИИС (4.72) – (4.77):**

1. Вначале вводятся постоянные элементы матриц измерений  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_1^T$ ,  $H_2^T$ ,  $P_{31}(1)$  и  $P_{32}(1)$  – вычисленные значения элементов апостериорной ковариационной матрицы ошибок фильтрации на 1-м шаге для дальномерного канала РЛС1 и дальномерного канала РЛС2:

$$\mathbf{H}_1 = \mathbf{H}_2 = [1 \ 0 \ 0]; \quad \mathbf{H}_1^T = \mathbf{H}_2^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{P}_{\text{э}1}(1) = \begin{bmatrix} P_{\text{э}11}(1) & P_{\text{э}12}(1) & P_{\text{э}13}(1) \\ P_{\text{э}21}(1) & P_{\text{э}22}(1) & P_{\text{э}23}(1) \\ P_{\text{э}31}(1) & P_{\text{э}32}(1) & P_{\text{э}33}(1) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{P}_{\text{э}2}(1) = \begin{bmatrix} P_{\text{э}11}(1) & P_{\text{э}12}(1) & P_{\text{э}13}(1) \\ P_{\text{э}21}(1) & P_{\text{э}22}(1) & P_{\text{э}23}(1) \\ P_{\text{э}31}(1) & P_{\text{э}32}(1) & P_{\text{э}33}(1) \end{bmatrix}.$$

2. По формулам (4.75) и (4.76) вычисляются дисперсии невязок измерений  $D_1$  и  $D_2$ :

$$D_1 = \mathbf{H}_1 \mathbf{P}_{\text{э}1}(1) \mathbf{H}_1^T = [1 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} P_{\text{э}11}(1) & P_{\text{э}12}(1) & P_{\text{э}13}(1) \\ P_{\text{э}21}(1) & P_{\text{э}22}(1) & P_{\text{э}23}(1) \\ P_{\text{э}31}(1) & P_{\text{э}32}(1) & P_{\text{э}33}(1) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = P_{\text{э}11}(1);$$

$$D_2 = \mathbf{H}_2 \mathbf{P}_{\text{э}2}(1) \mathbf{H}_2^T = [1 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} P_{\text{э}11}(1) & P_{\text{э}12}(1) & P_{\text{э}13}(1) \\ P_{\text{э}21}(1) & P_{\text{э}22}(1) & P_{\text{э}23}(1) \\ P_{\text{э}31}(1) & P_{\text{э}32}(1) & P_{\text{э}33}(1) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = P_{\text{э}11}(1).$$

3. Вводим начальные значения весовых коэффициентов  $b_1(0)$  и  $b_2(0)$ :

$$b_1(0) = b_2(0) = 0,5.$$

4. По формулам (4.57) и (4.68) вычисляются на 1-м шаге невязки измерений  $\Delta D_1(1)$  и  $\Delta D_2(1)$ :

$$\Delta D_1(1) = D_{\text{и}1}(1) - D_{\text{э}1}(1); \quad \Delta D_2(1) = D_{\text{и}2}(1) - D_{\text{э}2}(1).$$

5. По формулам (4.50) и (4.61) проводится оценка дальности на 1-м шаге  $D_{\text{о}1}(1)$  и  $D_{\text{о}2}(1)$ :

$$D_{\text{о}1}(1) = D_{\text{э}1}(1) + K_{\text{ф}11}(1) \Delta D_1(1);$$

$$D_{\text{о}2}(1) = D_{\text{э}2}(1) + K_{\text{ф}12}(1) \Delta D_2(1).$$

6. По формулам (4.73) и (4.73) вычисляются на 1-м шаге значения весовых коэффициентов матрицы  $b_1(1)$  и  $b_2(1)$ :

$$b_1(1) = \frac{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_1}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_1(1))^2}{2D_1}\right\} (1-b_1(0))}{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_1}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_1(1))^2}{2D_1}\right\} (1-b_1(0)) + \sqrt{\frac{1}{2\pi D_2}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_2(1))^2}{2D_2}\right\} (1-b_2(0))};$$

$$b_2(1) = \frac{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_2}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_2(1))^2}{2D_2}\right\} (1-b_2(0))}{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_1}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_1(1))^2}{2D_1}\right\} (1-b_1(0)) + \sqrt{\frac{1}{2\pi D_2}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_2(1))^2}{2D_2}\right\} (1-b_2(0))}.$$

7. По формуле (4.72) осуществляется оценка дальности на 1-м шаге с третичной обработкой информации ИИС:

$$\begin{aligned} D_{\text{ТОИ}}(k) &= b_1(k)D_{o1}(k) + b_2(k)D_{o2}(k) = \\ &= \frac{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_1}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_1(1))^2}{2D_1}\right\} (1-b_1(0))D_{o1}(1)}{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_1}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_1(1))^2}{2D_1}\right\} (1-b_1(0)) + \sqrt{\frac{1}{2\pi D_2}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_2(1))^2}{2D_2}\right\} (1-b_2(0))} + \\ &+ \frac{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_2}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_2(1))^2}{2D_2}\right\} (1-b_2(0))D_{o1}(1)}{\sqrt{\frac{1}{2\pi D_1}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_1(1))^2}{2D_1}\right\} (1-b_1(0)) + \sqrt{\frac{1}{2\pi D_2}} \exp\left\{-\frac{(\Delta D_2(1))^2}{2D_2}\right\} (1-b_2(0))}. \end{aligned}$$

Шаг закончен. Далее идут в том же порядке вычисления на следующем шаге:  $\Delta D_1(2)$ ,  $\Delta D_2(2)$ ,  $D_{o1}(2)$ ,  $D_{o2}(2)$ ,  $b_1(2)$ ,  $b_2(2)$ ,  $D_{\text{ТОИ}}(2)$  и т.д.

Особенностью полученного алгоритма является то, что апостериорные весовые коэффициенты третичной обработки вычисляются на каждом шаге. Апостериорные весовые коэффициенты позволяют проводить оценку дальности с учетом точностных характеристик калмановских фильтров в каждой РЛС, которые зависят от характера изменения фазовых координат ВС в зависимости от расположения РЛС относительно ВС.

#### 4.4. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ДАЛЬНОМЕРНОГО КАНАЛА ИИС С ПРИМЕНЕНИЕМ ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

На основании алгоритмов (4.50) – (4.77) разработана функциональная схема дальномерного канала ИИС УВД с применением третичной обработки информации для оценки дальности до ВС (рис. 4.8).

Главным отличием предложенной структуры ИИС с применением апостериорной весовой третичной обработки информации является использование вычислителей невязки дальности в РЛС1 и РЛС2, где проводятся вычисления невязки дальности на каждом шаге измерения, а также вычислителя весовых коэффициентов в диспетчерском пункте ИИС УВД, учитываю-

шего информацию о невязке по дальности, определяемую в процессе вторичной обработки информации в вычислителях невязки дальности каждой из наземных РЛС [20].

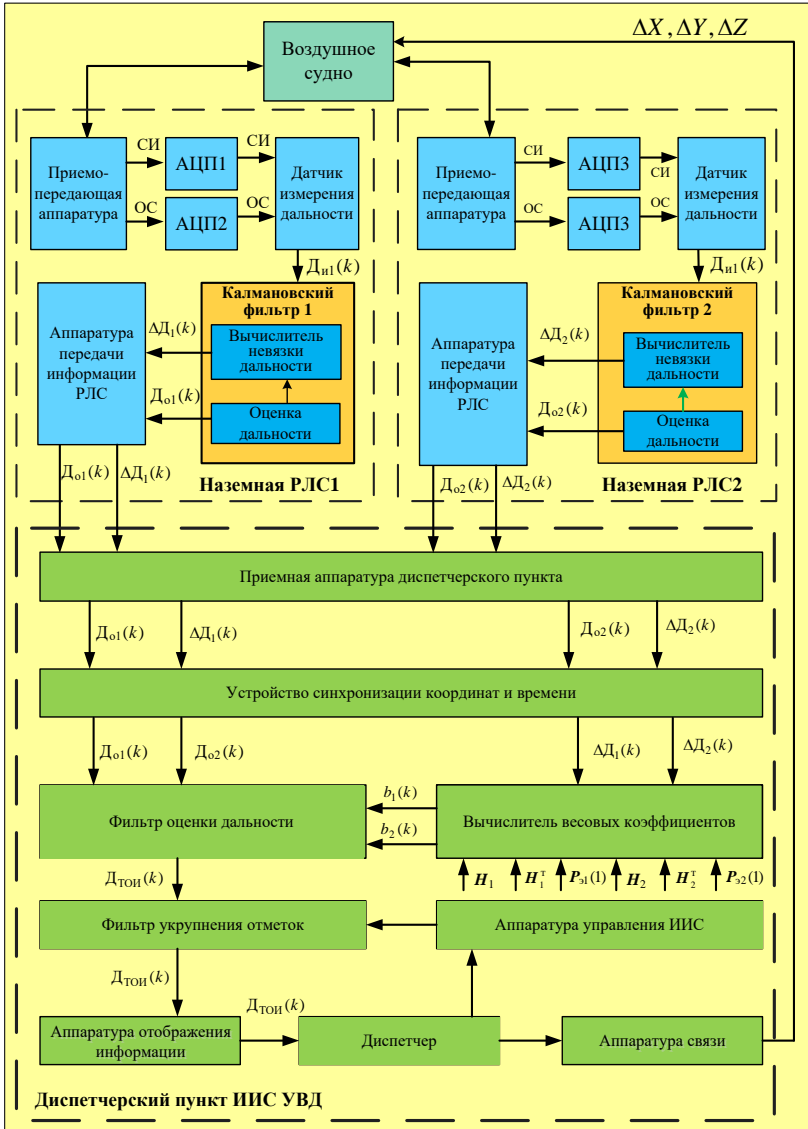


Рис. 4.8. Функциональная схема дальномерного канала ИИС с применением третичной обработки радиолокационной информации

Информация о невязке дальности от РЛС поступает в аппаратуру приема диспетчерского пункта, откуда поступает в вычислитель весовых коэффициентов, где проводится вычисление весовых коэффициентов в реальном времени, влияющее в дальнейшем на оценку дальности при третичной обработке информации.

Третичная обработка радиолокационной информации в ИИС методом весовой обработки с использованием апостериорной невязки дальности до ВС, а также учет пространственного расположения наземных РЛС системы позволят решить задачу повышения точностных характеристик оценки дальности до маневрирующего ВС, что способствует повышению пропускной способности системы и повышению достоверности общей картины воздушной обстановки [20].

Основными составляющими функциональной схемы оценки дальности ИИС с третичной обработкой информации являются диспетчерский пункт системы, а также наземные РЛС1 и РЛС2.

В функциональной схеме (рис. 4.8) наземные РЛС1 и РЛС2 системы содержат следующие элементы: приемо-передающая аппаратура, аналого-цифровые преобразователи (АЦП), калмановский фильтр, аппаратура передачи информации.

Приемо-передающая аппаратура РЛС генерирует мощные электромагнитные импульсы, которые через антенну излучаются в пространство в сторону ВС. Отраженный сигнал от ВС принимается антенной, направляется в приемное устройство для усиления и фильтрации слабых отраженных сигналов на фоне помех.

Датчик измерения дальности использует принцип измерения времени задержки между моментом излучения зондирующего электромагнитного сигнала и моментом приема отраженного сигнала от ВС.

АЦП преобразуют принятые аналоговые сигналы в цифровую форму для последующей высокоточной обработки. АЦП повышают вероятность обнаружения и точность определения координат ВС, улучшают разрешающую способность по дальности и скорости, эффективно подавляют помехи и выделяют полезный сигнал.

Калмановские фильтры реализованы по алгоритмам (4.50) – (4.60) для РЛС1 и (4.61) – (4.71) – для РЛС2. С выхода калмановских фильтров оценки дальности  $D_{o1}$ ,  $D_{o2}$  и невязки измерений  $\Delta D_1$ ,  $\Delta D_2$  поступают в аппаратуру передачи информации РЛС.

Аппаратура передачи информации РЛС передает радиолокационную информацию в диспетчерский пункт ИИС УВД по выделенным каналам связи. В качестве каналов связи могут использоваться радиорелейные линии связи, оптоволоконные линии или другие защищенные цифровые каналы.

Диспетчерский пункт ИИС УВД включает следующие элементы: диспетчер, приемная аппаратура диспетчера, устройство синхронизации координат и времени, фильтр оценки дальности, вычислитель весовых коэффициентов, фильтр укрупнения отметок, аппаратура отображения информации, аппаратура управления ИИС, аппаратура связи.

Диспетчер контролирует воздушное пространство в своей зоне ответственности, предотвращая столкновения ВС, использует радиолокационную информацию, радиосвязь и автоматизированные системы для наблюдения за ВС.

Приемная аппаратура диспетчера принимает радиолокационную информацию в диспетчерский пункт ИИС УВД по выделенным каналам связи.

Устройство синхронизации координат и времени обеспечивает создание единого системного времени и точную привязку данных, получаемых от РЛС, ко времени и местоположению. Синхронизация критична для автоматизированных рабочих мест диспетчеров, обеспечивая безопасность управления воздушным движением.

Фильтр оценки дальности реализованы по выражению (4.72).

Вычислитель весовых коэффициентов реализован по алгоритму (4.73) – (4.77).

Фильтр укрупнения отметок обеспечивает повышение эргономичности и эффективности работы диспетчера УВД, упрощая визуальный контроль за воздушным движением:

- уменьшает загрузку устройств отображения в условиях высокой интенсивности воздушного движения на экране диспетчера может отображаться большое количество отметок от ВС, находящихся близко друг к другу, в этом случае фильтр объединяет (группирует) эти отдельные отметки в единый, обобщенный объект или символ, когда они находятся на определенном минимальном расстоянии друг от друга;

- повышает читаемость и восприятие информации: группировка отметок предотвращает визуальный беспорядок (наложение символов друг на друга), делая воздушную обстановку более наглядной и легкой для восприятия диспетчером, это позволяет диспетчеру быстрее оценивать общую ситуацию в зоне ответственности за организацию воздушного движения;

- решение задач группирования воздушных объектов: фильтр решает задачу автоматического группирования целей, что может использоваться не только для отображения, но и для других алгоритмов обработки информации в ИИС УВД, например для упрощения автоматического обнаружения конфликтных ситуаций ВС.

Аппаратура отображения информации включает автоматизированные рабочие места (АРМ) диспетчеров с высокоточными мониторами, отображающими воздушную обстановку, планы полетов и радиолокационную информацию.

Аппаратура управления ИИС обеспечивает подачу команд для изменения режима работы фильтра укрупнения отметок.

Аппаратура связи – это комплекс наземных и бортовых радиосредств, обеспечивающих обмен информацией между диспетчерами и экипажами ВС для безопасного полета. Системы связи являются важным звеном в обеспечении безопасности и эффективности воздушного движения, позволяя координировать взлеты, посадки и полеты.

#### 4.5. ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДАЛЬНОМЕРНОГО КАНАЛА ИИС С ПРИМЕНЕНИЕМ ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

##### 4.5.1 Исследование невязки измерений дальности РЛС1 и РЛС2

Компьютерное моделирование невязок измерений функционирования дальномерных каналов РЛС1 и РЛС2 при слежении за движением ВС проводилось на основе моделирования маневра «большая коробочка», представленного на рис. 4.5, где показаны графики изменения дальности до ВС от РЛС1 и РЛС2.

Для получения невязок измерений дальности РЛС1 и РЛС2 использовались алгоритмы:

- алгоритм оценки невязок измерений дальности РЛС1:

$$D_{и1}(k) = D_1(k) + \xi_{дн1}(k); \quad (4.78)$$

$$\Delta D_1(k) = D_{и1}(k) - D_{э1}(k); \quad (4.79)$$

- алгоритм оценки невязок измерений дальности РЛС2:

$$D_{и2}(k) = D_2(k) + \xi_{дн2}(k); \quad (4.80)$$

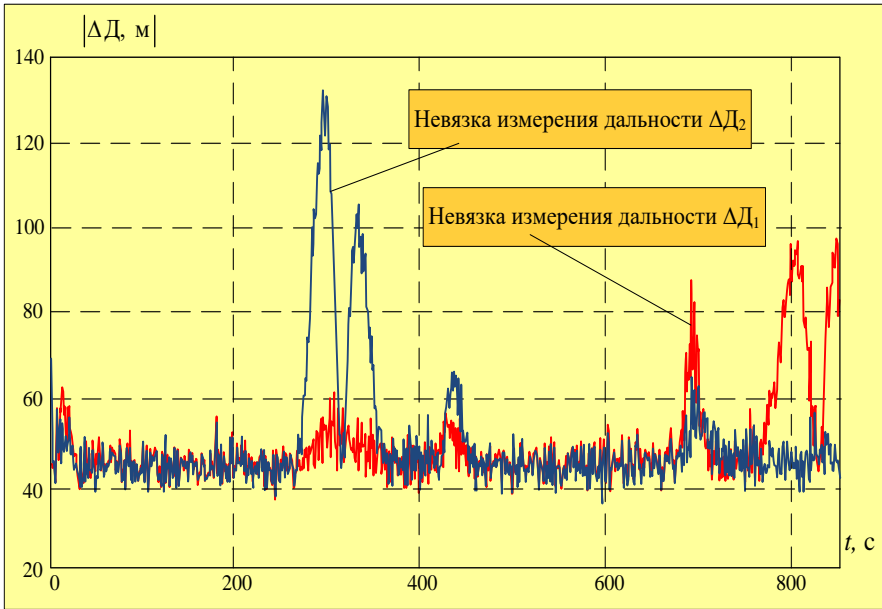
$$\Delta D_2(k) = D_{и2}(k) - D_{э2}(k). \quad (4.81)$$

Оценка невязок измерений дальности РЛС1 и РЛС2:

$$\Delta D_1(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N D_{и1}^j(k) - D_{э1}^j(k); \quad (4.82)$$

$$\Delta D_2(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N D_{и2}^j(k) - D_{э2}^j(k); \quad (4.83)$$

где  $D_{и1}^j(k)$  и  $D_{и2}^j(k)$  – измеренные значения дальности до ВС РЛС1 и РЛС2  $j$ -й реализации;  $D_{э1}^j(k)$  и  $D_{э2}^j(k)$  – экстраполированные значения дальности до ВС РЛС1 и РЛС2  $j$ -й реализации;  $N$  – количество реализаций.



**Рис. 4.9. Изменение невязки дальности до ВС относительно РЛС1 и РЛС2 при маневре «большая коробочка»**

Результаты моделирования изменения невязок дальности  $|\Delta D_1(k)|$  и  $|\Delta D_2(k)|$  показаны на рис. 4.9.

Результаты моделирования изменения невязок дальности  $|\Delta D_1(k)|$  и  $|\Delta D_2(k)|$  в РЛС1 и РЛС2 показывают, что значения невязок зависят от местоположения РЛС на аэродроме и от этапов траектории маневра «большая коробочка». Точность оценки дальности в третичной обработке информации зависит от двух разнесенных в пространстве РЛС, для которых весовые коэффициенты оценки дальности  $b_1$  и  $b_2$  зависят от значения невязки измерения  $\Delta D_1$  и  $\Delta D_2$ . Чем больше значение невязки измерения, тем меньше весовой коэффициент, и наоборот. Из рисунка 4.9. видно, что на временном отрезке в точках 300...380 с точность оценки дальности до ВС при третичной обработке информации будет определяться точностью РЛС1 ( $\Delta D_1 < \Delta D_2$ ,  $b_1 > b_2$ ). На временных отрезка в точках 680...700 с 780...820 с точность оценки дальности до ВС при третичной обработке информации будет определяться точностью РЛС2 ( $\Delta D_2 < \Delta D_1$ ,  $b_2 > b_1$ ).

#### 4.5.2 Исследование реальных точностных характеристик оценки дальности ИИС с использованием алгоритмов вторичной обработки информации в РЛС1, РЛС2 и третичной обработки радиолокационной информации и применением апостериорных весовых коэффициентов

С помощью имитационного моделирования на ЭВМ проводилось исследование реальной точности оценки дальности сопровождаемого ВС. Имитационное моделирование на ЭВМ представляет собой имитацию измеренных сигналов  $D_{и1}(k)$  в РЛС1 и  $D_{и2}(k)$  в РЛС2, обработку этих сигналов с помощью алгоритмов (4.50) – (4.57) и (4.61) – (4.68). Имитация входных сигналов  $D_{и1}(k)$  и  $D_{и2}(k)$  представляет собой изменение истинной дальности  $D_1(k)$  и шума наблюдения  $\xi_{дн1}(k)$ ,  $D_2(k)$  и шума наблюдения  $\xi_{дн2}(k)$ . Шумы наблюдения  $\xi_{дн1}(k)$  и  $\xi_{дн2}(k)$  имитируются датчиками случайных чисел.

Реальная точность дальности РЛС1 и РЛС2 до ВС оценивается по величине СКО дальности по количеству не менее 100 реализаций формулами:

$$\sigma_{Др1}(k) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (D_1(k) - D_{о1}^j(k))^2}{N-1}}; \quad (4.84)$$

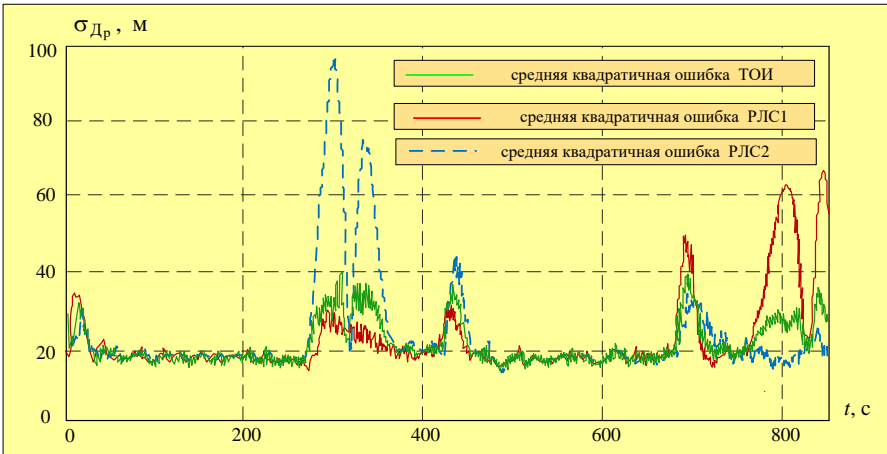
$$\sigma_{Др2}(k) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (D_2(k) - D_{о2}^j(k))^2}{N-1}}, \quad (4.85)$$

где  $\sigma_{Др1}(k)$  и  $\sigma_{Др2}(k)$  – СКО дальности до ВС относительно РЛС1 и РЛС2;  $D_{о1}^j(k)$  и  $D_{о2}^j(k)$  – оценочные значения дальности ВС относительно РЛС1 и РЛС2  $j$ -й реализации;  $N$  – количество реализаций.

Компьютерное моделирование обработки информации  $\Delta D_1(k)$ ,  $D_{о1}(k)$ , и  $\Delta D_2(k)$ ,  $D_{о2}(k)$  методом третичной обработки информации проводилось с помощью алгоритма (4.72 – 4.77).

Результаты моделирования представляются зависимостями реальной СКО дальности  $\sigma_{Др}$  для РЛС1, РЛС2 и третичной апостериорной обработки радиолокационной информации (ТОИ) от времени (рис. 4.10).

Результаты исследования реальной точности оценки дальности, полученные вторичной обработкой информации в РЛС1 и РЛС2, а также с использованием ТОИ и применением метода апостериорной весовой обработки, показывают, что точность оценки дальности с ТОИ значительно лучше, если точность оценки дальности в РЛС1 или РЛС2 низкая. Это связано с тем, что точность оценки дальности с ТОИ зависит от лучшей оценки дальности РЛС1 или РЛС2.



**Рис. 4.10. Зависимость реальной СКО дальности для РЛС1, РЛС2 и ТОИ от времени**

#### 4.5.3. Исследование реальных точностных характеристик оценки дальности ИИС с использованием алгоритмов третичной обработки радиолокационной информации и применением апостериорных и априорных весовых коэффициентов

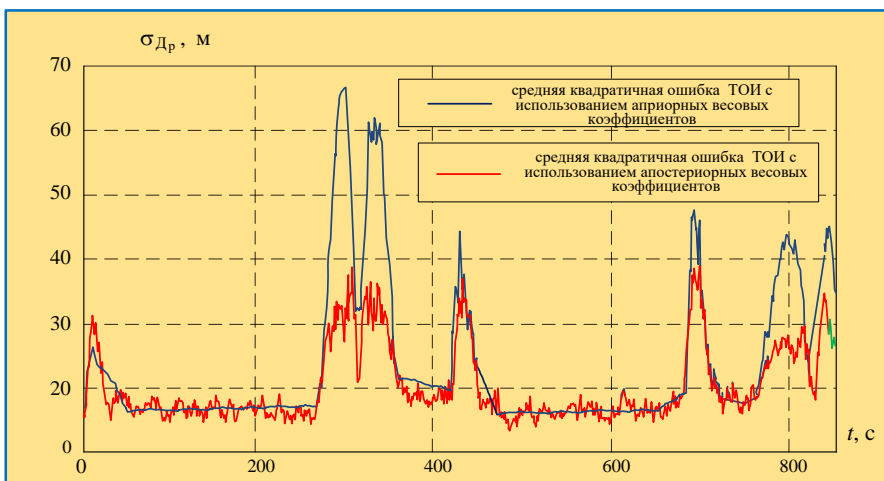
Оценка дальности с использованием алгоритма третичной обработки радиолокационной информации и применением апостериорных весовых коэффициентов  $b_1(k)$  и  $b_2(k)$ , которые в процессе слежения за ВС изменяются во времени, имеет вид

$$D_{\text{ТОИ}}(k) = b_1(k)D_{o1}(k) + b_2(k)D_{o2}(k). \quad (4.86)$$

Оценка дальности алгоритма третичной обработки радиолокационной информации с использованием априорных весовых коэффициентов  $b_1$  и  $b_2$ , которые в процессе слежения за ВС изменяются во времени (для РЛС1 и РЛС2 с одинаковыми тактико-техническими характеристиками  $b_1 = b_2 = 0,5$ ), характеризуется выражением

$$D_{\text{ТОИ}}(k) = b_1 D_{o1}(k) + b_2 D_{o2}(k). \quad (4.87)$$

На рисунке 4.11 представлены зависимости реальной СКО дальности до ВС в процессе маневрирования, полученные в результате третичной обработки информации при использовании метода апостериорной весовой обработки (4.86), а также результаты третичной обработки информации с применением метода априорной весовой обработки (4.86).



**Рис. 4.11. Зависимости реальной СКО дальности ТОИ с применением апостериорных и априорных весовых коэффициентов от времени**

Результаты исследования (рис. 4.11) показывают, что алгоритм третичной обработки радиолокационной информации в дальномерном канале ИИС с применением апостериорных весовых коэффициентов обладает лучшими точностными характеристиками по сравнению с алгоритмом третичной обработки информации, где используются априорные весовые коэффициенты (повышение точностных характеристик оценки дальности на отдельных участках траектории ВС «большая коробочка» маневрирования достигает порядка 60%).

## 5. ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЛГОРИТМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДАЛЬНОМЕРНОГО КАНАЛА ИИС УВД С ПРИМЕНЕНИЕМ ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

---

### 5.1. ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИИС УВД

Эффективность информационно-измерительных систем (автоматизированных систем) УВД оценивается комплексным набором показателей, которые охватывают безопасность, пропускную способность, экономичность и надежность системы [20].

Основные показатели эффективности ИИС УВД:

#### 1. Показатели безопасности полетов:

- вероятность конфликтных ситуаций (частота возникновения опасных сближений или нарушений установленных интервалов между ВС);
- количество отклонений от заданных траекторий, эшелонов или правил нарушения полетов ВС;
- своевременное обнаружение потенциальных конфликтных ситуаций в зоне ответственности аэродрома (зависит от функциональных возможностей ИИС и диспетчера).

2. Пропускная способность (характеризуется количеством ВС, которые могут управляться диспетчером в единицу времени):

- интенсивность воздушного движения характеризуется количеством ВС, поступивших в зону УВД ответственности за единицу времени;
- загруженность зоны УВД определяет количество ВС, одновременно находящихся под управлением диспетчера;
- количество задержек рейсов ВС связана с ограничением пропускной способности.

#### 3. Показатели надежности и готовности:

- надежность характеризуется вероятностью безотказной работы ИИС УВД в течение заданного времени;
- коэффициент готовности (ИИС УВД находится в работоспособном состоянии в течение заданного времени);
- время восстановления (среднее время, необходимое для восстановления работоспособного состояния ИИС).

#### 4. Экономические показатели:

- использование воздушного пространства (оптимизация маршрутов движения) для построения более прямых и оптимальных траекторий полета ВС, сокращая время в пути и расход топлива;
- производительность работы диспетчеров (эффективное управление большим количеством ВС).

## 5.2. ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИИС НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ И УРОВЕНЬ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Высокие точностные характеристики ИИС УВД, включая третичную обработку данных, напрямую повышают пропускную способность воздушного движения и уровень безопасности полетов. Чем точнее измерение координат ВС, тем меньше требуемые эшелоны разделения, что позволяет увеличить интенсивность движения, сохраняя необходимый уровень безопасности, особенно в районах аэродромов.

Влияние точности ИИС на безопасность полетов и пропускную способность:

1. Повышение точности измерения координат ВС ИИС позволяет сократить минимально допустимые интервалы между ВС, что ведет к росту пропускной способности воздушного движения.

2. Высокая точность ИИС обеспечивает более точное сопровождение маневрирующих ВС диспетчерами для предупреждения конфликтных ситуаций ВС, уменьшение ошибок пилотов при управлении ВС, что прямо влияет на поддержание заданного уровня безопасности ВС.

3. Использование систем с третичной обработкой позволяет эффективнее обрабатывать данные от нескольких источников, улучшая достоверность информации от ВС и точность контроля диспетчерскими службами за заданными траекториями ВС в зоне аэродрома.

Таким образом, модернизация ИИС в сторону повышения точности является ключевым фактором для повышения пропускной способности воздушного движения при заданном уровне безопасности.

Потенциальная конфликтная ситуация (ПКС) возникает, когда траектории двух или более ВС по прогнозам ИИС УВД пересекутся с нарушением указанных минимальных интервалов ВС, если не предпринять корректирующих действий по изменению траектории ВС.

Размеры ПКС зависят от минимально допустимых безопасных расстояний для вертикального и горизонтального эшелонирования (определяются стандартами и правилами управления воздушным движением обслуживания), которые формируют защитный объем безопасности ВС  $R_{30}$ .

В качестве защитного объема безопасности ВС являются «защитные зоны» или «стробы сближения» (цилиндр, шар, параллелепипед).

Прогноз траектории ВС воздушных судов осуществляется на основе текущих параметров движения (координаты, высота, курс, скорость) и планов полетов.

Выявить ПКС можно на основе сравнения прогнозируемого расстояния между ВС  $r_3$  с пороговым значением безопасного эшелонирования ВС  $r_{\text{пор}}$ .

Защитный объем  $R_{30}$  задается как объем воздушного пространства, определяемый в текущий момент времени  $t$  для каждого упрежденного момента времени  $t_3$ , попадание в который других ВС, в силу неполной достоверности информации о текущем и будущем положении самолета, приводит к образованию ситуации, характеризуемой вероятностью столкновения, превышающей заданную. Выявить ситуацию угрозы столкновения можно на основе сравнения прогнозируемого расстояния между ВС  $r_3$  с принятым пороговым значением безопасного разделения ВС  $r_{\text{пор}}$ . Однако, если принять во внимание те обстоятельства, что исходная информация, необходимая для работы ПКС, включает данные по оценке координат и параметров движения ВС в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а точности измерения координат в горизонтальной и вертикальной плоскостях существенно различаются, а также то, что параметры движения и маневренные характеристики ВС в горизонтальной плоскости и по высоте имеют существенные различия, то определение величины  $r_3$  в пространстве не представляет большого практического значения и решение задачи обнаружения конфликтной ситуации складывается из двух задач: анализа движения ВС в горизонтальной плоскости и одновременного анализа движения самолетов в вертикальной плоскости.

Для обеспечения безопасного расхождения ВС необходимо, чтобы для каждого момента времени фактическое расстояние между ВС было больше или равно установленному минимальному безопасному интервалу. Это условие можно выразить следующими неравенствами:

$$\left| \bar{R}_r \right| \geq \Delta r_r ; \left| \bar{R}_b \right| \geq \Delta r_b , \quad (5.1)$$

где  $\bar{R}_r$  и  $\bar{R}_b$  – расстояние между ВС в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а значения  $\Delta r_r$  и  $\Delta r_b$  – минимально безопасный интервал между ВС в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Расстояния  $\bar{R}_r(t)$  и  $\bar{R}_b(t)$  между ВС зависят от экстраполированных значений  $\bar{R}_{r3}(t)$  и  $\bar{R}_{b3}(t)$  между ВС в горизонтальной и вертикальной плоскостях на основе информации ИИС, ошибок оценки взаимного положения ВС  $\Delta \bar{R}_{r0}(t)$  и  $\Delta \bar{R}_{b0}(t)$  (определяются точностными характеристиками ИИС), отклонений ВС от заданной траектории движения вследствие ошибок пилотирования ВС  $\Delta \bar{R}_{r\text{пн}}(t)$  и  $\Delta \bar{R}_{b\text{пн}}(t)$ :

$$\bar{R}_r(t) = \bar{R}_{r3}(t) + \Delta \bar{R}_{r0}(t) + \Delta \bar{R}_{r\text{пн}}(t) ; \quad (5.2)$$

$$\bar{R}_b(t) = \bar{R}_{b3}(t) + \Delta \bar{R}_{b0}(t) + \Delta \bar{R}_{b\text{пн}}(t) , \quad (5.3)$$

Тогда с учетом выражения (5.1) для исключения угрозы столкновения ВС на интервале прогнозирования (экстаполяции)  $[0, t_3]$  должны выполняться условия:

$$\left| \bar{R}_\Gamma(t) \right| \geq \Delta r_\Gamma + \left| \Delta \bar{R}_{\Gamma 0}(t) \right| + \left| \Delta \bar{R}_{\Gamma n}(t) \right|; \quad (5.4)$$

$$\left| \bar{R}_B(t) \right| \geq \Delta r_B + \left| \Delta \bar{R}_{B 0}(t) \right| + \left| \Delta \bar{R}_{B n}(t) \right|. \quad (5.5)$$

Выполнение условий (5.4), (5.5) определяет бесконфликтный полет ПКС (не будет срабатывать команда ПКС в диспетчерском пункте). Если на интервале  $[0, t_3]$  неравенства (5.4), (5.5) нарушаются, это означает, что может возникнуть ситуация пересечения траекторий ВС, а это требует вмешательства системы ПКС.

Длительность интервала прогнозирования  $[0, t_3]$  определяет размеры защитного объема  $R_{з0}$ . Интервал  $[0, t_3]$  должен выбираться исходя из условия

$$t_3 \geq \sum_{i=1}^n t_i + t_{\text{ман}}, \quad (5.6)$$

где  $t_i$  – время задержки, которое зависит от действий диспетчера и пилота (обнаружение ПКС, передача команд пилоту, выполнение команд диспетчера);  $t_{\text{ман}}$  – время, необходимое для выполнения маневра ВС пилотом, для устранения ПКС.

С учетом выражения (5.6) пороговые расстояния безопасного полета ВС в горизонтальной  $R_\Gamma^{\text{пор}}$  и вертикальной  $R_B^{\text{пор}}$  плоскостях выбираются из условий:

$$R_\Gamma^{\text{пор}} = \Delta r_\Gamma + \left| \Delta \bar{R}_{\Gamma 0}(t_3) \right| + \left| \Delta \bar{R}_{\Gamma n}(t_3) \right|; \quad (5.7)$$

$$R_B^{\text{пор}} \geq \Delta r_B + \left| \Delta \bar{R}_{B 0}(t_3) \right| + \left| \Delta \bar{R}_{B n}(t_3) \right|. \quad (5.8)$$

Для обнаружения ПКС в горизонтальной плоскости используется одновременное выполнение условий:

$$R_\Gamma^{\text{min}} \leq R_\Gamma^{\text{пор}}; T_\Gamma^{\text{min}} \leq T_\Gamma^{\text{пор}}, \quad (5.9)$$

где  $R_\Gamma^{\text{min}}, R_\Gamma^{\text{пор}}$  – оценка и заданное пороговое значение расстояния минимального пролета ВС;  $T_\Gamma^{\text{min}}, T_\Gamma^{\text{пор}}$  – оценка и заданное пороговое значение времени до минимального сближения ВС.

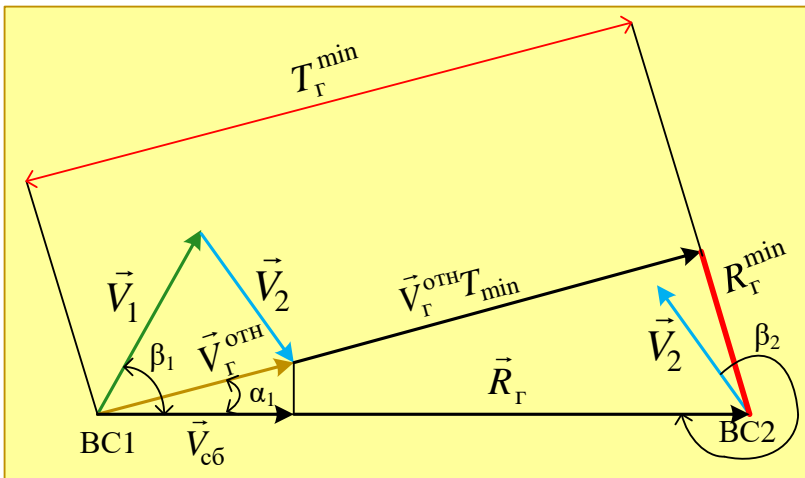


Рис. 5.1. Относительное движение воздушных судов

Параметры  $R_r^{\text{min}}$  и  $T_r^{\text{min}}$  определим для случай, когда два ВС совершают прямолинейное и равномерное движение. На рисунке 5.1 показаны векторы расстояния  $\vec{R}_r$  и горизонтальной скорости  $\vec{V}_r^{\text{отн}}$  между BC1 и BC2.

Используя геометрические соотношения, получим минимальное расстояние пролета ВС  $R_r^{\text{min}}$  (нормаль из точки BC2 на вектор  $\vec{V}_r^{\text{отн}}$ ), величина которого будет равна

$$R_r^{\text{min}} = |\vec{R}_r| \sin|\alpha| = \frac{|\vec{R}_r| |\vec{V}_r^{\text{отн}}| \sin|\vec{R}_r \wedge \vec{V}_r^{\text{отн}}|}{|\vec{V}_r^{\text{отн}}|} = \frac{|\vec{R}_r \times \vec{V}_r^{\text{отн}}|}{|\vec{V}_r^{\text{отн}}|}. \quad (5.10)$$

Минимальное время сближения ВС определяется по формуле

$$T_r^{\text{min}} = \frac{|\vec{R}_r| \cos|\vec{R}_r \wedge \vec{V}_r^{\text{отн}}|}{|\vec{V}_r^{\text{отн}}|} = \frac{|\vec{R}_r| |\vec{V}_r^{\text{отн}}| \cos|\vec{R}_r \wedge \vec{V}_r^{\text{отн}}|}{|\vec{V}_r^{\text{отн}}| |\vec{V}_r^{\text{отн}}|} = \frac{\vec{R}_r \vec{V}_r^{\text{отн}}}{|\vec{V}_r^{\text{отн}}|^2}. \quad (5.11)$$

При проверке ПКС в вертикальной плоскости определяется текущая разность высот ВС  $\Delta R_B(t)$ :

$$\Delta R_B(t) = R_{B2}(t) - R_{B1}(t). \quad (5.12)$$

Если  $\Delta R_B(t) \leq R_B^{\text{пор}}$  (ВС находятся в горизонтальной плоскости), то в этом случае проверка ПКС осуществляется из условия (5.9).

Если  $\Delta R_B(t) \geq R_B^{\text{поп}}$ , то осуществляется оценка величины  $R_B^{\text{min}}$

$$R_B^{\text{min}} = R_B(t) - V_{\text{вс1,2}} T_B^{\text{min}}, \quad (5.13)$$

где  $V_{\text{вс1,2}}$  – оценка вертикальной скорости между ВС1 и ВС2.

При принятии решения о наличии ПКС в горизонтальной и вертикальной плоскостях используется алгоритм

$$R_{\Gamma}^{\text{min}} \leq R_{\Gamma}^{\text{поп}} \wedge T^{\text{min}} \leq T^{\text{поп}} \wedge R_B^{\text{min}} \leq R_B^{\text{поп}}. \quad (5.14)$$

В выражении (5.14) параметры  $R_{\Gamma}^{\text{поп}}$ ,  $R_B^{\text{поп}}$  и  $T^{\text{поп}}$  выбираются из условия:

$$R_{\Gamma}^{\text{поп}} = \Delta r_{\Gamma} + \left| \Delta \bar{R}_{\Gamma\text{го}}(T_{\text{поп}}) \right| + \left| \Delta \bar{R}_{\Gamma\text{вп}}(T_{\text{поп}}) \right|; \quad (5.15)$$

$$R_B^{\text{поп}} \geq \Delta r_B + \left| \Delta \bar{R}_{\text{во}}(T_{\text{поп}}) \right| + \left| \Delta \bar{R}_{\text{вп}}(T_{\text{поп}}) \right|; \quad (5.16)$$

$$T^{\text{поп}} \geq \sum_{i=1}^n t_i + t_{\text{ман}}, \quad (5.17)$$

где  $\Delta \bar{R}_{\Gamma\text{го}}(T_{\text{поп}})$ ,  $\Delta \bar{R}_{\text{во}}(T_{\text{поп}})$  – погрешности оценки траекторий ВС в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

### 5.3. ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИИС НА БЕЗОПАСНОСТЬ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ И ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Безопасность воздушного движения зависит от вероятности нарушения безопасности полетов. В соответствии с требованиями по производству полетов вероятность нарушения безопасности полетов должна быть  $P_{\text{нбп}} \leq 10^{-6}$  [11].

Область безопасности ВС зависит от точности оценки координат ВС, которые зависят от эффективности ИИС УВД. Если угловые координаты имеют одинаковую среднюю квадратичную ошибку, то область безопасности ВС представляет собой шар объемом, равным

$$V_{\text{об}} = \frac{4}{3} \pi (6\sigma_x)^3, \quad (5.18)$$

где  $\sigma_x$  – СКО координат ВС.

Область (объем) зоны ответственности составляет  $V_{30}$  в ближней зоне зависит от высоты полета ВС и радиуса ближней зоны и составляет  $10^{10} \dots 10^{14} \text{ м}^3$ .

Объем ВС в пространстве  $V_{BC}$  составляет порядка  $4000 \dots 8000 \text{ м}^3$ .

Вероятность попадания  $i$ -го ВС в область безопасности  $j$ -го ВС или наоборот будет определяться формулой

$$P_{пij} = \frac{V_{BC}}{V_{30} - V_{BC}} \cdot \quad (5.19)$$

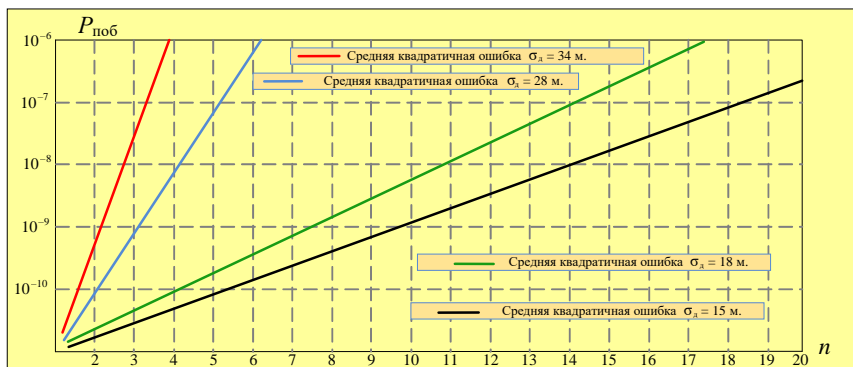
Вероятность непопадания ВС в область безопасности

$$P_{нп} = \frac{V_{об} - V_{BC}}{V_{об}} \cdot \quad (5.20)$$

Вероятность пересечения области пересечения для  $n$  ВС, находящихся в районе аэродрома, будет определяться по формуле

$$P_{поб} = \frac{(n-1)V_{об}}{V_{30} - (n-1)V_{об}} P_{нп} \cdot \quad (5.21)$$

На основе выражений (5.18) – (5.21) и различных средних квадратичных ошибок дальности (рис. 4.15) были получены вероятности пересечения областей безопасности ВС  $P_{поб}$  в зависимости от количества  $n$  ВС в ближней зоне УВД.



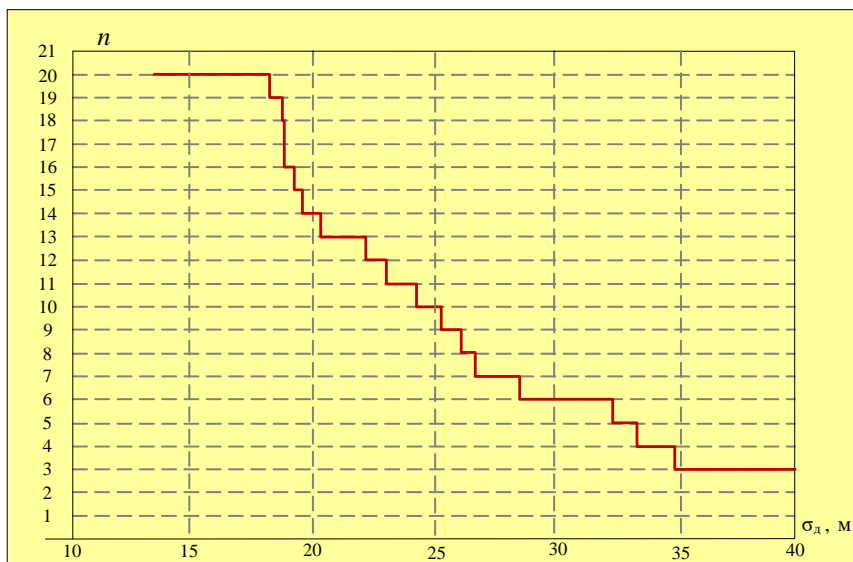
**Рис. 5.2. Изменение вероятности пересечения областей обеспечения безопасности ВС в зависимости от количества ВС для различных значений СКО дальности**

Из рисунка 5.2 видно, что вероятность пересечения областей безопасности ВС зависит от точностных характеристик ИИС и количества ВС, которые находятся в зоне ответственности диспетчера. Чем выше точностные характеристики ИИС, тем меньше вероятность пересечения траекторий ВС.

Через определение величины вероятности пересечения области обеспечения безопасности ВС (рис. 5.2) имеется возможность оценить пропускную способность ВС (характеризуется количеством ВС, которыми диспетчеры могут управлять в единицу времени). На рисунке 5.3 показана зависимость количества ВС под управлением диспетчера от СКО дальности  $\sigma_d$  дальномерного канала.

На рисунке 5.3. видно, что с уменьшением СКО дальности увеличивается пропускная способность ВС.

Таким образом, СКО координат ВС оказывает прямое влияние на безопасность полетов (определение безопасных интервалов (эшелонирование), снижение риска конфликтных ситуаций, надежность систем предупреждения) и пропускную способность системы организации воздушного движения (интервалы и плотность ВС, эффективное использование воздушного пространства, загруженность диспетчеров).



**Рис. 5.3. Зависимость количества ВС под управлением ИИС УВД от значений СКО дальности**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

Разработка алгоритмов перспективной ИИС УВД позволяет оптимизировать эшелонирование и сократить задержки ВС за счет точного прогнозирования положения ВС, анализировать огромные массивы данных в реальном времени для выявления потенциальных опасных сближений задолго до их возникновения, автоматически распределять нагрузки на секторы УВД и взлетно-посадочные полосы, обеспечивать безопасное совместное использование пространства пилотируемыми и беспилотными судами.

Безопасность, регулярность и экономичность полетов тесно связаны друг с другом и существенно зависят от эффективности УВД.

Важнейшей задачей по обеспечению безопасности полетов, подлежащей автоматизации, является функция предотвращения столкновений одного ВС с другим. Проблема предотвращения столкновений ВС имеет ряд фаз своего решения:

- обнаружение и сигнализация об угрозах столкновений;
- выработка управляющих команд.

Операции по этим фазам могут проводиться как на земле, так и на борту ВС, но обязательно с помощью ИИС УВД.

ИИС УВД должна предоставлять пользователям достоверную с высокой точностью аэронавигационную и метеорологическую информацию в реальном масштабе времени с целью выбора предпочтительных маршрутов полета, обеспечивать поддержание высокой пропускной способности при заданном уровне безопасности воздушного движения.

В монографии рассмотрены виды обработки радиолокационной информации и их использование при синтезе ИИС УВД, проанализированы существующие алгоритмы калмановской фильтрации, которые не соответствуют современным требованиям по организации воздушного движения.

Проведены синтез и исследование перспективных алгоритмов радиоэлектронных следящих систем (РЭСС) для оценки фазовых координат ВС с третичной обработкой информации с учетом кинематических и динамических параметров ВС.

Исследования показали, что использование перспективных алгоритмов РЭСС позволит улучшить точностные характеристики параметров ВС, повысить достоверность обработанной информации, увеличить пропускную способность при заданном уровне безопасности.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

---

1. **Анодина, Т. Г.** Моделирование процессов в системе управления воздушным движением / Т. Г. Анодина, В. И. Мокшанов. – М. : Радио и связь, 1993. – 263 с.
2. **Ахмедов, Р. М.** Автоматизированные системы управления воздушным движением: Новые информационные технологии в авиации : учебное пособие / Р. М. Ахмедов, А. А. Бибутов, А. В. Васильев. – СПб. : Политехника, 2004. – 446 с.
3. **Бакулев, П. А.** Радиолокационные системы : учебное пособие / П. А. Бакулев. – М. : Радиотехника, 2004. – 320 с.
4. **Бердышева, В. П.** Радиолокационные системы / В. П. Бердышева. – Красноярск : СФУ, 2011. – 398 с.
5. **Большаков, Ю. П.** Посадочные радиолокаторы гражданской авиации и тенденции развития техники их построения / Ю. П. Большаков, Е. Е. Нечаев // Научный вестник МГТУ ГА. – 2005. – № 6. – С. 97 – 102.
6. **Ботов, М. И.** Основы теории радиолокационных систем и комплексов : учебное пособие / М. И. Ботов, В. А. Вяхирев – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. – 530 с.
7. **Бухалев, В. А.** Распознавание оценивание и управление в системах со случайной скачкообразной структурой / В. А. Бухалев. – М. : Наука, Физматлит, 1996.
8. **Васильев, К. К.** Алгоритм первичной радиолокационной обработки / К. К. Васильев, Н. В. Лучков // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. – 2017. – № 5. – С. 39 – 44.
9. **Галкин, А. П.** Основы радиотехнических систем : учебное пособие / А. П. Галкин. – Владимир : Владим. гос. ун-т., 2004. – 108 с.
10. **Глистин В. Н.** Применение динамических данных воздушного судна в угломерном канале информационно-измерительных систем / Ю. Н. Панасюк // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2019. – № 1 – С. 190 – 196.
11. **Данилов, С. Н.,** Алгоритм сопровождения с реконфигурацией модели/ Р. А. Ефремов, Н. А. Кольтюков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. – № 3. – С. 418 – 423.
12. **Задорожный, А. И.** Автоматизированные системы управления полетами и воздушным движением / А. И. Задорожный. – М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1998.
13. **Зингер, Р.** Оценка характеристик оптимального фильтра для слежения за пилотируемой целью / Р. Зингер // Зарубежная радиоэлектроника. – 1971. – № 8. – С. 40 – 57.

14. **Зырянов, Ю. Т.** Основы радиотехнических систем : учебное пособие / Ю. Т. Зырянов, О. А. Белоусов, П. А. Федюнин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – 147 с.

15. **Коновалов, А. А.** Основы траекторной обработки радиолокационной информации / А. А. Коновалов – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – 164 с.

16. **Кузьмин, С. З.** Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С. З. Кузьмин. – М. : Радио и связь, 1986. – 352 с.

17. **Лобачев, Ю. В.** Обработка радиолокационной информации в автоматизированных системах управления полетами : монография/ Ю. В. Лобачев, Ю. Н. Панасюк, Б. П. Комягин. – Тамбов : ТВВАИУРЭ, 2008. – 152 с.

18. **Меркулов, В. И.** Авиационные системы радиоуправления / В. И. Меркулов, А. И. Канащенков. – М. : Радиотехника, 2003. – 389 с.

19. **Наимов, У. Р.** Концепция построения и структура перспективного информационно- измерительного комплекса / У. Р. Наимов, С. Н. Данилов, А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк, Н. А. Кольтюков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2018. – №.1 – С. 30-36.

20. **Панасюк, Ю. Н.** Обработка радиолокационной информации в радиотехнических системах : учебное пособие / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 84 с.

21. **Пат.** 2358287 Российская Федерация, МПК G 01 S 13/87. Способ определения дальности до маневренного летательного аппарата в режиме радиомолчания на основе использования / Шатовкин Р. Р. ; заявитель и патентообладатель ГОУВПО «Тамбовское высшее военное авиационное инженерное училище радиозлектроники (военный институт)». – № 2007146126 ; заявл. 11.12.07 ; опубл. 10.06.09, Бюл. № 16. – 8 с.

22. **Пат.** 2780803 С1 Российская Федерация, МПК G01S 13/70, G01S 13/87. Способ оценки дальности до маневрирующего воздушного судна информационно-измерительной системой управления воздушным движением с применением третичной обработки информации / Пудовкин А. П., Панасюк Ю. Н., Сустин А. И. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет». – № 2021132513 ; заявл. 09.11.21 ; опубл. 04.10.22.

23. **Пат.** 2826437 С1 Российская Федерация МПК G01S 13/87. Способ оценки дальности до маневрирующего воздушного судна информационно-измерительной системой управления воздушным движением с применением дисперсии невязки по дальности в третичной обработке информации / Пудовкин А. П., Панасюк Ю. Н., Сустин А. И. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет». – № 2024103973 ; заявл. 16.02.24 ; опубл. 10.09.24.

24. **Первачев, С. В.** Адаптивная фильтрация сообщений / С. В. Первачев, А. И. Перов. – М. : Радио и связь, 1991.
25. **Перевезенцев, В. П.** Радиолокационные системы аэропортов / В. П. Перевезенцев, А. И. Агарков. – М. : Транспорт, 1991. – 360 с.
26. **Панасюк, Ю. Н.** Алгоритм дальномерного канала с учетом информации бортовых датчиков воздушных судов / И. В. Князев, С. Н. Данилов, А. П. Пудовкин. – М. : Радиотехника, 2013.
27. **Панасюк Ю. Н.** Использование динамических характеристик воздушного судна в информационно-измерительных системах/ А. П. Пудовкин, И. В. Князев, В. Н. Глистин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. – № 3. – С. 381-386.
28. **Панасюк, Ю. Н.** Метод повышения точности третичной обработки информации с применением динамических весовых коэффициентов / А. П. Пудовкин, А. И. Рогачёв // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – № 4. – С. 595 – 600.
29. **Пудовкин, А. П.** Синтез алгоритмов радиоэлектронного комбинированного прицела / Ю. Н. Панасюк, И. В. Князев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. – № 3. – С. 413 – 417.
30. **Пудовкин, А.П.** Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах : монография / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – СПб. : Экспертные решения, 2014. – 256 с.
31. **Пудовкин, А. П.** Основы теории антенн : учебное пособие / А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк, А. А. Иванков. – Тамбов : ТГТУ, 2011. – 92 с.
32. **Сустин, А. И.** Информационно-измерительная и управляющая система с дальномерным каналом третичной обработки радиолокационной информации повышенной точности / А. И. Сустин, А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2024. – Т. 30, № 2. – С. 274 – 284.
33. **Сустин, А.И.** Применение калмановской фильтрации для метода динамических весовых коэффициентов в третичной обработке информации / А. И. Рогачёв, А. И. Сустин, Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2019. – № 1. – С. 47 – 52.
34. **Сустин, А. И.** Синтез дальномерного канала повышенной точности информационно-измерительной и управляющей системы с применением третичной обработки информации / А. И. Сустин, А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк // Южно-Сибирский научный вестник. – 2024. – № 2(54). – С. 91 – 97.
35. **Тарасенков, А. М.** Динамика полета и боевое маневрирование летательного аппарата / А. М. Тарасенков. – М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1986. – 314 с.
36. **Фарина, А.** Цифровая обработка радиолокационной информации / А. Фарина, Ф. Студер. – М. : Радио и связь, 1993.

37. **Черняк, В. С.** Многопозиционная радиолокация / В. С. Черняк. – М. : Радио и связь, 1993. – 418 с.
38. **Blackman, S.** Multiple Target Tracking with Radar Applications / S. Blackman. – Dedham : Artech House, 1999.
39. **Kolne, W.** Separate Processing of Primary and Secondary Radar Data in Multi Radar Tracking / W. Kolne. – Dresden, 2014.
40. **Pudovkin, A. P.** Algorithm synthesis for tertiary information processing of distance measuring channel in information and measurement system of air traffic control / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, A. I. Sustin, S. N. Danilov, L. G. Valepo, O. V. Trapeznikova // Journal of Physics: Conference Series: IV International Scientific and Technical Conference “Mechanical Science and Technology Update”, MSTU 2020, Omsk, 17 – 19 March 2020. – Omsk : Institute of Physics Publishing, 2020.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ВИДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ .....	5
1.1. Общие сведения .....	5
1.2. Первичная обработка радиолокационной информации .....	6
1.3. Вторичная обработка радиолокационной информации .....	7
1.4. Третичная обработка радиолокационной информации .....	9
1.5. Автоматическое обнаружение и сопровождение траектории .....	15
1.6. Траекторное сопровождение в различных радиолокационных средствах .....	17
1.7. Вопросы моделирования системы траекторной обработки .....	20
2. АЛГОРИТМЫ КАЛМАНОВСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ .....	23
2.1. Общие сведения об алгоритмах калмановской фильтрации .....	23
2.2. Исследование точностных характеристик алгоритмов калмановской фильтрации .....	30
2.3. Дискретный калмановский фильтр оценки дальности и скорости дальномерного канала .....	32
2.4. Исследование алгоритмов $\alpha$ - $\beta$ - и $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ -фильтрации оценки дальности и скорости дальномерного канала .....	39
2.5. Дискретный калмановский фильтр зингеровской модели .....	42
2.6. Адаптивный калмановский фильтр .....	47
2.7. Калмановский фильтр со случайной структурой .....	55
3. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ .....	71
3.1. Анализ условий применения ИИС УВД .....	71
3.2. Вектор скорости воздушного судна в районе аэродрома .....	73
3.3. Модель ускорения воздушного судна с учетом его кинематических параметров .....	75
3.4. Синтез дальномерного канала ИИС с учетом кинематических параметров воздушного судна .....	80
3.5. Синтез дальномерного канала ИИС с учетом кинематических и динамических параметров воздушного судна .....	95

4. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ С ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКОЙ ИНФОРМАЦИИ .....	110
4.1. ИИС с применением третичной обработки радиолокационной информации .....	110
4.2. Разработка модели движения воздушного судна в ИИС с применением третичной обработки радиолокационной информации .....	117
4.3. Алгоритм функционирования дальномерного канала ИИС с применением третичной обработки радиолокационной информации .....	131
4.4. Функциональная схема дальномерного канала ИИС с применением третичной обработки радиолокационной информации .....	137
4.5. Исследование точностных характеристик алгоритма функционирования дальномерного канала ИИС с применением третичной обработки радиолокационной информации .....	141
5. ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЛГОРИТМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДАЛЬНОМЕРНОГО КАНАЛА ИИС УВД С ПРИМЕНЕНИЕМ ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ .....	146
5.1. Показатели эффективности ИИС УВД .....	146
5.2. Влияние точностных характеристик ИИС на пропускную способность и уровень безопасности полетов воздушных судов .....	147
5.3. Влияние точностных характеристик ИИС на безопасность воздушного движения и пропускную способность воздушных судов .....	151
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	154
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	155

Научное электронное издание

ПАНАСЮК Юрий Николаевич  
ПУДОВКИН Анатолий Петрович  
СУСТИН Александр Иванович

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ  
В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ  
СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ  
ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Монография

Редактор Л. В. Комбарова  
Графический и мультимедийный дизайнер Т. Ю. Зотова  
Обложка, тиражирование, упаковка Л. В. Комбаровой

ISBN 978-5-8265-2988-1



Подписано к использованию 05.02.2026.  
Тираж 50 шт. Заказ № 13  
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5,  
помещение 2, к. 14  
Тел./факс (4752) 63-81-08.  
E-mail: izdatelstvo@tstu.ru