

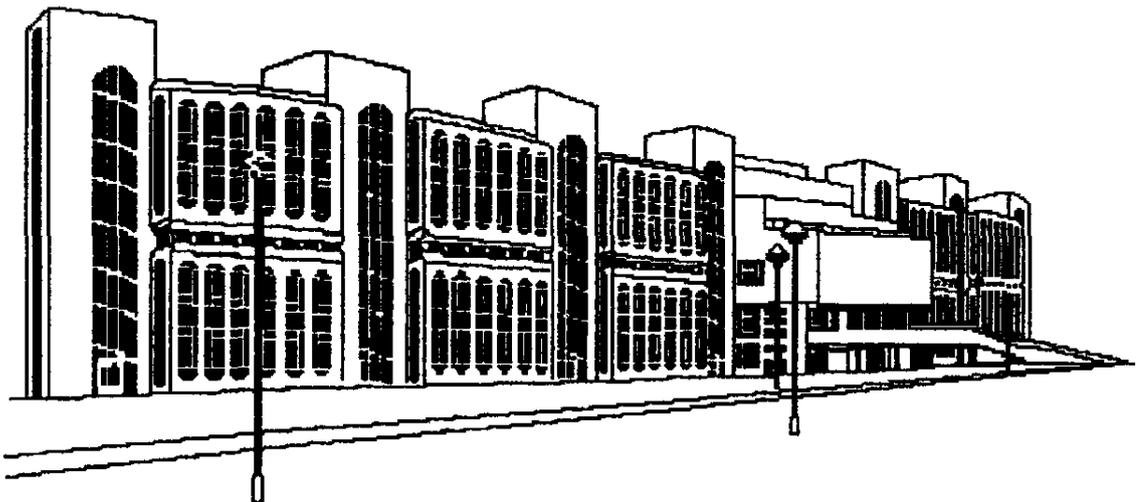
**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

Л.Е.Рудельсон

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ**

Часть II

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ



Москва – 2006

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

**Кафедра вычислительных машин, комплексов, систем и сетей
Л.Е.Рудельсон**

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ**

Часть II

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Книга 5

ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Утверждено Редакционно-
издательским советом МГТУ ГА
в качестве учебного пособия

Москва – 2006

ББК 0580.2
Р83

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Московского государственного технического университета ГА
Рецензенты: д-р технических наук, профессор В.Л. Кузнецов,
д-р технических наук Л.Е. Широков (ГосНИИАС)

Рудельсон Л.Е.
Р83 Программное обеспечение автоматизированных систем управления
воздушным движением. Часть II. Функциональное программное обес-
печение. Книга 5. Обработка радиолокационной информации – М.:
МГТУ ГА, 2006.- с 96.

ISBN.....

В книге в систематизированном виде с позиций программиста излагаются все фазы сбора данных, первичной, вторичной и третичной обработки радиолокационной информации, а также вопросы взаимодействия оперативного персонала с системой. Формулируются требования к программной поддержке технологии работы диспетчера с помощью представления на экранах индикаторов картины воздушной обстановки. На вход вычислительного комплекса поступают измеренные параметры движения воздушных судов, совершающих полеты. Наиболее ценным результатом их компьютерной обработки становится обновляемое с установленным темпом отображение динамически изменяющейся ситуации в воздушном пространстве. Отметки о наблюдаемых самолетах перемещаются по экрану на фоне картографии и зон метеорологических явлений, снабжаются формулярами сопровождения, дополняются списками и другими данными, формализованными регламентирующими документами гражданской авиации.

Пособие рассчитано на студентов специальностей 23.01.01 и ___.___.__ очной формы обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры ВМКСС ___.___.06 и методического совета ___.___.06.

Р 2404000000 – 032
Ц 33 (03)

ББК 0580.2
св. тем. план 2006
поз.

© Московский Государственный Технический
Университет Гражданской Авиации, 2006

Св. тем. план 2006 г.
поз.

РУДЕЛЬСОН Лев Ефимович

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Часть II

Функциональное программное обеспечение

Книга 5

Обработка радиолокационной информации

Учебное пособие

Редактор Г.В.Токарева

ЛР №020580 от 05.09.01 г.

Подписано в печать

Печать офсетная

Формат 60x84/16

6,0 уч.-изд. л.

усл.печ.л.

Заказ №

Тираж экз.

Московский Государственный Технический Университет ГА

125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д.20

Редакционно-издательский отдел

125493 Москва, ул. Пулковская, д.6а

ISBN.....

© Московский Государственный Технический
Университет Гражданской Авиации, 2006

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
1. ВВЕДЕНИЕ.....	6
1.1. Задачи и средства радиолокационного наблюдения.....	6
1.2. Принципы радиолокационного наблюдения.....	8
1.3. Первичная обработка радиолокационной информации.....	10
2. ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ В АС УВД.....	12
2.1. Принципы обработки радиолокационной информации.....	12
2.1.1. Постановка задачи.....	12
2.1.2. Сортировка и вторичная обработка информации.....	15
2.1.3. Третичная обработка информации.....	21
2.2. Алгоритмы обработки радиолокационной информации.....	24
2.2.1. Обработка данных на радиолокационных позициях.....	24
2.2.2. Анализ данных очередного обзора антенны РЛС в центре УВД.....	30
2.2.3. Автоматический захват и сопровождение ВС.....	32
2.3. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ВС.....	36
2.3.1. Обработка результатов измерений.....	36
2.3.2. Оптимальная оценка параметров траектории объекта.....	39
2.3.3. Программная реализация оценки параметров траектории.....	44
3. ОБРАБОТКА РЛИ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ НАБЛЮДЕНИЯ.....	43
3.1. Учет возможного маневрирования.....	43
3.1.1. Логика обнаружения маневра.....	43
3.1.2. Обработка информации о маневрирующих объектах.....	44
3.2. Обобщение данных нескольких источников.....	51
3.3. Вероятностные модели и процедуры отождествления.....	54
3.4. Исследование решающих правил третичной обработки.....	57
4. КОМПЛЕКСНОЕ ГИПОТЕЗНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ.....	61
4.1. Постановка и формализация задачи.....	61
4.1.1. Принципы гипотезной обработки РЛИ.....	61
4.1.2. Формализация процессов гипотезной обработки.....	64
4.1.3. Формирование гипотез.....	69
4.1.4. Алгоритмы гипотезного сопровождения.....	74
4.2. Объединение информации от двух источников: ПРЛ и ВРЛ.....	77
5. ФУНКЦИИ ВВОДА ДИСПЕТЧЕРОВ УВД ПО ОБРАБОТКЕ РЛИ.....	85
5.1. Отображение информации на экране диспетчера УВД.....	85
5.1.1. Организация диалога с системой.....	85
5.1.2. Картографическая информация.....	86
5.1.3. Динамическая информация.....	87
5.2. Функции ввода диспетчера.....	89
5.2.1. Классификация функций ввода.....	90
5.2.2. Прямые функции ввода.....	92
5.2.3. Функции ввода с аргументом.....	94
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	100
7. ЛИТЕРАТУРА.....	100

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное пособие входит во вторую часть серии «Программное обеспечение автоматизированных систем управления воздушным движением» (ПО АСУ ВД), подготовленной кафедрой Вычислительных машин, комплексов, систем и сетей для организации учебного процесса в рамках одноименной дисциплины. В соответствии с традиционным делением ПО на системную и функциональную составляющие, первая часть «Системное программное обеспечение» объединяет в своем составе следующие книги:

- Книга 1. Информационная база автоматизированных систем организации воздушного движения.
- Книга 2. Основы операционных систем реального времени.
- Книга 3. Управление периферией и вспомогательными процессами.

Вторая часть «Функциональное программное обеспечение» посвящена основным задачам, для решения которых развертываются системы УВД – аэронавигации и управлению потоками воздушного движения. Она содержит книги:

- Книга 4. Модель использования воздушного пространства. Обработка плановой информации.
- Книга 5. Обработка радиолокационной информации.
- Книга 6. Обработка данных автоматического зависимого наблюдения.
- Книга 7. Обработка метеорологической информации.
- Книга 8. Программная поддержка интегрированной технологии УВД.

Книга должна восполнить отсутствие учебной литературы по курсу. Назначение ПО – качественная поддержка диспетчерского персонала в его профессиональной деятельности. Достигается эта цель в первую очередь за счет представления на экранах индикаторов картины воздушной обстановки. На вход вычислительного комплекса поступают измеренные параметры движения воздушных судов, совершающих полеты. Наиболее ценным результатом их обработки средствами ПО становится обновляемое с установленным темпом отображение динамически изменяющейся ситуации в воздушном пространстве. Отметки о наблюдаемых самолетах перемещаются по экрану на фоне картографии и зон метеорологических явлений, снабжаются формулярами сопровождения, дополняются списками и другими данными, формализованными регламентирующими документами гражданской авиации. Работа такой системы немыслима без поддержки новых информационных и вычислительных технологий.

Книга может использоваться в качестве самостоятельного пособия как по системам организации воздушного движения и планирования потоков воздушных судов, так и по средствам программной поддержки диспетчерского персонала на всех этапах планирования и управления воздушным движением.

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. ЗАДАЧИ И СРЕДСТВА РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ. Деятельность диспетчера управления воздушным движением (УВД) основана на построении и анализе мысленного образа складывающейся в его секторе воздушной обстановки и тенденций ее развития [1]. Для создания такой модели ему необходимо предоставить полноценную исходную информацию, фактическую и прогнозируемую, о местоположении контролируемых воздушных судов (ВС), о курсе и скорости движения, об их плановых траекториях, о метеоусловиях. Данные должны отображаться в удобном для восприятия виде и не требовать дополнительных преобразований в процессе решения диспетчером основной задачи.

Определение пространственного места ВС, его скорости и направления движения в последовательные моменты времени составляет практический аспект воздушной навигации – прикладной науки о методах и средствах формирования и реализации плановой пространственно-временной траектории полета, обеспечивающих перемещение ВС из одной точки земной поверхности в другую. Навигационная задача решается по каждому участнику движения с помощью бортовой аппаратуры – экипажами, совершающими полеты, а также по всей их совокупности – средствами наземных центров УВД. В последнем случае для измерения координат и скоростей движущихся ВС используются радиолокационные станции (РЛС) и автоматические радиопеленгаторы (АРП), а также результаты работы бортовой аппаратуры, поступающие в центр и обобщаемые программным обеспечением (ПО) автоматизированных систем (АС) УВД.

В настоящее время основным источником информации о воздушной обстановке являются РЛС. Специалистам, разрабатывающим ПО, для успешной работы необходимо владеть хотя бы элементарными знаниями принципов радиолокации, а также основных характеристик радиолокаторов. Все многообразие таких характеристик принято классифицировать [1] на три группы: тактические, эксплуатационные и технические. Первые определяют возможности использования РЛС. Это *назначение*, в соответствии с которым ПО сортирует поступающие данные для дальнейшего преобразования и использования. По признаку назначения можно выделить аэродромные и трассовые, посадочные, обзора летного поля, метеорологические радиолокаторы. Другой тактической характеристикой называют *точку стояния*, координаты которой необходимы ПО для преобразования измеренного положения ВС в единую систему отсчета.

Особое место среди тактических характеристик занимает *зона видимости*, т.е. область пространства, в которой РЛС в нормальных условиях эксплуатации стабильно наблюдает ВС с заданными вероятностями обнаружения и ложной тревоги. Зону видимости обзорных РЛС называют также зоной действия или зоной обзора и представляют обычно как объем воздушного пространства (ВП), образуемый вращением диаграммы направленности ан-

тенны вокруг
 кальной оси (оси H на
 рис. 1.1). В этой обла-
 сти станция ведет не-
 прерывное радиолока-
 ционное наблюдение.
 Границы зоны видимо-
 сти определяются мак-
 симальной и мини-
 мальной дальностями
 наблюдения и предела-
 ми по азимуту и углу
 места. ПО использует
 эти параметры для про-
 верки наличия обнару-
 женного объекта.

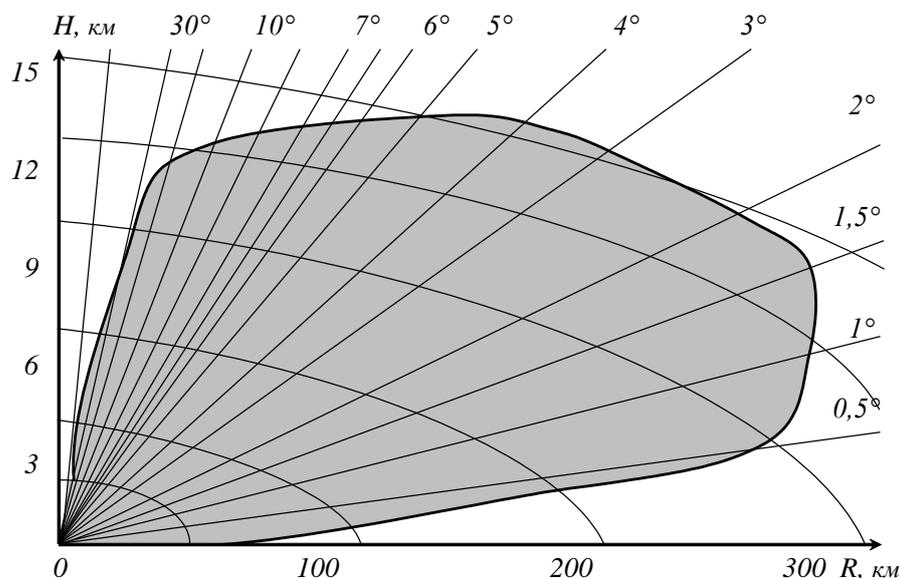


Рис. 1.1. Зона видимости обзорной РЛС

За время обзора луч антенны производит однократный обход всей зоны видимости. Определяемые *координаты* и точность их измерения зависят от назначения станции. Обзорные РЛС, как правило, двухкоординатные, они измеряют дальность и азимут. Посадочные радиолокаторы трехкоординатные, помимо названных величин с их помощью определяют угол места воздушного объекта. *Точность измерений* задают среднеквадратической погрешностью σ . *Разрешающая способность* станции по каждой координате характеризует возможности раздельного наблюдения близко расположенных ВС, совершающих полеты. Для ПО эти характеристики важны в фазах обнаружения, фильтрации, ассоциации и сопровождения ВС.

Помехоустойчивость – это свойство РЛС сохранять при воздействии помех заданные тактические характеристики в допустимых пределах. Источниками внешних помех являются шумы атмосферы и космоса, внутренних – флуктуационные шумы отдельных элементов приемника. Радиолокационному наблюдению могут мешать сигналы, отраженные от местных предметов, окружающих РЛС (строения, деревья, холмы, горы). Для станций сантиметрового и миллиметрового диапазоны дополнительными источниками отражений нередко становятся дождь, снегопад и град.

Эксплуатационные характеристики включают в себя показатели надежности, контроля и ремонтпригодности. Надежность традиционно оценивается коэффициентами готовности, оперативной готовности и технического использования. Ремонтпригодность – вероятностью восстановления РЛС в течение заданного времени и средним временем восстановления. В явном виде эксплуатационные характеристики не используются ПО при решении задач обработки радиолокационной информации (РЛИ).

Технические параметры РЛС задаются для обеспечения тактических и эксплуатационных показателей. Основными являются длина излучаемой волны, методы измерения дальности и угловых координат, форма зонди-

рующего сигнала, длительность и частота повторения импульсов, мощность, форма и ширина диаграммы направленности, метод и скорость обзора пространства, чувствительность приемника и т.д.

1.2. Принципы радиолокационного наблюдения. Радиолокация использует физические принципы отражения, переизлучения или собственные излучения электромагнитных волн для *обнаружения* материальных объектов, а также для *измерения* их координат и параметров движения. Процесс последовательного применения этих принципов для определения местоположения объектов с помощью радиометрических средств с учетом накопленной статистики (предыстории) их поведения (движения) представляет собой радиолокационное наблюдение. Носителями информации в данном процессе становятся радиолокационные сигналы и компьютерная память, хранящая предысторию. В зависимости от природы образования сигналов различают следующие виды наблюдения.

Первичная радиолокация (ПРЛ) основана на отражении от объектов (целей) прямых (зондирующих) сигналов, излучаемых передатчиком РЛС. Отраженный эхо-сигнал несет в себе информацию о координатах, скорости и ускорении объекта, а также о его физических особенностях, таких как размеры, конфигурация, электрические свойства. Отражающие способности цели и окружающей среды должны различаться, чтобы осуществить полноценное наблюдение, и это качество называют радиолокационной контрастностью.

Достоинство ПРЛ состоит в том, что с ее помощью можно обнаруживать объекты, не содержащие в своем составе источник излучения. Недостаток проявляется при больших удалениях и малой контрастности целей. Дальность обнаружения, как следует из уравнения радиолокации [2], обратно пропорциональна четвертой степени отношения мощности сигнала к мощности шума. Соответственно, возникают затруднения с выделением отраженных сигналов на фоне внешних и внутренних помех и с извлечением из них полезной информации. Кроме того, в АС УВД обычно применяются двухкоординатные РЛС, измеряющие дальность и азимут цели, высоту полета приходится приписывать ВС из дополнительного анализа ситуации.

Вторичная радиолокация (ВРЛ) вошла в практику УВД для преодоления этих недостатков. Ее реализация предполагает наличие на борту ВС специального ответчика (ретранслятора) осуществляющего переизлучение сигналов РЛС. Ответные сигналы обладают достаточной мощностью, чтобы значительно повысить дальность действия РЛС и достоверность информации. Появляется возможность передавать дополнительные данные (государственная принадлежность, позывной, показания бортовой аппаратуры, в том числе – высота полета). Недостаток метода состоит в необходимости собственно ответчика и в снижении точностных характеристик определения дальности и угловых координат.

Третий вид наблюдения – *пассивная радиолокация* – основана на приеме сигналов собственного радиоизлучения объектов. В гражданской авиации (ГА) она используется, главным образом, для наблюдения полетов маловы-

сотной авиации с помощью пеленгации переговоров пилота с диспетчерами.

Радиолокационное обнаружение и определение параметров местоположения и движения объектов основано [2] на постоянстве скорости c и прямолинейности распространения электромагнитных волн в однородной среде. Эти свойства позволяют вычислять расстояние путем преобразования измеренного времени прохождения излучаемых волн от РЛС до цели и обратно. Если это время составляет τ , тогда дальность D цели составит $D = c\tau/2$. Упрощенная временная диаграмма, иллюстрирующая принцип расчета дальности, представлена на рис. 1.2. Для получения величины расстояния до обнаруженного объекта достаточно замерить интервал τ времени от момента излучения (диаграмма *а*) до момента приема эхо-сигнала (диаграмма *б*). Для оценки усложнения этой задачи, возникающего при переходе от идеальной схемы к реальным измерениям, на диаграмме *с*) показан пример смеси отраженного сигнала с шумом. Подсказан путь выявления эхо-сигнала на фоне помех, основанный на сравнении величины поступающей (текущей) амплитуды с пороговым значением, превышение которого приводит к принятию решения о наличии отраженного импульса на входе приемника.

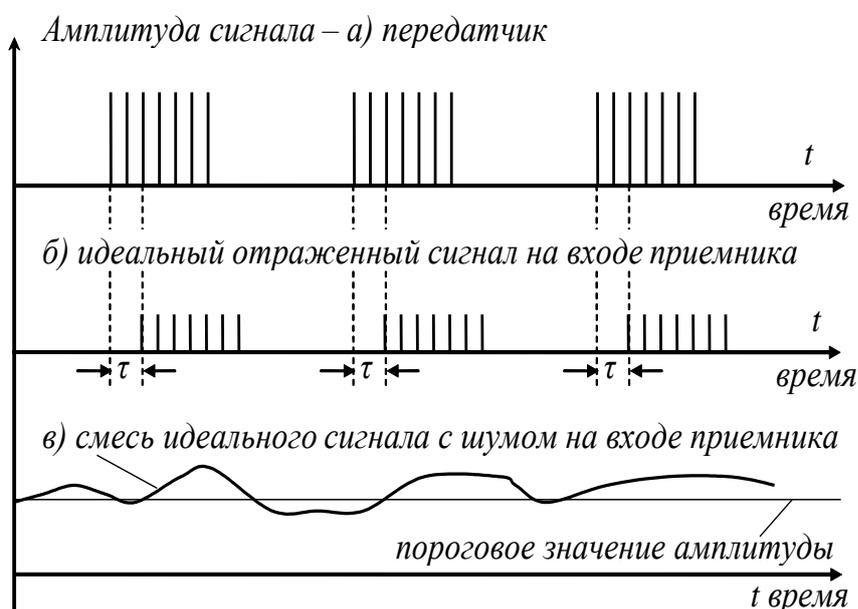


Рис. 1.2. Упрощенная временная диаграмма определения дальности обнаруженного объекта

Измерение угловых координат – пеленгация – также осуществляется на основе запаздывания принимаемых сигналов, которое зависит от направления на цель. С его изменением обновляются фазовые соотношения отраженных сигналов и их результирующая амплитуда, что позволяет определить азимут и угол места. На практике к этому средству прибегают при наблюдении ВС в зонах, не охваченных излучением РЛС, а при наличии поля, как и для расчета дальности, используют измеренное время. Для расчета азимута α это время Δt , в течение которого антенна в своем вращательном движении вокруг оси с известной угловой скоростью ω проходит сектор от направления на север до направления на обнаруженный объект: $\alpha = \omega \cdot \Delta t$. Посадочные радиолокаторы (высотомеры), совершающие сканирование в вертикальной плоскости, определяют угол места с помощью того же принципа преобразо-

вания (в угловые величины) времени прохождения лучом антенны от ее начального положения до обнаружения цели.

Аналогично решены задачи измерения векторов скорости движения ВС ГА. В принципе, амплитуда эхо-сигнала содержит все необходимые данные. Несущая частота отраженного или переизлученного радиолокационного сигнала тоже несет информацию о радиальной скорости цели, заключенную в величине ее доплеровского сдвига. Однако на практике распространение получили алгоритмические методы расчета вектора скорости на основе уравнений движения с учетом предыстории полета. В системах ВРЛ истинная скорость ВС измеряется на борту и по запросу ретранслируется в наземный центр ответчиком.

1.3. ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ. Сформулированная выше задача предоставления диспетчеру полноценной картины воздушной обстановки о местоположении контролируемых ВС, о курсе и скорости их движения, традиционно решается в системах УВД в три этапа: первичная, вторичная и третичная обработка РЛИ. Первый этап, как правило, реализуется на радиолокационных позициях (РЛП). С этой целью в составе единого радиолокационного комплекса (РЛК) организуется совместная работа средств обнаружения ПРЛ и ВРЛ, аппаратуры или программно-аппаратных средств первичной обработки РЛИ, устройств преобразования и передачи информации, а также дополнительного оборудования. В этом качестве могут использоваться метеоприставки для радиолокационного наблюдения за атмосферными явлениями и сдвигом (аномалиями) ветра, радиопеленгаторы и т.д.

Задача первого этапа – принятие решения об обнаружении цели в произвольной точке зоны видимости РЛС на текущем обзоре. Стохастический характер процесса радиолокационных измерений постулирует, что при наличии ВС в наблюдаемом объеме ВП существует конечная вероятность пропуска, т.е. принятия решения о его отсутствии, так же как при отсутствии ВС возможна «ложная тревога», т.е. принятие решения о поступлении отраженного сигнала там, где его не было. Сказанное поясняет диаграмма *с*) рис. 1.2: если выбросы флуктуирующих шумов превосходят порог на достаточном протяжении пачки зондирующих импульсов, то считается, что принят эхо-сигнал, а если сочетание ослабленного отраженного сигнала диаграммы *б*) со спадом амплитуды шума не превосходит порог или превосходит его недостаточно долго, тогда обнаружения не происходит. Это правило формализовано как критерий из «*n* по *m*», который реализуется счетчиком импульсов пачки эхо-сигнала: если передатчик посылал *m* импульсов, а приемником зафиксировано не менее *n* отраженных импульсов, то цель обнаружена, если поступило менее *n* импульсов, то цели нет.

По принятии решения о наличии ВС, аппаратура первичной обработки информации (АПОИ) или моделирующая ее работу компьютерная радиодиагностика, в соответствии с диаграммами рис. 1.2, вычисляет полярные координаты обнаруженной цели, преобразуя соответствующие значения вре-

мени в дальность и азимут. При наличии данных ПРЛ и ВРЛ по одному ВС производится объединение информации: в качестве оценки координаты выбирается ее наиболее точное значение. Известно, что ВРЛ определяет азимут с меньшей погрешностью. В то же время дальность измеряется менее точно, поскольку трудно учесть задержки сигнала при запуске ответчика. Далее полярные координаты преобразуются в декартовы, упаковываются в кодограмму сообщения и направляются в канал для передачи в центр УВД. Помимо координатной информации и дополнительных данных ВРЛ, сообщения РЛК содержат сведения об областях атмосферных явлений, об измеренном пеленге, а также о моментах прохождения лучом антенны направления на север и последовательные моменты пересечения им границ тридцатиградусных секторов кругового обзора относительно севера.

Выполненных действий недостаточно для формирования полноценной картины воздушной обстановки на экранах диспетчерского состава АС УВД. В районах с высокой интенсивностью полетов на каждом обзоре обнаруживаются ложные отметки, по которым ПО пытается «завязать» траектории движения ВС и сохраняет их десятки секунд. В сложных условиях наблюдения, при наличии групповых и маневрирующих целей, а также помех, пропусков и противоречий в информации, полученной в центре управления от различных источников, в режиме просмотра текущих (обнаруженных на данном обзоре) точек на экране диспетчера отображается «звездное небо», усеянное отметками ВС. В периоды обильного снегопада подобная картина наблюдается даже при отсутствии полетов. Метки текущего положения сохраняются на индикаторе в течение установленного алгоритмами обработки РЛИ периода «жизни», после чего исчезают, однако на смену им приходят другие, и общее восприятие сохраняется.

Освободить диспетчера от избыточной пестроты символов, создать достоверное однозначное отображение ситуации – задача следующих этапов обработки РЛИ. Для ее решения в центре УВД сосредотачиваются результаты работы АПОИ всех РЛК, принадлежащих системе. На основании измерений каждого из них ПО выполняет вторичную обработку информации (ВОИ), позволяющую построить траектории движения наблюдаемых ВС в «чистом» виде. Анализу методов и алгоритмов ВОИ посвящена первая глава настоящей книги. Во второй и третьей главах рассмотрены принципы следующего этапа, третичной обработки информации (ТОИ), на котором, для повышения качества отображаемых диспетчерам данных, производится обобщение траекторий одних и тех же ВС, построенных по результатам измерений разных источников, одновременно наблюдающих эти объекты. Заключительная глава излагает вопросы программной поддержки пультовых функций, предназначенных для взаимодействия диспетчерского персонала АС УВД с комплексом программ (КП) обработки РЛИ.

В книге использованы материалы, подготовленные известными специалистами в области обработки РЛИ авиационных систем: д.т.н. А.А. Егоровой, д.т.н. Ю.В. Ивановым, д.т.н. С.П. Панько, д.т.н. Э.М. Хазен, д.т.н. Л.Е.

2. ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ В АС УВД

2.1. ПРИНЦИПЫ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

2.1.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. Замысел схемы обработки радиолокационной информации зародился в военной сфере. Среди офицеров-зенитчиков всегда существовала мощная прослойка инициативных и эрудированных ртематиков. Возрастание скоростей и маневренности самолетов – воздушных целей – привели к ситуации, когда вести огонь по ним, используя только глаза и руки человека, оказалось практически бессмысленно. Определить точку пространства, на которую наводили орудия артиллерийские расчеты, становилось непосильным без применения средств автоматизации. Математикам нетрудно было найти аналогию для вычисления точки встречи снаряда с целью – с известными задачами астрономии. Еще в раннем средневековье люди умели предсказывать даты и время солнечных и лунных затмений. Появление в научном обиходе законов Кеплера позволило превратить накопленные эмпирические знания в математический аппарат, позволяющий рассчитать орбиту любой планеты. Было заманчиво перенести эти хорошо известные методы в область управления артиллерийским зенитным огнем.

Препятствием послужило отсутствие в бою математического описания траектории движения – «орбиты» цели. Ее нужно было построить по результатам наблюдения в реальном масштабе времени. Радиолокаторы давали возможность измерять мгновенное местоположение движущегося объекта, но проблема построения его траектории требовала своего решения. На первых порах приборы управления огнем устанавливались на каждом орудии, позднее оказалась предпочтительнее централизованная схема обработки данных о воздушном противнике – с одной стороны – и о собственных ресурсах противодействия налету – с другой. Гражданская авиация унаследовала эту схему. Для ее формализации воспользуемся следующей постановкой.

Совокупность операций по отбору и идентификации единичных измерений местоположения ВС, по завязке, построению и сбросу траекторий, по объединению траекторных данных от нескольких источников – составляет содержание вторичной и третичной обработки результатов радиолокационного наблюдения. Для решения этих задач в ПО АС УВД предусмотрен комплекс программ (КП) обработки РЛИ. Его методическую основу составляет критерий максимума апостериорной вероятности правильного объединения различных измерений и прокладки наблюдаемых траекторий. Применение критерия состоит в следующем. На основании n измерений текущих параметров движения x_1, x_2, \dots, x_n , выполненных с погрешностью, необходимо оценить параметры траектории $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$. Считается, что закон распределения вероятностей $p(x_1, x_2, \dots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$ известен, но неизвестны пара-

метры $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$. Их нужно выбрать так, чтобы при измеренных значениях x_1, x_2, \dots, x_n и при подстановке выбранных $\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \dots, \hat{\alpha}_k$, плотность распределения вероятностей $p(x_1, x_2, \dots, x_n, \hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \dots, \hat{\alpha}_k)$ оказывалась максимальной [3].

КП обработки РЛИ входит в состав ПО АС УВД и предназначен для приема, преобразования и накопления данных радиолокационного наблюдения, для подготовки к отображению полученных результатов на экране диспетчера в виде воздушной обстановки, а также для выполнения пультовых функций взаимодействия оперативного персонала с системой. Входной информацией для КП служат кодограммы сообщений о наблюдаемых объектах. Измеренные данные, обработанные АПОИ, поступают по мере обнаружения ВС от источников РЛИ на каждом обзоре антенны. Кроме того, вводятся данные о техническом состоянии РЛК и команды диспетчеров. Суммарный поток сообщений образуют M РЛК, каждый m -й из которых наблюдает N_m ВС, находящихся в его зоне видимости, при этом $m = \overline{1, M}$; $\sum_m N_m = kN$, где k –

коэффициент перекрытия радиолокационного поля, учитывающий возможности одновременного наблюдения цели несколькими источниками. Среди совокупности полученных от любого m -го АПОИ меток обнаруженных ВС могут быть ложные, не относящиеся ни к одному ВС в зоне действия системы, и могут отсутствовать отметки о некоторых ВС, реально совершающих полеты. Координаты наблюдаемых целей измеряются со случайными ошибками, статистические характеристики которых известны по каждому РЛК.

КП обработки РЛИ обеспечивает непрерывную прокладку траекторий (проводку) всех ВС, по которым поступает информация, и отображает картину воздушной обстановки таким образом, чтобы каждому сопровождаемому ВС соответствовала одна метка на экране, причем символ метки характеризует ее статус (этап обработки) – первичная, вторичная и т.д. При решении этой задачи возникают следующие проблемы:

- объединение отметок, относящихся к одному ВС, в траектории;
- отождествление измеренных данных, полученных по одному ВС от разных источников (не только от РЛК), а также с плановой информацией;
- отбор и удаление максимально возможного числа ложных отметок;
- восстановление и экстраполяция информации при потере радиолокационного сопровождения ВС на любом РЛК в течение нескольких обзоров;
- статистическое повышение точностных характеристик траекторий.

В целях повышения надежности и непрерывности сопровождения ВС производится параллельная (дублирующая) обработка траекторий по источникам. В каждой точке ВП системы назначается, в зависимости от значения коэффициента k перекрытия, до трех «ответственных» РЛК и по любому ВС может быть построено до трех траекторий. Это позволяет вести наблюдение при потере информации на одном или двух РЛК. В дальнейшем, на этапе ТОИ, дублирующие траектории отождествляются, и на экране диспетчера отображается только одна из них по каждому ВС.

Обработка РЛИ в центре управления полетами осуществляется в три

этапа: сортировка, ВОИ и ТОИ. На первом из них входной поток РЛИ сортируется по РЛК и по областям контролируемого пространства. Вводится сетка квадратов, с избытком покрывающая зону действия АС УВД. В каждом таком квадрате назначаются до трех ответственных РЛК, текущие отметки от которых используются при обработке РЛИ. Текущие отметки от других РЛК отсеиваются. Входные сообщения от АПОИ преобразуются к виду, принятому в системе, и упорядочиваются для дальнейшей обработки. Это позволяет снизить размерность задачи отождествления текущих отметок и траекторий.

Специфика названных задач состоит в принятии решений в условиях неопределенности, что придает вычислительным алгоритмам комбинаторный характер. Для программной реализации принципиальным становится вопрос создания специальной структуры обработки РЛИ, которая позволила бы отбирать и накапливать данные таким образом, чтобы в процессе принятия решения рассматривались наиболее правдоподобные варианты, и чтобы число этих вариантов было бы приемлемым по затратам времени. С этой целью, в ПО развитых систем УВД, ВП разбивают на непересекающиеся области, в которых проводятся селекция, накопление и последующая совместная обработка информации. В этом и состоит назначение квадратной сетки, построенной обычно с дискретом (шагом) квантования порядка десяти километров.

На этапе ВОИ осуществляются автоматический захват и сопровождение траекторий целей отдельно для каждого РЛК. Первичные радиации щееонные отметки, по которым не удалось «завязать» траекторию, выдаются на отображение в виде специального символа. Обработка производится по информации каждого «ответственного» РЛК только для ограниченного числа точек, попавших в соответствующий квадрат, что резко снижает размерность задачи перебора вариантов. Напомним, что по каждому ВС на этом этапе может быть образовано не более трех траекторий.

На этапе ТОИ используется установленная структурой ВП нарезка секторов управления (СУ). На территории каждого из них производится накопление траекторий, построенных по данным разных РЛК (до трех траекторий по одному ВС), и их последующая обработка – отождествление. За каждым СУ закрепляется до трех ответственных РЛК, и для организации обобщенных траекторий используются только результаты ВОИ по их данным. На отображение обобщенные траектории поступают также по диспетчерским секторам.

Излагаемая схема обработки РЛИ, основанная на разбиении ВП на области в соответствии со структурным замыслом системы УВД, позволяет:

- использовать накопление информации и групповые методы ее обработки, а также повысить вероятность принятия правильных решений;
- сократить количество перебираемых вариантов по сотням объектов до приемлемого уровня (единиц переборов по десяткам объектам);
- избавиться от избыточной информации без ущерба для надежности и качества работы с помощью удаления на всех этапах обработки отметок и траекторий, не попавших в зону действия РЛК или системы.

Особое значение эти преимущества приобретают в зонах с высокой ин-

тенсивностью полетов, в условиях которых на первый план выдвигается необходимость корректного разбиения общей задачи на составные части, решение которых приводит в своей совокупности к достижению цели системы в реальном масштабе времени. В данном случае таким разбиением является сортировка РЛИ по сетке квадратов, по секторам УВД и по источникам, выполняемая унифицированными методами и позволяющая в ходе своего исполнения отсеивать (отбраковывать) избыточную информацию.

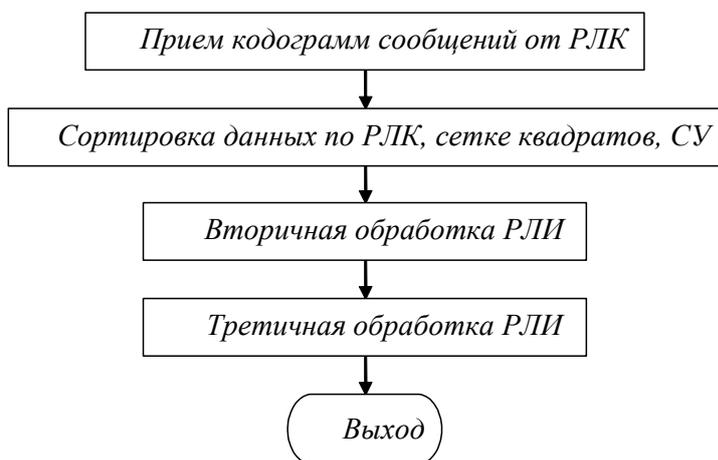


Рис. 2.1. Упрощенная схема обработки радиолокационной информации в ПО АС УВД

программ ВОИ и ТОИ. Однако в момент, когда в процессе сортировки обнаруживается сообщение о прохождении лучом антенны направления на очередную тридцатиградусную азимутальную метку, автоматически радиции ется заявка операционной системе на подключение программ ВОИ по соответствующему РЛК. После завершения ВОИ в очередном СУ формируется заявка на подключение ТОИ по тому же сектору УВД.

В целях обеспечения равномерности обработки, уменьшения среднего времени прохождения потока РЛИ через алгоритмы КП и поддержания его работоспособности в режиме информационной перегрузки – осуществляется планирование последовательности работ на этапах ВОИ и ТОИ.

2.1.2. СОРТИРОВКА И ВТОРИЧНАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ¹. На этапе сортировки решаются следующие задачи:

- распаковка и сортировка кодограмм входных сообщений;
- исключение информации, не подлежащей дальнейшей обработке;
- формирование списка текущих точек (ТТ) по РЛК и квадратам;
- обработка кодограмм меток севера, тридцатиградусных меток и тактировка (формирование заявок) работы группы программ ВОИ.

Процесс радиолокационных измерений координат неизбежно сопровождается ошибками. Принципиально для определения навигационных пара-

¹ Раздел подготовлен и любезно предоставлен для публикации д.т.н Э.М.Хазен, которой автор выражает глубокую признательность за участие в работе над данным пособием.

метров движения достаточно двух последовательных отметок. Однако нет никаких гарантий, что обе отметки являются истинными. Для повышения точности используют несколько отметок, полученных по результатам последовательных обзоров РЛС. Это позволяет усреднить результаты многих наблюдений и уменьшить влияние случайных ошибок. Такое усреднение называют сглаживанием координат. Однако любое ВС в своем движении может изменять курс в соответствии с полетным заданием, и тогда смещение отметки отражает ее истинное местоположение. В результате сглаживания эти особенности теряются или определяются с известной задержкой. Таким образом, сглаживание координат связано с ошибками двух видов:

- недостаточная фильтрация погрешности измерений местоположения ВС в случае прямолинейного равномерного движения (слабое сглаживание);
- искажение реальных траекторий маневрирующих объектов в предположении прямолинейного равномерного движения (сильное сглаживание).

Выбор алгоритма сглаживания основан на анализе статистических характеристик ошибок измерения координат и гипотез о возможной траектории движения объекта. Предполагается, что ВС движется с постоянным ускорением, в том числе нулевым. Движение осуществляется по линии постоянной кривизны (прямая или окружность постоянного радиуса). Маневром считается изменение ускорения или кривизны линии. Накопление точек предыстории и обработка данных производится на «постоянных» участках траектории, пока не обнаруживаются изменения ускорения и кривизны. Сигналом обнаружения маневра является выход экстраполированных точек за пределы строга прогнозирования траектории. Как следствие, система уменьшает количество учитываемых точек предыстории, делая сглаживание слабым, что упрощает задачу расчета новых параметров движения объекта.

При очередном подключении программ ВОИ планировщик заданий определяет последовательность РЛК, тридцатиградусных меток и квадратов, информация которых подлежит обработке на текущем такте (включении). По каждому квадрату на этапе ВОИ решаются следующие задачи:

- отбор ТТ, поступивших от АПОИ, подходящих к ранее образованным траекториям – экстраполяционным точкам ($ЭТ_{ВОИ}$);
- сглаживание $ЭТ_{ВОИ}$ с помощью подобранных к ним ТТ;
- выделение ТТ, не привязанных ни к одной $ЭТ_{ВОИ}$, и образование из них новых траекторий;
- пересчет показателей качества по траекториям и определение истинности или ложности $ЭТ_{ВОИ}$;
- формирование списков $ЭТ_{ВОИ}$ по квадратам и СУ, тактировка ГОИ.

Для объединения отметок ПРЛ и ВРЛ на этапе ВОИ нужна радиация вращения антенн радиолокаторов, на которых установлены соответствующие излучатели. Для радаров с совмещенными каналами ПРЛ и ВРЛ это выполняется автоматически. Если антенны разнесены, то синхронизацию осуществляют специальные алгоритмы. Алгоритмы вторичной обработки информации должны решать задачу автозахвата и сопровождения тра-

ектории ВС по точкам-измерениям ТТ, не имеющим кода ответчика ВРЛ.

Обозначим через $Z^T(n) = (x_1(n), \dots, x_k(n))$ координаты точек-измерений, полученных в дискретные моменты времени $t_n = n(\Delta t)$, при $n = 1, 2, \dots$, в разных обзорах. Здесь Δt обозначает период обзора РЛС; верхний индекс в Z^T обозначает транспонирование вектора-столбца Z . Если имеется какая-либо последовательность точек-измерений $Z(1), Z(2), \dots, Z(n)$, которые попадают в стробы предполагаемой траектории, проводимой путем последовательного сглаживания этих измерений, то неизвестно, представляет ли эта траектория истинную траекторию ВС или она проведена по ложным и смешанным точкам-измерениям, полученным от разных ВС. Для решения задачи автозахвата и сопровождения требуется выбирать наилучшие, наиболее правдоподобные варианты объединения точек-измерений в траектории и принимать решения об истинности или ложности варианта траектории.

Алгоритм решения этой задачи был предложен, разработан и опубликован в работах Э.М. Хазен [Д1-Д5]²; в работах [Д4, Д5] представлен более полный алгоритм, включающий ветвление и сокращение перебора вариантов траекторий, а в статье [Д2] разработан его частный случай, предназначенная для гражданской авиации. Алгоритм внедрен в АС УВД «Стрела», развернутой в Северо-Кавказском регионе, и проявил высокую эффективность и помехоустойчивость в условиях большого числа ложных точек, переотражений от местных предметов и других помех.

Сглаживание текущих координат предполагаемой траектории осуществляется по рекуррентным формулам оптимальной фильтрации [Д2-Д8]. Пусть ошибки измерений координат описываются k -мерным гауссовским распределением, и они независимы в разных обзорах (т.е. при разных n). В общем случае рекуррентная фильтрация параметров траектории может производиться последовательно при получении разнородных измерений, например, при получении иногда только пеленга, или иногда при наличии, а иногда при отсутствии измерения радиальной скорости. Пусть мы имеем линейное соотношение, связывающее радиальную скорость V_r с вектором скорости (V_x, V_y) , $V_r = V_x \cos \alpha + V_y \sin \alpha$, где угол α можно считать достаточно точно известным для сопровождаемой траектории. Тогда измерение радиальной скорости можно включить в рекуррентные формулы оптимальной линейной фильтрации [Д8]. Далее для простоты рассматривается случай однородных измерений, когда значение k остается постоянным при разных n .

Пусть точки-измерения действительно относятся к одной истинной траектории ВС. Обозначим это утверждение как гипотезу H_1 – гипотезу об истинности траектории. Обозначим через $\hat{a}(n-1)$ экстраполированное, т.е. ожидаемое, значение координат траектории в момент t_n , полученное на основе измерений $Z(1), \dots, Z(n-1)$. Доказано [Д4-Д6], что отклонения измеренных значений $Z(n)$ от их ожидаемых экстраполированных значений $\hat{a}(n-1)$

² Двойной нумерацией Д1-Д8 указаны ссылки на источники дополнительной литературы по теме.

независимы при разных n . Обозначим $\Delta Z_n = Z(n) - \hat{a}(n-1)$. Обозначим через $D(n)$ матрицу ковариаций этого вектора-отклонения $Z(n) - \hat{a}(n-1)$. Ее значение можно вычислить в зависимости от матрицы ковариаций ошибок измерений $Z(n)$, от используемого фильтра и от числа измерений n . Тогда при истинности гипотезы H_1 совместная плотность распределения вероятностей для отклонений: $P(\Delta Z_1, \dots, \Delta Z_n | H_1) = \prod_{j=1}^n (2\pi)^{-k/2} |D(j)|^{-1/2} \exp\left\{-\frac{1}{2} R^2(j)\right\}$, где $R^2(j)$ представляет собой безразмерное, «обобщенное» расстояние от измеренной точки $Z(j)$ до экстраполированной точки $\hat{a}(j-1)$:

$$R^2(j) = (Z^T(j) - \hat{a}^T(j-1))D^{-1}(j)(Z(j) - \hat{a}(j-1)).$$

В случае если последовательность точек-измерений содержит ложные и чужие точки, так что предполагаемая траектория не соответствует истинной (т.е. при отрицании гипотезы H_1 , которое обозначим как гипотезу H_2), разброс точек-измерений около экстраполированных сглаженных значений будет бóльшим. Примем, что при гипотезе H_2 , т.е. в случае ложной траектории, матрицу ковариаций отклонений ΔZ_n можно описать как $QD(n)$, где коэффициент Q характеризует увеличение разброса точек-измерений около сглаженной траектории. Определение значения Q и некоторое обоснование для этого предположения рассмотрены подробнее в [Д2]. Тогда совместная плотность распределения $P(\Delta Z_1, \dots, \Delta Z_n | H_2)$ записывается в том же виде, как и выше, с той только разницей, что вместо матрицы $D(n)$ надо подставить $QD(n)$.

Тогда логарифм отношения правдоподобия гипотез об истинности или ложности траектории на основе измерений $Z(n_0), Z(n_0+1), \dots, Z(n)$, можно записать в следующей аддитивной и рекуррентной форме. Обозначим

$$S(n) = \ln \frac{P(\Delta Z_{n_0}, \dots, \Delta Z_n | H_1)}{P(\Delta Z_{n_0}, \dots, \Delta Z_n | H_2)},$$

$$s(j) = \frac{k}{2} \ln Q + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Q} - 1\right) R^2(j); \quad j = n_0, n_0 + 1, \dots, n. \quad (2.1)$$

Тогда логарифм отношения правдоподобия равен

$$S(n) = \sum_{j=n_0+1}^n s(j) = S(n-1) + s(n); \quad S(n_0) = 0. \quad (2.2)$$

Величину $S(n)$ можно рассматривать как показатель качества траектории. Нетрудно включить в рассмотрение случай пропуска измерения, когда точка-измерение, скажем, $Z(k)$ не попадает в строб. Этому событию соответствует выполнение условия $R^2(k) \geq R^2_{str}$, где R^2_{str} – некоторое заданное значение. В этом случае логарифм отношения правдоподобия гипотез H_1 и H_2 получает отрицательное приращение, равное $\ln p/(1-F)$, где p – вероятность пропуска истинного измерения, F – вероятность появления ложной точки в стробе. Аддитивный и рекуррентный вид формулы (2.2) обеспечивает, что при обновлении новой точкой-измерением показатель качества варианта траектории получит аддитивное приращение.

Правило принятия решения при статистическом последовательном анализе гипотез H_1 и H_2 состоит в принятии гипотезы H_1 при выходе логарифма отношения правдоподобия за верхний порог A и принятии гипотезы H_2 при выходе за нижний порог. Благодаря накоплению информации (накоплению величины $S(n)$) можно увеличить вероятность правильного обнаружения истинной траектории и отсева ложных траекторий при сравнительно небольшом увеличении среднего числа n (математического ожидания числа n) измерений, наблюдаемых до принятия решения. Значения вероятностей правильных и ложных решений связаны с величинами порогов A и B .

После того, как принято решение об истинности траектории (при первом выходе показателя качества $S(n)$ за верхний порог A), информация об этой траектории выдается в виде экстраполированной точки ЭТ_{ВОИ}. До первого выхода $S(n)$ за верхний порог, т.е. до обнаружения, информация о предполагаемой траектории не отображается, и эта предполагаемая траектория существует в системе как «подпороговая», не видимая. При выходе $S(n)$ за нижний порог B , траектория сбрасывается как ложная. В дальнейшем, при сопровождении обнаруженной траектории, показатель качества продолжает рекуррентно пересчитываться по формулам (2.1), (2.2), так как привязка ложных точек к траектории не исключена вполне, и траектория может стать ложной. Рост показателя качества $S(n)$ ограничивается сверху величиной $A^* > A$, чтобы уменьшить инерционность при принятии решений.

При сопровождении обнаруженной траектории, если это единичная, достаточно изолированная траектория, то с ней (т.е. с ее ЭТ_{ВОИ}) соотносится точка-измерение ТТ, которая попадает в ее строб с наименьшим «обобщенным расстоянием» R^2 от нее. При сопровождении группы траекторий может решаться «задача о назначении» с использованием следующих известных алгоритмов и программ целочисленного линейного программирования [Д2]:

Найти такое соответствие текущих точек-измерений ТТ и ЭТ_{ВОИ}, при котором обращается в максимум сумма приращений показателей качества

$$\sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{m_2} s_{ij} \delta_{ij} \rightarrow \max,$$

при условиях $\sum_{i=1}^{m_1} \delta_{ij} \leq 1$, $\sum_{j=1}^{m_2} \delta_{ij} \leq 1$, $\sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{m_2} \delta_{ij} = \min(m_1, m_2)$, причем δ_{ij} должно быть равно 0 или 1. Здесь m_1 – число рассматриваемых ЭТ_{ВОИ}, m_2 – число ТТ.

Осуществляется также анализ приращений показателей качества с целью обнаружения маневра. При получении нескольких отрицательных приращений подряд, проверяется возможность маневра и целесообразность переключения фильтра. Описанный алгоритм предложен в [Д2] как частный случай полного алгоритма [Д3] (глава 4, §10) и в [Д5], включающего рассмотрение ветвящихся траекторий, сокращение их перебора, выбор наиболее правдоподобных вариантов, и статистический последовательный анализ для принятия решения об истинности или ложности варианта траектории.

Реализация более полного алгоритма автозахвата и сопровождения тра-

екторий ВС, предложенного и разработанного в [ДЗ-Д7], осуществлена на моделях обработки радиолокационной информации для сложных условий, при наличии большого числа ложных точек-измерений, при больших ошибках и нерегулярности измерений, при возможности сравнительно близких траекторий и подтвердила его высокую эффективность и помехоустойчивость при сравнительно скромных требованиях к производительности используемых ЭВМ. Опишем основные принципы его построения. Принципиальная схема сокращения перебора ветвящихся вариантов траекторий с сохранением наилучших (наиболее правдоподобных, или оптимальных) вариантов была предложена в [ДЗ] (глава 4, §10). Кратко опишем ее.

Пусть имеется несколько пучков ветвящихся вариантов траекторий (каждый из которых могут быть представлены в ЭВМ в виде цепного списка формуляров вариантов). Для удобства изложения, перенумеруем эти пучки индексом i . В i -й пучок входят варианты траекторий, имеющие общую начальную точку-измерение; обозначим ее TT_i . Пусть в рассматриваемом текущем n -м обзоре получено несколько новых текущих точек-измерений $TT_j(n)$, которые могут сопоставляться с вариантами траекторий и обновлять их. Индексируем варианты траекторий, входящие в один пучок, индексом k .

Для того чтобы выбирать оптимальные варианты траекторий, нужно ввести «показатель качества» для варианта траектории, по которому можно сравнивать их качество. Обозначим значение показателя качества k -го варианта из i -го пучка, имевшегося после $(n-1)$ -го обзора, через $S(i, k; n-1)$. Очень важно, чтобы выбранный показатель обладал свойствами аддитивности и рекуррентности. Тогда при обновлении k -го варианта из i -го пучка новой текущей точкой-измерением $TT_j(n)$, показатель качества получает приращение, так что $S(i, j; n) = S(i, k; n-1) + dS(k, j; n)$. Это свойство аддитивности и рекуррентности выполняется точно или с хорошим приближением для показателя качества, характеризующего правдоподобие варианта траектории. Показатель (2.1), (2.2), имеющий смысл отношения правдоподобия гипотез об истинности или ложности варианта траектории, был введен ранее в [Д5], но можно вводить и другие аддитивные показатели, рассмотренные в [Д3].

Обозначим через $S^*(i, j; n)$ значение показателя качества для наилучшего варианта, который можно получить при обновлении точкой-измерением $TT_j(n)$ «наиболее подходящего», наилучшего для нее варианта из i -го пучка. Используем рекуррентное соотношение $S^*(i, j; n) = \max_k [S^*(i, k; n-1) + dS(k, j; n)]$.

Эта формула позволяет пересчитывать значения показателей качества и обновлять пучок вариантов, причем в пучке сохраняются лучшие варианты. В этой схеме реализуется принцип, близкий к принципу динамического программирования Беллмана [Д3, Д6]. При этом число вариантов в пучке не будет возрастать экспоненциально с ростом числа обзоров n (что было бы возможным при сохранении всевозможных вариантов ветвящихся траекторий), а может быть лишь пропорциональным числу новых текущих точек $TT_j(n)$, по-

падающих в стробы к вариантам пучка, или не превосходить числа вариантов в пучке, имевшегося в предыдущем обзоре. Ветвление вариантов траекторий осуществляется не только по возможной привязке разных новых текущих точек-измерений, но также при появлении признака возможного наличия рневра; в этом случае сохраняется и продолжается также и вариант траектории, соответствующий отсутствию маневра [Д6].

Осуществляется последовательный анализ истинности или ложности для каждого варианта в пучке [Д3-Д7]. При принятии решения об истинности наилучшего варианта, он может оставаться как единственный, и информация об обнаруженной траектории выдается на выход алгоритма [Д4-Д7].

Вся основная информация, относящаяся к ЭТ_{ВОИ}, сосредоточивается в формуляре (записи) ЭТ_{ВОИ}. Здесь хранятся параметры движения ВС – координаты, вектор скорости, высота, время обновления. Вместе с ними фиксируются системные данные – точностные характеристики, показатель качества, адресные ссылки, технологические признаки и т.д. Формуляры ЭТ_{ВОИ} в своей совокупности образуют в оперативной памяти основную радиационную зону, представляющую собой линейный массив. Над ней надстраиваются списки адресов формуляров по РЛК, по квадратам, по секторам, а также по функциональным признакам, например, список впервые введенных ЭТ.

2.1.3. ТРЕТИЧНАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ. Объединение информации от нескольких разнесенных на местности РЛК получило название третичной обработки РЛИ. Решаются задачи отождествления отметок от одного ВС, полученных разными источниками, и формирования траектории по объединенным данным. Процессу ТОИ предшествует пересчет координат отметок от различных РЛС в единую систему отсчета. Все отметки приводятся к единому времени с помощью экстраполяции векторов координат к очередному моменту объединения информации. Обычно время экстраполяции невелико и допускает применение линейной экстраполяции.

Задача отождествления отметок решается в два этапа. Сначала отметки группируются по попаданию координат в строб допустимых отклонений, размеры которого зависят от погрешности оценки координат. Затем отметки отождествляются и объединяются. Если от многих РЛС в строб попадают отметки, принадлежащие нескольким ВС, то задача группирования становится многовариантной. Технологическая схема ее решения включает в себя:

- вычисление разности координат отметок внутри каждой группы;
- построение корреляционной матрицы ошибок P_i как суммы радиационных матриц ошибок группируемых координат;
- построение квадратичных форм Q_i для оценки имеющихся вариантов группирования целей с учетом корреляции измеренных параметров;
- выбор варианта группирования, для которого Q_i минимальна.

Напомним, что под корреляцией понимается зависимость между случайными величинами, не имеющая, *вообще говоря*, строго функционального характера. Для лучшего понимания следует отдавать себе отчет в том, что

понятие случайного является абстрактным, что в реальном физическом мире все события и процессы имеют свои причины и следствия. Однако мы не располагаем математическими средствами для учета всех факторов радиителности. Для решения проблем, стоящих перед человечеством, достаточно выделить главные факторы, определяющие течение исследуемых процессов, и рассматривать только их воздействия. Проще объявить процесс бросания игральных костей случайным и рассчитать вероятности возможных исходов, чем выяснять нюансы психофизиологического состояния игрока, мгновенные значения мышечных напряжений, механику полета и приземления игровых кубиков. В этом абстрагировании заложен переход от функционального радсания к вероятностному, и нетрудно объяснить, почему результат становится неоднозначным, почему используются выражения «*вообще говоря*» и т.п.

В отличие от функциональной зависимости корреляция, *как правило*, рассматривается тогда, когда одна из величин зависит не только от данной другой, но и от ряда *случайных* факторов. Зависимость между двумя случайными событиями проявляется в том, что условная вероятность одного из них при наступлении другого отличается от безусловной вероятности. Аналогично, влияние одной случайной величины на другую характеризуется условными распределениями одной из них при фиксированных значениях другой.

Числовой характеристикой совместного распределения двух случайных величин, выражающей их не разъясняемую при анализе взаимосвязь, является коэффициент корреляции, вводимый как $\rho = \rho(X_1, X_2)$ для величин X_1 и X_2 с математическими ожиданиями a_1 и a_2 и ненулевыми дисперсиями σ_1^2 и σ_2^2 . Для нормированных величин X_1 и X_2 , т.е. для $(X_1 - a_1) / \sigma_1$ и $(X_2 - a_2) / \sigma_2$, коэффициент корреляции совпадает с упомянутой выше *ковариацией*. Он симметричен относительно X_1 и X_2 и не изменяется при сдвиге начала отсчета измеряемых величин или их масштаба. Примечательно, что $-1 \leq \rho \leq 1$, а также что $|\rho| = 1$ тогда и только тогда, когда величины связаны линейной функциональной зависимостью. Если X_1 и X_2 независимы, то $\rho(X_1, X_2) = 0$. Обратное утверждение *в общем случае* неверно; о величинах, для которых $\rho = 0$ говорят, что они не коррелированы. Равенство $\rho = 0$ достигается как для независимых, так и для независимых случайных величин. Заметим, что в приложении к алгоритмам обработки радиолокационных данных это не существенно.

Наконец, корреляционная матрица P представляет собой матрицу коэффициентов корреляции нескольких случайных величин. Если X_1, \dots, X_n – случайные величины с дисперсиями $\sigma_1^2, \dots, \sigma_n^2$, то элементы ρ_{ij} матрицы P при $i \neq j$ равны коэффициентам корреляции $\rho(X_i, X_j)$, а при $i = j$ равны единице. Свойства корреляционной матрицы P определяются свойствами ковариационной матрицы Σ , рассмотренной выше при анализе выражения (2.1).

Строгое решение задачи отождествления предполагает наличие значительных компьютерных ресурсов. Для m РЛК и n наблюдаемых ВС число s вариантов группирования составляет $s = (m - 1)! \times n!$ И резко возрастает с увеличением m и n . Эвристические алгоритмы формирования единичных из-

мерений усредняют координаты объектов с помощью весовых коэффициентов, обратно пропорциональных дисперсиям ошибок каждой РЛС. Кардинальным упрощением является так называемая мозаичная обработка, при которой зона ответственности системы разделяется на непересекающиеся зоны видимости РЛК, в каждой из которых доминирующим по точности признается единственный источник, а зоны перекрытия игнорируются. В каждой такой области используются отметки от ВС, полученные этим источником. Результатом упрощения становится явление «отскока» метки ВС на экране диспетчера при переходе от одного элемента мозаики к другому. Несогласованность сопровождаемых ПО траекторий одной и той же цели по данным разных РЛС приводит к тому, что в момент смены доминирующих РЛК отметка ВС скачком меняет свое местоположение на индикаторе, в общем случае – не по курсу движения, что вносит нервозность в работу диспетчера.

В развитых АС УВД принята другая схема. На этапе ТОИ, при организации обобщенной траектории $ЭТ_{ТОИ}$ по каждому ВС, одна из сопровождаемых траекторий ВОИ назначается приоритетной, а другие считаются запасными. На основе приоритетной $ЭТ_{ВОИ}$ по данному ВС создается формуляр $ЭТ_{ТОИ}$ в основной информационной зоне КП. В него заносятся характеристики траектории, взятые из формуляра приоритетной $ЭТ_{ВОИ}$, а также адреса, показатели качества и некоторые другие параметры запасных траекторий.

По каждому СУ на этапе ТОИ решаются следующие задачи:

- формирование соответствия $ЭТ_{ВОИ}$ и $ЭТ_{ТОИ}$;
- захват и сопровождение $ЭТ_{ТОИ}$;
- смена приоритетов $ЭТ_{ВОИ}$, сброс $ЭТ_{ВОИ}$ и $ЭТ_{ТОИ}$;
- формирование списков $ЭТ_{ТОИ}$ по СУ и отображение $ЭТ_{ТОИ}$;
- привязка $ЭТ_{ТОИ}$ к плановой траектории по коду ответчика ВРЛ.

При соответствии точек очередная $ЭТ_{ТОИ}$, ближайшая к $ЭТ_{ВОИ}$, отбирается в область (строб) допустимых отклонений координат. Если она «отобразилась» в строб, то решение об отождествлении принимается при величине показателя качества $ЭТ_{ТОИ}$, превышающей верхний порог, что свидетельствует о достаточном качестве оценки параметров траектории (формула 2.2, вычисленное значение $L_n \geq A$). Если же показатель качества $ЭТ_{ТОИ}$ меньше

радициго порога, то выполняется последовательная процедура отождествления по данной паре $ЭТ_{ВОИ} - ЭТ_{ТОИ}$. Если ни одна из $ЭТ_{ТОИ}$ не отобразилась к $ЭТ_{ВОИ}$, то по $ЭТ_{ТОИ}$ производится ее захват, т.е. образуется новая обобщенная траектория, для которой анализируемая $ЭТ_{ВОИ}$ будет приоритетной. Запасных траекторий у новой $ЭТ_{ТОИ}$ нет. В случае отождествления $ЭТ_{ВОИ}$ с ранее существовавшей $ЭТ_{ТОИ}$, новая $ЭТ_{ВОИ}$ становится запасной, и между ними устанавливаются связи (адресные ссылки).

Приоритетность $ЭТ_{ВОИ}$ для данной $ЭТ_{ТОИ}$ не является постоянной. При ухудшении качества сопровождения $ЭТ_{ВОИ}$ (например, при пропусках или низком показателе качества) и при наличии запасных траекторий с лучшими характеристиками производится смена приоритетной траектории. Запасная $ЭТ_{ВОИ}$ становится приоритетной, а приоритетная – запасной. При выходе по-

казателя качества $\text{ЭТ}_{\text{ВОИ}}$ за нижний порог ее сбрасывают (удаляют), но связанная с ней $\text{ЭТ}_{\text{ТОИ}}$ подлежит сбросу только в том случае, если у нее нет запасных траекторий. В противном случае сопровождение обобщенной траектории продолжается. Смена доминирующего источника происходит не скачком, как в мозаичной схеме, а плавно, без отскока метки ВС. Диспетчер даже не замечает факта перехода цели от одного РЛК к другому.

2.2. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

2.2.1. ОБРАБОТКА ДАННЫХ НА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ПОЗИЦИЯХ. Важнейшей составной частью РЛК, входящих в состав АС УВД, является аппаратура первичной обработки информации (АПОИ), выполняющая следующие основные операции:

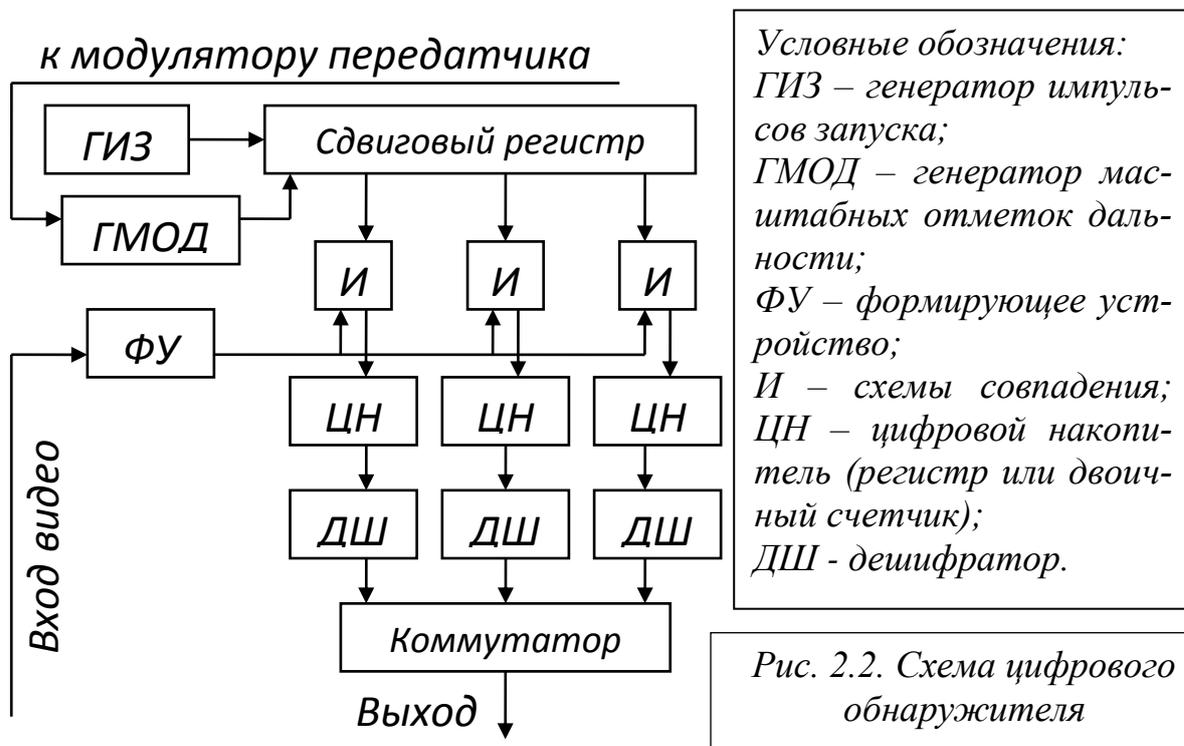
- обнаружение полезных сигналов с помощью логического обнаружителя и формирование радиолокационных отметок;
- определение пространственных координат ВС по результатам измерений в течение одного обзора РЛС.

Кроме того, в процессе первичной обработки выполняются дополнительные операции: декодирование информации, поступающей по вторичному каналу, привязка этой информации к координатам целей; формирование стандартных сообщений для передачи их через узкополосную линию связи.

Цифровая обработка радиолокационной информации позволяют эффективно использовать современную элементную базу – интегральные микросхемы высокой степени интеграции. Из приемного тракта РЛС измеренные координаты поступают на вход аппаратуры первичной обработки информации, где они кодируются, упаковываются в кодограммы и передаются в центр управления полетами. ПО АС УВД производит вычисление параметров траекторий, их «завязку», а также сглаживание и экстраполяцию координат. АПОИ является устройством сопряжения РЛС с системой, т.е. преобразователем информации о цели в стандартные сообщения. Кроме того, первичная обработка должна отсеивать помехи и выделять полезные сигналы. Оптимальной процедурой обработки при обнаружении импульсных радиосигналов является их накопление на протяжении всего времени нахождения цели в луче диаграммы направленности антенны. Аналоговые накопители – потенциалоскопы и ультразвуковые линии задержки – сложны в реализации и в эксплуатации.

Цифровые накопители конструктивно проще, и удобны для настройки в процессе использования. Идеи цифрового накопления (рис. 2.2) применительно к РЛС известны с конца пятидесятых годов, однако их массовый выпуск оказался возможным только в настоящее время на основе современной микроэлектронной базы. В цифровых системах перечисленным выше операциям обработки предшествуют вспомогательные операции двоичного квантования по амплитуде на два уровня (0 или 1) и временной дискретизации сигналов, подаваемых на АПОИ с аналогового приемного устройства РЛС.

Логика работы обнаружителя сводится к поиску ответа на вопрос: имеются ли на входе приемного устройства РЛС, сопрягаемой с АПОИ, полезный сигнал и помеха или только помеха. В зависимости от алгоритма работы обнаружителей в современных образцах реализуется весовой или критерийный метод обнаружения пачки двоично-квантованных сигналов. Обработка двоично-квантованных сигналов осуществляется на отдельных элементарных участках дальности. С этой целью наблюдаемая дальность обнаруже-



ния квантуется на дискреты дальности. Длительность каждого кванта дальности должна быть согласована с полосой пропускания приемного устройства РЛС и длительностью зондирующих импульсов.

В сдвиговый регистр (СР) в момент посылки зондирующего импульса записывается единица. Генератор масштабных отметок дальности – обычный делитель частоты – вырабатывает импульсы, период $t_{ГМОД}$ следования которых в единицах дальности соизмерим с разрешающей способностью и выбирается из соображений удобства отсчета. Импульсы этого генератора используются для перемещения (сдвига) единицы вдоль регистра. Максимальное количество L разрядов СР рассчитывается как $L = 2D/c \cdot t_{ГМОД}$, где c – скорость распространения электромагнитных волн, D – дальность видимости РЛС.

Видеосигнал поступает с выхода приемника РЛС. Если напряжение видеосигнала превышает порог ограничения, то на выходе ФУ формируется стандартный по длительности и амплитуде импульс, который записывается в соответствующий ЦН через открытую схему И. Если в текущем периоде $t_{ГМОД}$ видеосигнал отсутствовал, тогда число, записанное в ЦН, не изменится. Таким образом, движение единицы (сдвиг или суммирование) в СР синхронизируется с разверткой по дальности, а в цифровых накопителях накапливаются импульсы от целей, расположенных на различных удалениях на од-

ном азимуте. В конце каждого периода зондирующих импульсов (импульсов запуска) коммутатор опрашивает состояние дешифраторов. Если на некотором участке дальности критерий обнаружения (в данном случае – количество импульсов) выполнен, то на выходе дешифратора появится единица. Это означает принятие решения о наличии цели на данном участке дальности. Оценка координаты дальности осуществляется по номеру ЦН, а оценка координаты азимута производится путем фиксации центра принятой пачки.

Информация о координатах выдается не в реальном времени, по мере ее формирования, а в конце периода $t_{ГМОД}$. При использовании диспетчерских индикаторов воздушной обстановки необходимо получение отметок ВС в реальном времени. С этой целью через малый интервал времени после открытия соответствующей схемы 'И' производят опрос дешифратора. Такая задержка необходима для завершения переходных процессов в ЦН. Схема устройства дискретизации (квантования) приведена на рис. 2.3.

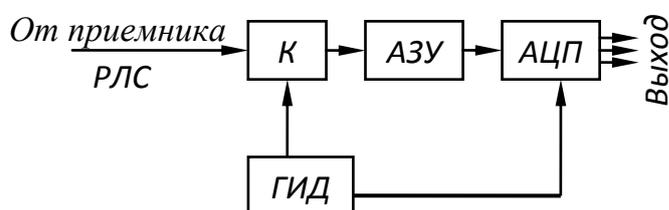


Рис. 2.3. Схема устройства квантования

Аналоговый сигнал с выхода приемника РЛС поступает на аналоговый ключ К, который открывается короткими импульсами, формируемыми генератором импульсов дискретизации ГИД. Мгновенное значение входного на-

пряжения в момент дискретизации запоминается аналоговым запоминающим устройством (АЗУ). В простейшем случае ключ АЗУ – это последовательно соединенные диодный или транзисторный ключевой каскад и запоминающий конденсатор. Входное сопротивление аналого-цифрового преобразователя (АЦП) должно быть большим для того, чтобы за период дискретизации напряжение на выходе АЗУ уменьшалось незначительно. АЦП преобразует ступенчатое «напряжение» с выхода АЗУ в цифровой код. Большое распространение получили АЦП с двумя уровнями квантования: 0 и 1, однако в настоящее время активно совершенствуются методы обработки радиолокационной информации с многоразрядным АЦП.

Частоту дискретизации выбирают в соответствии с теоремой Котельникова, и она должна быть, по крайней мере, на порядок больше частоты зондирующих импульсов. Сигнал, отраженный от цели (эхо-сигнал), на выходе приемника РЛС представляет собой пачку видеоимпульсов, частота которых, без учета эффекта Доплера, равна частоте зондирующих импульсов, а огибающая определяется формой диаграммы направленности антенны. Это значит, что сначала амплитуда импульсов нарастает и доходит до максимума при совпадении оси диаграммы направленности с направлением на цель. После прохождения максимума амплитуда импульсов снова уменьшается до нуля. Таким образом, в начале и в конце пачки при бинарном квантовании возможно либо исчезновение импульсных единиц, либо появление ложных. Это объясняется влиянием шума, особенно на предельных дальностях.

Обработку квантованных сигналов (пачек), в процессе которой используется вся информация о пачке, в том числе и от огибающей, называют квазиоптимальной. Наиболее предпочтительна квазиоптимальная обработка пачки импульсов с помощью симметричной весовой функции. Алгоритм квазиоптимального обнаружения пачки бинарно квантованных сигналов с весовой обработкой основывается на вычислении функции правдоподобия и выглядит следующим образом: $\sum_{\lambda=1}^A x_{\lambda} n_{\lambda} \geq Z$, где x_{λ} – последовательность нулей и единиц на выходе бинарного квантователя (дискретизатора); A – количество импульсов в пачке; n_{λ} – весовой коэффициент, учитывающий ожидаемые вероятности появления нуля или единицы в позиции λ . Огибающая последовательности этих коэффициентов соответствует диаграмме направленности антенны РЛС; Z – порог обнаружения. Таким образом, процедура заключается в суммировании произведений $x_{\lambda} \cdot n_{\lambda}$ в пределах всей пачки и сравнении с порогом, т.е. в состав аппаратуры должен входить цифровой умножитель. Однако, поскольку используется бинарное квантование, то величина x_{λ} может принимать только значения нуля или единица. Следовательно, операция перемножения вырождается в операцию суммирования (рис. 2.4).

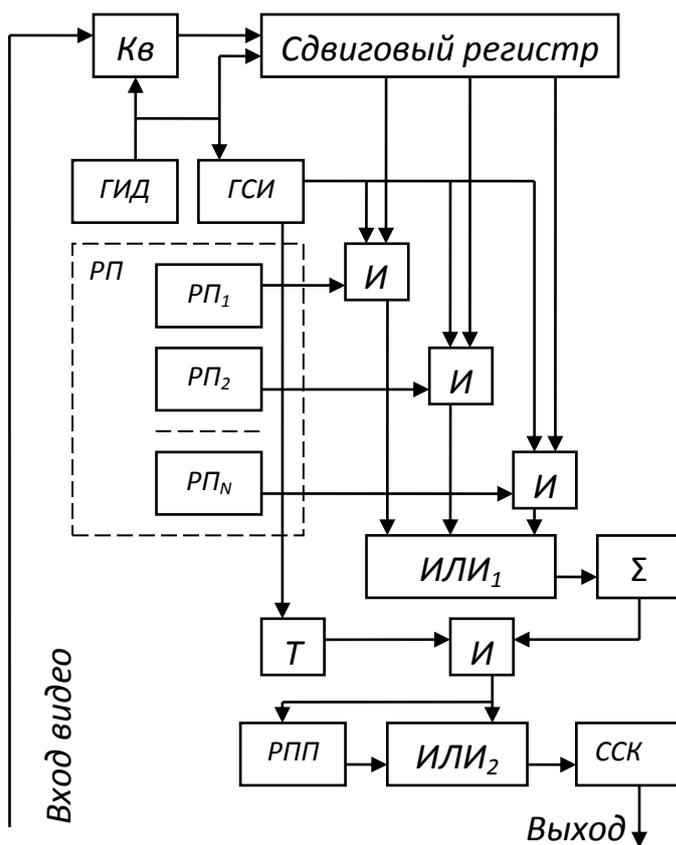


Рис. 2.4. Схема весовой обработки

Работа устройства происходит по следующей схеме. С выхода квантователя Кв под действием генератора импульсов дискретизации ГИД последовательно поступают нули или единицы в сдвиговый регистр СР. Емкость СР должна быть равна числу импульсов в пачке или несколько меньше этого количества – в предположении, что импульсы на краях пачки могут исчезать. Сигналы с каждого разряда СР должны взвешиваться в соответствии со значением весовых коэффициентов, которые рассчитываются заранее и хранятся в регистрах памяти РП. Генератор синхромпульсов ГСИ выдает пачку из N импульсов на каждый импульс ГИД. Период импульсов

ГСИ должен быть больше времени суммирования и переходных процессов.

Пусть в первом разряде СР записана единица, во втором – нуль. Тогда при поступлении первого синхримпульса весовой коэффициент, хранимый в РП₁, будет перенесен в сумматор Σ. Следующий импульс ГСИ будет воздействовать на схему совпадения И₂, однако содержимое РП₂ занесено в

сумматор не будет, так как во втором разряде СР в этот момент записан нуль. Аналогичные действия произойдут с остальными разрядами. Когда будут опрошены все разряды, то с выхода квантователя поступит единица (или нуль), соответствующие информации с выхода приемника РЛС. Подобные суммирования коэффициентов, хранимых в регистрах памяти, производятся для каждого сдвигового импульса. После суммирования (незадолго до поступления очередного импульса сдвига) накопленная сумма S_N с помощью триггера Т и схемы совпадения И через схему ИЛИ₂ переносится в схему сравнения кодов ССК, где сравнивается с пороговой величиной S_0 . Если $S_N > S_0$, то его сравнивают с предыдущим значением S_{N-1} , хранимым в регистре промежуточной памяти РПП. Если $S_N > S_{N-1}$, то S_N переносится в РПП и процесс продолжается. Если $S_N < S_{N-1}$, то выдается выходной сигнал, который с точностью до интервала дискретизации соответствует центру обнаруженной пачки.

Весовой метод обнаружения сигнала основан на задержке импульсов пачки на время, кратное периоду повторения, и последующем сложении их с весовыми коэффициентами n_λ , отражающими форму диаграммы направленности. Алгоритм обнаружения пачки двоично-квантованных сигналов, реализующий весовое накопление, заключается в суммировании значений весовых коэффициентов n_λ на тех позициях $\lambda = 1, 2, \dots, \Lambda$, которым соответствуют единицы, и сравнении полученной суммы с пороговым числом Z .

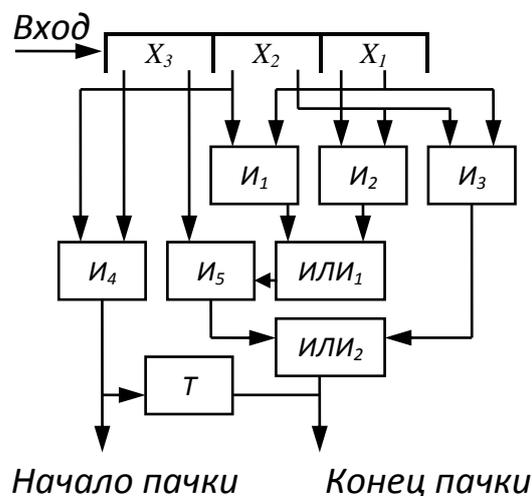
Весовая обработка позволяет точно определить центр пачки, однако сложна в аппаратной реализации. Для упрощения пачку представляют прямоугольником. Единственным отличием области пачки от области помех становится увеличение плотности единиц в области цели. Основной проблемой является фиксация границ пачки. Существует ряд критериев, по которым определяют принадлежность отдельных импульсов к одной и той же пачке. Широко распространен критерий обнаружения пачки в случае, если появляется m единиц на n смежных позициях. Конец пачки обычно фиксируется поступлением серии из K нулей. Если K мало, то велика вероятность «расщепления» цели или даже ее потери, так как на внутренних позициях пачки допустимы пропуски одного или нескольких импульсов (единиц). Для корректного выбора K необходима априорная информация о характере распределения нулей и единиц в реальном сигнале. Устройства для безвесовой обработки представляют собой двухпороговые логические структуры. В качестве примера рассмотрим логический синтез цифрового автомата, обнаруживающего начало пачки при появлении двух единиц на трех смежных позициях, а конец пачки – по серии из двух нулей подряд (рис. 2.5).

В таблице приведены комбинации x_i , которые могут возникнуть в 3-х смежных позициях. Событие $P_i = 1$ обнаружения начала пачки, удовлетворяющее принятому критерию, выполняется для комбинаций x_i , отмеченных серым фоном. Функция алгебры логики P_s , определяющая условие обнаружения начала пачки, имеет вид: $P_s = x_1 x_2 x_3 \vee \bar{x}_1 x_2 x_3 \vee x_1 \bar{x}_2 x_3 \vee x_1 x_2 \bar{x}_3$. После ее минимизации получим: $P_s = x_3 (\bar{x}_1 x_2 \vee x_1 \bar{x}_2) \vee x_1 x_2$. Условие фиксации оконча-

ния пачки: $P_f = \bar{x}_2 \bar{x}_3$. Структурная схема автомата, реализующего программу обнаружения пачки по двум импульсам на трех смежных позициях при опре-

X_1	X_2	X_3	P_i
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Рис. 2.5. Автоматная таблица и схема обработки



деления конца пачки по серии из двух нулей подряд после начала пачки, иллюстрирует таблицу. Триггер Т включается импульсом «Начало пачки» и разрешает выявление конца пачки. Возвращается триггер Т в исходное состояние импульсом «Конец пачки».

Автоматное представление логики обнаружения цели и измерения ее координат позволяет программисту описать эти процессы на языке блок-схем и перейти от схемной реализации к компьютерной. В качестве основного алгоритма межпериодной обработки сигналов используется алгоритм безвесовой обработки, реализуемый путем поэтапного анализа сигнала с радиции щем нескольких критериев.

Для разделения сигнала и помехи в АПОИ используются их различия по амплитуде, длительности и протяженности по азимуту. Сначала отфильтровывают все сигналы, амплитуда которых меньше определенного порогового уровня U_0 . Далее фильтруют сигналы, которые не удовлетворяют критерию длительности импульсов и сигналы, которые не имеют приемлемой протяженности по азимуту. Оптимальный выбор критериев обработки производится с учетом длительности и частоты повторения импульсов РЛС, ширины диаграммы направленности ее антенны и периода обзора, а также временного соотношения между импульсами и ответной посылкой ВРЛ.

Критерий обнаружения по амплитуде. Пороговое значение видеосигнала задается в соответствии с определенным правилом изменения некоторого среднего уровня сигнала РЛС. Этот усредненный сигнал формируется путем интегрирования во времени сигнала с выхода приемного устройства РЛС. В АПОИ обычно устанавливаются пороговые уровни помех и пороговые уровни шумов, которые используются для обработки видеосигналов на различных дальностях РЛС, причем уровень помех изменяется быстрее, чем уровень шума. Уровень шумов измеряется в конце радиолокационной развертки, где пассивные помехи малы. Установка порогового уровня шума, выполняемая схемой управления уровнем шума (УУШ), сводится к опреде-

лению в конце каждой развертки числа сигналов, амплитуда которых выше текущего уровня шумов. На этих дальностях амплитуда большинства сигналов соизмерима с уровнем шумов, и измеренные схемой УУШ сигналы представляют собой ложные тревоги. Схема УУШ, подстраивая пороговый уровень, поддерживает частоту ложных тревог постоянной.

Критерий обнаружения по длительности. Эхо-сигнал цели должен иметь длительность, соизмеримую с длительностью зондирующих импульсов РЛС. В АПОИ имеется специальное устройство – дискриминатор длительности импульсов – для фильтрации импульсов, длительность которых не укладывается в допустимые пределы. В качестве критерия длительности выбирается условие $\tau_{\min} < \tau < \tau_{\max}$.

Критерий обнаружения по азимутальной протяженности. Для проверки на протяженность по азимуту в АПОИ просматривается последовательность эхо-сигналов, относящихся к одной дальности. При этом если выполняется критерий обнаружения начала пачки, например, по логике « m из n », то схема обнаружения фиксирует начальный азимут Θ_n . Здесь « m из n » означает, что начало пачки фиксируется в том случае, если на n смежных зондированиях на фиксированном кванте дальности обнаружены m единиц. Критерии типа « m из n » часто называют программами или логиками фиксации начала пачки. При выполнении критерия обнаружения окончания пачки (например, наличие серии из нескольких нулей подряд) фиксируется конечный азимут Θ_k и одновременно определяется угловая протяженность отметки $\Delta\Theta = \Theta_k - \Theta_n$. Если $\Delta\Theta_{\min} < \Delta\Theta < \Delta\Theta_{\max}$, то цель считается обнаруженной. Значения $\Delta\Theta_{\min}$ и $\Delta\Theta_{\max}$ могут быть изменены в зависимости от характеристик и условий работы РЛС.

2.2.2. АНАЛИЗ ДАННЫХ ОЧЕРЕДНОГО ОБЗОРА АНТЕННЫ РЛС В ЦЕНТРЕ УВД. Рассмотрение схемы программной обработки радиолокационной информации для отображения диспетчеру картины воздушной обстановки в удобном для восприятия виде целесообразно начать со случая отсутствия полетов в системе. Известно, что даже в таких условиях на вход приемника РЛС поступают шумовые эхо-сигналы. По некоторым из них АПОИ принимает решение о наличии цели, и в центр УВД направляется кодограмма об отметке ВС, содержащая его «измеренные» координаты, вычисленные по времени запаздывания «эха» относительно зондирующего сигнала передатчика РЛС и относительно момента прохождения антенной направления на север. В терминах ВОИ поступившая отметка носит название текущей точки.

ПО АС УВД последовательно, по тридцатиградусным секторам кругового обзора антенны, накапливает ТТ и анализирует достоверность каждой, чтобы определить, следует ли отображать диспетчеру наблюдаемые РЛК цели, или для их выдачи на экран нет достаточных оснований. Логика анализа основана на статистике наблюдения и достаточно проста в случае работы с одиночным объектом. Рис. 2.6 поясняет алгоритмическую схему захвата ВС и обнаружения его траектории. Выдвигается гипотеза о том, что РЛК измерил местоположение реальной цели с параметрами R_l , θ , движущейся прямо-

линейно и равномерно с постоянной скоростью V_{\max} , где R_1 – дальность, θ – азимут, V_{\max} – скорость движения, которая в силу неопределенности типа цели принимается равной максимально возможной при полетах современных летательных аппаратов. Поступившее от РЛК единичное измерение R_1 , θ принимается за начало траектории, которая либо окажется ложной, либо подтвердится в результате наблюдения на нескольких последующих обзорах. Алгоритмы ВОИ строят вокруг начальной точки гипотетической траектории область неопределенности, в которой следует ожидать появления второй отметки на следующем обзоре, так называемый стартовый строб для формирования новой траектории (рис 2.6 а).

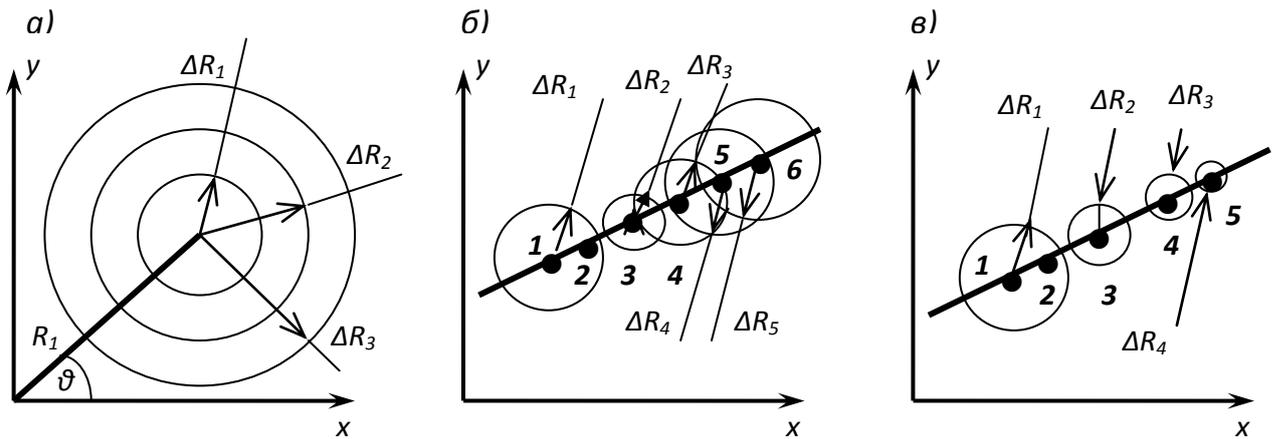


Рис. 2.6. Ситуации обнаружения траектории ВС на этапе ВОИ

- а) попытка завязать траекторию по единичному измерению;
 б) прокладка ложной траектории при последовательности ложных тревог;
 в) завязка и прокладка истинной траектории.

Основу стартового строба составляет окружность радиуса $\Delta R_1 = V_{\max} \cdot T$ с центром R_1 , θ , где T – время оборота антенны. Для учета погрешности измерений РЛС по дальности и азимуту каждой точке окружности радиации щеется эллипс ошибок единичных измерений. Тогда стартовый строб представляет собой объединение введенной окружности с совокупностью эллипсов ошибок. Полуоси a и b стартового строба в полярных координатах рассчитываются исходя из условий:

$$a = \Delta \rho_{\max} = V_{\max} \cdot T + 2 \cdot \sigma_{\rho};$$

$$b = \Delta \theta_{\max} = V_{\max} \cdot T + 2 \cdot R \cdot \sigma_{\theta},$$

где: σ_{ρ} , σ_{θ} – погрешности радиолокационных измерений, стандартные ошибки по дальности и азимуту; для пассивной локации $\sigma_{\rho} \approx 200$ м, $\sigma_{\theta} \approx 8'$; для активной – $\sigma_{\rho} \approx 250$ м, $\sigma_{\theta} \approx 12'$.

В результате второго обзора ВП возможны следующие ситуации:

- ни одна новая отметка не попадает в стартовый строб;
- внутрь строба попадают $k \geq 1$ новых отметок.

В первом случае принимается решение, что единичное измерение предыдущего обзора не подтвердилось, и отметка признается ложной. Если же в

строб попадает одна отметка, то траектория считается обнаруженной, и включаются алгоритмы завязки траектории. Две радиолокационные отметки 1 и 2 на рис. 2.6 б) получены в двух последовательных обзорах. Отметка 2 попала в строб ΔR_1 , и началось вычисление ожидаемых положений ВС на следующих обзорах 3, 4, 5, 6 с помощью стробов $\Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4, \Delta R_5$. Если подтверждающие отметки не появились, как это показано на рис. 2.6 б), то новая траектория признается ложной. Если же в строб попадают ожидаемые отметки от ВС, то завязывается траектория, которая сопровождается с постепенным уменьшением размеров стробов (рис. 2.6 в). Если на каждом обзоре в строб попадают по несколько отметок, то происходит ветвление гипотез о движении целей, завязываются и сопровождаются все больше траекторий, при этом часть из них не подтверждаются и сбрасываются.

Сообщения, поступившие в ПО от АПОИ, обрабатываются алгоритмами ВОИ после их накопления и сортировки во входном информационном массиве (рис. 2.7). Цикл анализа данных наблюдения за очередной обзор состоит в рассмотрении всех отметок ВС, поступивших между двумя последовательными сообщениями о прохождении лучом антенны РЛС направления на север. Сначала обрабатываются отметки ВРЛ (с бортовыми номерами), затем – ПРЛ. По каждой оснащенной радиолокационным ответчиком, т.е. «активной» цели, от АПОИ поступают ее прямоугольные координаты, номер борта и другие данные. Наличие номера упрощает привязку новой отметки к существующей траектории. Сообщения ПРЛ содержат только координаты.

Каждый частный цикл анализа новой информации по одной цели начинается с попытки ее отождествления с уже существующей траекторией. Для активной метки, появившейся впервые, производится ее автоматический ввод в сопровождение. Идентификация пассивных целей производится лишь в случае, если новую отметку можно определенно отождествить лишь с одной имеющейся траекторией. Если отметка может быть отнесена к нескольким известным траекториям или наоборот, несколько новых отметок могут быть отнесены к одной траектории, то возникает так называемая спорная ситуация. Наконец, если новая отметка не отождествляется ни с одной обнаруженной траекторией, то в действие вступает алгоритм автозахвата цели. По окончании фазы отождествления

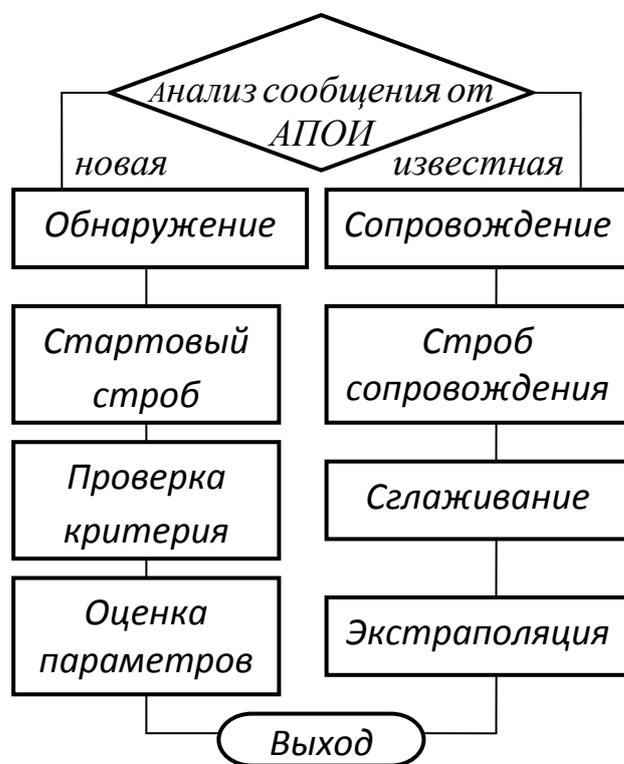


Рис. 2.7. Упрощенная схема ВОИ

ТТ система выполняет их сопровождение.

2.2.3. АВТОМАТИЧЕСКИЙ ЗАХВАТ И СОПРОВОЖДЕНИЕ ВС. Каждая отметка, переданная из АПОИ и не отождествленная ни с одной из наблюдаемых траекторий, может либо служить началом новой траектории, либо оказаться ложной. Для подтверждения или опровержения любого из этих предположений недостаточно одной ТТ. Необходимо продолжить наблюдение в течение нескольких обзоров РЛС. На каждом из них накапливаются и обновляются данные, характеризующие параметры движения цели. Для компенсации ошибок измерения используются результаты предыдущих наблюдений, что позволяет получить сглаженные траектории. Каждая новая отметка дает возможность скорректировать параметры движения и более точно предсказывать положение ВС в момент локации на следующем обзоре.

После второго попадания отметки от цели в стартовый строб [4] определяются направление и скорость полета цели, и следующие области ее вероятного положения в пространстве рассчитываются с учетом вычисленных параметров движения. Новые подтверждения наличия цели позволяют на каждом следующем обзоре уменьшать размеры стробов. Процедура повторяется на протяжении трех обзоров и носит название автоматического захвата траектории. При наличии двух отметок параметры строба автозахвата рассчитываются с учетом вычисляемого значения текущей скорости V и курса U движения объекта: $V = \sqrt{dX^2 + dY^2}$, где текущие приращения $dX = (X_2 - X_1)/T$, $dY = (Y_2 - Y_1)/T$, $T = t_2 - t_1$; X_1, Y_1, t_1 – прямоугольные координаты первой отметки и момент их определения; X_2, Y_2, t_2 – координаты второй отметки и момент их определения. Нетрудно далее рассчитать текущий курс движения ВС: $U = \arctg[\text{abs}(dY / dX)]$ – с поправкой в зависимости от знаков dX и dY .

Координаты центра строба вычисляются как экстраполированное положение объекта:

$$X_{cst} = V \cdot \cos U \cdot T + X_2, \quad Y_{cst} = V \cdot \sin U \cdot T + Y_2;$$

$$R_{cst} = \sqrt{X_{cst}^2 + Y_{cst}^2} - \text{экстраполированная дальность};$$

$$\theta_{cst} = \arctg(Y_{cst} / X_{cst}) - \text{экстраполированный азимут}.$$

$$\text{Полуоси: } a = \sigma_\rho \cdot 15, \quad b = \sigma_\theta \cdot 15 \cdot R_{cst}. \text{ Вновь полагаем: } a = \max\{a, b\}.$$

Таким образом, имеем параметры строба для поиска третьей отметки.

При автоматическом сопровождении, вследствие погрешности измерений, зарегистрированные положения ВС статистически отклоняются от действительной линии пути. Для ослабления влияния таких флуктуаций на расчет упрежденного местоположения в качестве исходных данных используют не фактические координаты предыдущего обзора, а их сглаженные по определенному алгоритму значения. Алгоритм сглаживания строится при следующих допущениях:

- ошибки радиолокационных измерений азимута и дальности независимы, случайны и распределены нормально;
- ВС ГА движется с постоянными скоростью и курсом или соверша-

ют разворот с постоянным радиусом.

Наибольшее распространение в ПО АС УВД получил алгоритм скользящего сглаживания (рис. 2.8), суть которого состоит в том, что при длительном времени радиолокационного наблюдения движения цели:

- новые положения определяются с коррекцией, учитывающей предыдущие значения координат;
- вес предыдущих измерений с течением времени уменьшается, чтобы вклад новых данных в результат оказался более существенным.

Используемые алгоритмом соотношения представлены на рис. 2.8:

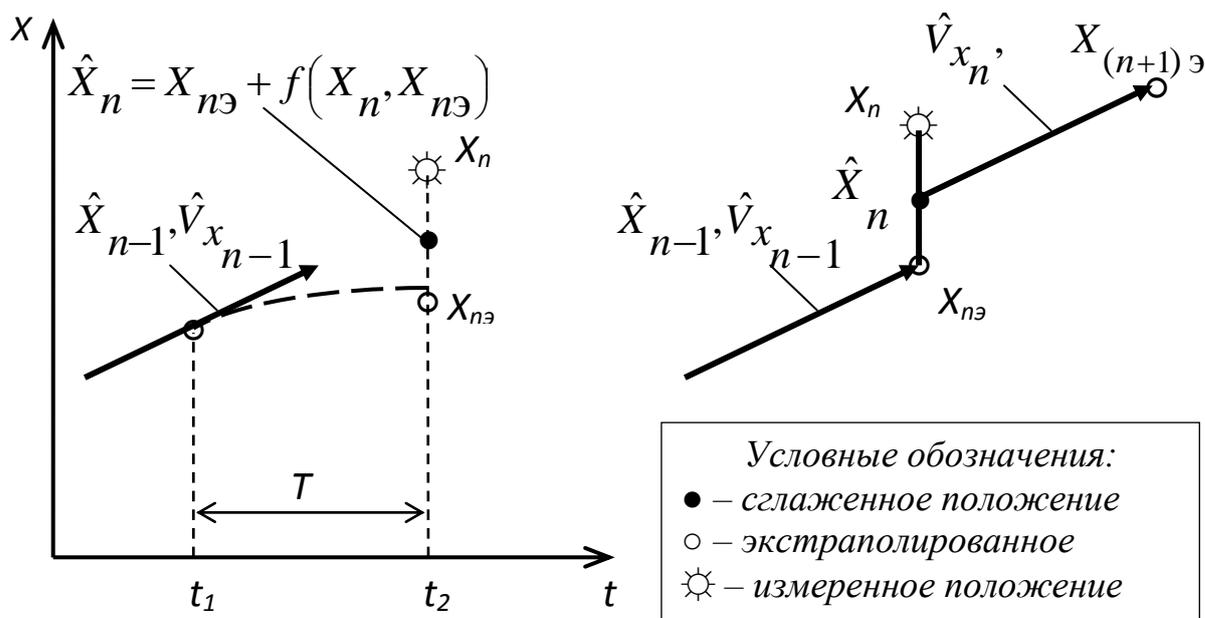


Рис. 2.8. Сглаживание и экстраполяция траектории ВС

$$\hat{X}_n = X_{nэ} + \alpha(X_n - X_{nэ}); \quad \hat{V}_n = \hat{V}_{n-1} + \beta \frac{(X_n - X_{nэ})}{T},$$

где \hat{X}_n, \hat{V}_n – сглаженные значения координаты и скорости на n -ом обзоре радиолокатора; $X_{nэ}$ – экстраполированные значения координаты на n -ом обзоре; X_n – измеренные значения координаты на n -ом обзоре; множители α и β определяются как $\alpha = 2(2Q - 1) / (Q(Q + 1))$; $\beta = 6 / (Q(Q + 1))$, Q – количество предысторий цели, так называемый коэффициент прочности траектории.

Значения Q обычно увеличиваются на единицу при каждом очередном подтверждении – до некоторого условного порога, устанавливаемого в диапазоне 10 – 15. Если величина X_n лежит вне области, построенной около $X_{nэ}$, в которую цель, согласно вычисленным параметрам, должна попасть с вероятностью 0.65, то значения Q сохраняют неизменными. В случаях пропуска цели или когда она оказывается вне области, в которую должна была попасть с вероятностью 0.95, значение Q уменьшают на единицу. Координаты экстраполированного положения рассчитываются по формуле:

$$X_{(n+1)э} = \hat{X}_n + \hat{V}_n \cdot T.$$

Определение параметров строба для поиска четвертой и последующих отметок реализуется как составная часть задачи установления соответствия между экстраполированной отметкой наблюдаемой траектории и вновь поступивших измеренных координат текущей точки. За показатель качества привязки новой точки к прокладываемой траектории принимается логарифм отношения правдоподобия двух гипотез относительно ее принадлежности к множеству точек трассы. Первая гипотеза утверждает, что совокупность состоит из истинных точек, вторая – что в совокупность входят и ложные отметки. При этом считается, что дисперсия расстояния между измеренной и экстраполированной точками в случае ложной привязки в Q раз больше, чем при истинной привязке. Для четвертой точки полагаем $Q = 2$.

Определим расстояние между полюсами эллиптического строба, исходя из фазы сопровождения. Если ВС совершает прямолинейное равномерное движение, тогда расхождение между измеренным и экстраполированным значениями невелико, и соответственно, строб автосопровождения выбирается относительно небольшим. Если ВС совершает маневр, тогда размеры строба нужно увеличить. Используем, как это сделано в [5], обозначение $Conf$ в качестве величины вероятности попадания в строб очередной измеренной отметки на следующем обзоре антенны радиолокатора. Введем для определенности $Conf_i = 0,65$ для решения задач автоматического сопровождения, $Conf_i = 0,95$ для задач автозахвата и $Conf_i = 0,998$ для моделирования ситуации маневра. Пусть индекс $i = 1, 2, 3$ (в порядке перечисления). Тогда для построения эллиптического строба вокруг экстраполированного положения объекта можно пользоваться известными выражениями:

$$K_{conf_i} = \sqrt{2 \cdot \ln \left[\frac{1}{1 - Conf_i} \right]}, \quad i = 1, 2, 3. \quad K_Q = (Q + 1) \cdot (Q + 2) / [Q \cdot (Q - 1)].$$

Расчет полуосей эллиптического строба:

$$a = \sigma_\rho \cdot K_{conf_i} \cdot K_Q \quad (\text{в метрах}),$$

$$b = \sigma_\theta \cdot K_{conf_i} \cdot K_Q \cdot R_{cst} \quad (\text{в радианах, где, как и прежде, } R_{cst} = \sqrt{X_{cst}^2 + Y_{cst}^2}).$$

Напомним, что при сопровождении ВС, наряду с поступлением ложных отметок, на отдельных обзорах возможен пропуск измерений радиационного их местоположения. В таких случаях координаты и оценки параметров траектории экстраполируются на последующие обзоры, в которые ожидается поступление кодограмм РЛС о наличии цели. По мере увеличения времени упреждения возрастает погрешность экстраполяции, и соответствующим образом увеличиваются размеры строба. Если в течение l обзоров, начиная с n -го, не появилось ни одной отметки, тогда на отображение в формуляр ВС выдается специальный символ потери радиолокационного сопровождения, а на $(n + l)$ -м обзоре траектория сбрасывается. Как правило, значение l принимается равным 5 – 10, и подтверждение цели ожидается минутой.

При движении ВС по близким, пересекающимся или встречным траек-

ториям возникают ситуации, названные перепутыванием, при которых очередные ТТ привязываются к «чужим» траекториям (рис. 2.9). При одновременном попадании в строб двух или более отметок необходимо принять решение, какая из них принадлежит сопровождаемой цели. Если отметок несколько, то часть из них может быть ложными, а другая часть может принадлежать другой цели. Необходимо выделить единственную отметку из всех

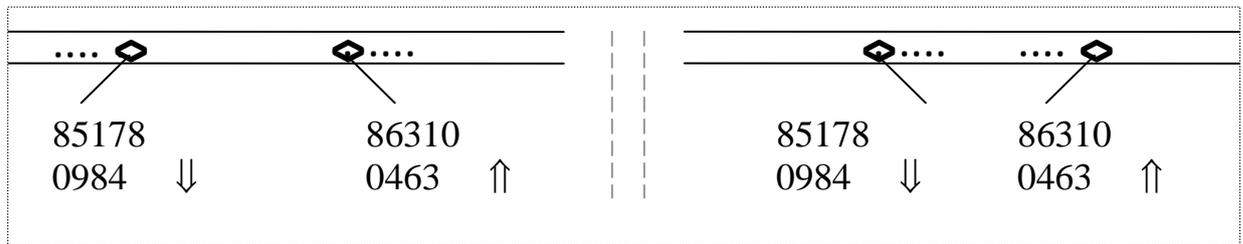


Рис. 2.9. Ситуация «перепутывания» траекторий

попавших в строб, которая является истинной для данной траектории, и отбросить остальные как ложные для сопровождаемой цели. Считается, что истинной является та отметка, которая находится ближе (в определенном смысле) другим к предсказанному положению на момент экстраполяции. Первоначальной мерой «близости» выбирается размер $Conf_i$ строба. Отождествленной считается та отметка, которая попадает в строб меньшего размера.

При попадании нескольких точек в строб одного размера, алгоритм выполняет следующие действия. Для каждой i -й пары координат, $i = \overline{1, n}$, вычисляется величина $F_i = (X_i - X_3)^2 + (Y_i - Y_3)^2 - a < 0$, где значение a рассчитывается на этапе прогнозирования для каждого типа строба. Для разрешения спорной ситуации из величин F_i выбирается минимальная, и соответствующая отметка считается отождествленной. Наличие данных о высоте полета позволяет дополнительно проверять условие $|H_i - H_3| \leq \sigma \approx 60$ метров.

Незначительные усложнения алгоритма позволяют устойчиво сопровождать ВС при высокой плотности ложных отметок, при пропусках измерений, а также при ошибках, соизмеримых с расстояниями между ВС. В то же время, при поступлении качественной РЛИ, единственный истинный вариант отбирается достаточно быстро. Дальнейшая обработка автоматически сводится к сопровождению одиночных изолированных траекторий. При наличии данных ВРЛ о бортовом номере проблема перепутывания траекторий практически снимается. Однако в любом случае ПО всегда предоставляет диспетчеру возможность внести по результатам переговоров с экипажем и пеленгации ВС поправки в действия алгоритма с помощью пультовых операций.

2.3. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ВС

2.3.1. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.

Алгоритмы обработки РЛИ, как упоминалось выше, построены на анализе измеренной информации о местоположении ВС и вычислении их упрежденных координат. Источники данных обладают известной погрешностью, и для создания общей картины

необходимо на каждом шаге наблюдения принимать решение, как построить «равнодействующую» на основе неоднозначных показаний различных инструментов об одном и том же объекте, каким образом осуществить их объединение. Первичный и вторичный локаторы измеряют координаты ВС с разной точностью, и в процессе прокладки траектории их нужно оптимально согласовывать и синхронизировать. В области перекрытия зон видимости работа каждого РЛК характеризуется ошибками, зависящими от совокупности местных условий и факторов воздушной обстановки. При построении траектории, в моменты очередного вычисления упрежденных координат и выставления строга экстраполяции, необходимо оценивать параметры движения каждого ВС, чтобы уверенно сопровождать наблюдаемый объект в условиях ложных данных, пропусков измерений, групповых целей, маневров по высоте и курсу. Для оценки параметров прокладки траектории в КП обработки РЛИ предусмотрена программная подсистема анализа качества работы, достигающая в АС УВД разного уровня автоматизации соответствующей степени развития, полноты и достоверности. В ее задачи входит создание и постоянное обновление массивов показателей качества измерений для всех источников во всех областях зоны их видимости в зависимости от времени и технического состояния, а также от взаимного положения ВС, участвующих в движении.

Алгоритмы анализа качества обрабатывают результаты измерений и сопоставляют измеренные координаты с проложенной траекторией полета. В известной степени эти функции совпадают с проверкой точностных характеристик навигационного оборудования. Для проверки прибора необходим эталон, более точный, чем проверяемая навигационная аппаратура, и априорные сведения о том, какой окажется его погрешность вследствие влияния ошибок эталонного средства. Задача ставилась в [1] А.А. Егоровой и рассматривалась на первом шаге как оценка объединения результатов измерений постоянной величины с некоррелированными погрешностями. Пусть ВС движется прямолинейно и равномерно с неизвестной скоростью V . В момент времени t двумя датчиками измерены ее значения \dot{x}_1 и \dot{x}_2 , с дисперсиями $\sigma_{V_1}^2$ и $\sigma_{V_2}^2$ соответственно. Погрешности измерений независимы и распределены по нормальному закону. Плотности распределения вероятностей \dot{x}_1 и \dot{x}_2 :

$$p(\dot{x}_1, V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{V_1}} \exp \left[-\frac{(\dot{x}_1 - V)^2}{2\sigma_{V_1}^2} \right]; \quad p(\dot{x}_2, V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{V_2}} \exp \left[-\frac{(\dot{x}_2 - V)^2}{2\sigma_{V_2}^2} \right].$$

Необходимо выбрать величину \hat{V} таким образом, чтобы она оказалась оптимальной оценкой истинной скорости V . Рассчитаем совместную плотность распределения вероятностей:

$$p(\dot{x}_1, \dot{x}_2, V) = p(\dot{x}_1, V) \cdot p(\dot{x}_2, V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{V_1} \cdot \sigma_{V_2}} \exp \left[-\frac{(\dot{x}_1 - V)^2}{2\sigma_{V_1}^2} - \frac{(\dot{x}_2 - V)^2}{2\sigma_{V_2}^2} \right].$$

Функция $p(\dot{x}_1, \dot{x}_2, V)$ достигает максимума при минимальном значении

показателя экспоненты. Продифференцируем показатель по V , приравняем производную нулю и решим уравнение относительно V :

$$\hat{V} = \left(\frac{\dot{x}_1}{\sigma_{V_1}^2} + \frac{\dot{x}_2}{\sigma_{V_2}^2} \right) / \left(\frac{1}{\sigma_{V_1}^2} + \frac{1}{\sigma_{V_2}^2} \right). \quad (2.3)$$

Следовательно, оптимальной становится оценка \hat{V} , полученная взвешенным суммированием результатов измерений с весовыми коэффициентами, обратно пропорциональными дисперсиям. Погрешность оценки разности $(V - \hat{V})$ распределена по нормальному закону с нулевым средним значением. Так как дисперсия суммы величин с постоянными коэффициентами равна сумме их взвешенных дисперсий $D[b_1 \dot{x}_1 + b_2 \dot{x}_2] = b_1^2 D[\dot{x}_1] + b_2^2 D[\dot{x}_2]$, преобразуем (2.3) к виду $D[\hat{V}] = \left(\frac{1}{\sigma_{V_1}^2} + \frac{1}{\sigma_{V_2}^2} \right)^{-1}$. Эта формула позволяет оценить вклад эталона, т.е. результата прокладки траектории алгоритмами вторичной обработки РЛИ, в уменьшение погрешности более грубого измерения. При равенстве дисперсий $\sigma_{V_1} = \sigma_{V_2}$ источников имеем: $\hat{V} = (\dot{x}_1 + \dot{x}_2)/2$ и $D[\hat{V}] = \sigma_V^2/2$. При переходе от двух к m источникам с некоррелированными погрешностями совместная плотность распределения вероятностей:

$$p(\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_m, V) = \prod_{i=1}^m p(\dot{x}_i, V) = \prod_{i=1}^m \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{V_i}} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \frac{(\dot{x}_i - V)^2}{2\sigma_{V_i}^2} \right].$$

Выражение (2.3) преобразуется к виду:

$$\hat{V} = \left(\sum_{i=1}^m \frac{\dot{x}_i}{\sigma_{V_i}^2} \right) / \left(\sum_{i=1}^m \frac{1}{\sigma_{V_i}^2} \right), \quad D[\hat{V}] = \left(\sum_{i=1}^m \frac{1}{\sigma_{V_i}^2} \right)^{-1}. \quad (2.4)$$

Формулы (2.4) рекомендуются и для использования в случае измерения скорости одним датчиком в разные моменты времени при условии, что погрешности измерений независимы. Тогда расчеты упрощаются вследствие постоянства дисперсии: $\sigma_{V_i}^2 = \sigma_V^2$. Оценка скорости сводится к усреднению измерений, а дисперсия погрешности уменьшается в m раз.

Учет корреляции измерений усложняет оценку параметров движения ВС. Пусть в момент времени t двумя датчиками получены значения скорости \dot{x}_1 и \dot{x}_2 . Погрешности измерений распределены по нормальному закону:

$$p(\dot{x}_1, \dot{x}_2, V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{V_1} \cdot \sigma_{V_2} \sqrt{1-k^2}} \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{1}{2(1-k^2)} \left[\frac{(\dot{x}_1 - V)^2}{2\sigma_{V_1}^2} - \frac{2k(\dot{x}_1 - V)(\dot{x}_2 - V)}{\sigma_{V_1} \cdot \sigma_{V_2}} + \frac{(\dot{x}_2 - V)^2}{2\sigma_{V_2}^2} \right] \right\},$$

где k – нормированный коэффициент корреляции.

Как и для некоррелированных измерений, объединенное значение скорости \hat{V} считается оптимальным, если максимальна функция $p(\dot{x}_1, \dot{x}_2, V)$.

Выражение (2.3) преобразуется к виду:

$$\hat{V} = \left(\frac{\dot{x}_1}{2\sigma_{V_1}^2} + \frac{\dot{x}_2}{2\sigma_{V_2}^2} - \frac{k}{\sigma_{V_1} \cdot \sigma_{V_2}} (\dot{x}_1 + \dot{x}_2) \right) / \left(\frac{1}{2\sigma_{V_1}^2} + \frac{1}{2\sigma_{V_2}^2} - \frac{2k}{\sigma_{V_1} \cdot \sigma_{V_2}} \right).$$

В случае равноточных измерений дисперсия определяется следующим образом: $\sigma_{\hat{V}}^2 = \sigma_V^2(1+k)/2$. При полной корреляции, когда $k = 1$, согласно этой формуле, выигрыш по точности получить невозможно и $\sigma_{\hat{V}} = \sigma_V$. С уменьшением k снижается величина дисперсии, и при $k = 0$ $\sigma_{\hat{V}}^2 = \sigma_V^2/2$.

2.3.2. ОПТИМАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ ОБЪЕКТА. Полет ВС на трассах складывается из участков прямолинейного равномерного движения между поворотными пунктами маршрута. Расчет упрежденного положения ВС на таких участках анализировался в п. 2.2.3 данного пособия. Для оценки качества сопровождения определим интервалы времени T , через которые производится измерение координаты x , равные длительности обзора антенны РЛС. Из уравнения движения $x = V_1 T + x_0$, где V_1, x_0 – истинные значения начальной скорости и местоположения. Величина \hat{x}_i , измеренная в момент $i \cdot T$, характеризуется погрешностью $\hat{x}_i - (V_1 \cdot i \cdot T + x_0)$, имеющей гауссово распределение. В предположении равноточных измерений координаты x имеем плотность распределения всей совокупности в следующем виде:

$$p(x_1, x_2, \dots, x_n, V_1, x_0) = \prod_{i=1}^n p(x_i, V_1, x_0) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \right)^n \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (V_1 \cdot i \cdot T + x_0)^2 \right]$$

Выберем начальные значения параметров V_1, x_0 такими, чтобы функция $p(x_1, x_2, \dots, x_n, V_1, x_0)$ достигала максимума. Найдем частные производные показателя экспоненты по V_1, x_0 , приравняем их нулю и получим систему уравнений, из которой определим оптимальные оценки начальной координаты и скорости:

$$\hat{x}_0 = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (2n+1-3i) \hat{x}_i; \quad \hat{V}_1 = \frac{6}{nT(n^2-1)} \sum_{i=1}^n (3i-n-1) \hat{x}_i. \quad (2.5)$$

Сглаженное значение координаты x_n на момент последнего измерения:

$$x_n = \hat{V}_1 \cdot n \cdot T + x_0 = \frac{2}{n(n+1)} \sum_{i=1}^n (3i - n - 1) \hat{x}_i.$$

Погрешности оптимальных оценок V_1, x_0 независимы и распределены по нормальному закону. Дисперсия ошибки измерения координаты составит:

$$\sigma_{x_n}^2 = \sigma_x^2 \frac{2(2n-1)}{n(n+1)}, \text{ а скорости } - \sigma_{V_1}^2 = \sigma_V^2 \frac{12}{n \cdot T^2 (n^2 - 1)}.$$

Кoeffициент корреляции R_{01} вычисляют с помощью усреднения произведения случайных величин координат и скорости. Учитывая, что $x_i \cdot x_j = 0$, получаем: $R_{01} = \sigma^2 \frac{6}{n \cdot T (n+1)}$.

Система анализа качества по формулам (2.5) вычисляет данные о местоположении и об истинной скорости ВС, а также их дисперсии. При получении дополнительной информации с борта (приборная скорость и ее вычисленная на земле дисперсия) оценивается целесообразность запроса данных бортовой аппаратуры – как функция количества накопленных измерений.

Оценка параметров траектории основана на очевидном допущении. Если предположить, что радиолокационное наблюдение и все величины – исходные данные для определения линии пути – не содержат ошибок, то элементы траекторий, выведенные из трех или четырех наблюдений, в свою очередь, будут точными в случае движения объекта по известному закону. Следовательно, привлечение дополнительных наблюдений к вычислениям приведет к тому же результату. Но поскольку все наши измерения и радицидения выполнены с известной долей погрешности, то и вычисленные на их основе величины неизбежно носят приближенный характер. Важнейшей целью подобных расчетов является наилучшее из возможных соответствие искомым неизвестных их истинным значениям. Это достигается посредством обработки заведомо большего числа измерений, чем необходимо для определения неизвестных величин. Корректное решение данной задачи возможно лишь в том случае, когда мы располагаем предварительно определенной траекторией, элементы которой подлежат последовательному уточнению так, чтобы наилучшим образом удовлетворить всем проведенным наблюдениям.

Пусть для двух векторов фактического состояния системы x_k и x_{k+1} , относящихся к моментам времени t_k и t_{k+1} соответственно, существует уравнение связи вида $x_{k+1} = \Phi_k x_k + w_k$. Формируемый вектор измерений определен как $z_k = H_k x_k + v_k$, где x_0, w_k , и v_k – взаимно некоррелированные векторы с математическими ожиданиями $m_0, 0$ и 0 и положительно определенными ковариационными матрицами и S_0, Q_k , и R_k соответственно (последние два члена представляют собой последовательности белого шума).

Тогда представленный на рис. 2.10 рекуррентный алгоритм реализует оптимальную в смысле метода наименьших квадратов фильтрацию по Калману. Вектор $x_{k/j}$ представляет собой оценку вектора x , отнесенного к моменту

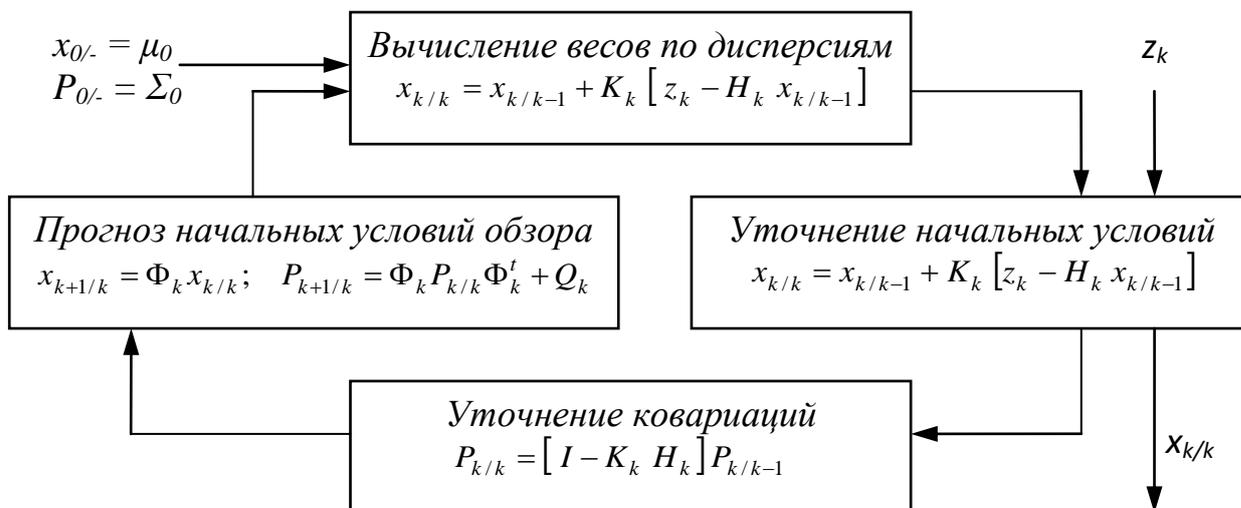


Рис. 2.10. Рекуррентный алгоритм, реализующий фильтрацию по Калману

ту времени t_k , учитывающую измерения до момента t_j включительно, а $P_{k/j}$ – его ковариационная матрица. Достоверность получаемых результатов определяется соответствием реальной системы ее модели, реализованной в алгоритме фильтра. Приведенные уравнения можно вывести с помощью ряда методов. Например, если исходные переменные распределены нормально, то минимизация квадратичной формы $e_{k/j}^t A e_{k/j}$, характеризующей среднеквадратическую ошибку прогноза, приводит к уравнениям Калмана (здесь A – положительно определенная весовая матрица, $e_{k/j} = x_k \cdot x_{k/j}$). В случае распределения величин, отличного от гауссова, дополнительным условием для получения однозначного решения является наличие линейного соотношения между измерениями z_k , оценкой x_k состояния системы и его прогнозом x_{k+1} .

Ветвь алгоритма, занимающаяся ковариационным анализом, не требует для своей работы ни конкретных значений оценок состояния системы, ни измерений; необходимы только величины, характеризующие их погрешности. Данное свойство обычно используется для априорной оценки точности результатов. Далее с помощью методов статистического анализа следует убедиться в том, что реализованная в фильтре модель измерений соответствует своему реальному прототипу. Наконец, когда построенный фильтр удовлетворяет всем требованиям, необходимо провести серию заключительных испытаний для оценки адекватности выбранного способа линеаризации задачи, для локализации и отладки возможных ошибок вычислительного характера. В большинстве случаев расширенный вариант алгоритма с замкнутым контуром обратной связи позволяет значительно снизить нежелательные последствия линеаризации. Ошибки в вычислениях обычно вызваны ограничениями компьютерного представления данных и наиболее ярко проявляются в ковариационных матрицах, которые становятся либо несимметричными, либо имеют отрицательные диагональные элементы, вследствие чего нарушается

правильная работа фильтра Калмана. Влияние этой погрешности можно снизить, удерживая большее число значащих цифр при вычислениях или применив численный алгоритм, менее чувствительный к ошибкам округления.

2.3.3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ. Известные алгоритмы исходят из формализации уравнений движения с определением координат (x, y) , их производных и времени t обзора (см. п. 2.2.3):

$$x = a_x t^2 + b_x + c_x; \quad dx = 2a_x t + b_x; \quad y = a_y t^2 + b_y + c_y; \quad dy = 2a_y t + b_y; \\ V = \sqrt{dx^2 + dy^2}; \quad U = \arctg(dx, dy); \quad dx = \frac{X_{cst} - X_{c2l}}{T_{cst} - t}; \quad dy = \frac{Y_{cst} - Y_{c2l}}{T_{cst} - t}. \quad (2.6)$$

Для упрощения вычислительной схемы все рассчитываемые коэффициенты приводятся к единообразному аддитивно-мультипликативному виду:

$$D = a \cdot b_1 \cdot c_2 + b \cdot c_1 \cdot a_2 + c \cdot a_1 \cdot b_2 - c \cdot b_1 \cdot a_2 - a \cdot b_2 \cdot c_1 - b \cdot a_1 \cdot c_2. \quad (2.7)$$

Ситуации классифицируются по глубине предыстории наблюдения.

Обнаружена одна отметка. Прогнозируемое положение для второй точки определяется стартовым стробом (максимальной скоростью ВС):

T_{cst} – прогнозируемое время обнаружения следующей отметки, равное периоду $T_{обз}$ обзора антенны РЛС;

X_{cst}, Y_{cst} , – координаты центра строба, равные измеренным значениям первой отметки: $X_{cst} = X_1, Y_{cst} = Y_1$;

X_{c2l}, Y_{c2l} , – сглаженные значения координат, передаваемые на отображение диспетчеру в виде символа текущей точки: $X_{c2l} = X_1, Y_{c2l} = Y_1$.

Обнаружены две отметки в двух последовательных обзорах. Скорость V и курс U ВС вычисляются по измеренным значениям координат:

$$V = \sqrt{\left(\frac{X_2 - X_1}{T_2 - T_1}\right)^2 + \left(\frac{Y_2 - Y_1}{T_2 - T_1}\right)^2}; \quad U = \arctg\left(\left|\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}\right|\right)$$

с поправкой в зависимости от знаков разностей координат.

Рассчитывается экстраполированное положение цели:

$$X_{cst} = V \cdot T_{cst} \cdot \cos U + X_2, \quad Y_{cst} = V \cdot T_{cst} \cdot \sin U + Y_2.$$

Сглаженные значения координат при обнаружении второй отметки, как и в предыдущем случае, вновь полагаются равными измеренным и передаются на отображение в виде текущей точки: $X_{c2l} = X_2, Y_{c2l} = Y_2$.

Обработка массива обнаруженных точек. Начиная с $n = 3$, где n – индекс обнаруженной точки, гипотетически отождествляемой с сопровождаемым ВС, алгоритм оценки параметров движения работает по следующей схеме. Входными являются массивы предыстории: $\{T_n, T_{n-1}, T_{n-2}\}; \{X_n\}; \{Y_n\}$.

Определяются: $t_1 = T_{n-2} - T_0$, где T_0 – момент начала сопровождения ВС; $t_2 = T_{n-1} - T_0$; $t_3 = T_n - T_0$. Вычисляются и сохраняются для использования

на следующем шаге построения траектории коэффициенты $S1 = \sum_{i=1}^n t_i$;

$S2 = \sum_{i=1}^n t_i^2$; $S3 = \sum_{i=1}^n t_i^3$; $S4 = \sum_{i=1}^n t_i^4$. Следующая группа коэффициентов фиксирует

предысторию измеренных координат X : $S6 = \sum_{i=1}^n X_i$; $S7 = \sum_{i=1}^n X_i \cdot t_i$; $S8 = \sum_{i=1}^n X_i \cdot t_i^2$; затем Y : $S9 = \sum_{i=1}^n Y_i$; $S10 = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot t_i$; $S11 = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot t_i^2$. В условных обо-

значениях аддитивно-мультипликативного выражения (2.7) полагают: $a = S4$; $b = S3$; $c = S2$; $a1 = S3$; $b1 = S2$; $c1 = S1$; $a2 = S2$; $b2 = S1$; $c2 = n$. Тогда можно получить нормировочный расчетный коэффициент D_0 и перейти к дальнейшим вычислениям. Положим $a = S6$; $b = S3$; $c = S2$; $a1 = S7$; $b1 = S2$; $c1 = S1$; $a2 = S8$; $b2 = S1$; $c2 = n$. Подставляя обновленные значения в (2.7) получаем Da_x , используемый выше в формулах (2.6). Следующий шаг – пересчет коэффициента b_x , для которого полагаем: $a = S4$; $b = S6$; $c = S2$; $a1 = S3$; $b1 = S7$; $c1 = S1$; $a2 = S2$; $b2 = S8$; по-прежнему, $c2 = n$. Подставляя эти данные в (2.7), имеем Db_x . Для оценки третьего коэффициента выражения (2.6) по координате X полагаем: $a = S4$; $b = S3$; $c = S6$; $a1 = S3$; $b1 = S2$; $c1 = S7$; $a2 = S2$; $b2 = S1$; $c2 = S8$ и вычисляем Dc_x . Аналогично рассчитываем коэффициенты по координате Y . Полагаем: $a = S9$; $b = S3$; $c = S2$; $a1 = S10$; $b1 = S2$; $c1 = S1$; $a2 = S11$; $b2 = S1$; $c2 = n$, имеем Da_y . На следующем шаге $a = S4$; $b = S9$; $c = S2$; $a1 = S3$; $b1 = S10$; $c1 = S1$; $a2 = S2$; $b2 = S11$; $c2 = n$, вычисляем Db_y . Наконец, при $a = S4$; $b = S3$; $c = S9$; $a1 = S3$; $b1 = S2$; $c1 = S10$; $a2 = S2$; $b2 = S1$; $c2 = S11$, получаем Dc_y . Для перехода к величинам выражения (2.6), нормируем только что вычисленные коэффициенты: $a_x = Da_x/D_0$, $b_x = Db_x/D_0$, $c_x = Dc_x/D_0$, $a_y = Da_y/D_0$, $b_y = Db_y/D_0$, $c_y = Dc_y/D_0$. Далее рассчитываются сглаженные и прогнозируемые координаты – в соответствии с «предварительно определенной орбитой, элементы которой», по выражению К.Ф. Гаусса, «подлежат последовательному уточнению так, чтобы наилучшим образом удовлетворить всем проведенным наблюдениям»:

$$X_{cгл} = a_x \cdot (t_n - t_{n-1})^2 + b_x \cdot t_n + c_x; \quad Y_{cгл} = a_y \cdot (t_n - t_{n-1})^2 + b_y \cdot t_n + c_y.$$

$$t_{\text{э}} = t_n + (t_n - t_{n-1}); \quad X_{\text{э}} = a_x \cdot t_{\text{э}}^2 + b_x \cdot t_{\text{э}} + c_x; \quad Y_{\text{э}} = a_y \cdot t_{\text{э}}^2 + b_y \cdot t_{\text{э}} + c_y.$$

Отметим, что на отображение выдаются сглаженные координаты $X_{cгл}$, $Y_{cгл}$.

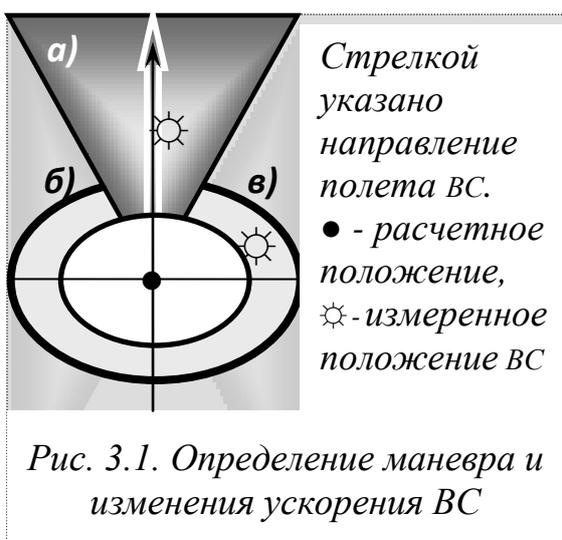
3. ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ НАБЛЮДЕНИЯ

3.1. УЧЕТ ВОЗМОЖНОГО МАНЕВРИРОВАНИЯ

3.1.1. ЛОГИКА ОБНАРУЖЕНИЯ МАНЕВРА. В настоящее время качественные результаты обработки РЛИ гарантируются лишь в случае захвата и сопровождения изолированных объектов, не совершающих маневров, при полном и однозначном измерении их координат в условиях отсутствия преднамеренных помех. В сложной информационной обстановке – пропуски и неоднозначность измерений, ложные измерения, маневрирующие и групповые объекты, помехи – такое сопровождение характеризуется большим числом ложных траекторий, перепутыванием траекторий, срывом сопровождения и пропуском движущихся объектов [6].

Неустойчивость процесса объясняется ошибками измерений и выставления математического строга для отбора отметки измерения (около прогнозируемого положения объекта в предположении его прямолинейного движения). Классические алгоритмы обработки РЛИ [1, 2] создавались для компьютеров первых поколений с низким быстродействием и малым объемом памяти. Авторы целенаправленно упрощали вычислительные схемы и сокращали описания объектов. Для определения скоростей движения использовались линейные фильтры, имеющие невысокую точность и не позволяющие выполнить комплексную обработку информации от нескольких радиолокаторов. При переходе к технике нового поколения, имеющей практически неограниченные вычислительные ресурсы, алгоритмы обработки попросту заимствовались из ПО предшественников. Ситуацию можно улучшить, если более полно использовать новые возможности компьютеров. Можно в любой информационной обстановке получить достаточно точное сопровождение всех наблюдаемых объектов с помощью более сложных фильтров, накопления дополнительной статистики, учета возможностей маневрирования и комплексной обработки нескольких гипотез прокладки траекторий [6].

Сигналом обнаружения маневра считается изменение параметров прокладываемой траектории. Прямолинейное равномерное движение преобразуется



в линию с неопределенной кривизной, ускорение становится отличным от нуля. На рис. 3.1 около экстраполированной отметки построены два строга. Измеренное местоположение ВС должно оказаться во внутреннем строге с вероятностью $Conf_1 = 0.65$, во внешнем – $Conf_2 = 0.95$. Попадание измеренной отметки во внутренний строб означает сохранение гипотезы о прямолинейности и равномерности. При обнаружении ВС в области, ограниченной треугольником а) и дугой внутреннего строга, принимается решение о том, что цель движется прямолинейно с ускорением. Если точка наблюдается в заштрихованных областях б) или в), тогда считается, что цель маневрирует по курсу и скорости. Рассмотрим задачу оценки параметров криволинейной траектории.

3.1.2. ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ О МАНЕВРИРУЮЩИХ ОБЪЕКТАХ

3.1.2.1. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ. Процесс радиолокационных измерений координат неизбежно сопровождается ошибками. Принципиально для определения навигационных параметров движения достаточно двух последовательных отметок. Однако нет никаких гарантий, что обе отметки являются

истинными. Для повышения точности используют несколько последовательных отметок. Это позволяет усреднить результаты многих наблюдений и уменьшить влияние случайных ошибок. Такое усреднение называют сглаживанием координат. Однако ВС в своем движении может изменять курс в соответствии с полетным заданием, и тогда смещение отметки отражает ее истинное местоположение. В результате сглаживания эти особенности теряются или определяются с известной задержкой. Таким образом, сглаживание координат связано с ошибками двух видов:

- недостаточная фильтрация погрешности измерений, (короткая предыстория, слабое сглаживание);
- искажение реальных траекторий маневрирующих объектов (пренебрежение результатами последних измерений, сильное сглаживание).

При маневрах ВС нарушается соответствие между гипотезой прямолинейного равномерного движения и фактической траекторией, вследствие чего появляется динамическая ошибка сопровождения. Возрастание отклонений используется для обнаружения маневра путем сравнения результата накопления погрешности за n обзоров с установленным порогом. Геометрическая интерпретация соответствующего алгоритма приведена на рис. 3.2. Траектория ВС изображается в виде

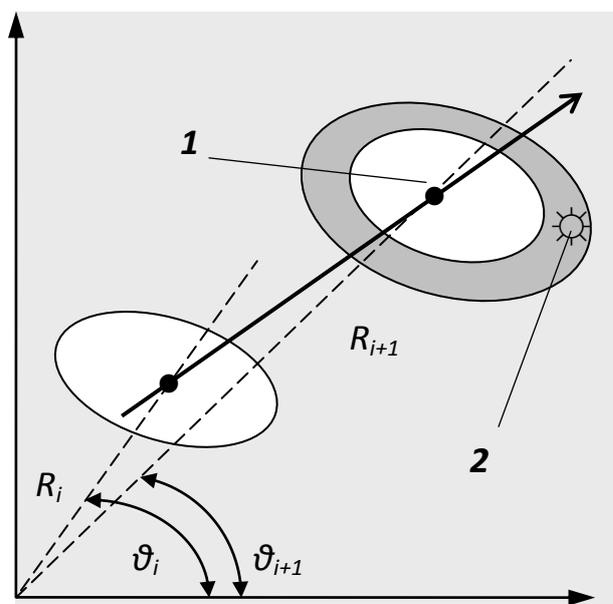


Рис. 3.2. Обнаружение маневра

стрелки, проходящей через две последовательные отметки положения цели на i -м и $(i + 1)$ -м обзорах. В момент t_i измеренные дальность R_i и азимут θ_i определяют текущее положение и дают возможность рассчитать координаты на момент t_{i+1} (точка 1 на рис. 3.2). Кроме строба автосопровождения метки 1 в предположении прямолинейного движения выставляется так называемый «сторожевой» строб обнаружения маневра $Conf_3 = 0.998$, помеченный штриховкой. Попадание в сторожевой строб измеренной отметки 3 от наблюдаемого ВС свидетельствует о маневре, а относительное положение внутри строба – о направлении и величине скорости его исполнения. Для алгоритмов обработки РЛИ факт обнаружения маневра становится переключателем длины учитываемой предыстории с $10 \div 20$ точек до $2 \div 4$, либо служит основанием для перехода к уравнениям движения с использованием полиномов более высокой степени.

Выбор алгоритма сглаживания основан на анализе статистических характеристик ошибок измерения координат и гипотез о возможной траектории движения объекта. Предполагается, что ВС движется с постоянным ускорением, в том числе нулевым. Движение осуществляется по линии постоянной

кривизны (прямая или окружность постоянного радиуса). Маневром считается изменение ускорения или кривизны линии. Накопление точек предыстории и обработка данных производится на «постоянных» участках траектории, пока не обнаруживаются изменения ускорения и кривизны. Сигналом обнаружения маневра является выход экстраполированных точек за пределы строга прогнозирования траектории. Как следствие, система уменьшает количество учитываемых точек предыстории, делая сглаживание слабым, что упрощает задачу расчета новых параметров движения объекта [7].

3.1.2.2. ФОРМАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА СОПРОВОЖДЕНИЯ МАНЕВРИРУЮЩИХ ВС. Согласно изложенной постановке, начиная с третьей отметки, алгоритм селекционирует поступившие радиолокационные измерения по унифицированной схеме. Если при отождествлении отметка попала в строб $Conf_1 = 0.65$, тогда (при вычислении на следующем обзоре) пересчитывается глубина предыстории $Q = Q + 1$, при этом соблюдается эмпирическое ограничение Q_{max} , как правило, $Q_{max} = 12$. Если отметка попала в строб $Conf_2 = 0.95$, тогда значение Q сохраняется ($Q_{cst} = Q$). Наконец, если отметка попала в строб маневра $Conf_3 = 0.998$, тогда $Q = 2$ и накопленная ранее траектория сбрасывается до трех предшествующих точек, чтобы обеспечить слабое сглаживание. Оценим параметры криволинейной траектории. Составляющие скорости ΔX_{Vi} и ΔY_{Vi} вычисляются единообразно: $\Delta X_{Vi} = \frac{X_i - X_{i-1}}{T_i - T_{i-1}}$, $\Delta Y_{Vi} = \frac{Y_i - Y_{i-1}}{T_i - T_{i-1}}$. Среднее значение ΔX_{Sn} и ΔY_{Sn} составляющих скорости V_{SPn} за n обзоров:

$$\Delta X_{S_n} = \frac{X_n - X_1}{t_n - t_1} = \frac{\Delta X_{S_{n-1}} \cdot (n-2) + \Delta X_{Vn}}{n-1}; \quad \Delta Y_{S_n} = \frac{Y_n - Y_1}{t_n - t_1} = \frac{\Delta Y_{S_{n-1}} \cdot (n-2) + \Delta Y_{Vn}}{n-1} \quad (3.1)$$

Средняя скорость, рассчитанная на рассматриваемом участке траектории:

$$V_{SPn} = \sqrt{\Delta X_{S_n}^2 + \Delta Y_{S_n}^2}. \quad (3.2)$$

Значение скорости на текущем обзоре: $V_n = \sqrt{\Delta X_n^2 + \Delta Y_n^2}$.

Весьма полезной информацией для определения маневра ВС является скорость его сближения с источником измеренных данных (радиальная скорость), которая измеряется радиолокатором в режиме селекции движущихся целей, однако согласно существующим протоколам обмена не передается от РЛК в центр управления и не используется алгоритмами обработки РЛИ.

Для принятия гипотезы о движении по криволинейной траектории необходимо иметь не менее $n = 3$ последовательных отметок наблюдаемых ВС, так как при $n < 3$ через них всегда можно провести прямую. Справедливо и другое утверждение: через три точки можно провести окружность, и притом только одну. По трем измерениям легко находятся координаты ее центра и радиус предполагаемого разворота по ней, угол между i -й и $(i+1)$ -й отметками и угловая скорость ω_i движения ВС на анализируемом отрезке времени (очередном обзоре). Усреднение угловой скорости по n сохраняемым точкам выполняется по формулам, аналогичным (3.1). Оценка параметров каждой последующей точки начинается с расчета усредненных значений по всей со-

храняемой предыстории по формулам (3.1, 3.2) и поправочных коэффициентов для предсказания ближайших упрежденных координат. Коэффициент K_{trn} кривизны траектории, проходящей через n следующих подряд точек, выводится из элементарных геометрических построений:

$$K_{trn} = \frac{2 \sin\left(\frac{\omega_{Sn} \cdot T_n}{2}\right)}{V_{SPn} \cdot T_n},$$

где T_n – время наблюдения n точек траектории, ω_{Sn} – усредненная угловая скорость ВС на том же участке полета.

С помощью K_{trn} вычисляется коэффициент K_{SPn} коррекции значения скорости ВС на криволинейном участке траектории:

$$K_{SPn} = \frac{\omega_{Sn}}{V_{Sn} \cdot K_{trn}} = \frac{\omega_{Sn} \cdot V_{SPn} \cdot T_n}{2 V_{Sn} \cdot \sin\left(\frac{\omega_{Sn} \cdot T_n}{2}\right)}.$$

Предусмотрена алгоритмическая защита вычисляемого значения скорости: если оно составляет менее тридцати метров в секунду, то принимается решение о пропуске отметки. В противном случае становятся неприемлемыми величины коэффициентов коррекции скорости и ускорения для криволинейной траектории, а при нулевой горизонтальной скорости приведенные выражения вообще теряют смысл.

На каждом n -ом обзоре при сопровождении криволинейной траектории значение скорости вычисляется с поправкой K_{SPn} : $V_{kn} = K_{SPn} \cdot V_n$. Для дальнейшей оценки параметров траектории определяется линейное ускорение a_n движения ВС на текущем обзоре: $a_n = \left(V_{kn} - V_{k(n-1)} \right) / \left(T_n - T_{n-1} \right)$, где

радица $V_{k(n-1)} = K_{SPn} \cdot V_{n-1}$. Аналогично, при наличии не менее трех измерений местоположения цели, определяется среднее значение ускорения:

$$a_{Sn} = \frac{a_{S(n-1)} \cdot (n-3) \cdot \left(K_{SPn} / K_{SP(n-1)} \right) + a_n}{n-2}.$$

При оценке угловой скорости ω_n можно положить $a_{Sn} = 0$.

Получив перечисленные оценки, ПО приступает к уточнению параметров сопровождаемой криволинейной траектории. Их сглаженные значения рассчитываются на установленную для алгоритма глубину n сохраняемой предыстории по каждой i -й отметке, $i = 1, \dots, n$. Для вычисления декартовых координат местоположения сначала определяют сглаженные значения $U_{cgl i}$ курса цели, исходя из ее начального курса U_{0Sn} на анализируемом отрезке траектории, найденного коэффициента K_{trn} кривизны, а также усредненных величин скорости V_{Sn} и ускорения a_{Sn} : $U_{cgl i} = K_{trn} \cdot \left(\frac{a_{Sn} \cdot T_i^2}{2} + V_{Sn} \cdot T_i \right) + U_{0Sn}$.

Для расчета начальных значений абсциссы X_{0Sn} и ординаты Y_{0Sn} используются формулы:

$$X_{0S n} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i - \frac{\sum_{i=1}^n \sin U_{cgl i}}{K_{trn}}}{n}; \quad Y_{0S n} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \frac{\sum_{i=1}^n \cos U_{cgl i}}{K_{trn}}}{n},$$

где X_i, Y_i – координаты i -й отметки траектории. В завершение процедуры, вычисленные начальные значения координат n -ой отметки преобразуются в сглаженные с помощью полученных ранее коэффициента K_{trn} кривизны и сглаженного курса $U_{cgl i}$:

$$X_{cgl i} = X_{0S n} + \frac{\sin U_{cgl n}}{K_{trn}}, \quad Y_{cgl i} = Y_{0S n} + \frac{\cos U_{cgl n}}{K_{trn}}.$$

На шаге прогнозирования оцениваются экстраполированные значения координат и курса ВС, используемые для поиска центра выставляемого стро-ба. При этом момент T_{cst} упреждения рассчитывается не простым сдвигом времени на период обзора антенны РЛС, а в предположении сохранения тенденции маневрирования. Считается, что следующая отметка поступит спустя тот же интервал $\Delta T_{n+1} = T_{n+1} - T_n$, что и предыдущая T_n относительно T_{n-1} :

$$T_{cst} = T_n + (T_n - T_{n-1}); \quad U_{cst} = K_{trn} \cdot \left(\frac{a_{Sn} \cdot T_{cst}^2}{2} + V_{Sn} \cdot T_{cst} \right) + U_{0S n}.$$

$$X_{cst} = X_{0S n} + \frac{\sin U_{cst}}{K_{trn}}, \quad Y_{cst} = Y_{0S n} + \frac{\cos U_{cst}}{K_{trn}}.$$

Все использованные обозначения рассмотрены выше.

3.1.2.3. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МАНЕВРИРУЮЩИХ ВС. Под рневром цели понимают преобразование траектории, связанное с изменением ускорения (продольной перегрузки) или радиуса разворота (кривизны траектории). В установившемся горизонтальном полете при расчете элементов пространственного маневра ВС используются следующие соотношения:

$$\dot{X} = V \cos \gamma; \quad \dot{Y} = V \sin \gamma; \quad \dot{V} = n_x g; \quad \dot{\gamma} = \frac{g}{V} \operatorname{tg} \chi, \quad (3.3)$$

где: V – истинная воздушная скорость полета ВС,

χ – угол крена при выполнении маневра,

γ – курс движения ВС, отсчитываемый от оси движения,

n_x – продольная перегрузка ВС.

В случае бокового маневрирования (разворота), дополнительно рассматривается информация о физических возможностях изменения вектора скорости ВС, определяемых его лётно-техническими характеристиками:

$$R = \frac{V^2}{g \cdot \operatorname{tg} \chi}, \quad (3.4)$$

где R – радиус разворота. Положим $n_x g = a$, тогда $V = a(t - t_0) + b$, где b – скорость ВС в момент t_0 . Интегрируя уравнения (3.3) с учетом соотношения (3.4), нетрудно получить следующие выражения для координат x, y :

$$X = R \sin \left(\frac{at^2}{2R} + \frac{bt}{R} + \gamma_0 \right) + x_R, \quad -Y = R \cos \left(\frac{at^2}{2R} + \frac{bt}{R} + \gamma_0 \right) + y_R, \quad (3.5)$$

где γ_0 – курс ВС в момент времени t_0 ; x_R, y_R – координаты центра окружности разворота.

Таким образом, координаты X, Y определяются шестью параметрами траектории, с которыми они связаны нелинейной зависимостью. Для нахождения этих параметров предпочтителен метод искусственной линеаризации, работающий по следующей схеме [2]. Первоначально параметры траектории определяются приближенно, а затем отыскиваются поправки к ним – путем составления и решения системы нормальных (ортогональных) уравнений относительно этих поправок. Коэффициенты системы вычисляются по частным производным функций координат от параметров траектории.

Существенным ограничением применимости метода является необходимость достаточно точного определения исходных значений параметров. Погрешность приближенных значений относительно истинных не должна превышать известного диапазона, так как иначе в процессе линеаризации не представляется возможным ограничиваться первыми членами разложения в ряд Тейлора. Исследования, выполненные на имитационной модели [7], позволяют утверждать, что прямое использование искусственной линеаризации (дифференцирование по указанным выше параметрам траектории) не приводит к желаемому результату. Элементарные оценки среднеквадратичных ошибок параметров как функций от значений измеренных координат показывают, что их величины не позволяют воспользоваться первыми членами разложения искомых функций координат в ряд Тейлора по параметрам траектории. В первую очередь это касается вычисления R, x_R, y_R – по той причине, что в общем случае они не обладают свойствами аддитивности. Как известно, радиус разворота R может менять знак, а точка x_R, y_R может оказываться по разные стороны от прокладываемой траектории. Ошибка определения параметров нарастает при уменьшении скорости движения ВС, что неприемлемо при построении траекторий полета в районе аэродрома, а также в задачах радиолокационного наблюдения легкой (маловысотной) авиации.

Наконец, формулы (3.5) не имеют смысла при малой кривизне траектории $K \rightarrow 0$, где $K = 1/R$. Для преодоления этого затруднения можно преобразовать выражения (3.5) к виду, не содержащему координаты центра окружности x_R, y_R , который может использоваться для построения как прямолинейных, так и криволинейных траекторий. Для решения этой задачи разложим функции X, Y в ряд Тейлора в окрестности некоторой точки \bar{t} . Имеем [7]:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= V \cos \gamma; & \ddot{X} &= \dot{V} \cos \gamma - V \dot{\gamma} \sin \gamma & \text{и тт.д} \\ \dot{Y} &= V \sin \gamma; & \ddot{Y} &= \dot{V} \sin \gamma + V \dot{\gamma} \cos \gamma & \text{и тт.д} \\ V &= at + b; & \dot{V} &= a; & \ddot{V} = 0; \\ \gamma &= \frac{Kat^2}{2} + Kbt + \gamma_0; & \dot{\gamma} &= Kat + Kb; & \ddot{\gamma} = Ka; & \ddot{\gamma} = 0. \end{aligned}$$

При $\bar{t} = 0$ искомое разложение будет иметь вид:

$$\begin{aligned} X &= \bar{x} + b \cos \gamma_0 t + (a \cos \gamma_0 - Kb^2) \frac{t^2}{2} + \dots \\ Y &= \bar{y} + b \sin \gamma_0 t + (a \sin \gamma_0 - Kb^2) \frac{t^2}{2} + \dots \end{aligned} \quad (3.6)$$

где $\bar{x} = x_{(0)}$; $\bar{y} = y_{(0)}$.

Формулы (3.6) не содержат координат центра окружности, они имеют смысл при сколь угодно малом значении кривизны K траектории полета ВС, а при $K = 0$ описывают прямолинейную траекторию. В отличие от радиационного в задачах обработки радиолокационной информации независимого представления координат X, Y полиномами, формулы (3.6) содержат согласованные параметры. Нетрудно заметить, что независимое представление координат X, Y полиномами выше второй степени на начальных этапах прокладки траектории методически не имеет смысла. В большинстве случаев, как показывает практика, при таком представлении будем получать траектории, кривизна которых не только не является постоянной, но и меняет знак при переходе от обзора к обзору. Другим полезным свойством выражений (3.6), следующим из согласованности параметров, становится возможность использовать при расчетах любое количество первых членов разложения, в зависимости от требуемой точности вычислений.

Линеаризацию, составление и решение системы нормальных уравнений траектории маневра целесообразно выполнять не в прямоугольных координатах (X, Y) , а в полярных R, φ :

$$R = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad \varphi = \arctg\left(\frac{y}{x}\right). \quad (3.7)$$

Преимущество заключается в том, что измерения R, φ являются равноточными, и это позволяет при использовании формул (3.7) избежать необходимости применения весовых коэффициентов в системе нормальных уравнений, т.е. сделать процедуру расчета более корректной.

Традиционные процедуры вычисления коэффициентов по частным производным функций координат от параметров a, b, K, γ_0 , как отмечено выше, не дают желаемого результата в силу достаточно большой погрешности вычисления параметров, особенно на начальных этапах построения траектории. Для обхода этого затруднения в качестве базовых параметров используются не вычисленные значения a, b, K, γ_0 , а измеренные координаты движущихся ВС. Следуя [1], назовем алгоритмически безошибочными процедурами такие программные функции, которые позволяют исключить ошибки вычислений при отсутствии ошибок измерений. В нашем случае для достижения алгоритмической безошибочности необходимо получить на входе, как показывают результаты моделирования, четыре измерения местоположения ВС, т.е. восемь координат, используемых в качестве параметров.

Примером алгоритмической ошибки может служить традиционно используемое в задачах сопровождения маневрирующих целей выражение для вычисления горизонтальной скорости V полета: $V = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} / \Delta t$, поскольку формула не применима для круговой траектории. При переходе к

полярной системе параметры a, b, K, γ_0 окажутся искомыми функциями координат R_i, φ_i ($i = 1, 2, 3, 4$). С этой целью формулы (3.7) преобразуются к виду $R = (R_i, \varphi_i)$, $\varphi = (R_i, \varphi_i)$. Тогда частные производные для коэффициентов системы нормальных уравнений определяются как:

$$\frac{\partial R}{\partial R_1} = \frac{\partial R}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial a} \cdot \frac{\partial a}{\partial R_1} + \frac{\partial R}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial b} \cdot \frac{\partial b}{\partial R_1} + \dots + \frac{\partial R}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial a} \cdot \frac{\partial a}{\partial R_1} \quad \text{и т.д.} \quad (3.8)$$

Вычислив частные производные и значения координат при выбранных параметрах, получим две системы из восьми нормальных уравнений с восемью неизвестными относительно искомым поправок $\Delta R, \Delta \varphi$ в соответствии с традиционным алгоритмом обработки радиолокационной информации, изложенным в [2]. На каждом шаге, при получении очередного измерения от радиолокатора, объем вычислений, несмотря на громоздкость выражений (3.8), является относительно небольшим для современных вычислительных средств, и как показывают результаты статистического моделирования, вполне реализуемым в реальном масштабе времени. Согласно результатам исследования [7], излагаемый метод характеризуется меньшими значениями погрешности в сравнении с традиционными алгоритмами [2]. Дисперсия вычисления любого параметра находится по известным формулам:

$$\sigma_{R_j}^2 = \frac{H_j^R}{|H|_R}; \quad \sigma_{\varphi_j}^2 = \frac{H_j^\varphi}{|H|_\varphi},$$

где $|H|_R, |H|_\varphi$ – определители системы нормальных уравнений; H_j^R, H_j^φ – алгебраические дополнения j -х диагональных элементов определителей.

3.2. ОБОБЩЕНИЕ ДАННЫХ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ

Одним из направлений развития систем обслуживания воздушного движения является предоставление каждому пилоту полной информации о складывающейся по маршруту выполняемого им полета обстановке. Достигнутый в среднем уровень авиационной техники позволяет ему пользоваться лишь показаниями индикаторов, установленных перед ним на приборной панели – о состоянии ВС, а также бортового радиолокатора – о ситуации за бортом в непосредственной близости. Лишь наземным службам – диспетчерскому персоналу – доступна общая картина, дающая возможность контролировать потоки движения и в случае необходимости принимать решения о вмешательстве в ход процесса. Экипаж такой информацией не располагает, и в своих действиях вынужден исполнять указания диспетчеров, не всегда отчетливо сознавая их необходимость. Достижения техники связи позволяют уже в настоящее время сделать действия и команды диспетчера более прозрачными для пилотов – за счет трансляции на борт фактической информации о положении дел в зоне выполнения полетов. Данные обобщаются ПО наземного центра по результатам измерений многих источников. К ним относятся принадлежащие системе РЛК, АРП, средства метеорологических на-

блюдений, а также доклады бортовых навигационных систем, поступившие от всех участников движения, оснащенных аппаратурой автоматического зависимого наблюдения (АЗН). В этом состоит концепция так называемого всестороннего наблюдения (АЗН-В), излагаемая в книге 6 данной серии.

Задача обобщения данных нескольких источников рассмотрена в следующей главе с позиций комплексного гипотезного сопровождения. В большинстве известных систем этот подход не приобрел доминирующей роли. Считается, что в вычислительном отношении предпочтительно сначала прокладывать траектории объектов независимо по данным каждого источника, а на следующем этапе – этапе третичной обработки – использовать их для повышения качества отображаемой диспетчеру информации. Траектории каждого ВС, наблюдаемого с разных ракурсов несколькими радиолокаторами, при обобщении позволяют не только точнее определять и предсказывать местоположение объекта, но и оперативно отслеживать текущие значения погрешности каждого источника измерений.

Алгоритмически задача решается в три этапа. Сначала все отметки

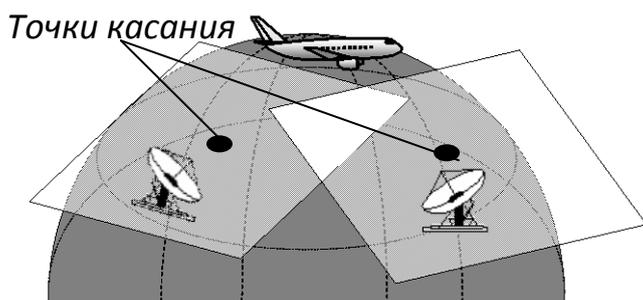


Рис. 3.3. Объединение данных двух РЛС

синхронизируются по времени и согласуются по высоте. Каждый источник РЛИ обнаруживает и измеряет положение цели в пространстве в разные моменты времени. Для синхронизации данных ПО устанавливает единый для всех РЛС и пеленгаторов момент местоопределения ВС и пере-

считывает координаты для корректности их сопоставления. Ранее упоминалось, что обычно на данном шаге используется линейная экстраполяция. Согласование по высоте полета необходимо для работы с отметками первичной локации. В ГА обычно эксплуатируются двухкоординатные источники ПРЛ, позволяющие измерить лишь наклонную дальность и азимут объекта. В отсутствии ВРЛ значение высоты искусственно присваивается наблюдаемой цели и уточняется в процессе сопровождения алгоритмически либо по диспетчерскому вводу. Не случайно при наличии только данных ПРЛ половину рабочего времени диспетчера занимают переговоры с пилотами, причем половину переговоров составляют справки о высоте полета. Для уменьшения ошибки преобразования приходится вводить (посредством проекций на землю и на нормаль к ее поверхности) в наклонные координаты первичного трека относительную высоту H_{ref} полета. Формулы для пересчета координат с учетом кривизны земли и различия магнитных склонений в точках стояния РЛП приведены в книге 1 (раздел 2.2.1.4) настоящей серии. Заметим, что они не учитывают явление рефракции, обусловленное искривлением электромагнитных волн в атмосфере и проявляющееся в кажущемся смещении удаленных объектов по вертикали. Приведенные в книге 1 формулы поясняет рис. 3.3. На нем схематично изображены две РЛС, измеряющие координаты объекта каждая относительно горизонтальной плоскости, касательной к поверхности земли в точке стояния радара. Даже по известному углу места мы получим высоту полета относительно этой плоскости, а не относительно уровня моря. Однако трассовые РЛС ГА, как правило, не измеряют этой координаты. Определение высоты значительно упрощается при наличии ответчика ВРЛ. В этом случае в центр УВД ретранслируется преобразованные в метры показания бортового альтиметра – датчика барометрического давления. Нетрудно видеть, что ошибка преобразования в общем случае окажется разной для разных источников. Именно ее учитывают рекомендуемые формулы. Далее, рис. 3.3 поясняет, что каждый источник характеризуется собственным направлением на север, и эти оси не параллельны, и следовательно, измеренные азимуты окажутся не согласованными для наблюдающих РЛС. Сказанное создает представление о том, что решение задачи обобщения результатов измерений требует достаточно скрупулезного учета многих факторов.

На втором этапе отметки группируются по их попаданию в строб допустимых отклонений, который определяется ошибками оценки координат. Затем производится отождествление отметок и их объединение. Если в строб попадают отметки от многих РЛС, и отметки принадлежат разным целям, то для выполнения процедуры группирования сопоставляются все возможные варианты принадлежности точек образуемым группам. Вычисляются разности координат в каждой группе и корреляционная матрица P_i ошибок для каждого i -го варианта группирования – как сумма корреляционных матриц ошибок группируемых координат. Составляется квадратичная форма $Q_i = Z_i^T P_i Z_i$ и принимается вариант, для которого значение Q_i минимально.

Пусть в строб допустимых отклонений попали две отметки с векторами параметров θ_{11} и θ_{12} , полученные от первой РЛС, и одна отметка с вектором параметров θ_2 от второй РЛС. Корреляционные матрицы ошибок равны P_1 и P_2 соответственно. Возможны два варианта группирования Z_1 и Z_2 :

$$Z_1 = \left\| \begin{array}{l} \theta_{11} \rightarrow \theta_2 \\ \theta_{12} \end{array} \right\|; \quad Z_2 = \left\| \begin{array}{l} \theta_{11} \\ \theta_{12} \rightarrow \theta_2 \end{array} \right\|.$$

Корреляционные матрицы ошибок для первого и второго вариантов группирования одинаковы и определяются как $P_i = P_1 + P_2$. Конкурирующие квадратичные формы $Q_1 = Z_1^T P_i Z_1$ и $Q_2 = Z_2^T P_i Z_2$. Из рассмотренных вариантов выбирается первый, если $Q_1 < Q_2$, или второй – в противном случае.

Пусть имеем произвольное число k выборок $\left\{ \theta_{i_k}^k(t_{ij}) \right\}$, т.е. векторов измеренных или оцененных параметров движения для i -й траектории k -го источника на j -м обзоре в момент времени t_{ij} , $i = 1, 2, \dots, I_k$; $j = 1, 2, \dots, n$. Зафиксируем $k = 1, 2$. Требуется установить соответствие между траекториями, построенными по данным наблюдения двух источников, однозначно определив, какие траектории относятся к одному и тому же ВС и каким радициям одного источника не соответствует ни одна траектория другого источника. В частном случае, когда каждая выборка содержит оценки одной траектории ($I_1 = I_2 = 1$), задача сводится к селекции (различению) двух гипотез: относятся ли траектории к одному ВС или нет. Для ее решения необходимо построить процедуру отождествления – статистическое решающее правило, устанавливающее, отождествлены или не отождествлены две траектории.

Обычно решающие правила характеризуются тремя параметрами: вероятностью прокладки ложной траектории, вероятностью пропуска (отвержения) действительной траектории (так называемые ошибки первого и второго рода) и средним временем принятия решения. Однако при реализации в ПО большое значение имеют еще два показателя: среднее число операций в каждом такте обработки и потребности в компьютерной памяти. В зависимости от постановки задачи рассматриваются различные вероятностные модели отождествляемых объектов и предъявляются соответствующие требования к характеристикам решения задачи [4]. Приведем их перечень.

а). Отождествить траектории ВС, построенные по измерениям разных источников, обеспечить заданные значения вероятностей ошибок первого и второго рода при ограничении на время принятия решения. Процедура должна работать в реальном масштабе времени, т.е. при жестких ограничениях на среднее число операций в одном такте обработки и на потребности в памяти.

б). Отождествить первичную радиолокационную информацию с первичной или с траекторной информацией при тех же ограничениях.

с). Отождествить траектории, построенные по данным РЛС, с плановыми траекториями ВС при тех же ограничениях.

д). Отождествить траектории, построенные по данным РЛС, с эталонными траекториями, обеспечив заданные значения вероятностей ошибок (без ограничений на время принятия решения, оперативную память и т.д.).

Эталонной называется экстраполированная траектория движения ВС, построенная с упреждением на один обзор вперед по результатам предшествующей обработки – с помощью статистических методов. Примером может служить линия регрессии с минимизацией ошибок сглаживания измеренных координат по методу наименьших квадратов. Выше использовалась аналогия процесса радиолокационного сопровождения ВС с калибровкой измерительных инструментов на основе сопоставления с эталоном, а также аналогия с астрономическими вычислениями положения планет на их орбитах в фиксированные моменты времени. Сходство в том, что помимо ошибок измерений следует учитывать ошибки эталона. Различие – точность калибров и законов Кеплера на порядок выше, чем в экспериментальных замерах, а эталонная траектория накапливает в себе погрешность всей предыстории полета ВС, и может оказаться соизмеримой с ошибками радиолокационных измерений.

Сущность метода наименьших квадратов (по К. Гауссу) заключается в допущении, что «убыток» от замены точного (неизвестного) значения m физической величины ее приближенным значением X , вычисленным по результатам наблюдений, пропорционален квадрату ошибки: $(X - m)^2$. В этих условиях оптимальной оценкой признают такую лишенную систематической ошибки величину X , для которой среднее значение «убытка» минимально.

3.3. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ И ПРОЦЕДУРЫ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ

Процесс отождествления траекторий, сопровождаемых разными РЛС, можно формализовать как задачу о различении статистических гипотез при коррелированных по времени результатах наблюдений. Сглаженные значения координат траекторий имеют случайные составляющие, которые можно рассматривать как гауссовские марковские случайные процессы. Известно, что при сопровождении и сглаживании параметров траекторий радиации шееется нелинейная операция стробирования измеренных точек, однако распределение вероятностей случайных составляющих сглаженных значений координат и скорости ВС хорошо аппроксимируется гауссовским [4].

Обозначим через (x_n, y_n) вектор-разность координат двух траекторий, проведенных на один и тот же момент времени, или разность координат сопровождаемой траектории и ее проекции на плановую траекторию (при отождествлении измерений с планом полета). Значения x_n и x_{n+1} коррелированы с коэффициентом корреляции r_n , точно так же коррелированы y_n и y_{n+1} . Предположим, что значения x_i и y_i статистически независимы.

При гипотезе H_1 о том, что траектории соответствуют одному и тому же ВС, полагаем, что $M x_n = 0, M y_n = 0$, а дисперсии $M x_n^2 = M y_n^2 = \sigma_n^2$. При гипотезе H_2 о том, что траектории соответствуют разным ВС, полагаем, что $M x_n = \rho_n \cos \varphi_n, M y_n = \rho_n \sin \varphi_n$, где $\rho_n \geq \rho, \rho$ – минимальное допустимое расстояние между ВС, а φ_n – угол ориентации вектора-разности (x_n, y_n) . Незвестный угол φ_n будем приближенно считать постоянным, $\varphi_n \equiv \varphi$; положим далее $\rho_n = \rho$. Тогда совместное распределение для $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$:

$$P(x_1, y_1, \dots, x_n, y_n / H_i) = \exp \left\{ - \left[(x_1 - a_i(1))^2 + (y_1 - b_i(1))^2 \right] / 2\sigma_1^2 \right\} \times \\ \times \prod_{k=1}^{n-1} [2\pi\sigma_k^2(1-r_k^2)]^{-1} \times \exp \left\{ - \frac{(x_{k+1} - r_k x_k - a_i(k))^2 + (y_{k+1} - r_k y_k - b_i(k))^2}{2 \cdot \sigma_k^2(1-r_k^2)} \right\},$$

где: гипотезе H_1 соответствует $a_1(k) \equiv b_1(k) \equiv 0$ при $k = 1, \dots, n$; гипотезе H_2 соответствует $a_2(k) = \rho(1-r_k) \cos \varphi, b_2(k) = \rho(1-r_k) \sin \varphi$; причем $k = 2, \dots, n$; $a_2(1) = \rho \cos \varphi, b_2(1) = \rho \sin \varphi$. Можно считать, что неизвестный угол φ имеет априорное равномерное распределение в интервале $(0, 2\pi)$. Тогда, выполняя интегрирование по φ , с учетом соотношения

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{a \cos \varphi} d\varphi = I_0(a),$$

где I_0 – функция Бесселя, находим следующее выражение L_n для логарифма отношения правдоподобия гипотез H_1 и H_2 :

$$L_n = \ln \frac{P(x_1, y_1, \dots, x_n, y_n / H_1)}{P(x_1, y_1, \dots, x_n, y_n / H_2)} = \frac{\rho^2}{2\sigma_1^2} + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\rho^2(1-r_k)}{2\sigma_k^2(1+r_k)} - \ln I_0 \left(\rho \sqrt{S_1^2(n) + S_2^2(n)} \right),$$

$$\text{где } S_1(n) = \frac{x_1}{\sigma_1^2} + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{(x_{k+1} - r_k x_k)}{\sigma_k^2(1+r_k)}, \quad S_2(n) = \frac{y_1}{\sigma_1^2} + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{(y_{k+1} - r_k y_k)}{\sigma_k^2(1+r_k)}.$$

Отметим, что статистика L_n при большом числе наблюдений представляет собой марковский случайный процесс. Она достаточна для различения гипотез H_1 и H_2 и обладает, кроме того, свойством транзитивности:

$$P(L_{n+1} / x_1, y_1, \dots, x_n, y_n) = P(L_{n+1} / L_n).$$

Оптимальное последовательное решающее правило для различения гипотез H_1 и H_2 связано с использованием только текущего значения L_n , которое следует сравнивать с двумя порогами: при $L_n \geq A_n$ принимается гипотеза H_1 , в то время как при $L_n \leq B_n$ принимается H_2 , а при $B_n < L_n < A_n$ считается, что решение еще «не созрело», и наблюдения продолжают. Вычисленные

значения L_n образуют монотонную функцию от более простого выражения $Z_n = \sqrt{S_1^2(n) + S_2^2(n)}$, вследствие чего с порогом можно сравнивать Z_n .

Выше предполагалось, что угол $\varphi_n \equiv \varphi$. Для скрещивающихся траекторий, когда угол φ_n меняется от обзора к обзору сравнительно быстро, допустимо рассматривать значения φ_n неизвестными, случайными и независимыми при различных n . Тогда выражение для L_n преобразуется к следующему виду:

$$L_1 = \frac{\rho^2}{2\sigma_1^2} - \ln I_0 \left(\frac{\rho \sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{\sigma_1^2} \right),$$

$$L_{n+1} = L_n + \frac{\rho^2(1-r_n)}{2(1+r_n)\sigma_n^2} - \ln I_0 \left(\frac{\rho \sqrt{(x_{n+1} - r_n x_n)^2 + (y_{n+1} - r_n y_n)^2}}{\sigma_n^2(1+r_n)} \right).$$

Рассмотрим случай, когда коэффициенты r_n корреляции равны нулю. Такая ситуация возникает при отождествлении не сглаженной первичной радиолокационной отметки с плановой или эталонной траекторией, или двух не сглаженных траекторий. Она также приближенно соответствует отождествлению не сглаженной траектории одной РЛС и сопровождаемой сглаженной траектории другой РЛС. При $r_n \equiv 0$ выражение для L_n принимает вид:

$$L_{n+1} = L_n + \frac{\rho^2(1-r_n)}{2(1+r_n)\sigma_n^2} - \ln I_0 \left(\frac{\rho l_n}{\sigma_n^2} \right),$$

где $l_n = \sqrt{x_n^2 + y_n^2}$ – расстояние между траекториями при измерении на n -ом обзоре. Отождествление траекторий на основе анализа расстояний между ними оптимально лишь в случае независимости x_n, y_n, φ_n при разных n .

При выводе формул для отношения L_n правдоподобия гипотез отождествления траекторий использовалось допущение о независимости случайных составляющих координат x_i и y_i . Это предположение выполняется с достаточной точностью, если эллипсоиды рассеивания ошибок измерений координат не очень вытянуты. Исследования алгоритмов фильтрации траекторий с учетом коррелированности ошибок измерений x_i и y_i показывают высокую точность раздельного сглаживания составляющих координат по осям эллипса, вдоль и поперек формируемой линии движения ВС, что подтверждает достаточную общность проведенного анализа.

Рассмотрим последовательные правила покоординатного отождествления. В этом случае значения x_n и y_n исследуются отдельно друг от друга. При гипотезе $H_1: M x_n = 0, D x_n = \sigma_n^2$. При гипотезе $H_2: |M x_n| \geq \Delta$. Сложную гипотезу H_2 заменяем двумя простыми – $H_2^+: M x_n = \Delta$ и $H_2^-: M x_n = -\Delta$. Логарифм L_n^* отношения правдоподобия записывается в виде:

$$L_n^*(\vec{x}) = \frac{\Delta^2}{2\sigma_1^2} + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\Delta_k^2(1-r_k)}{2\sigma_k^2(1+r_k)} - \left| \frac{x_1 \Delta}{\sigma_1^2} + \sum_{k=2}^n \frac{(x_k - r_k x_{k-1}) \Delta}{\sigma_k^2(1+r_k)} \right|,$$

что соответствует проверке гипотезы H_1 против той из гипотез H_2^+ или H_2^- , которая при наблюдаемых значениях x_1, \dots, x_n является более правдоподоб-

ной согласно оценке $\pm \Delta$. Аналогично записывается $L_n^*(\bar{y})$. Гипотеза H_1 принимается при выходе за верхний порог обеих величин L_n^* , гипотеза H_2 – при выходе за нижний порог хотя бы одной из них. Таким же способом можно получить статистики $L_n^*(V)$ и $L_n^*(\psi)$ для скорости и курса. Однако для контрастного разрешения ВС в случае полета в группе с общим курсом разумнее ограничиться стробированием по скорости и курсу.

Правило отождествления по одному наблюдению рассогласований $x_n, y_n, \delta_{V_x}(n), \delta_{V_y}(n)$ основано на проверке попадания этого четырехмерного вектора или отдельных его компонент в допустимый эллипсоид рассеивания:

$$\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^4 b_{ij}(n) Z_i(n) Z_j(n) \leq R^2,$$

где $Z_1(n) = x_n, Z_2(n) = y_n, Z_3(n) = \delta_{V_x}(n), Z_4(n) = \delta_{V_y}(n)$; $\| b_{ij}(n) \|$ – матрица, обратная матрице корреляций $x_n, y_n, \delta_{V_x}(n), \delta_{V_y}(n)$.

На основе данного неравенства сформированы следующие фиксированные решающие правила (функции $F 1 - F 4$):

$$F 1: x_n^2 + y_n^2 \leq R_1^2, \quad F 2: \frac{x_n^2}{\sigma_n^2} + \frac{y_n^2}{\sigma_n^2} \leq R_2^2,$$

$$F 3: b_{11}(n) x_n^2 + 2b_{13}(n) x_n \delta_{V_x}(n) + b_{33}(n) (\delta_{V_x}(n))^2 + b_{22}(n) y_n^2 + 2b_{24}(n) y_n \delta_{V_y}(n) + b_{44}(n) (\delta_{V_y}(n))^2 \leq R_3^2,$$

$$F 4: \sum_{i,j=1}^4 b_{ij}(n) Z_i(n) Z_j(n) \leq R_4^2.$$

Решающие правила $F 3$ и $F 4$ учитывают и координаты, и скорости движущегося объекта. $F 3$ согласно замыслу по координатного отождествления отличается от $F 4$ тем, что ковариационная матрица b_{ij}^{-1} считается расщепленной по x_n и по y_n . Она распадается на две двумерные матрицы, связывающие x, V_x и y, V_y . При этом отпадает необходимость в пересчете и обращении полной четырехмерной матрицы.

3.4. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕШАЮЩИХ ПРАВИЛ ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКИ

Анализ эффективности различных методов отождествления траекторий выполнен [4] с помощью имитационной модели, в состав которой входят программы, реализующие подыгрыш радиолокационной информации, последовательные процедуры отождествления, анализ полученных результатов. Имитация радиолокационного поля позволяет моделировать процесс измерений, одновременно выполняемых десятками источников с указанными экспериментатором координатами точек стояния, направлением луча антенны в момент запуска задачи, погрешностями по дальности σ_D , азимуту σ_β , углу места и другими характеристиками. Допускается наблюдение движения сотен ВС, маршруты которых могут задаваться сценариями, либо генерироваться в пределах установленных воздушных трасс и коридоров случайным образом. Случайным является при этом выбор разрешенных точек и момен-

тов времени входа в зону действия системы, направления движения в точках разветвления трасс, типов ВС и т.д. На каждом такте имитации вычисляются истинные параметры движения, далее с помощью датчика нормального распределения на них накладываются ошибки измерения, формируются кодограммы сообщений РЛК, поток которых дополняется ложными измерениями. Далее суммарный поток прореживается пропусками реальных отметок, и в таком виде подается на вход алгоритмов вторичной обработки РЛИ.

ПО вторичной обработки осуществляет захват и сопровождение траекторий ВС по данным нескольких РЛС, сглаживание параметров их движения, пересчет показателей качества траекторий. Этап третичной обработки представлен и исследован на основе описанных выше процедур отождествления:

- четыре последовательные процедуры L_1, L_2, L_3, L_4 ;
- четыре фиксированные процедуры $F 1, F 2, F 3, F 4$.

Исследовано влияние на качество отождествления как внешних условий обработки, не управляемых ПО, так и внутренних параметров процедур. В качестве неуправляемых в экспериментах варьировались расстояния между ВС, ошибки измерения координат, наличие корреляции между x и y . Параметры процедур – это величины порогов, размеры стробов, коэффициент r корреляции. Сравнительный анализ результатов работы процедур строился на основе сопоставления величин вероятностей неправильного решения и средних значений времени принятия решений.

Результаты работы четырех последовательных процедур L_n в зависимости от расстояния R между ВС и ошибок σ_D, σ_β измерений представлены в табл. 3.1. Здесь $R = 0$ соответствует случаю, когда отождествляемые траектории, прокладываемые по данным нескольких РЛС, относятся к одному объекту. Ситуации $R > 0$ описывают отождествление траекторий нескольких ВС, наблюдаемых несколькими источниками. Значения R указаны в километрах.

Средние времена принятия решения приведены в табл. 3.2 (в количествах обзоров) для значений погрешностей измерений $\sigma_D = 1.5$ км, $\sigma_\beta = 10'$.

Таблица 3.1.

Вероятность принятия неправильного решения (последовательные процедуры)

Ошибки измерения	Расстояние между ВС	Типы последовательных процедур			
		L_1	L_2	L_3	L_4
$\sigma_D = 1$ км $\sigma_\beta = 10'$	0	0,02	0,05	0,005	0,025
	3	0,05	0,06	0,02	0,005
	4	0,005	0,0...	0,0...	0,0...
	5	0,0...	0,0...	0,0...	0,0...
$\sigma_D = 1,5$ км $\sigma_\beta = 10'$	0	0,07	0,114	0,038	0,094
	3	0,163	0,198	0,079	0,024
	4	0,016	0,036	0,006	0,002
	5	0,005	0,002	0,0...	0,0...
$\sigma_D = 2$ км	0	0,13	0,205	0,094	0,2
	3	0,3	0,24	0,181	0,07
	4	0,09	0,123	0,031	0,005

$\sigma_\beta = 10'$	5	0,02	0,19	0,0...	0,0...
$\sigma_D = 2$ км $\sigma_\beta = 20'$	0	0,15	0,22	0,115	0,25
	3	0,32	0,26	0,19	0,075
	4	0,13	0,13	0,06	0,015
	5	0,02	0,025	0,0...	0,0...

Таблица 3.2.

Среднее время принятия решений (последовательные процедуры)

Расстояние между ВС (км)	Типы последовательных процедур			
	L_1	L_2	L_3	L_4
0	4,5	5,6	4,6	5,3
3	4,5	4,8	4,0	4,7
4	3,4	3,5	2,8	3,4
5	2,4	2,2	1,8	2,3

Из содержимого табл. 3.1 и 3.2 следует, что наилучшие результаты дают статистики L_3 и L_4 , причем характерно, что L_3 принимает решение несколько быстрее, чем L_4 . С другой стороны, как можно видеть из формул раздела 3.2, L_4 проще реализуется. Наконец, L_3 обеспечивает меньшую ошибку при возрастании σ_D и σ_β , т.е. предполагает более широкий диапазон применения в ПО радиолокационного сопровождения.

Результаты моделирования фиксированных процедур $F 1 - F 4$ показывают, что при $R = 0$ статистики $F 2 - F 4$ имеют постоянный уровень принятия неправильных решений, зависящий от размеров стробов, а при $R > 0$ процент ошибки уменьшается с ростом R и с увеличением точности оценок параметров движения. Для статистики $F 1$, не связанной с такими оценками, наблюдается обратная картина: процент ошибочных решений уменьшается с ростом n при $R = 0$ и остается высоким при $R > 0$.

В табл. 3.3 предпринята попытка использовать различие свойств исследуемых решающих функций. В ней приведены установившиеся значения вероятности ошибки для статистик $F 2 - F 4$ при $R = 0$, а для $R > 0$ указан номер обзора, начиная с которого процедура выходит на уровень вероятности ошибки, не превосходящий 0,01. Соответствующие ячейки табл. 3.3 заштрихованы. В колонке статистики $F 1$ представлена противоположная ситуация. В заштрихованных ячейках, соответствующих $R = 0$, указан номер обзора, а при $R > 0$ – вероятность принятия неверного решения.

Таблица 3.3.

Вероятность принятия неправильного решения (фиксированные процедуры)

Ошибки измерения	Расстояние между ВС	Типы фиксированных процедур			
		$F 1$	$F 2$	$F 3$	$F 4$
$\sigma_D = 1$ км	0	4	0,20	0,10	0,09
	3	0,25	7	3	3
	4	0,07	5	1	1

$\sigma_\beta = 10'$	5	0,02	2	1	1
$\sigma_D = 1,5 \text{ км}$	0	10	0,22	0,12	0,11
	3	0,3	12	6	5
$\sigma_\beta = 10'$	4	0,14	9	2	2
	5	0,04	4	1	1

Заметим, что статистика $F 3$ отличается от $F 4$, кроме сказанного ранее, еще и тем, что получена в предположении независимости x и y : $\text{cov}(x, y) = 0$. Данные табл. 3.3 показывают, что это допущение мало сказывается на результатах работы решающих функций. Напомним, что программно $F 3$ реализуется существенно проще $F 4$. Менее очевидны достоинства и недостатки последовательных процедур. Статистики $L_1 - L_4$ получены в предположении, что дисперсии оценок по координатам равны между собой $\sigma_D^2 = \sigma_\beta^2$, и что корреляция между x и y отсутствует: $\text{cov}(x, y) = 0$. Результаты моделирования работы алгоритмов, основанных на последовательных правилах принятия решений, сосредоточены в табл. 3.4. Они говорят о допустимости сделанных предположений, позволяющих с помощью статистик $L_1 - L_4$ обеспечить приемлемый уровень ошибок даже в наихудших для отождествления условиях.

Вероятности ошибочных решений для статистик $L_1 - L_4$, а также их значения, усредненные по множеству состояний σ_x / σ_y и $\text{cov}(x, y)$ сгруппированы в табл. 3.4 по отношениям величин погрешности измерений координат ($\sigma_x / \sigma_y = 3$, $\sigma_x \approx \sigma_y$) и по значениям ковариации ($\text{cov}(x, y) = 0$, $\text{cov}(x, y) \rightarrow \text{max}$). Как и предыдущие результаты, они заимствованы из [4].

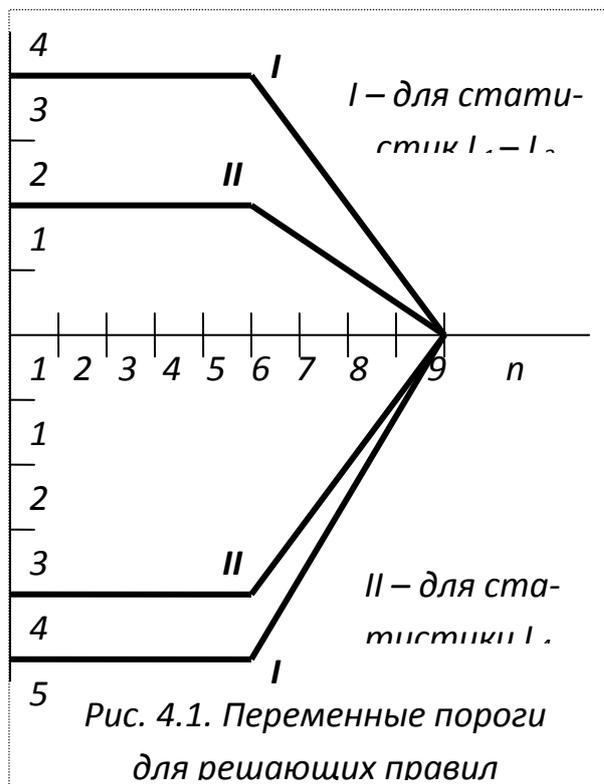
Качество работы решающих правил $L_1 - L_4$ непосредственно зависит от выбранных при проектировании ПО значений A_n и B_n порогов. При малых порогах решения принимаются быстро, но среди них велика доля неправильных. При увеличении значений порогов количество ошибок уменьшается, однако возрастает среднее время принятия решений.

Таблица 3.4.

Вероятность принятия неправильного решения в условиях различных соотношений ошибок измерения (последовательные процедуры)

Соотношение ошибок измерения	Дистанция между ВС (км)	Типы последовательных процедур			
		L_1	L_2	L_3	L_4
$\sigma_x / \sigma_y = 3$, $\text{cov}(x, y) = 0$	0	0,09	0,155	0,06	0,115
	3	0,243	0,255	0,1	0,045
	4	0,03	0,07	0,025	0,003
	5	0,01	0,015	0,0...	0,0...
$\sigma_x \approx \sigma_y$, $\text{cov}(x, y) \rightarrow \text{max}$	0	0,04	0,13	0,07	0,095
	3	0,155	0,17	0,025	0,005
	4	0,012	0,01	0,0...	0,0...
	5	0,003	0,0...	0,0...	0,0...
Средние	0	0,07	0,114	0,038	0,094
	3	0,163	0,198	0,079	0,094

значения	4	0,016	0,036	0,006	0,002
	5	0,005	0,002	0,0...	0,0...



На рис. 3.4 представлены наилучшие величины порогов, полученные по результатам статистического моделирования. Нетрудно видеть, что все процедуры «усекаются» на определенном шаге n . Причина заключается в том, что в процессе их исполнения необходимо принимать решения за ограниченное время. В подавляющем большинстве случаев статистики $L_1 - L_4$ выходят за пороги до шага «усечения», и лишь около пяти процентов случаев связаны с принятием решения на последнем шаге.

Результаты исследования позволяют рекомендовать значение коэффициента корреляции $r = 0.6$, что соответствует установившемуся

режиму фильтрации. При уменьшении значения r , качество отождествления в процедурах $L_2 - L_4$ несколько ухудшается, и при достижении $r = 0$ показатели качества их работы совпадают с L_1 .

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы. В системах, имеющих достаточные ресурсы времени для решения задач отождествления, следует применять решающее правило L_3 , дающее наилучшее качество отождествления траекторий. В системах, работающих в жестком режиме реального времени, имеет смысл применять комбинированное решающее правило. Если на отождествление поступают траектории с хорошим качеством прокладки, т.е. такие, по которым получены достаточно точные оценки параметров их движения, то следует применять процедуру F_3 однократного отождествления. Если же параметры траектории оценены со значительной погрешностью, тогда в зависимости от имеющихся ресурсов времени следует воспользоваться одной из последовательных процедур отождествления L_3 или L_4 .

4. КОМПЛЕКСНОЕ ГИПОТЕЗНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ

4.1. ПОСТАНОВКА И ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ

4.1.1. Принципы гипотезной обработки РЛИ. Напомним, что ПО обработки РЛИ строилось в условиях ограниченных ресурсов существовавших

средств вычислительной техники, и его создатели не видели перспектив ратификации необходимой целостности процесса сопровождения. Теперь такие возможности предоставлены и реализуются на практике. Л.Е. Широковым в [6] изложены основы синтеза алгоритмов радиолокационного сопровождения движущихся объектов, основанные на качественно новом подходе к задачам захвата и обнаружения, к процессам ассоциации, фильтрации и экстраполяции отметок, названные гипотезной обработкой информации. Анализ перечисленных задач приводит к заключению, что в сложных условиях наблюдения работа традиционных алгоритмов характеризуется большим количеством ложных траекторий, перепутыванием действительных траекторий, потерями сопровождения, пропуском ВС, совершающих полеты. Причины недостатков заложены в погрешности измерения координат цели с одной стороны и в ошибке выставления математического строга ожидания истинной отметки около прогнозируемого положения на следующем обзоре – с другой.

Оценка параметров движения, в частности, определение скорости ВС, осуществляется линейными радиции щее-дифференцирующими фильтрами [2], имеющими невысокую точность и не позволяющими выполнить совместную обработку информации от нескольких источников. Начальные значения составляющих скорости объекта обычно далеки от истинных. В результате, время переходного процесса от обнаружения к сопровождению в известных фильтрах довольно значительно. При неполном измерении координат, например, при наличии только пеленгов, сопровождение осуществляется лишь по поступающим координатам – без вычисления не измеряемых координат и скоростей движения объектов.

Существует возможность и в условиях такой обстановки добиться необходимой точности сопровождения всех наблюдаемых целей с достоверным определением их неизмеренных координат и скоростей движения на основе поддержания информационной целостности системы. Комплексное гипотезное сопровождение (КГС) объектов объединяет функции, традиционно возлагаемые на первичную, вторичную и третичную обработку, использует все полученные отметки и пеленги, дополняя их данными планов полетов, и с новым качеством организует захват, обнаружение и процессы сопровождения движущихся объектов: ассоциацию и фильтрацию измерений, экстраполяцию координат и прокладку траекторий ВС.

Новое качество и принципиальное отличие гипотезной обработки состоит в следующем. В традиционных системах принятие решения о принадлежности очередной отметки той или другой сопровождаемой траектории осуществляется на основе формального критерия максимума правдоподобия (выражения 2.1, 2.2 раздела 2 данной книги). При большом количестве ложных отметок, очевидно, велика вероятность того, что алгоритм выбора на рждом обзоре остановится на одной из них. Однако и в обычных условиях наблюдения эта вероятность не стремится к нулю. Важно, что процесс сопровождения управляется обратной связью от характеристик складывающейся-

ся обстановки. Мы приспособляемся к ее изменениям. Заслуга создателей гипотезной схемы в том, что они смогли преодолеть этот стереотип мышления. Гипотезные алгоритмы фактически принимают на себя управление радиисом подбора точек к эталонной траектории и делают его более целенаправленным. По каждой новой отметке, исходя из условий наблюдения, строится несколько гипотез наиболее вероятного дальнейшего движения объекта, и по ним производится выбор и привязка точки к существующему эталону.

Захват на сопровождение производится по первой отметке, поступившей от радара или от пеленгатора, без ожидания ее подтверждения. Значения не измеряемых координат (дальность при работе с пеленгатором) и скоростей движения предполагаемого объекта задаются в виде гипотез движения, для формирования которых используется априорная информация о диапазонах возможных величин параметров движения – летно-технические характеристики ВС, структура воздушного пространства и план его использования. Такой подход позволяет производить автоматический захват даже при низкой вероятности обнаружения и порождает линейный, а не экспоненциальный рост потребностей в компьютерных ресурсах при увеличении интенсивности потока измеренных отметок от источников.

Отождествление поступающих отметок с гипотезными траекториями движения объектов с учетом ложных измерений, преднамеренных помех, неоднозначности и противоречивости данных, обнаружения новых целей – допускает выдвижение одновременно нескольких конкурирующих вариантов идентификации точек (гипотез ассоциации). Из них лишь один соответствует истинному «происхождению» отметок (реализованная гипотеза ассоциации), при этом измеренные координаты отметки каждого ВС связаны с конкретным типом траектории его движения (реализованная гипотеза движения).

Заметим, что полеты гражданской авиации осуществляются в менее сложных условиях наблюдения. Необходимость использования ПО, способного работать в любой обстановке, диктуется тем, что АС УВД по замыслу являются системами двойного назначения. В особых ситуациях их радиационные возможности должны использоваться для решения задач обеспечения национальной безопасности. Однако тенденции развития современных средств навигации, наблюдения и программного обеспечения противоречат этой концепции. Основной акцент делается на использование вторичной локации, автоматического зависимого наблюдения, плановых данных о выполняемых рейсах. Опыт террористической атаки на США показывает, к каким трагедиям может привести отсутствие в системе первичной локации.

Фильтрация в задачах КГС осуществляется субоптимальным гипотезным фильтром второго порядка [6], который обрабатывает все измеренные отметки (пеленги), отождествленные с гипотезными траекториями движения объектов, и для каждого сопровождаемого объекта вычисляет апостериорные вероятности достоверности связанных с ним гипотез (траекторий). По значениям апостериорных вероятностей после двух-трех измерений выделяется

реализованное движение (гипотеза) объекта. Если осуществлять фильтрацию в системе координат источника РЛИ (в естественной системе координат), тогда будем иметь диагональную матрицу ошибок измерения, что позволит без потери точности сократить объем вычислений с помощью декомпозиции фильтра второго порядка на ряд последовательно включаемых частичных фильтров. Каждый из них, уточняя весь вектор оценок и ковариации оценок, обрабатывает только одну координату: азимут, дальность, высоту, скорость сближения и т.д. Такой состав фильтров – азимутальный, дальностный, радиально-скоростной, высотный – дает возможность обрабатывать любое сочетание измеряемых координат в измеренной метке положения ВС, что необходимо при фильтрации пеленгов, антиподов, уводящих помех по дальности и других следствий переотражения радиолокационных сигналов. Под *антиподом* в радиолокации понимают сигнал, отраженный от цели на поверхность земли и затем от земли на приемник антенны, воспринимаемый как эхо-сигнал. *Уводящие помехи по дальности и по радиальной скорости* связаны с объединением совокупности переотраженных сигналов с ложными отметками, приводящим к прокладке ложной траектории. Если такая совокупность не подтверждается на части обзоров, а затем появляется вновь, и процесс пропусков и обнаружений помехи растягивается во времени, то говорят о так называемых *мерцающих* помехах.

Экстраполяция оценок и ковариации оценок координат и скоростей осуществляется в КГС для каждой гипотезной траектории каждого сопровождаемого ВС. Шаг экстраполяции кратен (в частности, равен) темпу поступления измеренных данных, например, равен периоду обзора антенны РЛС. В процессе вычисления упрежденных координат допускается регулирование количества и типа анализируемых гипотез с помощью операций ветвления, склеивания и сброса траектории.

Обнаружение движущегося объекта фиксируется как результат радитификации с какой-либо одной из его гипотезных траекторий совокупности двух-четырёх отметок измеренного положения этого объекта, называемых «своими», таких, для которых данная гипотеза, согласно оценке параметров движения, является наиболее вероятной. Требуемое для обнаружения количество «своих» отметок зависит от достоверности получаемой от источника информации и определяется как минимальное значение, гарантирующее отсутствие ложных траекторий с наперед заданной вероятностью.

Таким образом, концепция гипотезной обработки заключается в выдвигании на каждом шаге радиолокационного наблюдения нескольких гипотез дальнейшей прокладки траектории, не противоречащих законам физики, возможностям маневров ВС и правилам выполнения полетов. В число гипотез включаются, помимо самой «близкой» к экстраполяционной точке, более «отдаленные» новые измеренные отметки, в том числе – ложные, и каждая гипотеза ветвится и сопровождается системой равноправно и автономно от других, с учетом возможных пропусков цели на отдельных обзорах, до тех пор, пока не исчезнет последний шанс продолжить начатое построение. Для

реализации концепции необходим математический аппарат, способный обеспечить линейную зависимость объемов компьютерных вычислений и памяти от количества сопровождаемых объектов.

4.1.2. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ГИПОТЕЗНОЙ ОБРАБОТКИ. Рассмотрим комплексное гипотезное сопровождение движущихся объектов как задачу оценки компонент случайного процесса $\{\mathbf{j}(t), \boldsymbol{\theta}(t)\}$, состояния которого $\mathbf{j}(t)$ определяют количество действительных траекторий во времени, а вектор $\boldsymbol{\theta}(t)$ описывает их параметры. Реальное движение характеризуется интервалами кусочно-постоянных траекторий, что позволяет ограничить анализ рамками хорошо изученных математических моделей. Ненаблюдаемая источниками истинная траектория эволюции точных значений координат и скоростей s движущихся объектов описывается системой дифференциальных уравнений: $\dot{\theta}^{j(m)}(t) = \mathbf{a}(t, j^{(m)}(t), \boldsymbol{\theta}^{(m)}(t))$, $m = \overline{1, s}$, где $\boldsymbol{\theta}^{(m)} = (\theta_1^{(m)}, \theta_2^{(m)}, \dots, \theta_p^{(m)})$ – вектор-строка координат и скоростей m -го объекта; $\mathbf{a}(\dots) = a_1(\dots), a_2(\dots), \dots, a_p(\dots)$ – вектор-функция правых частей дифференциальных уравнений; $j^{(m)}(t)$ – реализуемая гипотеза движения m -го объекта, эволюция которой во времени определяется формулами:

$$P(j^{(m)}(t + \Delta t) = j / j^{(m)}(t) = i) = \begin{cases} 1 - \sum_{i \neq j} q_{ij}(t) \Delta t + o(\Delta t), & i = j, \\ q_{ij}(t) \Delta t + o(\Delta t), & i \neq j, \end{cases}$$

$$i, j = j_1(m), \dots, j_N(m),$$

где $q_{ij}(t)$ – интенсивность перехода скачкообразной составляющей из состояния i в состояние j . Заметим, что здесь переменная $j(m)$ представляет собой индекс гипотезной траектории из рассматриваемого массива гипотез, сопровождаемых по m -му объекту. Его следует отличать от обозначения $j^{(m)}$ радицизованной гипотезы движения m -го объекта.

Задание априорного распределения вероятностей для каждого ненаблюдаемого процесса $\{j^{(m)}(t), \boldsymbol{\theta}^{(m)}(t)\}$, как и траектория его эволюции, выполняется известным набором функций $p_j^{(m)}(\boldsymbol{\theta})$, $j = j_1(m), \dots, j_N(m)$ со свойствами:

$$p_j^{(m)}(\boldsymbol{\theta}) \geq 0, \quad \sum_j p_j^{(m)} = 1, \quad p_j^{(m)} = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} p_j^{(m)}(\boldsymbol{\theta}) d\theta_1 \dots d\theta_p.$$

Совокупность q измеренных отметок $\mathbf{X}^I(t_n) = \{\mathbf{X}_v^I(t_n), v = 1, \dots, q\}$, полученных в момент времени t_n наблюдаемого процесса I -м источником информации $I = I_1, \dots, I_w$, описывается следующей системой уравнений: $\mathbf{X}_v^I(t_n) = \mathbf{H}_{juv}^I(t_n, \boldsymbol{\theta}(t_n)) + \xi_v^I(t_n)$, $v = 1, \dots, q$, где вектор ошибок измерения $\xi_v^I(t_n)$ – независимая гауссова последовательность с нулевым математическим ожиданием и корреляционной матрицей \mathbf{R}^I .

Вектор-функция $\mathbf{H}_{juv}^I(t_n, \boldsymbol{\theta}(t_n))$ определяется информационным составом $j_{uv} = n_k$, т.е. вариантом измеряемых координат v -й отметки ВС от I -го источника с учетом поправки $k \cdot \Delta$ для неоднозначных измерений, Δ – шаг неоднозначности, а также указанием движущегося объекта j_{ov} , к которому она относится. Таким образом, $\mathbf{H}_{juv}^I(\dots)$ описана источником данных и реализованной

в момент времени t_n гипотезой ассоциации $\mathbf{j}_a(t_n) = \{(j_{01}, j_{u1}), \dots, (j_{0q}, j_{uq})\}$. Заметим, что $\{\mathbf{j}_a(t_n)\}$ – также ненаблюдаемый процесс. Вероятность этой гипотезы ассоциации определяется пересечением:

$$P\{\mathbf{j}_a(t_n) = ((j_{01}, j_{u1}), \dots, (j_{0q}, j_{uq}))\} = \prod_{m \in A} P_0^I(\boldsymbol{\theta}^{(m)}(t_n)) \prod_{m \notin A} [1 - P_0^I(\boldsymbol{\theta}^{(m)}(t_n))],$$

где $A = \{j_{01}, \dots, j_{0q}\}$, $P_0^I(\boldsymbol{\theta})$ – вероятность обнаружения I -м источником, наблюдающим m -й объект с координатами и скоростями $\boldsymbol{\theta}$.

В такой постановке ложные измерения трактуются как измерения местоположения объектов, время «жизни» которых стремится к нулю. Поддержание выдвинутых с их помощью гипотез, пусть даже ложных, исключает пропуск реально существующих наблюдаемых объектов, что весьма важно, а возникающие при автоматическом захвате по ним ложные траектории сбрасываются на этапе их проверки на истинность (обнаружение реальных объектов) как не подтвержденные ни одной последующей измеренной отметкой.

Задача состоит в получении текущих оптимальных – по критерию минимума среднеквадратической ошибки – оценок координат и скоростей всех наблюдаемых объектов и в выборе наиболее вероятной гипотезы движения каждого из них. Искомые оценки координат и скоростей m -го объекта являются условные математические ожидания величин векторов-строк $\boldsymbol{\theta}^{(m)}$ при наличии вектора-функции $\mathbf{X}^I(t_n)$ измерений на всей глубине предыстории $M_t(\boldsymbol{\theta}_k^{(m)}) = M(\boldsymbol{\theta}_k^{(m)} / \mathbf{X}_0^t)$, $k = 1, \dots, p$, где $\mathbf{X}_0^t = \{\mathbf{X}^I(t_n), t_n \leq t, I = I_1, \dots, I_w\}$.

При введенных ограничениях на процесс сопровождения соблюдается простая зависимость [6] математического ожидания $M_t(\boldsymbol{\theta}_k^{(m)})$ случайного вектора от первого семиинварианта $m_k^{j^{(m)}}(t)$ его условного апостериорного распределения $\pi_{\boldsymbol{\theta}_k^{(m)} / j^{(m)}}^{(m)}(t) = \pi_{j^{(m)} / \boldsymbol{\theta}_k^{(m)}}^{(m)}(t) / \pi_j^{(m)}(t)$, которые являются оптимальной оценкой координат и скоростей $j^{(m)}$ -й гипотезной траектории, вычисляемой по накопленным отметкам, и от апостериорной вероятности $\pi_j^{(m)}(t)$ этой $j^{(m)}$ -й гипотезной траектории.

Напомним, что семиинвариантом называют числовую характеристику совокупности случайных величин, родственную понятиям моментов распределения старшего порядка. Его достоинство состоит в более практичном способе вычисления даже для двух первых моментов – математического ожидания и дисперсии, и вводят его следующим образом. Пусть $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_k)$ – случайный вектор, $\varphi_\xi(t) = M|e^{i(t, \xi)}|$ – его характеристическая функция, переменная $t = (t_1, \dots, t_k)$, $t_i \in R$, причем $(t, \xi) = \sum_{i=1}^k t_i \xi_i$ и для некоторого $n \geq 1$ моменты распределения n -го порядка $M|\xi_i|^n < \infty$, $i = 1, \dots, k$. Тогда существуют смешанные моменты $m_\xi^{(v_1, \dots, v_k)} = M\xi_1^{v_1} \dots \xi_k^{v_k}$ для всех неотрицательных целочисленных v_1, \dots, v_k таких, что $v_1 + \dots + v_k \leq n$. При этом для достаточно малых $|t|$ главное значение $\ln \varphi_\xi(t)$ представимо по формуле Тейлора в виде

$$\ln \varphi_{\xi}(t) = \sum_{v_1 + \dots + v_k \leq n} \frac{v_1 + \dots + v_k}{v_1! \dots v_k!} s_{\xi}^{(v_1, \dots, v_k)} \times t_1^{v_1} \dots t_k^{v_k} + o(|t|^n),$$

где коэффициенты $s_{\xi}^{(v_1, \dots, v_k)}$ называются смешанными семиинвариантами порядка $v = (v_1, \dots, v_k)$ вектора $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_k)$. Для независимых случайных векторов семиинвариант их суммы есть сумма семиинвариантов каждой из них. Справедливы формулы связи между ними и моментами распределения (для простоты приведем выражения для $k = 1$, обозначим $m_n = m_{\xi}^{(n)}$, $s_n = s_{\xi}^{(n)}$):

$$m_1 = s_1, m_2 = s_2 + s_1^2, m_3 = s_3 + 3s_1s_2 + s_1^3, \dots \text{ и } s_1 = m_1 \text{ (т.е. } M\xi), s_2 = m_2 - m_1^2 \text{ (т.е. } D\xi).$$

Используя соотношение $m_k^{j(m)}(t) = M(\theta_k^{(m)} / \mathbf{X}_0^t, j(m))$, где, по-прежнему, $j = j_1(m), \dots, j_N(m)$, запишем упомянутую формулу связи:

$$M_t(\theta_k^{(m)}) = \sum_j m_k^{j(m)}(t) \cdot \pi_j^{(m)}(t), \quad k = 1, \dots, p,$$

а в качестве правила выбора наиболее вероятной гипотезы движения $j_0(m)$ определим максимум апостериорной вероятности $\pi_j^{(m)}(t)$ по всем j траекториям: $j_0(m) = j_k(m)$, если $\pi_k^{(m)}(t) = \max\{\pi_1^{(m)}(t), \dots, \pi_N^{(m)}(t)\}$.

На основе изложенной формализации в [6] получены уравнения фильтрации и экстраполяции для комплексной гипотезной обработки РЛИ, описывающие траекторию эволюции апостериорных вероятностей каждой гипотезы, а также условных семиинвариантов: первых $m_k^{j(m)}(t)$ – как оценки математического ожидания для значений вектора θ параметров движения объектов – и вторых $d_{kl}^{j(m)}(t)$ – как оценки ковариации, $m = 1, 2, \dots, s$. Уравнения фильтрации – гипотезный фильтр второго порядка – включают в свой состав перечисленные выше величины:

$$j(m) = j_1(m), \dots, j_N(m),$$

$$\pi_j^{(m)}(t_n) = \begin{cases} \pi_j^{(m)}(t_{n-0}) c_v^{j(m)}(t_n) \lambda^m, & n = 1, 2, \dots, \text{ если отметка } \mathbf{X}_v^I(t_n) \\ \text{ассоциируется с } m\text{-м объектом,} \\ \pi_j^{(m)}(t_{n-0}) [1 - M_{t_{n-0}}^{j(m)} P_0^I(\theta^{(m)})], & n = 1, 2, \dots, \text{ если нет} \\ \text{измеренных отметок, ассоциированных с } m\text{-м объектом;} \end{cases}$$

$$m_k^{j(m)}(t_n) = \begin{cases} [1 / c_v^{j(m)}(t_n)] M_{t_{n-0}}^{j(m)} \{ \theta_k^{(m)} \exp[-h_v(\dots)] \}, & n = 1, 2, \dots, \text{ если} \\ \text{отметка } \mathbf{X}_v^I(t_n) \text{ ассоциируется с } m\text{-м объектом,} \\ m_k^{j(m)}(t_{n-0}), & n = 1, 2, \dots, \text{ если нет измеренных отметок,} \\ \text{ассоциированных с } m\text{-м объектом;} \end{cases}$$

$$k = 1, \dots, p;$$

$$d_{kl}^{j(m)}(t_n) = \begin{cases} [1/c_v^{j(m)}(t_n)] M_{t_{n-0}}^{j(m)} \left\{ \Delta_k^{j(m)} \Delta_l^{j(m)} \exp[-h_v(\dots)] \right\}, & n=1,2,\dots, \text{ если} \\ \text{отметка } \mathbf{X}_v^l(t_n) \text{ ассоциируется с } m\text{-м объектом,} \\ d_{kl}^{j(m)}(t_n - 0), & n=1,2,\dots, \text{ если нет измеренных отметок} \\ \text{в момент } t_n, \text{ ассоциированных с } m\text{-м объектом;} \end{cases}$$

$$l \leq k = 1, \dots, p,$$

$$\text{где: } c_v^{j(m)}(t_n) = M_{t_{n-0}}^{j(m)}[-h_v(\dots)];$$

$$h_v(\dots) = 0.5 [\mathbf{X}_v^l(t_n) - \mathbf{H}_{juv}^l(t_n, \boldsymbol{\theta}^{(m)}(t_n))] (\mathbf{R}^l)^{-1} \times [\mathbf{X}_v^l(t_n) - \mathbf{H}_{juv}^l(t_n, \boldsymbol{\theta}^{(m)}(t_n))]^T,$$

$$\Delta_k^{j(m)} = \theta_k^{(m)} - m_k^{j(m)}(t_n - 0), \quad \lambda^{(m)} - \text{нормирующий множитель:}$$

$$\lambda^{(m)} = \frac{1 - \sum_1 \pi_j^{(m)}(t_n)}{\sum_2 \pi_j^{(m)}(t_n - 0) c_v^{j(m)}}.$$

В последнем выражении сумма Σ_1 вычисляется по тем гипотезным траекториям m -го объекта, у которых нет ассоциированных измеренных отметок, а Σ_2 – для гипотез, подтвержденных результатами наблюдения.

В [6] получены основанные на той же формализации уравнения экстраполяции для гипотезной обработки. Все расчетные соотношения доведены до вычислительных схем, использованных в ПО ряда АС УВД и родственных систем сопровождения движущихся объектов. В частности, для интегрирования дифференциальных уравнений экстраполяции применяется метод Эйлера с шагом Δt и заменой в моменты времени $n \cdot \Delta t$ частотных характеристик $q_{ij} \cdot \Delta t$ переходов скачкообразного процесса априорными вероятностями гипотезных траекторий p_{ij} . Особое внимание уделено снижению объема вычислений при операциях с матрицами с помощью декомпозиции полного вектора измеренной отметки последовательностью фильтров второго порядка. Другим направлением сокращения компьютерных ресурсов избрано табличное задание ряда функций. В задачах сопровождения ВС правые части уравнений радируются полиномами от степеней, экспонент, синусов и косинусов. Расчет математических ожиданий от вариаций сочетания этих нелинейных функций вызывает серьезные затруднения вычислительного характера. Рекомендуется следующая последовательность действий программиста в таких ситуациях:

- преобразование произведений синусов и косинусов в сумму;
- разложение синусов, косинусов и экспонент в ряд Тейлора около среднего значения аргумента;
- переход от моментов к семиинвариантам и отбрасывание семиинвариантов выше второго порядка (гауссово приближение);
- сворачивание преобразованных рядов Тейлора.

Значения часто употребляемых в задачах гипотезной обработки выражений заранее рассчитаны по соотношениям, приведенным в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Аргумент (X)	Математическое ожидание $M^j(X)$
$\sin \Delta_p^j$	0

$\cos \Delta_p^j$	$\exp(-d_{pp}^j/2)$
$\exp(\Delta_p^j)$	$\exp(d_{pp}^j/2)$
$\Delta_k^j \sin \Delta_p^j$	$d_{kp}^j \exp(-d_{pp}^j/2)$
$\Delta_k^j \cos \Delta_p^j$	0
$\exp(\Delta_k^j \Delta_p^j)$	$(1 - 2d_{pp}^j)^{-0.5}$, если $k = p$, $(1 - 2d_{kp}^j - d_{kk}^j d_{pp}^j + (d_{kp}^j)^2)^{-1}$ в противном случае
$\Delta_k^j \Delta_l^j \sin \Delta_p^j$	0
$\Delta_k^j \Delta_l^j \cos \Delta_p^j$	$(d_{kl}^j - d_{kp}^j d_{lp}^j) \exp(-d_{pp}^j/2)$
$\Delta_l^j \exp(\Delta_k^j \Delta_p^j)$	0
$\Delta_k^j \Delta_l^j \Delta_n^j \sin \Delta_p^j$	$(d_{kl}^j d_{np}^j + d_{kn}^j d_{lp}^j + d_{ln}^j d_{kp}^j - d_{kp}^j d_{lp}^j d_{np}^j) \exp(-d_{pp}^j/2)$
$\Delta_k^j \Delta_l^j \Delta_n^j \cos \Delta_p^j$	0
$\Delta_k^j \Delta_l^j \Delta_n^j \Delta_m^j \sin \Delta_p^j$	0
$\Delta_k^j \Delta_l^j \Delta_n^j \Delta_m^j \cos \Delta_p^j$	$(d_{kl}^j d_{nm}^j + d_{kn}^j d_{lm}^j + d_{km}^j d_{ln}^j - d_{kp}^j d_{lp}^j d_{nm}^j - d_{kp}^j d_{lp}^j d_{nm}^j - d_{kp}^j d_{np}^j d_{lm}^j - d_{kn}^j d_{lp}^j d_{mp}^j - d_{kp}^j d_{mp}^j d_{ln}^j - d_{km}^j d_{lp}^j d_{np}^j + d_{kp}^j d_{lp}^j d_{np}^j d_{mp}^j) \exp(-d_{pp}^j/2)$

4.1.3. ФОРМИРОВАНИЕ ГИПОТЕЗ. Предусмотрены три разновидности комплексного гипотезного сопровождения движущихся объектов:

- набор начальных гипотез движения $j = j_1(m), \dots, j_N(m)$ m -го ВС, выдвигаемых в момент захвата, называемый начальной «розеткой» гипотез;
- совокупность текущих гипотез движения $j = j_1(m), \dots, j_N(m)$ m -го объекта при его сопровождении (текущая «розетка» гипотезных траекторий);
- гипотезы ассоциации измерений $\{\mathbf{j}_a(t_n)\}$.

Естественное требование к любому набору формируемых гипотез определяется целью его создания: он должен содержать в себе реализуемую гипотезу. Тогда задача ПО состоит в правильном выборе траектории движения, которая по известным критериям лучше других соответствует фактической. Для того чтобы начальная гипотеза движения своевременно выделялась из розетки, необходимо, чтобы формируемый набор гипотез движения был контрастным хотя бы по одной измеряемой координате. Напомним, что под радиолокационной контрастностью (см. раздел 1.2) понимают степень отличия отражающих способностей цели и окружающей среды, необходимую для полноценного наблюдения. В данном контексте это качество трактуется как требование, чтобы расхождение гипотез движения хотя бы по одной координате существенно превышало ошибки ее измерения. Следовательно, вид начальной розетки зависит от номенклатуры координатного состава первой измеренной отметки (азимут-дальность, прямоугольная система, пеленг), т.е. от источника информации (РЛС или АРП). Для наглядности рассмотрим геометрическую интерпретацию. На рис. 4.1 представлена начальная розетка гипотезных траекторий в момент захвата на сопровождение – как по отметке, содержащей измеренную радиальную скорость V_R сближения ВС с источником, так и по отметке, не содержащей V_R .

Заштрихованы зоны возможного положения концов вектора скорости, с которой движется объект. Очевидно, что все начальные гипотезные траек-

тории имеют одинаковые начальные вероятности и одну исходную точку «зарождения», определяемую измеренными координатами (хотя бы пеленгом) первой отметки. Они отличаются только значениями скоростей полета, разброс которых зависит от шага квантования, т.е. от принятого при формировании начальной розетки разбиения априорной зоны возможных скоростей ВС. После выделения радиальной составляющей V_R скорости при ее отсутствии или неоднозначности в измеренной отметке (рис. 4.1б, 4.1в), производится переход к формированию начальной розетки (рис. 4.1а) для определения тангенциальной скорости.

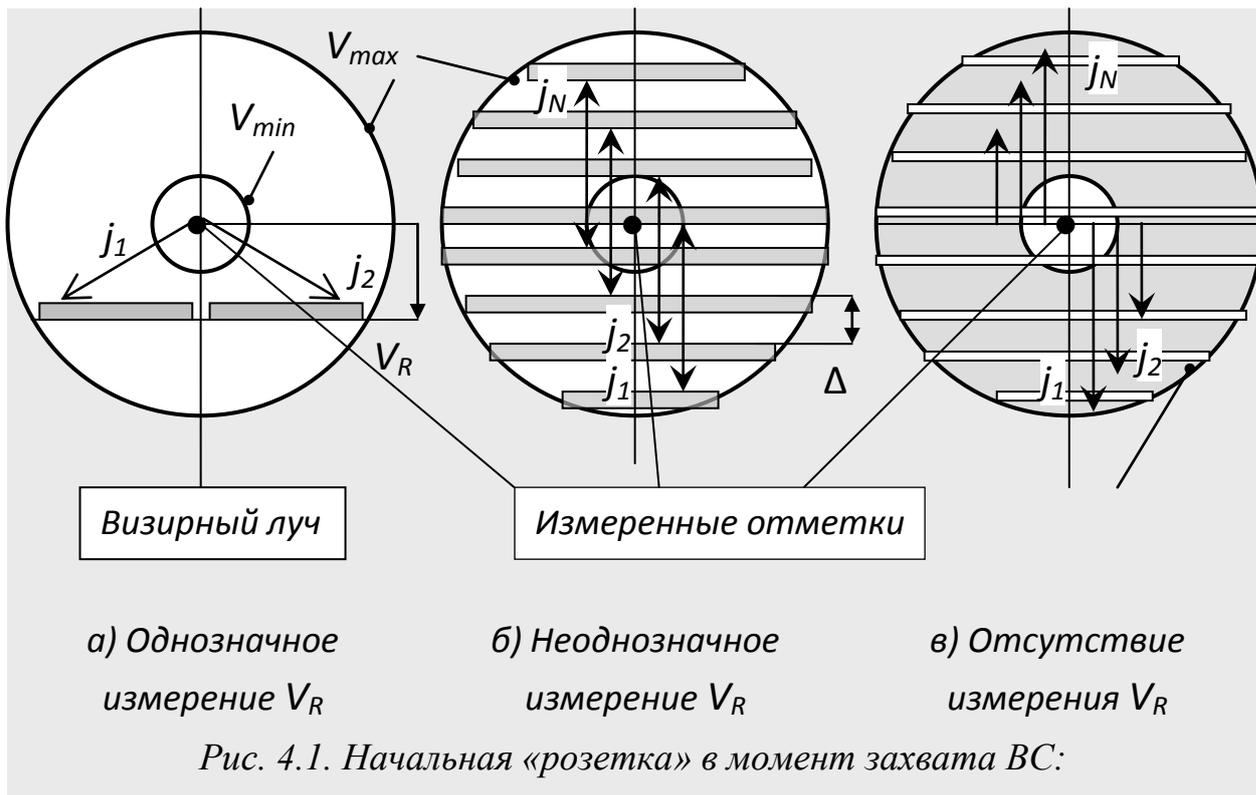


Рис. 4.1. Начальная «розетка» в момент захвата ВС:

Текущая розетка гипотезных траекторий строится в соответствии с возможностями маневрирования движущегося объекта. Каждый тип маневра (по курсу, высоте или скорости) допускает три варианта развития событий: маневр в одну сторону (разворот вправо, снижение или торможение), маневр в другую сторону (разворот влево, набор высоты или разгон), отсутствие маневра. Сочетание двух первых вариантов определяет пространственный маневр.

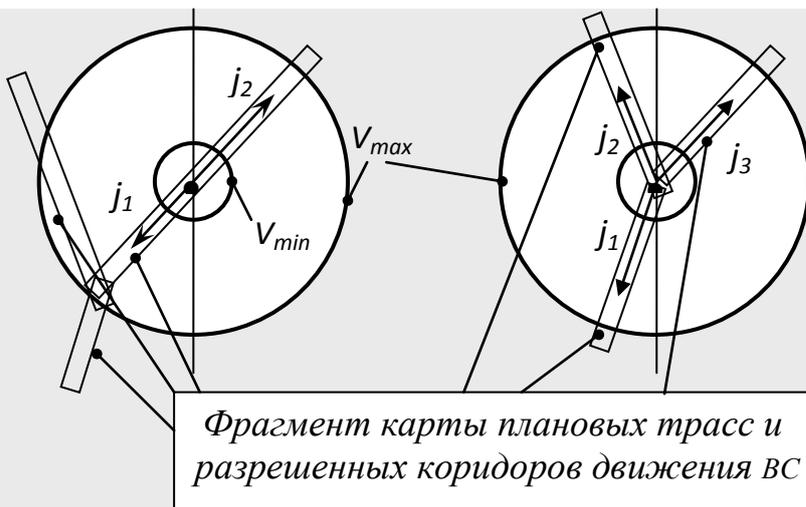


Рис. 4.2. Плановые гипотезные траектории

Гипотезные траектории, содержащие маневр объекта, называются маневрирующими гипотезными траекториями. Гипотезы, сформированные с учетом известной ПО плановой информации, называются плановыми (рис. 4.2).

При независимом

рассмотрении движения ВС в горизонтальной и вертикальной плоскостях производится автономное построение горизонтальных и вертикальных тезных траекторий. Условный пример формирования текущих гипотезных траекторий при обработке данных о маневре ВС по курсу приведен на рис. 4.3. В пояснениях к нему точки возможного изменения невра по традиции называются точками ветвления.

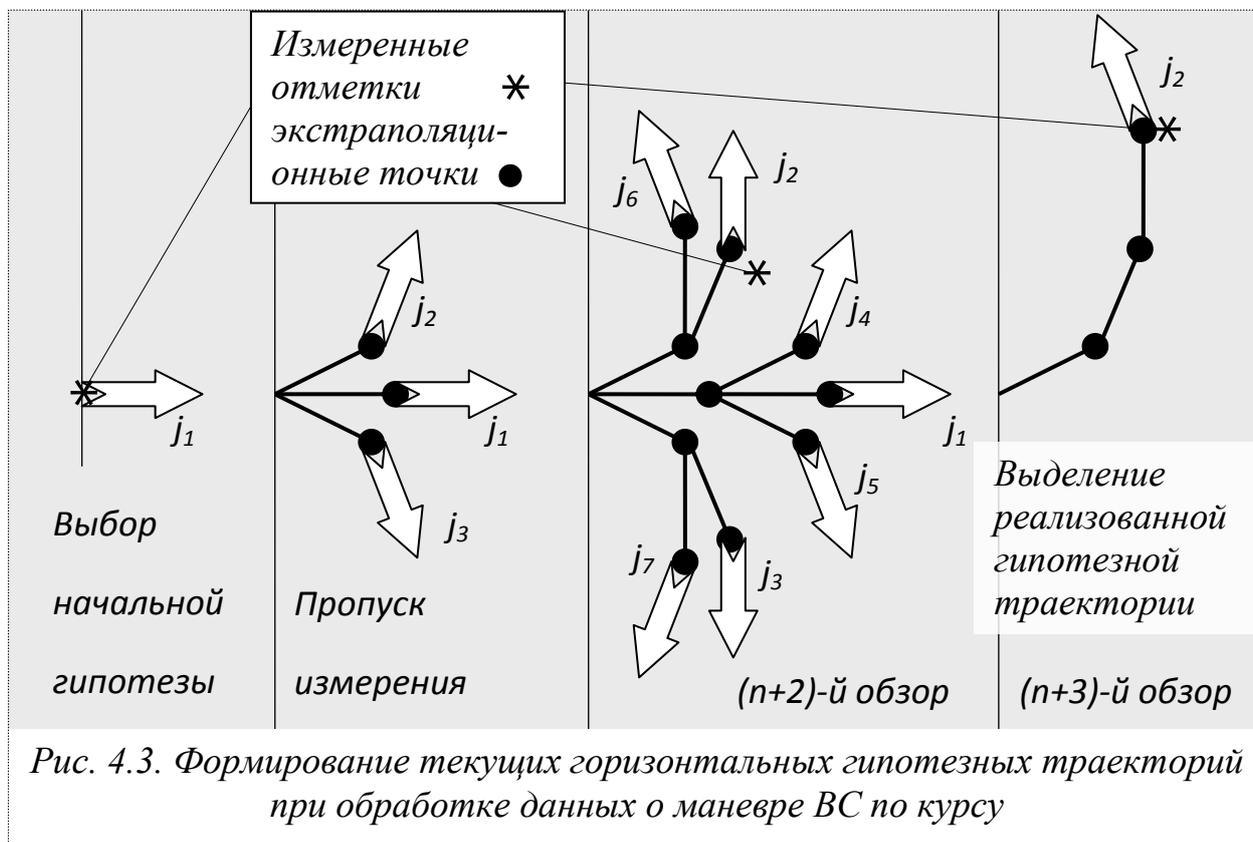


Рис. 4.3. Формирование текущих горизонтальных гипотезных траекторий при обработке данных о маневре ВС по курсу

Формируемая текущая розетка маневрирующих гипотезных траекторий должна создаваться симметричной относительно вектора скорости последней выделенной гипотезной трассы, а их начальные вероятности должны устанавливаться равными, чтобы априорно не отдавать предпочтения ни одному допустимому виду маневра. До момента выявления реализованной гипотезы движения в точках ветвления происходит накопление количества гипотезных траекторий. В момент выделения реализованной гипотезы движения остается одна гипотезная траектория, затем процесс накопления и сброса в единицу повторяется. Как правило, максимальное число сопровождаемых гипотезных траекторий не превышает семи экземпляров для одного типа маневра. Набор гипотез текущей розетки ограничивается возможностями маневрирования ВС, а также вероятностью того, что имеющиеся в системе источники данных не смогут его обнаружить. При наличии плановой информации о движении объектов и даже просто карты воздушных трасс зоны управления или схемы коридоров прилета и вылета района аэродрома – для повышения точности сопровождения целесообразно дополнить текущую розетку плановыми траекториями и расчетами текущего положения ВС по плану полета.

Гипотезы ассоциации измерений формируются после получения оче-

редной совокупности измеренных отметок и пеленгов. Каждая отметка с неоднозначным определением хотя бы какой-либо координаты раскрывается как конечный набор однозначных отметок, отличающихся только значениями этой координаты. Эта процедура рассмотрена выше на рис. 4.1. Гипотезная ассоциация не требует стробирования измерений, однако для сокращения количества рассматриваемых гипотез отождествления целесообразно предварительно ограничивать полученные отметки и пеленги стробами гипотезных траекторий. Заключенные в строб отметки, относящиеся к одной $j(m)$ -й гипотезе, с возможно разным количеством измеряемых координат ранжируются по нормированному числу степеней свободы n^l критерию χ^2 (по невязке):

$$\chi^2 = \begin{cases} \frac{1}{n^l} \sum_k \frac{[x_k^l(t_n) - m_k^{j(m)}(t_n - 0)]^2}{d_{kk}^{j(m)}(t_n - 0) + (\sigma_k^l)^2} & \text{для неманеврирующих гипотезных трасс} \\ \min_i \frac{1}{n^l} \sum_k \frac{[x_k^l(t_n) - \mu_k^i(t_n - 0)]^2}{\rho_{kk}^{j(m)}(t_n - 0) + (\sigma_k^l)^2} & \text{для маневрирующих гипотезных трасс} \end{cases}$$

где n^l – количество измеряемых l -м источником координат, μ_k^i , $\rho_{kk}^{j(m)}(t_n - 0)$ – оценка и дисперсия оценки k -й измеряемой координаты, прогнозируемые на момент измерения от точки ветвления гипотезной траектории при маневре с интенсивностью $i \cdot \Delta\mu$, $\Delta\mu$ – шаг квантования интенсивности соответствующего маневра. Например, при маневре по курсу влево на угол до $\angle 30^\circ$:

$$\Delta\psi = i \cdot \Delta\mu, \Delta\mu = -2,5^\circ, i = 1, 2, \dots, 12.$$

Отметки с большим значением невязки, превышающем $\chi^2 = 2.71$, что соответствует уровню значимости 0.1 при одной степени свободы, из соответствующей гипотезной траектории исключаются. Для антиподов, уводящих помех по дальности, по скорости сближения и т.п. формируются дополнительные псевдоизмеренные отметки, тиражируемые с помощью исключения «подозреваемых» координат из информационного состава полученных исходных точек. После ранжирования анализируется число k_0 оставшихся отметок и пеленгов в каждой гипотезной траектории:

a) если $k_0 = 0$, то имеем одну гипотезу ассоциации, которая предполагает отсутствие отметок и пеленгов, принадлежащих гипотезной траектории;

b) если $k_0 = 1$, то имеем следующие две гипотезы ассоциации:

- отметка или пеленг принадлежит гипотезной траектории;
- нет отметок или пеленгов, принадлежащих гипотезной траектории.

c) если $k_0 \geq 2$, то имеем следующие три гипотезы ассоциации:

- ближайшая по невязке отметка или пеленг принадлежит траектории;
- следующая по невязке отметка или пеленг принадлежит траектории;
- нет отметок или пеленгов, принадлежащих гипотезной траектории.

Если $k_0 = 0$ или невязка ближайшей отметки (пеленга) мала: $\chi^2 \leq 0.46$, то реализуется только первая, наиболее вероятная гипотеза ассоциации. В остальных случаях учитываются располагаемые вычислительные ресурсы. Исполняется запрос к сетевой операционной системе о текущей загруженности процессоров, и если ресурсы производительности достаточны, то реализуют-

ся все сформированные гипотезы ассоциации. Если загрузка критическая или система работает в режиме перегрузки, тогда организуется диалог с диспетчером, в окне которого отображаются сформированные алгоритмом обработки РЛИ рекомендации, какие именно объекты надлежит сопровождать с полным набором гипотез согласно складывающейся ситуации. Тогда все гипотезы реализуются по ВС, выделенным диспетчером. По остальным объектам – сопровождаются наиболее вероятные гипотезы в пределах имеющихся в наличии ресурсов. При количестве гипотез ассоциации j -й гипотезной траектории $N_a^j > 1$ производится $N_a^j - 1$ раз копирование этой траектории с радиацией в каждой копии ее ассоциированной измеренной отметки (пеленга), фильтруемой последовательностью гипотезных фильтров второго порядка.

При наличии антиподов, уводящих помех по дальности и т.п. формируются соответствующие дополнительные гипотезы ассоциации с указанием обрабатываемых координат измеренной отметки. Для рационального выбора совокупности гипотез ассоциации необходимо использовать точностные характеристики, вероятность обнаружения и «местные» особенности источника данных – перечень неоднозначно измеряемых координат и шаг неоднозначности, наличие АПОИ, ложных измерений, зон затенения, засветки и т.д.

Управление гипотезами включает четыре операции: выделение радицизованной гипотезной траектории, сброс, «склеивание» и ветвление. Для каждого сопровождаемого m -го объекта определяется наиболее вероятная гипотезная траектория $j_0(m)$: $\pi_{j_0}^{(m)} = \max_j \{\pi_j^{(m)}\}$ и проверяется условие $\pi_{j_0}^{(m)} \geq \pi^*$, где $\pi^* = 0,85 \div 0,9$. Если проверяемое условие выполняется, тогда в качестве реализованной гипотезы движения m -го объекта принимается наиболее вероятная $j_0(m)$ -я траектория. Ей приписывается единичная вероятность, а остальные гипотезы анализируемого ВС сбрасываются. При $\pi_{j_0}^{(m)} < \pi^*$ и при построении маневрирующих гипотез с помощью попарного суммирования вероятностей гипотезных траекторий с маневрами по курсу $\pi_{j_1}^{(m)}$ и по высоте $\pi_{j_2}^{(m)}$ проверяется наличие пространственного маневра ВС.

Если $\pi_{j_1}^{(m)} + \pi_{j_2}^{(m)} \geq \pi^*$, то принимается решение, что объект совершает пространственный маневр, и «склеиванием» этих двух гипотез формируется реализованная гипотезная траектория пространственного движения объекта. При невозможности выделить реализованную гипотезу в течение установленного периода времени выполняется склеивание всех сопровождаемых гипотез движения m -го объекта. Склейка массива $\{i(m) \in J\}$ траекторий m -го объекта осуществляется по формулам:

$$\pi_{j_0}^{(m)} = \sum_{i \in J} \pi_i^{(m)},$$

$$m_k^{j_0(m)} = \sum_{i \in J} m_k^{i(m)} \cdot \pi_i^{(m)} / \pi_{j_0}^{(m)}, \quad k = 1, \dots, p,$$

$$d_{kl}^{j_0(m)} = \sum_{i \in J} \left[d_{kl}^{i(m)} + \left(m_k^{i(m)} - m_k^{j_0(m)} \right) \left(m_l^{i(m)} - m_l^{j_0(m)} \right) \right] \times \pi_i^{(m)} / \pi_{j_0}^{(m)}, \quad l \leq k = 1, \dots, p.$$

Выделенная либо «склеенная» гипотезная траектория является основой для формирования новой совокупности гипотез путем установки признаков ветвления как вероятностей того или другого маневра объекта. Сброс траектории и соответствующих ей гипотез, а следовательно, сброс сопровождения движущегося ВС осуществляется, когда вероятность отсутствия измеренных меток (пеленгов) становится очень малой, т.е. выполняется критерий:

$$\prod_i (1 - P_0^i) \leq c_1, \quad c_1 = 0,001 \div 0,01$$

для каждого i -го источника информации об этом объекте, $i = \overline{1, I}$.

Логарифмируя последнее неравенство и аппроксимируя $\ln(1 - P_0^i)$ известным приближением $\ln(1 - P_0^i) \approx - (P_0^i + 0,5(P_0^i)^2)$, переходим от мультипликативного к аддитивному представлению критерия сброса – в виде суммы:

$$\sum_i P_0^i (P_0^i + 2) \geq c_2, \quad c_2 = 9 \div 14.$$

Произведение и сумма вычисляются по обзорам антенны РЛС, в которых отсутствуют измерения координат, ассоциированные с траекторией ВС. При поступлении замеров от любого источника, накопленные сумма и произведение обнуляются.

Информация о сопровождаемых обнаруженных ВС выдается диспетчеру в виде выходных результирующих траекторий. Оценки координат и скоростей движения объектов, одноименные координатам и скоростям гипотезных траекторий, вычисляются следующим образом:

$$m_k^{(m)} = \sum_{j \in J} m_k^{j(m)} \cdot \pi_j^{(m)}, \quad k = 1, \dots, p,$$

Для несмещенной оценки преобразованных координат и скоростей сопровождаемого объекта необходимо выполнить эти вычисления по каждой его гипотезной траектории, а результаты усреднить. Например, для расчета модуля скорости m -го объекта имеем:

$$V^{(m)} = \sum_j V^{j(m)} \pi_j^{(m)}, \quad V^{j(m)} = \sqrt{\left(m_k^{i(m)} \right)^2 + \left(m_l^{i(m)} \right)^2}.$$

4.1.4. АЛГОРИТМЫ ГИПОТЕЗНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ. Программное обеспечение комплексного гипотезного сопровождения движущихся объектов объединяет в своем составе семь основных алгоритмов: отбора, ассоциации, фильтрации, управления гипотезами, захвата, экстраполяции, формирования выходных траекторий. Информационная поддержка реализована в виде трех массивов траекторий: гипотезные траектории, внутренние траектории и результирующие – отображаемые – траектории. Каждая гипотезная траектория соответствует определенной гипотезе движения и определяется ее вероятно-

стью, вектором оценок всех фазовых координат объекта и ковариациями оценок. Внутренняя траектория объекта содержит адреса гипотезных траекторий и *общую* информацию по объекту: время завязки, текущее время, текущие вероятности обнаружения, признак государственной принадлежности ВС, тип летательного аппарата, перечень источников наблюдения, которые обнаруживают его и т.п. Каждая результирующая траектория содержит оптимальные оценки координат и скоростей сопровождаемого объекта, текущее время, время последнего измерения координат, а также *общую* информацию.

Алгоритм отбора производит сортировку измеренных отметок (или пеленгов) каждого источника в стробы текущих гипотезных траекторий. Отметки, не попавшие ни в один из стробов, фиксируются в зоне для захвата.

Алгоритм отождествления для совокупности измерений одного источника формирует гипотезы ассоциации и производит последующее копирование гипотезных траекторий согласно этим сформированным гипотезам.

Алгоритм фильтрации имеет структуру последовательности фильтров второго порядка $\Phi_r(\Phi_{r-1}(\dots(\Phi_1)))$. Каждый фильтр на очередном подключении обрабатывает измерение только одной координаты ВС. При отсутствии измерений какой-либо μ -й координаты соответствующий фильтр Φ_μ не включается. Все перечисленные фильтры программно реализуются в виде указания обрабатываемой координаты при вызове подпрограммы универсального фильтра. В процессе комплексной обработки радиолокационных данных алгоритмы ассоциации и фильтрации включаются в цикл по источникам.

Алгоритм управления гипотезами производит выделение реализованной гипотезы движения, сброс, склеивание и установку признаков ветвления гипотезных траекторий. Кроме того, выполняется проверка истинности траектории (обнаружение движущегося объекта), по результатам которой принимается решение о формировании выходной траектории для отображения.

Алгоритм захвата по каждой отметке (пеленгу) из зоны захвата формирует новую внутреннюю траекторию и соответствующую ей начальную розетку гипотез.

Алгоритм экстраполяции осуществляет ветвление гипотезных траекторий в соответствии с ранее установленными признаками и выполняет экстраполяцию гипотезных траекторий внутри интервала времени между измерениями – как на текущее время, так и на ожидаемый ближайший момент измерения координат движущегося объекта.

Алгоритм формирования выходных траекторий включается с принятым темпом отображения информации диспетчерам для построения результирующих траекторий обнаруженных ВС по соответствующим им гипотезам.

Рассмотрим работу алгоритмов КГС в сложных условиях наблюдения.

Сопровождение плотных групп объектов. По результатам первого обзора захватываются те объекты группы, по которым есть отметки измерения. Захват остальных производится в последующие обзоры при поступлении отметок от них. В каждом обзоре проверяется попадание полученных измерений в малые стробы гипотезных траекторий. Отметки, не попавшие в стробы

гипотезных траекторий сопровождаемых объектов, немедленно передаются алгоритмам завязки траекторий новых объектов. Для каждой стробируемой отметки вычисляется невязка χ^2 . Если даже для ближайшей траектории невязка $\chi^2 > 2.71$, то допускается наличие нового объекта, т.е. формируется гипотеза ассоциации, описывающая отметку как принадлежащую новому объекту. Подтверждение и выдача нового объекта происходит при выделении соответствующей гипотезы ассоциации. Таким образом, возможно сопровождение как разрешимой, так и не разрешимой группы объектов.

Сопровождение маневрирующих объектов. В процессе сопровождения маневрирующего объекта рассматриваются различные гипотезы его движения. Каждый вид маневра – по курсу, скорости, высоте – добавляет к исходной гипотезе движения неманеврирующего объекта по две новые гипотезы за время одного обзора: маневр в одну сторону и маневр в другую сторону. В случае пропуска измерений число гипотез движения возрастает еще больше.

Отбор, ассоциация и фильтрация измерений производится для всех гипотезных траекторий (с маневром и без него). Вычисляются апостериорные вероятности гипотезных траекторий $\pi_j^{(m)}$ и определяется наиболее вероятная $\pi_{j_0}^{(m)}$ из них. Для маневрирующего объекта ею становится гипотезная траектория с соответствующим маневром, и при $\pi_{j_0}^{(m)} > 0.85 \div 0.9$ она считается реализованным движением объекта, а остальные его гипотезы сбрасываются. От выделенной гипотезной траектории вновь формируются гипотезы с маневрами и без них, и процесс сопровождения продолжается.

Сопровождение ВС в условиях неполной координатной информации. В случае пеленгации объектов обычно остается не измеряемой дальность. Возможность ее косвенного определения, как и для скорости и курса пеленгуемого объекта, в подвижной системе координат основана на использовании гипотезного подхода и на связи измеряемых пеленгов с не измеряемыми дальностью, скоростью и курсом в реализуемом движении объекта. Оценки координат и параметров движения вычисляются не путем непосредственных операций с измеряемыми пеленгами, а на основе выделения по ним реализованной гипотезы движения. При завязке траектории излучающего объекта начальная розетка гипотезных траекторий устанавливается на середину диапазона возможных значений дальности. Каждая рассматриваемая гипотеза траектории содержит полную информацию о координатах и скорости объекта. Эти траектории экстраполируются и корректируются по результатам измерений пеленгов. Та из них, которая лучше других согласуется с полученными в обзорах замерами пеленгов – выделяется. Выделенная гипотезная траектория, близкая к реальному движению, содержит оценки всех его фазовых координат. Точность оценок зависит от характера движения подвижной системы координат. Например, маневр типа «отворота» повышает точность оценок в два-три раза в зависимости от интенсивности маневра.

Сопровождение объектов на фоне естественных и преднамеренных помех. Естественные помехи в виде ложных и фоновых отметок при сопрово-

вождении объектов в основном отсеиваются малыми стробами гипотезных траекторий. Отметки, попавшие в стробы, участвуют в формировании гипотез ассоциации и соответствующих им траекторий. Однако вероятности этих гипотез быстро падают от обзора к обзору, так как не подтверждаются последующими измерениями, и через два-три обзора они сбрасываются.

Нестробируемые (не попавшие в строб) ложные и фоновые отметки поступают на завязку новых внутренних траекторий (не выдаваемых на отображение диспетчеру). Они проходят проверку на истинность (подтверждение обнаружения движущегося объекта), требующую попадания в последующих обзорах трех отметок в стробы какой-либо одной из ее гипотезных траекторий с частотой, определяемой вероятностью обнаружения. Внутренние траектории, не отвечающие требованиям проверки на истинность, не выдаются в выходную зону результирующих траекторий и сбрасываются.

При наличии преднамеренных помех, для защиты от мерцающих, уводящих помех – по дальности и по скорости сближения – каждая «подозреваемая» измеренная отметка рассматривается особо по каждому варианту измерения координат: с пеленгами и без них, с дальностью и без нее, с радиальной скоростью и без нее. Подозреваемыми называют отметки, у которых невязка χ^2 для ближайшего объекта по соответствующей измеряемой координате превышает заданный уровень, и при анализе варьируются координаты с наибольшими значениями невязки. При излучении объектом шумовой помехи положительно зарекомендовала себя в качестве защиты рассмотренная выше процедура сопровождения объекта по неполной координатной информации, позволяющая сбрасывать заведомо ложные траектории такого рода.

В таблице 4.2 представлены сравнительные характеристики радиационных систем радиолокационного сопровождения ГА и систем КГС.

Таблица 4.2

Функциональные возможности систем сопровождения

Характеристики	Традиционное ПО	Система КГС
1. Принцип построения	ВОИ + ТОИ	КГС
2. Система координат	декартова	полярная
3. Вероятность обнаружения	> 0.7	> 0.3
4. Захват	по двум отметкам	по одной отметке
5. Метод привязки измерений	математический строб	гипотезная ассоциация
6. Выбор данных	приоритетный РЛК	от всех источников
7. Сопровождение		
• изолированных целей	+	+
• пеленгуемых целей	не поддерживается	+
• групповых целей	не поддерживается	+
• маневрирующих целей	+	+
на фоне ложных отметок	не поддерживается	+
и преднамеренных помех	не поддерживается	+

4.2. ОБЪЕДИНЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ОТ ДВУХ ИСТОЧНИКОВ: ПРЛ И ВРЛ.

Для иллюстрации универсальности объединения траекторий методом комплексного гипотезного сопровождения рассмотрим пример работы в подвижной системе с началом отсчета на борту ВС, совершающего полет. Выберем цилиндрическую систему координат с фазовыми координатами движущихся объектов: азимут β_0 , горизонтальная дальность D_0 , радиальная V_{R0} и тангенциальная V_{T0} скорости, высота H_0 , вертикальная скорость V_{H0} , перемещающуюся в пространстве со скоростью $V(t) = (W_N(t), W_E(t), V_y(t))$.

Для представления правых частей дифференциальных уравнений движения целей в виде полиномов от степеней, синусов и косинусов обозначим:

$$\theta_1^{(m)} = \beta_0^{(m)}, \quad \theta_2^{(m)} = 1/D_{r0}^{(m)}, \quad \theta_3^{(m)} = V_{R0}^{(m)}, \quad \theta_4^{(m)} = V_{T0}^{(m)}, \quad \theta_6^{(m)} = H_0, \quad \theta_7^{(m)} = |V_{H0}|.$$

Тогда уравнения m -го объекта в проекции на горизонтальную плоскость имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_1^{(m)}(t) &= -\theta_2^{(m)}(t)(-W_N(t)\sin\theta_1^{(m)}(t) + W_E(t)\cos\theta_1^{(m)}(t) - \theta_4^{(m)}(t)), \\ \dot{\theta}_2^{(m)}(t) &= (\theta_2^{(m)}(t))^2 (W_N(t)\cos\theta_1^{(m)}(t) + W_E(t)\sin\theta_1^{(m)}(t) - \theta_3^{(m)}(t)), \\ \dot{\theta}_3^{(m)}(t) &= \theta_2^{(m)}(t)\theta_4^{(m)}(t)(-W_N(t)\sin\theta_1^{(m)}(t) + W_E(t)\cos\theta_1^{(m)}(t) - \theta_4^{(m)}(t)), \\ \dot{\theta}_4^{(m)}(t) &= \theta_2^{(m)}(t)\theta_3^{(m)}(t)(-W_N(t)\sin\theta_1^{(m)}(t) + W_E(t)\cos\theta_1^{(m)}(t) - \theta_4^{(m)}(t)). \end{aligned} \quad (4.1)$$

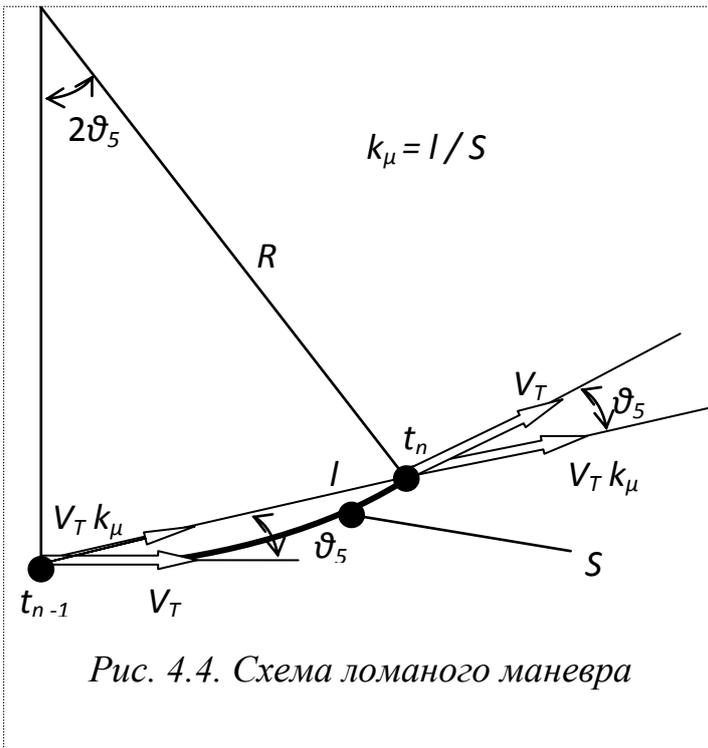


Рис. 4.4. Схема ломаного маневра

Для описания маневра объекта по курсу выберем представленную на рис. 4.4 схему «ломаного» маневра, согласно которой его истинная криволинейная траектория аппроксимируется прямыми участками – хордами выстраиваемых от обзора к обзору дуг (помечена символом S на рисунке). Тогда при развороте объекта по курсу на угол $2\vartheta_5$ за время T на интервале $(t, t + T)$ движение объекта по хорде описывается уравнениями (4.1) с начальными условиями по скоростям:

$$\begin{aligned} \theta_3^{(m)} &= (\theta_3^{(m)}(t)\cos(j^{(m)}\theta_5^{(m)}) - \theta_4^{(m)}(t)\sin(j^{(m)}\theta_5^{(m)}))k_\mu, \\ \theta_4^{(m)} &= (\theta_4^{(m)}(t)\cos(j^{(m)}\theta_5^{(m)}) - \theta_3^{(m)}(t)\sin(j^{(m)}\theta_5^{(m)}))k_\mu, \end{aligned}$$

а в момент времени $t + T$ производится «доворот» и коррекция скорости:

$$\theta_3^{(m)}(t + T) = (\theta_3^{(m)}\cos(j^{(m)}\theta_5^{(m)}) - \theta_4^{(m)}\sin(j^{(m)}\theta_5^{(m)})) / k_\mu^{(m)},$$

$$\theta_4^{(m)}(t + T) = (\theta_4^{(m)}\cos(j^{(m)}\theta_5^{(m)}) + \theta_3^{(m)}\sin(j^{(m)}\theta_5^{(m)})) / k_\mu^{(m)},$$

где коэффициент $k_\mu^{(m)}$ используется для обозначения $k_\mu^{(m)} = \sin \theta_5^{(m)} / \theta_5^{(m)}$, а значения $j^{(m)}$ гипотезы движения устанавливается по следующему правилу:

$$j^{(m)} = \begin{cases} -1, & \text{если полет совершается в фазе маневра влево по курсу,} \\ 0, & \text{если нет маневра по курсу,} \\ 1, & \text{если полет совершается в фазе маневра вправо по курсу,} \end{cases}$$

где допускаются любые переходы между этими двумя состояниями.

Динамика эволюции высоты полета m -го объекта и его маневр по высоте описываются столь же очевидными уравнениями:

$$\dot{\theta}_6^{(m)}(t) = j_H^{(m)}(t)\theta_7^{(m)}(t), \quad \dot{\theta}_7^{(m)}(t) = 0,$$

$$j_H^{(m)} = \begin{cases} -1, & \text{если полет совершается в фазе снижения,} \\ 0, & \text{если полет совершается в горизонтальной фазе,} \\ 1, & \text{если полет совершается в фазе набора высоты,} \end{cases}$$

где возможны любые переходы между тремя названными гипотезами.

Итак, пусть имеем два источника РЛИ: $I = 1$ – первичный радиолокатор, $I = 2$ – вторичный радиолокатор. Для каждого источника канал наблюдения, т.е. массив накопленных данных о параметрах движения цели, предполагается линейным: $\mathbf{X}^I(t_n) = \boldsymbol{\theta}(t_n)H^I + \boldsymbol{\xi}^I(t_n)$. Прямая отметка ПРЛ т.е. отраженный от объекта сигнал:

$$\mathbf{X}_1^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)}), \quad x_1^{(1)} = \beta = \theta_1^{(m)} + \xi_1^{(1)}, \quad x_2^{(1)} = 1/D_r = \theta_2^{(m)} + \xi_2^{(1)}, \\ x_3^{(1)} = \dot{D} + W_N \cos m_1^{(m)} + W_E \sin m_1^{(m)} = \theta_3^{(m)} + \xi_3^{(1)};$$

$$\mathbf{H}_1^{(1)} = \begin{pmatrix} 100 \\ 010 \\ 001 \\ 000 \\ 000 \\ 000 \\ 000 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_1^{(1)} = \begin{pmatrix} (\sigma_\beta^{(1)})^2 & 0 & 0 \\ 0 & (\sigma_r^{(1)})^2 & 0 \\ 0 & 0 & (\sigma_D^{(1)})^2 \end{pmatrix}, \quad (\sigma_r^{(1)})^2 = (\sigma_D^{(1)}/D_r^2)^2.$$

Антипод ПРЛ – последовательно отраженный от объекта и от земли сигнал: $\mathbf{X}_2^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_3^{(1)}), \quad x_1^{(1)} = \beta, \quad x_3^{(1)} = \dot{D} + W_N \cos m_1^{(m)} + W_E \sin m_1^{(m)},$

$$\mathbf{H}_2^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_2^{(1)} = \begin{pmatrix} (\sigma_\beta^{(1)})^2 & 0 \\ 0 & (\sigma_D^{(1)})^2 \end{pmatrix}.$$

Описание источника ВРЛ, прямая метка – ответ объекта на запрос:

$$\mathbf{X}_1^{(2)} = (x_1^{(2)}, x_2^{(2)}), \quad x_1^{(2)} = \beta = \theta_1^{(m)} + \xi_\beta^{(2)}, \quad x_2^{(2)} = 1/D_r = \theta_2^{(m)} + \xi_r^{(2)},$$

$$\mathbf{H}_1^{(2)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_1^{(2)} = \begin{pmatrix} (\sigma_\beta^{(2)})^2 & 0 \\ 0 & (\sigma_r^{(2)})^2 \end{pmatrix}, \quad (\sigma_r^{(2)})^2 = (\sigma_D^{(1)}/D_r^2)^2.$$

Антипод ВРЛ – ответ объекта на запрос, отраженный от земли:

$$\mathbf{X}_2^{(2)} = (x_1^{(2)}), \quad x_1^{(2)} = \beta, \quad \mathbf{H}_2^{(2)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_2^{(2)} = \begin{pmatrix} (\sigma_\beta^{(2)})^2 \end{pmatrix}.$$

Передаваемая объектом в ответе полетная информация может содержать высоту: $x_6^{(2)} = H = \theta_6 + \xi_H^{(2)}$. Другие особенности источников данных:

- время обзора источника ПРЛ 4 ÷ 10 секунд, вероятность обнаружения 0.5 ÷ 0.7; темп поступления измерений для источника ВРЛ определяется частотой запросов, вероятность обнаружения ответного сигнала 0.8 ÷ 0.9;
- дальность обнаружения ВРЛ более чем вдвое превосходит ПРЛ;
- наряду с прямыми отметками ПРЛ и ВРЛ имеют место первые и вторые антиподы (однократные или двукратные отражения радиосигнала от поверхности земли);
- для ПРЛ характерно большое число ложных отметок (фон земли), особенно на малых дальностях;
- отметки ВРЛ поступают только от ВС, оборудованных ответчиками;
- для ВРЛ ложные отметки возникают при приеме ответов на чужие запросы или по боковым лепесткам приемной антенны;
- при интенсивном маневре по курсу имеет место пропадание отметок ВРЛ из-за отклонения зоны излучения антенны ответчика при крене ВС.

Алгоритмы фильтрации и экстраполяции, рассмотренные в разделе 4.1.2, после вычисления математических ожиданий координат векторов с помощью таблицы 4.1, работают в данном примере как композиция четырех фильтров: азимутального, дальностного, радиально-скоростного и высотного. Последовательность подключения программ следующая:

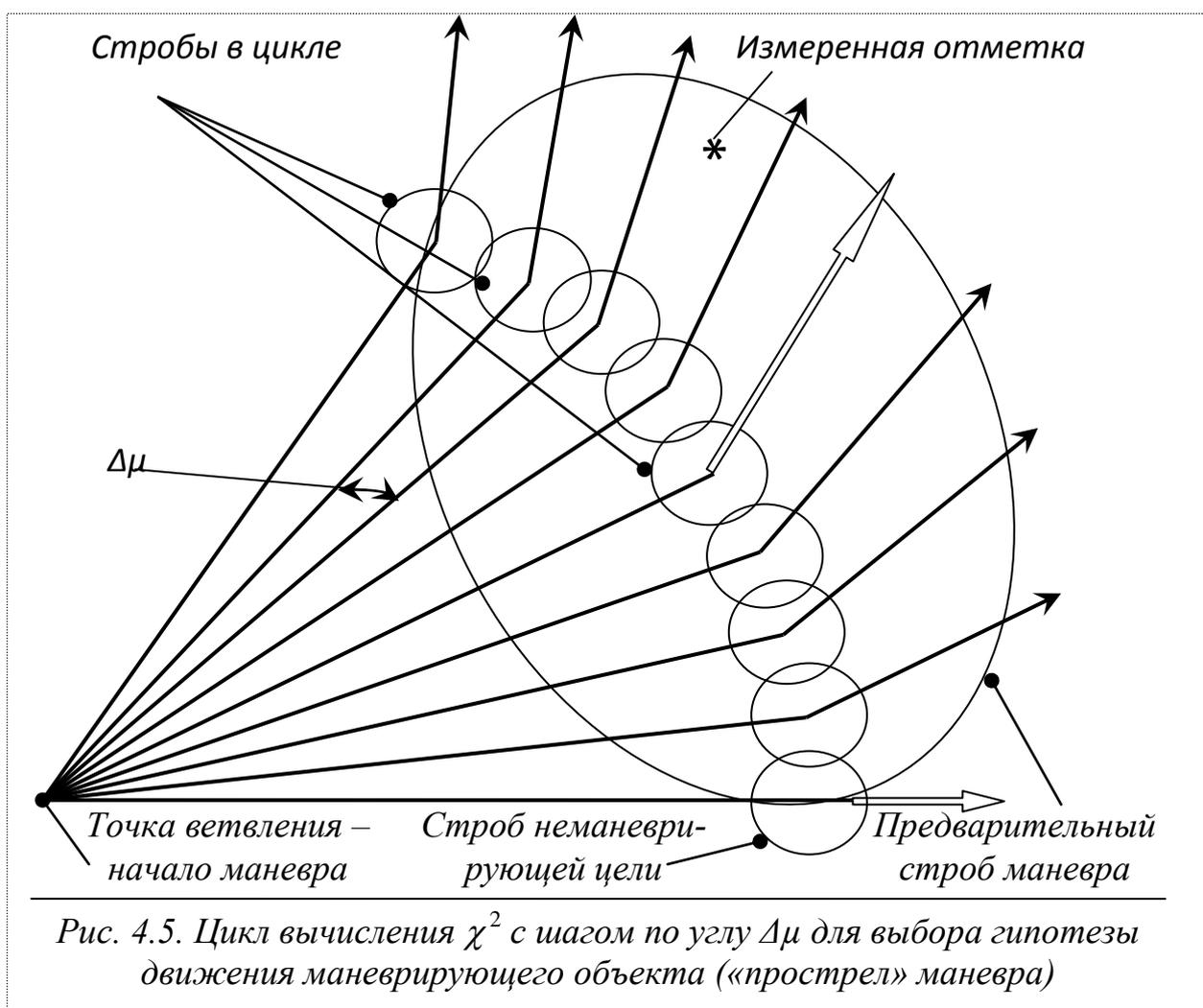
- азимутальный, дальностный, радиально-скоростной фильтры для обработки прямой отметки ПРЛ;
- азимутальный, радиально-скоростной для обработки антипода ПРЛ;
- азимутальный и дальностный для обработки прямой отметки ВРЛ;

- азимутальный для антипода и не запрошенного ответа ВРЛ;
- высотный для обработки высоты, поступающей в ответе или вычисляемой по прямой отметке и антиподу.

Напомним, что начальные «розетки» гипотезных траекторий при захвате по отметкам ПРЛ и ВРЛ имеют вид, представленный в разделе 4.1.3 на рис. 4.1. При наличии плановой информации начальная «розетка» формируется согласно рис. 4.2.

Алгоритм отбора располагает стробами по азимуту, дальности и скорости сближения. Для отбора прямых отметок, первых и вторых антиподов имеются три верхние границы строба по дальности. Для отметок с неоднозначной скоростью сближения, с помощью соответствующего строба, выбирается ее однозначное значение.

Алгоритм ассоциации выполняет отождествление стробированных меток и антиподов. Для маневрирующих гипотезных траекторий приведенный критерий χ^2 (раздел 4.1.3) вычисляется в цикле по углу маневра (рис. 4.5), называемом «прострел» маневра.



Используются четыре массива траекторий:

- горизонтальные гипотезные траектории;

- вертикальные гипотезные траектории;
- внутренние траектории;
- выходные результирующие траектории.

На рис. 4.6 и 4.7 показаны полученные в реальном масштабе времени выходные результирующие траектории при большом числе ложных отметок (до 400 в каждом обзоре) и при сопровождении групповых (плотные группы до трех объектов) и маневрирующих целей. Значения ошибок измерения источников: $\sigma_{\beta}^{(1)} = 2^\circ$, $\sigma_D^{(1)} = 60$ м, $\sigma_{Vr}^{(1)} = 10$ м/сек, $\sigma_{\beta}^{(2)} = 0.8^\circ$, $\sigma_D^{(2)} = 100$ м.

Коэффициент проводки – важнейшая характеристика прокладки траектории ВС, рассчитываемая как среднее по ансамблю объектов отношение

*

времени сопровождения объекта к времени его наблюдения источниками информации, для указанных диспетчером ВС равен единице. Коэффициент проводки для остальных объектов – не ниже 0,9. КГС обеспечивает повышение точности сопровождения и существенно сокращает время достижения установившихся значений ошибок, так как выделение реализованной гипотезы происходит значительно быстрее эволюции оценок. Особенно наглядно это проявляется при сопровождении групповых и маневрирующих объектов в условиях большого количества ложных отметок и низкой вероятности обнаружения. При этом требования к вычислительным ресурсам системы со-

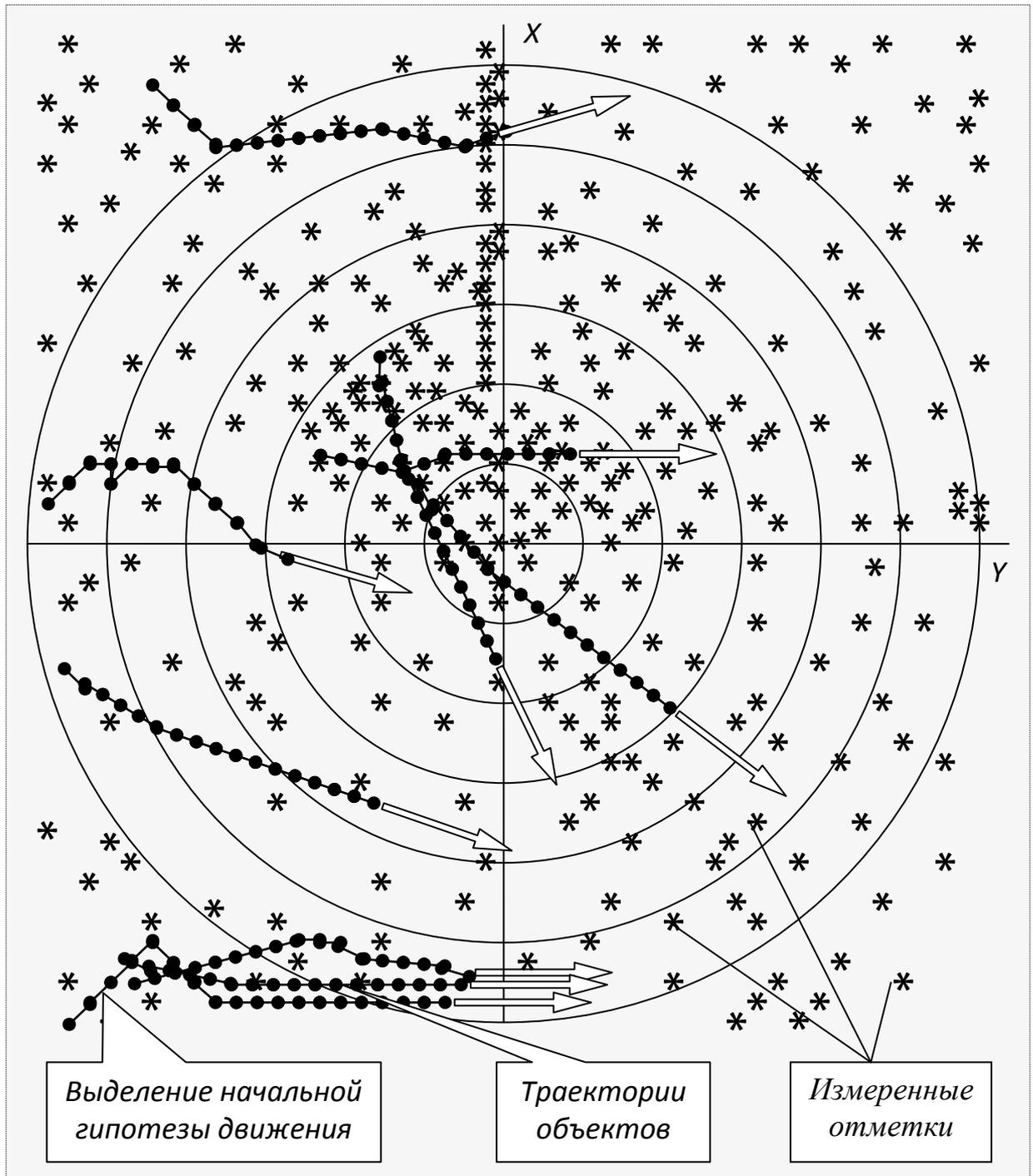


Рис. 4.6. Результирующие траектории на фоне ложных отметок

храняют линейный рост при увеличении потока измеренных отметок ВС.

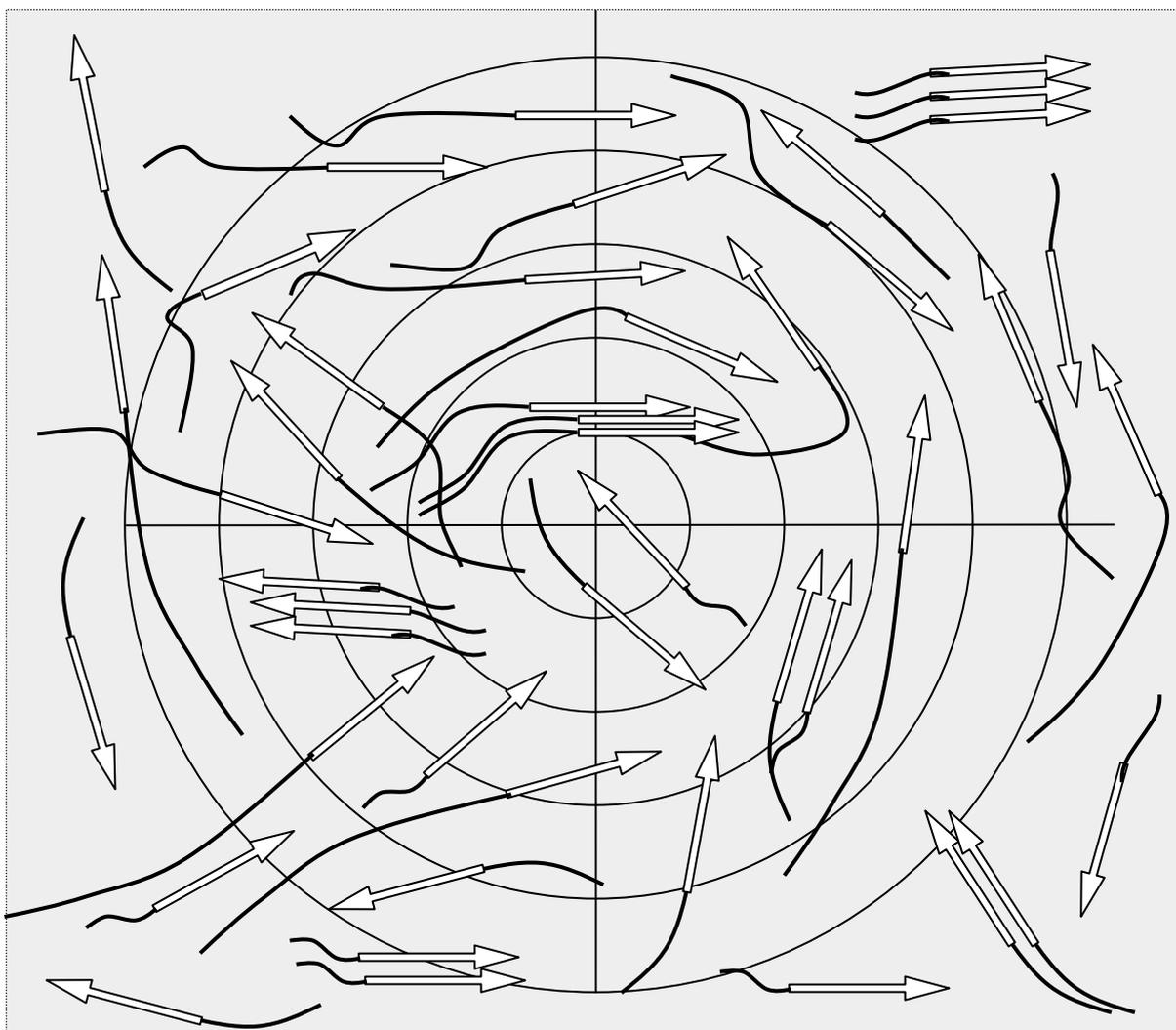


Рис. 4.7. Результирующие траектории при массовом сопровождении групповых и маневрирующих объектов

5. ФУНКЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСПЕТЧЕРОВ С СИСТЕМОЙ

5.1. ОТОБРАЖЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ НА ЭКРАНЕ ДИСПЕТЧЕРА УВД

5.1.1. ОРГАНИЗАЦИЯ ДИАЛОГА С СИСТЕМОЙ. Состав оборудования и его компоновка на рабочих местах диспетчеров позволяют управлять средствами отображения информации, взаимодействовать со смежными секторами и корректировать информацию о совершаемых полетах в целях обеспечения УВД в ВП сектора. В рабочем режиме на экране отображаются (см. рис. 5.1):

- текущее время с дискретностью одна секунда;
- картографическая информация, содержащая установленные границы секторов управления с наложением на них геометрии трасс, условные обозначения навигационных пунктов и аэродромов;

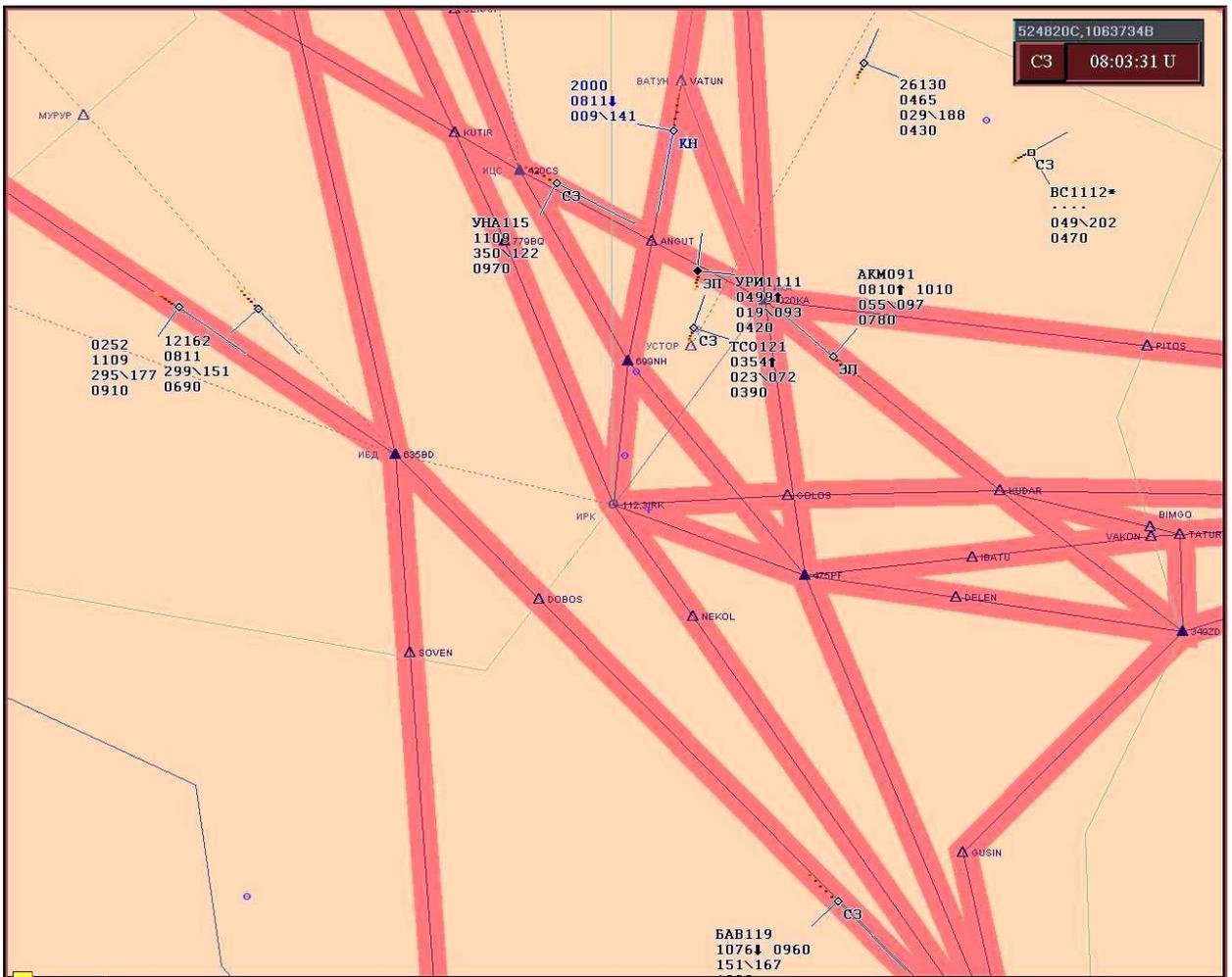


Рис. 5.1. Отображение информации на экране диспетчера

- символы местоположения ВС, совершающих полеты, с дополнительной информацией о параметрах их движения;
- зоны запрета автоматического захвата ВС на сопровождение;
- зоны ограничения полетов;
- масштабная линейка, кольца дальности, вектор-измеритель;
- линии пеленгов с величинами прямого и обратного пеленгов;
- метеорологическая и другая текстовая информация.

5.1.2. КАРТОГРАФИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ. ПО поддерживает широкий набор карт, которые могут по мере необходимости вызываться диспетчером на отображение с помощью функциональной клавиатуры и манипулятора «мышь». Пример индикации воздушной обстановки на фоне картографии, содержащей линии трасс, символы навигационных пунктов, границы секторов и зон управления, соответствующий требованиям европейской организации гражданской авиации, приведен на рис. 5.2. В табл. 5.1 представлены условные обозначения, рекомендованные для карт в районной АС УВД.

3.4.1. Таблица 5.1

обозначение	содержание
—————	границы диспетчерского района полетной информации
.....	границы сектора управления воздушным движением

—————	воздушные трассы и местные воздушные линии I категории
- - - - -	спрямленные маршруты
○	уиии аэродромы и их буквенные обозначения
△	ИИР маркированные пункты обязательных донесений
○	ЩГ немаркированные пункты обязательных донесений

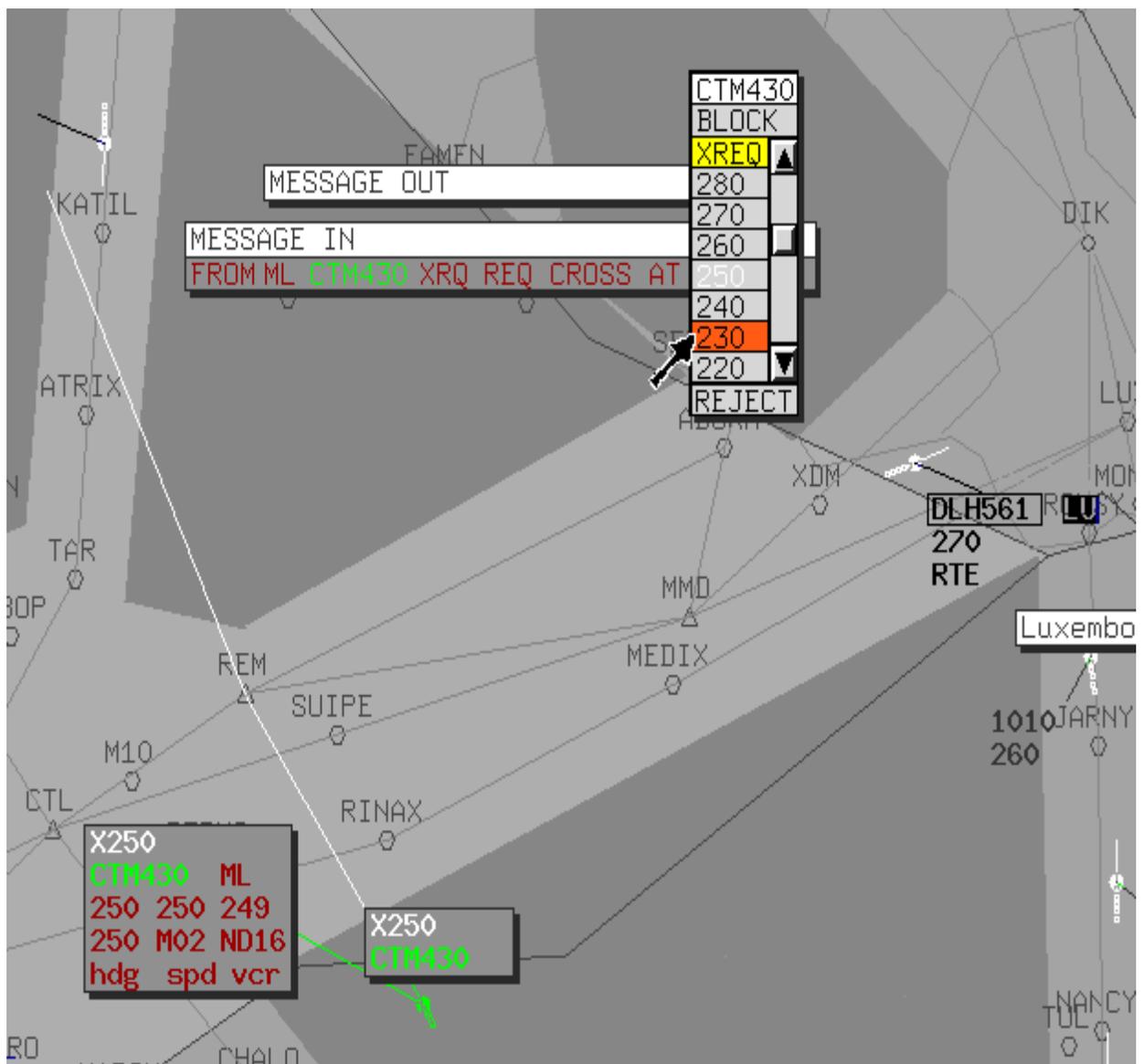


Рис. 5.2. Синтетическая картина воздушной обстановки с картографией и символьными обозначениями дополнительных полетных данных

5.1.3. ДИНАМИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ. Координатные радиолокационные отметки отображаются на экране диспетчера в виде специальных символов различной конфигурации в зависимости от фазы обработки и наличия плана полета по ВС, сопровождаемых системой. В табл. 5.2 представлены условные

обозначения, рекомендованные для использования.

3.4.2. Таблица 5.2

СИМВОЛ	содержание
○	символ текущей точки – отметки несопровожаемого ВС
+	отметка несопровожаемого ВС по данным ВРЛ
×	отметка несопровожаемого ВС по данным ПРЛ
□	символ ВС, находящегося на управлении по ПРЛ без плана полета
◇	символ ВС, находящегося на управлении по ВРЛ без плана полета
◻	символ ВС, находящегося на управлении по ПРЛ с планом полета
◊	символ ВС, находящегося на управлении по ВРЛ с планом полета
◎	символ сопровождаемого ВС, не взятого на управление
⊕	символ не управляемого ВС, сопровождаемого по данным ПРЛ
⊗	символ не управляемого ВС, сопровождаемого по данным ВРЛ
↕	символ трека по плану полета ВС

Код диспетчера, как и код сектора управления, представляет собой двухсимвольную комбинацию, чаще всего с лидирующей буквой и замыкающей цифрой, допускается использование только буквенных символов. Указывает, под управлением какого диспетчера в данный момент времени находится то или иное ВС. Символ диспетчера располагается впереди относительно координатной отметки ВС по ходу его полета. Координатная отметка в совокупности с предысторией движения и кодом диспетчера представляет собой трек.

Дополнительная информация по каждому ВС, сопровождаемому системой, отображается на экране в виде формуляра сопровождения (ФС), связанного с координатной отметкой линией-связкой. Линия-связка располагается под углом 90° к линии пути ВС. В случае наложения формуляров разных ВС при их последовательном движении по полю экрана, ПО автоматически отыскивает им свободные места и «отбрасывает» на новые позиции. При этом угол линии-связки относительно курса ВС может измениться на 45° или 135°. Кроме того, предусмотрена специальная функция «Отброс формуляра», позволяющая диспетчеру вручную переместить ФС в положение, при котором линия-связка расположится под углом 270° к линии пути ВС.

Формуляр сопровождения состоит из нескольких строк по восемь знакомест в каждой. Рекомендованы формуляры из двух и трех строк. Трехстрочный ФС содержит семь полей, в которые записывается следующая информация (см. рис. 5.3).

1		2
3	4	5
6	7	

Рис. 5.3. Поля формуляра сопровождения ВС

1. Позывной ВС – бортовой номер либо код ответчика ИКАО;
2. Символ ↘ потери сопровождения ВС, который появляется в формуляре, если в течение двух и более обзоров по ВС отсутствует РЛИ.
3. Значение текущей высоты в десятках метров (4 цифры) относительно

стандартного давления 760 мм ртутного столба. В плановом формуляре сопровождения отображается высота, указанная в плане полета.

4. Символ тенденции изменения высоты полета – Δ соответствует движению в фазе набора высоты, ∇ - фазе снижения, горизонтальный полет идентифицируется незаполненным (пустым) полем.

5. Заданный эшелон полета, отображаемый в сотнях метров (3 цифры), заносится в формуляр сопровождения вручную.

6. Путевая скорость полета (в плановом ФС индицируется скорость полета, указанная в плане). Путевая скорость определяется по радиолокационным измерениям и отображается в км/час (4 цифры). Имеется возможность вызывать на отображение в этом поле остаток топлива в процентах по данным ВРЛ (лидирующий символ Т и три цифры).

7. Эшелон полета (4 знака), принимающий следующие значения:

- разрешенный эшелон входа в сектор, согласованный во время приема-передачи ВС (лидирующий пробел и три цифры);
- уточненный эшелон полета, указывается так же;
- запрошенный эшелон полета из плана (буква 'С' и три цифры).

В двухстрочном ФС отображается информация первых пяти полей (первых двух строк). Изменение полноты формуляров выполняет диспетчер с помощью функций ввода. При получении от ответчика ВС сигналов аварийного состояния осуществляется автоматический ввод в сопровождение, если он не был произведен ранее, и принудительное отображение символа ВС, терпящего бедствие, на всех диспетчерских экранах. При этом отметки ВС, ФС и символ бедствия отображаются в режиме мигания.

Векторы экстраполяции отображаются на экране в виде прямых линий по ходу движения, начало которых находится в центре символа ВС. Конец вектора указывает упрежденное положение ВС. Расстояние от трека до конца вектора рассчитывается на основании путевой скорости полета ВС и указанного диспетчером времени экстраполяции (от двух до пяти минут). Вектор корректируется по курсу и скорости полета ВС на каждый момент обновления информации на экране. Примеры отображения перечисленных типов динамической информации представлены на рис. 5.4.

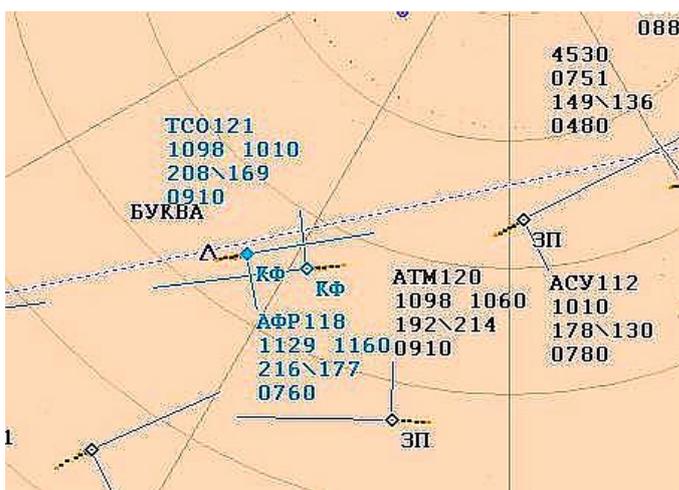


Рис. 5.4. Примеры отображения кода диспетчера (ЗП), ФС, линий связи и векторов экстраполяции

ного диспетчером времени экстраполяции (от двух до пяти минут). Вектор корректируется по курсу и скорости полета ВС на каждый момент обновления информации на экране. Примеры отображения перечисленных типов динамической информации представлены на рис. 5.4.

Масштабная линейка и вектор-измеритель. Оба инструмента предусмотрены для визуального определения на экране расстояния между любыми двумя точками. Масштабная линейка представляет собой от-

резок горизонтальной линии с делениями разной цены. Общая длина соответствует 50 км, цена деления между тремя первыми точками составляет 5 км, с третьей по седьмую – 10 км. С помощью клавиатуры или мыши чер может переместить масштабную линейку в любое место экрана. Вектор-измеритель представляет собой прямую линию между двумя точками на экране, указанными диспетчером. Он позволяет измерять как расстояние в километрах, так и азимут в градусах между заданными точками, значения которых отображаются в соответствующем окне.

Зоны ограничений и режимов полетов. ПО предоставляет возможность отображения на экране этих областей пространства в виде многоугольников с формулярами, содержащими пояснительный текст. Формуляры зон состоят из трех строк и содержат следующие поля (рис. 5.5):

1	2	
3		4
5	6	

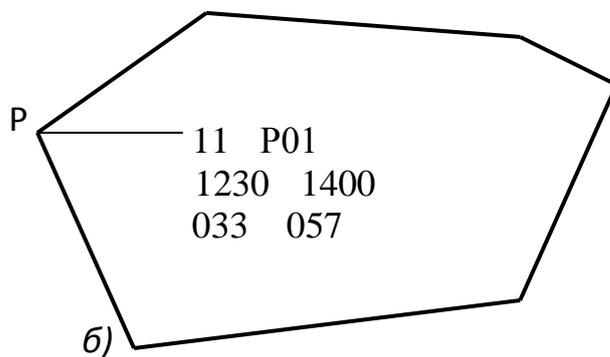


Рис. 5.5. Формуляр зоны а) и зона ограничений режимов полетов б) и их отображение на экране

- 1 – обозначение зоны ограничений и режимов полетов (два знака).
- 2 – буква «Р» (режим) и номер зоны (две цифры).
- 3 – время начала действия ограничения в часах и минутах.
- 4 – время окончания действия ограничения в часах и минутах.
- 5 – обозначение нижнего эшелона ограничений в сотнях метров.
- 6 – обозначение верхнего эшелона ограничений в сотнях метров.

Зоны запрета автозахвата. Все ВС, находящиеся в зоне действия системы, по замыслу должны автоматически браться на сопровождение. Не всегда (не при любых условиях радиолокационного наблюдения) ПО полноценно справляется с этой задачей. Для запрета автозахвата в указанных областях ВП, а также для исключения ввода в сопровождения ложных отметок или помех, диспетчеру дана возможность задания на экране зоны запрета автозахвата. Зона имеет вид квадрата. Координаты центра и размеры стороны квадрата указываются диспетчером с помощью мыши и клавиатуры. Если размер квадрата не указан, ПО выбирает его равным 50 км. Зоне автоматически присваивается порядковый номер, который отображается справа от вершины.

Линии радиопеленгов. Отображаются диспетчеру в виде отрезков прямых, исходящих из точек стояния АРП и проходящих через пеленгуемое ВС. У основания линии индицируются цифровые значения прямого и обратного пеленгов. Диспетчер имеет возможность выбора нескольких АРП.

Маршруты полетов ВС. Маршрут полета ВС, по которому в системе есть план полета, отображается на экране в виде ломаной линии со следующими обозначениями:

- символы аэродромов вылета и назначения (см. табл. 5.1);
- символы пунктов обязательных донесений (см. табл. 5.1).

Справа от каждого пункта и аэродрома отображается формуляр, состоящий из четырех полей, изображенный на рис. 5.6. Около точки входа в зону действия системы формуляр дополняется позывным номером ВС. Поля содержат следующую информацию.

АГ	85444	108
----	-------	-----

1	
2	
3	
4	

Рис. 5.6. Формуляр точки маршрута

1– условное обозначение пункта обязательных донесений или аэродрома (1 – 5 букв).

2 – время пролета пункта обязательных донесений или вылета (посадки) на аэродроме в часах и минутах (четыре цифры); в случае полета группы ВС допускается индикация двух значений времени (глубина боевого порядка) для головного и замыкающего ВС группы.

3– запрошенный эшелон полета (три цифры); для группы допускается указание диапазона высот полета ВС участников группы (шесть цифр).

цифр).

4– позывной ВС, по которому отображается маршрут полета (до семи символов, индицируются только в формуляре начальной точки маршрута).

Текстовая информация. Предусмотрены несколько окон для оповещения диспетчера о нештатных ситуациях УВД, а также для отображения интегральной информации о воздушной обстановке в виде списков ВС:

- список ожидания;
- список потерь;
- окно сообщений о нарушениях планов полетов;
- список конфликтных ситуаций;
- список входа в сектор;
- список пролета пункта обязательных донесений;
- списки прилета и вылета на аэродроме.

В целях разгрузки рабочего поля экрана диспетчеру предоставлена возможность «перетаскивать» с помощью мыши любое окно на свободное в текущий момент времени место. Рассмотрим состав и содержание первой пары окон (остальные анализировались в книге 4 данной серии).

Список ожидания. В ситуациях, когда на экране отображаются скопления ВС, их формуляры сопровождения загромождают изображение и мешают диспетчеру сосредоточиться на анализе обстановки. В этих случаях бывает полезным снять с отображения формуляры ВС, по которым не требуется вмешательства в действия пилота, и ограничиться наблюдением ФС только тех из них, которые выполняют полет в более сложных условиях, создающих предпосылки к конфликтным ситуациям. С этой целью предусмотрены ручные функции перевода дополнительной информации ФС в список ожидания, состав и содержание которого демонстрирует рис. 5.7. Каждая строка списка содержит:

АВ	96333	0843	084
АБ	65623	0600	060
АА	46520	0541	054
<i>Рис. 5.7. Отображение списка ожидания</i>			

- индекс (две буквы), соответствующий индексу строки списка входа;
- радиотелефонный позывной ВС (поле 1 формуляра сопровождения);
- текущую высоту полета в десятках метров из поля 3 ФС;

- заданный эшелон полета в сотнях метров из поля 5 ФС;
- признак потери радиолокационного сопровождения из поля 2 ФС.

Строки в списке ожидания располагаются в зависимости от заданной высоты полета, чем она больше, тем выше строка. С изменением высоты строки автоматически меняют свои места в списке. В случае отсутствия значения заданной высоты критерием становится текущая высота полета. Строки могут удаляться обратным ручным переводом в ФС, либо по функции передачи управления в смежный сектор. Кроме того, если отсутствует радиолокационная информация по данному ВС (не возобновляется в течение четырех обзоров РЛС), о чем свидетельствует символ потери , строка может быть переведена вручную в список потерь.

Список потерь (рис. 5.8) содержит строки со следующей информацией по каждому ВС:

- индекс строки (две буквы), соответствующий индексу строки списка входа;
- радиотелефонный позывной ВС из поля 1 формуляра сопровождения;
- заданный эшелон полета в сотнях метров из поля 5 ФС;
- признак сопровождения только по данным ПРЛ (буква «П»);
- признак запрета стирания строки из списка (буква «Р»).

АА	87241	066	П Р
АК	87783	060	П Р
АО	46333	054	
АР	47814	051	
<i>Рис. 5.8. Формат списка потерь</i>			

Вновь поступающая информация занимает нижнюю строку, остальные строки сдвигаются вверх. ПО осуществляет формирование новой строки в случае потери радиолокационного сопровождения. Строка списка может стираться вручную диспетчером, либо автоматически, через десять минут после попадания в список, если диспетчером не введен признак «Р» запрета стирания. Система допускает передачу управления по строке списка потерь.

5.2. ФУНКЦИИ ВВОДА ДИСПЕТЧЕРА

5.2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ФУНКЦИЙ ВВОДА.

В настоящее время наблюдается тенденция перехода от традиционного взаимодействия диспетчера с ПО при помощи клавиатуры – к работе с манипулятором «мышь». При этом необходимые функциональные клавиши, как правило, сохраняются на пульте и дублируются либо их изображениями на экране, либо упаковкой в рамки всплывающих или выпадающих меню функций ввода диспетчера. В данном изложении приводится описание замысла этих средств интерфейса «человек-машина» без конкретной ориентации на реализацию в известных изделиях.

Общее назначение функций состоит в обеспечении управляемости работы ПО, в предоставлении диспетчеру возможности изменять состав и формы отображения информации, в организации доступа к известной системе информации – как по совокупности ВС (спискам), так и к каждому сопровождаемому объекту индивидуально. В соответствии с назначением, функции ввода классифицируются на прямые, обеспечивающие единообразный переход от одного представления данных на экране к другому, и на так называемые функции ввода с аргументом, реализующие обработку запросов по определенным критериям.

Особое место занимают функции, осуществляющие модификацию данных радиолокационного сопровождения автоматически. Свое место в составе ПО в настоящее время обрели лишь три из них: автоматический ввод ВС в сопровождение, автоматический переход к отображению планового трека при потере радиолокационного сопровождения и автоматическая корректировка плановой информации по результатам радиолокационных наблюдений. Препятствием к повышению уровня автоматизации является юридический аспект работы диспетчера. При разборе происшествий трудно предъявлять претензии к должностному лицу, фактически не взявшему на управление ВС, нарушившее правила полетов. Если ввод в сопровождение выполнила система, то юридическая ответственность диспетчера за безопасное УВД ничем не подтверждена. Исходя из этой посылки, любое изменение статуса наблюдаемого ВС должно фиксироваться человеком, принимающим решения по управлению движением. Диспетчер должен нажать клавишу «Ввод в сопровождение», и этот факт станет для него мерой ответственности за принятый им рейс. С другой стороны, на действия, связанные с исполнением функции принятия ВС на управление требуется время, которого может не хватать на осуществление диспетчерского контроля обстановки в целом.

Высказанные противоречия решены в известных системах организационно. Согласно установившейся традиции, при наличии плана полета ВС ввод в сопровождение осуществляется автоматически. По содержанию кодограмм ВРЛ, ПО получает позывной номер сопровождаемого ВС, использует его как ключ для поиска плана полета, анализирует совокупность планируемых и наблюдаемых данных – и принимает решение о вводе в сопровождение ожидаемого борта, подтвержденное фактическими измерениями. При этом автоматически осуществляется отождествление радиолокационной и плановой информации об анализируемом ВС.

Функция автоматической корректировки плановой информации по результатам радиолокационных наблюдений связана с юридическими аспектами в меньшей степени. Если условия выполнения полетов таковы, что установленные планом сроки не соблюдаются, либо складывающаяся обстановка вынуждает диспетчера перевести ВС на другую высоту, либо изменить маршрут следования – система может автоматически «подтянуть» плановые данные к фактическим. Как правило, действия ПО ограничиваются изменением величин скорости полета точек маршрута в соответствии со сглажен-

ными параметрами радиолокационной траектории. План пересчитывается, и в нем фиксируются новые моменты пролета навигационных пунктов.

На рис. 5.9 представлены некоторые функции выбора режима работы экрана: изменение масштаба, смещение центра, вызова и регулирования длины вектора экстраполяции для отметки сопровождаемого ВС.

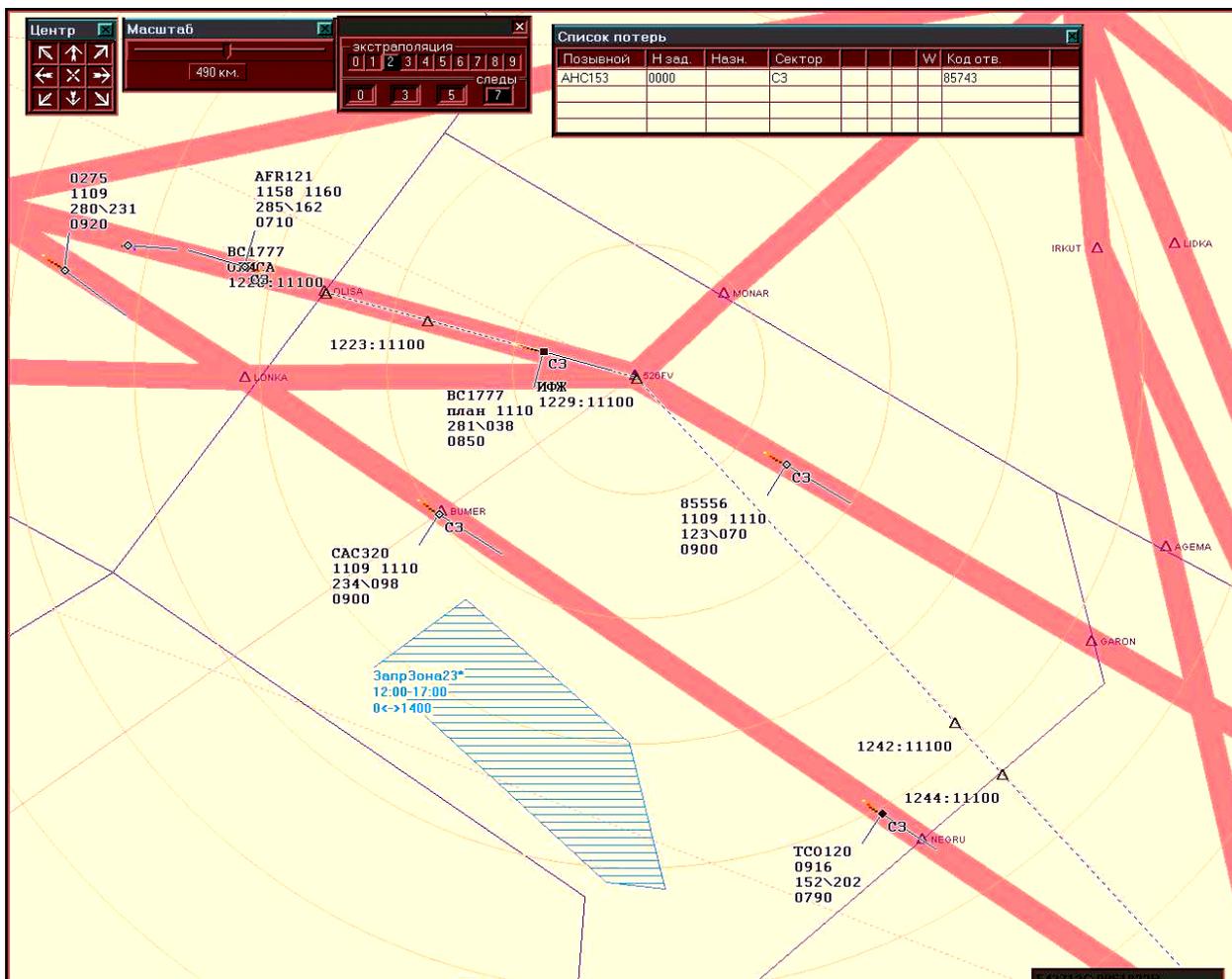


Рис. 5.9. Пример средств для выбора режима отображения

5.2.2. ПРЯМЫЕ ФУНКЦИИ ВВОДА. Напомним, что ввод прямых функций может осуществляться либо с помощью пультовых клавиш, либо с помощью манипулятора «мышь» путем щелчка по соответствующему пункту меню или по изображению клавиши на экране диспетчера.

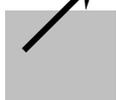
КОД
ОТВ

Код ответчика. При нажатии клавиши обеспечивается отображение в поле 1 ФС – вместо номера рейса – кода ответчика по всем ВС с международными позывными, которые находятся под управлением на данном рабочем месте. Для ВС, не оборудованных международными ответчиками, сохраняется регистрационный номер ВС. При повторном нажатии клавиши в поле 1 ФС иностранной авиакомпании индицируется номер рейса по плану полета.



Масштабная линейка. При нажатии клавиши на экране отображается масштабная линейка. Ее положение на экране можно изменить либо «перетаскиванием» мышью, либо с помощью функции

«Место списка». Повторное нажатие клавиши приводит к гашению линейки.



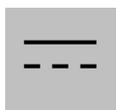
Вектор экстраполяции. При активизации функции на экране отображаются векторы экстраполяции по всем ВС, управляемым с данного диспетчерского пульта, с глубиной упреждения на три минуты, и появляется окно задания параметров экстраполяции, изображенное в верхнем поле рис. 5.9. Длина вектора рассчитывается средствами ПО по измеренной скорости ВС и заданному времени упреждения. Время может быть изменено щелчком мыши по нужной кнопке окна экстраполяции.



Пеленг АРП. При активизации данной функции на индикаторе воздушной обстановки отображаются линии пеленга и значения прямого и обратного пеленгов, которые располагаются у основания линии, в точке стояния АРП, если она находится на экране.



Режим. При активизации данной функции диспетчеру отображается зона ограничений и режимов полетов (рис. 5.5, 5.9). Как и другие прямые функции, она при повторной активизации производит обратное действие – гашение вызванной зоны на экране.

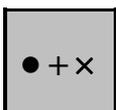


Полнота формуляра. С помощью этой функции осуществляется последовательный переход к отображению ФС разной полноты по всем ВС, находящимся под управлением диспетчера. В разных АС УВД допускаются ФС, содержащие от одной до пяти строк. Наиболее употребительными являются представленные на рис. 5.3 двухстрочные и трехстрочные формуляры. Рис. 5.9 и 5.10 содержат четырехстрочные ФС.



Топливо/скорость. После активизации данной функции в поле 6 ФС отображается значение остатка топлива, полученное системой от ответчиков вторичной локации, в процентах от полной заправки.

При повторной активизации функции вновь индицируется значение путевой скорости в км/час.



Несопровождаемые ВС. При активизации данной функции на экране отображаются символы несопровождаемых ВС. Повторное нажатие гасит эти символы.



Быстрый просмотр. С помощью данной функции обеспечивается отображение ФС по всем ВС, находящихся на управлении в смежных секторах и находящихся в пределах границ экрана. Полнота ФС соответствует состоянию соответствующей функции на пульте диспетчера, осуществляющего быстрый просмотр.



Код диспетчера. По исполнению данной функции происходит отображение кода диспетчера рядом с треками ВС, которые находятся под управлением в секторе. Коды диспетчеров смежных секторов

отображаются постоянно, независимо от активизации этой функции.



Масштаб. Перемещение мышью движка в окне указания масштаба позволяет увеличивать или уменьшать его по всему полю экрана.

Смещение центра. Нажатие граничных кнопок окна «Центр» приводит к плавному смещению изображения по полю экрана в направлении, совпа-

дающем с ориентацией стрелки на кнопке. Прекращение нажатия останавливает начатое движение. Щелчок по центральной кнопке позволяет восстановить положение центра сектора.

5.2.3. ФУНКЦИИ ВВОДА С АРГУМЕНТОМ. Линейка основного функционального меню диспетчера сектора содержит три группы выпадающих подменю, или три группы функций, называемых ПЛАН, ВЫБОР, ТРЕК.

В группу функций ПЛАН входят:

- маршрут по плану;
- трек по плану;
- расчетное время пролета (ЕТО);
- фактическое время пролета пункта.

В группу функций ВЫБОР входят:

- карта;
- место списка;
- сектор просмотра;
- выбор АРП;
- зона;
- вектор;
- экстраполяция.

В группу функций ТРЕК входят:

- привязка формуляра сопровождения;
- ввод в сопровождение;
- новый позывной;
- перевод ФС в ФО;
- заданная высота;
- уточненная высота;
- сброс/запрет сброса строки;
- перенос ФС.

Маршрут по плану. С помощью данной функции обеспечивается отображение на экране маршрута полета ВС, указанного диспетчером. Для этого необходимо обратиться к пункту ПЛАН линейки основного меню и выбрать в выпадающем меню пункт «Маршрут по плану». На экране в ответ появляется окно для ввода аргумента функции – двухбуквенного индекса строки списка входа или строки списка ожидания,

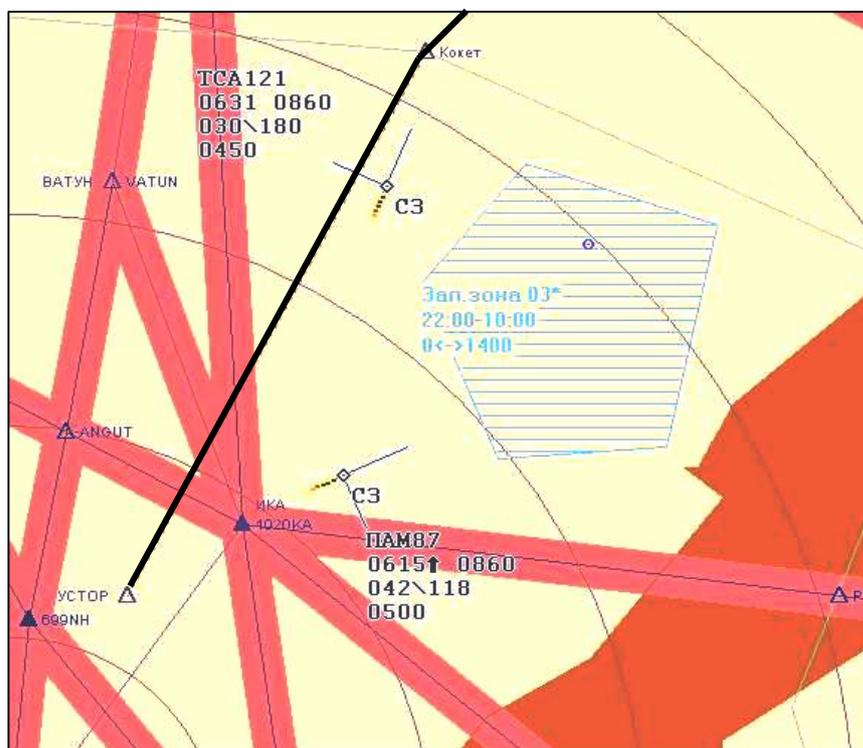


Рис. 5.10. Отображение маршрута ВС по плану

соответствующего ВС. Диспетчер может либо ввести индекс, либо щелкнуть мышью отметку ВС на экране, и тогда нужный индекс автоматически введется в окно средствами ПО. Далее необходимо нажать клавишу ВВОД, либо «щелкнуть» ее изображение. Отмена отображаемого маршрута сопряжена с теми же действиями, с той разницей, что вместо клавиши Enter используется клавиша «Escape».

Трек по плану. Данная функция обеспечивает отображение на индикаторе расчетного положения ВС по плану. Следует помнить, что с плановым треком можно исполнять те же действия, что и с радиолокационным: наблюдать код диспетчера, ФС, вектор экстраполяции, передавать управление и т.д. Для предотвращения ситуаций неоднозначности, ПО обеспечивает доступ лишь к одной из возможных форм представления ВС. В любой момент времени на экране может быть либо радиолокационный трек, либо плановый, либо строка списка потерь. Таким образом, трек по плану может вызываться лишь в отсутствие радиолокационного сопровождения ВС при наличии плана полета. Для его отображения необходимо обратиться к соответствующему пункту меню, набрать индекс строки списка входа (либо щелкнуть мышью отметку или ФС ВС) и нажать ВВОД. Для отмены трека используется клавиша Escape.

Расчетное время пролета. С помощью функции «ЕТО» (*Estimated Time Overflow*) производится ввод расчетного времени пролета указанного навигационного пункта. Пересчитывается план полета, начиная от указанной точки. Для ввода необходимо активизировать функцию (клавишей или мышью) и в появившемся окне набрать:

- индекс строки списка входа;
- расчетное время пролета пункта (четыре цифры, часы и минуты);
- наименование пункта (три-пять букв);
- нажать (щелкнуть мышью) клавишу ВВОД.

Фактическое время пролета. С помощью функции «АТО» (*Actual Time Overflow*) производится ввод действительного времени пролета указанного навигационного пункта. Пересчитывается план полета, начиная от указанной точки. Для ввода необходимо активизировать функцию (клавишей или мышью) и в появившемся окне набрать те же данные, что при вводе ЕТО. Если не указано значение времени, то система автоматически заполняет поле текущим временем в часах и минутах.

ГРУППА ФУНКЦИЙ ВЫБОР.

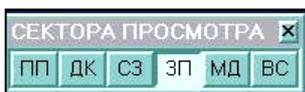
Карта. С помощью данной функции обеспечивается отображение выбранной карты на экране (либо его отмена). Для вызова карты необходимо активизировать функцию (клавишей или мышью) и в появившемся окне набрать ее номер, после чего нажать (щелкнуть мышью) клавишу ВВОД. По исполнению функции нужная карта отобразится на экране диспетчера. Для стирания выбранной карты производятся те же действия с той разницей, что для отмены используется клавиша Escape.

Место сиска. С помощью данной функции производится перемеще-

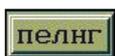
ние на экране любых индицируемых окон. Типовое исполнение функции – использование стандартного механизма «перетаскивания» мышью. На случай внезапного отказа манипулятора «мышь» предусмотрено клавишное управление поиском места окна на экране. С этой целью каждому окну присвоен специальный индекс: О – список ожидания, П – список потерь, Т – окно ввода аргумента, М – масштабная линейка и т.д. Для изменения местоположения на экране переносимого окна необходимо:

- выбрать в меню функцию «Место списка»;
- «стрелочными» клавишами указать курсором новое место окна;
- нажать клавишу ВВОД.

После исполнения функции левый верхний угол переносимого окна займет место в указанной курсором точке экрана.

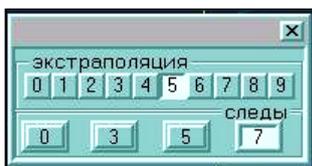


Выбор сектора для просмотра. С помощью данной функции назначаются секторы, смежные с зоной ответственности диспетчера данного пульта, для последующего отображения в режиме «быстрого просмотра» формуляров сопровождения по ВС, находящимся на экране в указанных секторах. Для назначения сектора необходимо щелкнуть мышью по кнопке с нужным наименованием. Одновременно можно выбрать до шести секторов. Для отмены выбранных ранее секторов следует повторно щелкнуть мышью по нажатым кнопкам.



Выбор АРП. С помощью данной функции производится назначение до трех станций АРП для пеленгации ВС, с экипажем которого диспетчер ведет переговоры. При нажатии клавиши появляется окно выбора, в котором каждой станции и каждому каналу сопоставлены свои кнопки управления. После нажатия нужных кнопок диспетчер исполняет ввод. Отображение линий пеленга происходит при активизации прямой функции АРП.

Зона запрета автозахвата. После активизации функции следует щелчком мыши указать на экране точку центра вводимой зоны и набрать в окне аргумента размер зоны в десятках километров (одна – две цифры). По исполнении функции на экране отобразится зона запрета автозахвата в виде квадрата. Если размер не был указан, то система выбирает сторону квадрата длиной 50 км. В этой зоне захват по ПРЛ не производится, но может быть реализована ручная функция «Ввод в сопровождение». Отмена зоны осуществляется по номеру, который отображается в правом верхнем углу квадрата.



Экстраполяция. Данная функция позволяет выбрать величину времени экстраполяции, которая вместе со значениями путевой скорости будет определять длину векторов упрежденного положения ВС. Для задания времени следует вызвать на отображение окно экстраполяции и щелкнуть мышью кнопку с нужным значением, после чего нажать ВВОД. Отображение векторов по всем управляемым диспетчером ВС осуществляется при активизации прямой функции «Экстраполяция» (см. выше). Для отображения векторов по ВС, находящимся в смежных секторах, необходимо активизировать данную функцию и щелкнуть отметку или ФС ВС.

Отмена отображения векторов экстраполяции производится в том же порядке, но заключается нажатием клавиши Escape.



Вектор-измеритель. С помощью данной функции обеспечивается отображение векторной линии между двумя точками, указанными на экране, а также значений расстояния и азимута между ними. Для этого следует активизировать соответствующую клавишу или пункт меню, щелкнуть мышью исходную и конечную точки вектора. По исполнению функции в окне обмена сообщениями отобразится расстояние (три цифры) в километрах, а также прямой и обратный азимуты (по три цифры) с точностью до градуса. Для отмены отображения клавиша щелкается мышью повторно.

Группа функций ТРЕК.

Привязка формуляра сопровождения. С помощью данной функции производится отождествление плана полета с управляемой (сопровожаемой) отметкой ВС, если борт не оборудован ответчиком ВРЛ. После активизации (из меню или клавишей) открывается окно ввода аргумента, которое следует заполнить индексом строки списка входа (или щелкнуть мышью строку списка для автоматического набора). Далее щелчком мыши указывается нужное ВС. На экране символ ВС без плана заменится на символ ВС с планом (см. табл. 5.2), а в формуляре сопровождения появится плановая информация.

Ввод в сопровождение. С помощью данной функции фиксируется юридическая ответственность диспетчера за управление принимаемым ВС в случаях их появления из областей ВП, расположенных вне зоны действия системы (прием от соседних взаимодействующих систем УВД):

- взятие на управление ВС, наблюдаемых средствами ПРЛ;
- взятие на управление ВС, наблюдаемых средствами ВРЛ (ВРЛ+ПРЛ);
- взятие на управление ВС, наблюдаемых средствами ПРЛ с одновременной привязкой плана полета;
- взятие на управление ВС, находящихся в зоне запрета автозахвата.

Напомним, что для ВС, имеющих ответчик ВРЛ и план полета, известной системе, отождествление радиолокационной и плановой информации производится автоматически. Для ручного ввода в сопровождение необходимо активизировать описываемую функцию (клавишей или из меню), щелкнуть мышью отметку принимаемого борта, набрать индекс соответствующей строки списка входа, если в системе есть план полета, и нажать ВВОД. После исполнения на экране отобразится символ сопровождаемого ВС с кодом диспетчера и ФС, в поле 1 которого для бортов, не оборудованных ответчиком ВРЛ, отобразится системный номер ВС, а в поле 6 – путевая скорость. При наличии плана в поле 1 средствами ПО заносится из него регистрационный номер ВС. По ВС, оборудованным ВРЛ, в поле 1 индицируется код ответчика (совпадающий по содержанию с регистрационным номером по плану).

Для отмены сопровождения выполняются те же действия с той разницей, что в заключение нажимается клавиша Escape. Как результат, ФС и код диспетчера стираются с экрана, а символ заменяется отметкой ВС, не взятого на управление. Если ФС был перенесен в список ожидания, тогда автомати-

чески стирается его соответствующая строка.

Позвн.

Новый позывной. В ряде ситуаций УВД возникает необходимость в изменении позывного ВС в процессе выполнения полета. Для того чтобы передать ПО эту информацию, предусмотрена данная функция, которая активизируется нажатием клавиши «Позвн». На экране появляется окно для ввода (набора с помощью клавиатуры) нового позывного ВС. Далее щелчком мыши указывается символ ВС, и в поле 1 его ФС вместо старого отображается новый позывной.

В ОЖИД.

Перевод информации ФС в список ожидания. С помощью данной функции производится перевод информации из ФС (для разгрузки экрана при большом скоплении управляемых ВС) в список ожидания (СПО) и обратно. Для реализации функции необходимо нажать соответствующую клавишу и «перетащить» мышью формуляр сопровождения в отображаемый на экране СПО. По исполнению функции информация из ФС «переместится» в СПО, а у символа ВС отобразится индекс строки СПО. Для выполнения обратной операции следует активизировать ту же клавишу и щелкнуть мышью строку СПО. Система восстанавливает ФС у символа ВС и стирает указанную строку СПО. В случае потери радиолокационного сопровождения строка из СПО переводится в список потерь.

НзДн.

Заданный эшелон. С помощью данной функции производится ручной ввод заданного эшелона в поле 5 ФС указанного ВС, если по выполняемому рейсу в системе нет плана полета. При наличии плана после отождествления радиолокационной и плановой информации данное поле заполняется автоматически. Значение заданной высоты переносится в ФС из поля 15 плана полета. Для ручного ввода заданного эшелона необходимо:

- активизировать функцию «Н_{зДн}» нажатием клавиши (ее изображения);
- набрать на клавиатуре заданный эшелон в сотнях метров;
- щелкнуть мышью символ ВС.

По исполнению функции в ФС отобразится значение заданного эшелона.

Уточненный эшелон. Операции по вводу в ПО для отображения в поле 7 ФС значения «Н_{утч}» аналогичны работе с функцией «Заданный эшелон». Отличия состоят в том, что диспетчер должен дополнительно указать системе, над каким навигационным пунктом ВС в своем дальнейшем движении должен занять «уточненный» эшелон. При наличии плана полета автоматически производится его пересчет, влияющий на распределение плановой информации. Новое значение фиксируется в строке списка входа в следующий сектор по ходу полета. Предусмотрена возможность стирания введенной величины «Н_{утч}» из ФС. В этом случае ПО восстанавливает в поле 7 значение эшелона из плана полета по данному рейсу.

сбр

Сброс – запрет. С помощью данной функции обеспечивается ручная операция исключения информации из списка потерь (СПП), а также запрет автоматического исключения строки из СПП по указанному ВС. Для удаления строки необходимо:

- активизировать функцию нажатием клавиши (или ее изображения);

- щелчком мыши указать стираемую строку (или набрать ее индекс в появившемся окне ввода аргумента);

- нажать клавишу ВВОД.

По исполнении функции указанная строка исключается из списка. Для запрета автоматического стирания необходимо выполнить те же действия, но вместо клавиши ВВОД нажать клавишу Escape.

После исполнения функции указанная строка не будет удаляться автоматически. Согласно технологии УВД, информация по ВС, находящимся в СпП, отображается в течение десяти минут, после чего автоматически стирается. Считается, что потеря радиолокационного сопровождения вызвана тем, что ВС покинул зону действия системы или совершил посадку на ее территории. Если же в течение десяти минут поступление радиолокационной информации по ВС возобновляется, то система автоматически восстанавливает отображение трека с ФС, а соответствующая строка СпП стирается.

Перенос ФС. При скоплении нескольких треков на небольшом участке экрана возникают ситуации наложения ФС одних ВС на другие. Когда отметок немного, система рассредоточивает формуляры автоматически. Для случаев, когда это не удастся, предусмотрена данная ручная функция ввода диспетчера. Для переноса ФС необходимо нажать соответствующую функциональную клавишу и щелкнуть мышью символ ВС. По исполнении функции линия-связка и ФС переместятся на 180° относительно прежнего положения.

ПРД

Передача управления. С помощью данной функции осуществляется радиолокационная передача управления ВС в смежный по направлению движения сектор УВД. Для ее исполнения необходимо нажать функциональную клавишу передачи. На экране появляется окно ввода аргумента, и в его поле ввода следует внести с помощью клавиатуры или выпадающих списков код сектора, диспетчеру которого передается управление. Далее необходимо щелкнуть мышью символ передаваемого ВС, если его трек отображается на экране, либо строку списка, если ВС находится в СпП. ПО проверяет наличие в маршруте по плану полета кода сектора, в который передается управление, и если его нет – отвергает ввод с указанием причины. Если сектор затрагивается плановым маршрутом, тогда на экранах обоих диспетчеров, передающего и принимающего, начинается мерцание строк СпП или символов передаваемого ВС, а также кода передающего диспетчера и ФС, причем последний индицируется в максимальном по количеству строк виде. Если в течение трех минут после исполнения функции принимающий диспетчер не осуществил приема управления ВС, то мерцание прекращается, а ФС или строка СпП принимают исходное состояние.

ПРМ

Прием управления. С помощью данной функции осуществляется юридический прием ВС, передаваемого на управление из смежного сектора УВД. Для ее реализации необходимо нажать клавишу приема и щелкнуть мышью мигающий символ ВС (строку СпП). Мерцание прекращается на обоих экранах, у передающего диспетчера с отображения снимается дополнительная и плановая информация о ВС.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиолокационное наблюдение в настоящее время является основным источником информации о воздушной обстановке, предоставляемой диспетчерскому персоналу. Однако специфика (физическая природа) процесса измерений такова, что его результаты не обладают удовлетворительным качеством. Помимо отметок реальных объектов, в центр управления полетами поступают ложные, в то время как действительные отметки могут оказаться пропущенными на том или другом обзоре. Отобразить на экране устойчивую картину взаимного положения движущихся ВС невозможно без компьютерной обработки. Для решения этой задачи созданы специальные алгоритмы обработки радиолокационной информации, основанные на методах математической статистики и составляющие ядро программного обеспечения автоматизированных систем управления воздушным движением. Традиционные принципы обработки построены по ступенчатой схеме. На радиолокационных позициях сигналы приемника РЛС преобразуются в кодограммы сообщений о ВС, пересылаемых в центр УВД, где происходит накопление и статистическая обработка координат обнаруженных объектов, по результатам которых осуществляется построение их траекторий с учетом измерений нескольких источников наблюдения. В качестве альтернативы общеизвестной схеме, излагается новый комплексный подход к обработке РЛИ, основанный на активной обратной связи между выдвигаемыми гипотезами и результатами измерений. Выбор очередной отметки управляется не только на основе статистических решающих правил, но с учетом функциональных аспектов – физической природы процесса и организации структуры ВП. Траектория каждого ВС изначально прокладывается по данным нескольких источников, и отпадает необходимость в их обобщении. Результаты сопровождения получаются точнее, чем при ступенчатой обработке, а потребности в вычислительных ресурсах остаются на прежнем уровне. В книге рассмотрены все этапы компьютерной обработки радиолокационных данных, а также функции взаимодействия диспетчерского персонала с системой.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Анодина Т.Г., Кузнецов А.А., Маркович Е.Д.** Автоматизация управления воздушным движением. – М.: Транспорт, 1992.
2. Теоретические основы радиолокации. / Под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Советское радио, 1964.
3. **Иванов Ю.В.** Радиотехнические системы управления воздушным движением. // Учебное пособие. – Л.: ЛТИ, 1981. Электронная версия книги <http://rtsystems.narod.ru/Radar>, 2005.

4. **Хазен Э.М., Паронджанов С.Д.** Исследование задачи отождествления траекторий воздушных судов. / В сб. «Управление воздушным движением». – М.: Воздушный транспорт, 1983.

5. **Савицкий В.И., Василенко В.А., Владимиров Ю.А., Точилор В.В.** Автоматизированные системы управления воздушным движением. / Справочник. – М.: Транспорт, 1986.

6. **Широков Л.Е.** Комплексное гипотезное сопровождение движущихся объектов. // Известия Академии наук, Теория и системы управления, 2000, № 6.

7. **Рыбас В.Н.** Алгоритм обработки радиолокационных данных о маневрирующих объектах. // Научный вестник МГТУ ГА, сер. Прикладная математика. Информатика, № 102, – М.: МГТУ ГА, 2006.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Д1. **С.Д. Паронджанов, Э.М. Хазен.** Алгоритм обнаружения траекторий самолетов в районной автоматизированной системе управления воздушным движением. // Изв. АН СССР, Техническая кибернетика, 1982, № 2.

Д2. **Э.М. Хазен.** Методы оптимальных статистических решений и задачи оптимального управления. - М.: Советское Радио, 1968.

Д3. **Э.М. Хазен.** Рекуррентные алгоритмы классификации и оценивания в Районной Автоматизированной Системе Управления Воздушным движением. // Изв. АН СССР, Техническая кибернетика, 1988, № 1.

Д4. **Э.М. Хазен.** Рекуррентные алгоритмы автозахвата, фильтрации и сопровождения траекторий самолетов. Вопросы радиоэлектроники, Сер. Общетеchnическая, вып.14. - М.: МНИИПА, 1977.

Д5. **Э.М. Хазен.** Алгоритм распознавания ветвящихся гипотез в задаче автозахвата и сопровождения траекторий многих движущихся объектов. // Автоматика и телемеханика, 1996, № 7.

Д6. **Э, М. Хазен.** Высокоточный алгоритм автозахвата и сопровождения траекторий самолетов – постановщиков активных помех – по результатам измерений их пеленгов. Вопросы радиоэлектроники, Сер. Общетеchnическая, вып.11. - М.: МНИИПА, 1997

Д7. **Э.М. Хазен.** Рекуррентные алгоритмы фильтрации и интерполяции траекторий самолетов (с учетом измерений радиальной скорости). Реферативный журнал «Радиотехника», 1991, № 7.

[На начало документа](#)

[На исходный документ](#)