

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный
институт имени академика С.П.Королева

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Куйбышев 1985

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный
институт имени академика С.П.Королева

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ
ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Утверждено
редакционно-издательским
советом института
в качестве методических
указаний к работе по курсу
"Радиотехнические системы"
для студентов

Куйбышев 1985

В методических указаниях рассматриваются алгоритмы вторичной обработки радиолокационных сигналов; описывается программная реализация алгоритмов на ЭВМ; даются рекомендации по выполнению машинного эксперимента. Указания предназначены для студентов, обучающихся по специальности "Радиотехника".

Составитель В.Д. Кузнецов

Рецензенты: канд.техн.наук доц. С.М.Тоскин,
канд. техн.наук доц.Е.А.Мущаков

Цель и порядок выполнения работы

Цель работы:

изучение и экспериментальное исследование на цифровой модели алгоритмов последовательного сглаживания оценок траекторий целей, используемых во вторичной обработке радиолокационной информации;

приобретение студентами знаний и практических навыков по использованию ЭВМ и работе на ней.

Работа включает следующие этапы:

изучение (вне аудитории) основ теории вторичной обработки радиолокационных сигналов;

ознакомление с задачами и существом машинного эксперимента на ЭВМ;

выбор исходных данных для машинного эксперимента;

подготовка задания для ЭВМ;

собственно проведение эксперимента на ЭВМ;

анализ полученных результатов и составление отчета;

отчет за работу перед преподавателем.

Для выполнения машинного эксперимента необходимо выбрать следующие параметры:

величину скорости движения цели из диапазона значений, свойственного современным самолетам (в качестве единиц измерения нужно использовать м/с);

величину приращения скорости и координату (номер отсчета координаты), где начинается участок равноускоренного движения. Величину приращения рекомендуется выбрать приблизительно равной 10% от первоначального значения скорости. Приращение по знаку может быть как положительным, так и отрицательным. При выборе номера отсчета следует учесть, что вся длина моделируемого участка траектории составляет 100 отсчетов, а под участок равноускоренного движения отводится 10

отчетов;

две пары значений коэффициентов сглаживания α и β . При этом следует воспользоваться графиками, представленными на рис.9, и формулой (19). Одну пару этих коэффициентов рекомендуется выбрать для сравнительно большого значения относительной дисперсии случайной ошибки (0,7-0,8), а вторую - для дисперсии в 1,5-2 раза меньшей первоначального значения (0,4-0,5) (см.в разд. "Сглаживающий цифровой фильтр" формулу (19) и рис.9);

дисперсию ошибки радиодальномера (средне-квадратическая ошибка измерения дальности в радиолокационных станциях (РЛС) обзорного типа составляет десятки метров).

Как известно, пользователь может общаться с ЭВМ только посредством наборов данных. Для ввода исходных данных в ЭВМ необходимо составить набор исходных данных, который имеет следующую структуру:

```
// GD. SYSIN _ DD _ *
```

```
Входные данные для программы на Фортране
```

```
/ *
```

Считывание данных из набора в память ЭВМ производится с помощью операторов

```
READ 1, V, DV, IX
```

```
READ 5, AL1, BET1, AL2, BET2
```

```
READ 10, D
```

```
1 FORMAT (2(F5.1,2X),I2)
```

```
5 FORMAT (4(F4.2,2X))
```

```
10 FORMAT (F7.1)
```

Данные в наборе записываются в соответствии с форматом этих операторов. Непосредственное общение пользователя с ЭВМ осуществляется с помощью дисплея EC-7920. Сущность проводимых в работе экспериментов описывается в разд. "Машинный эксперимент". На печать выводятся массивы чисел идеальных траекторий движения цели; отклонений траекторий возмущенных помехами от идеальных; случайных ошибок фильтрации отчетов траекторий; динамических ошибок, кроме того, значения дисперсий случайных ошибок.

При анализе полученных результатов необходимо провести качественное сравнение характера протекания процессов во времени на входе и выходе фильтров в различных экспериментах, установить зависимость динамической ошибки от характера движения цели, провести количественное сравнение случайной и динамической ошибок. В результате анализа необходимо определить, выполняются или не выполняются в эксперименте предпосылки, вытекающие из теории, вынести свое суждение об эф-

фективности рассматриваемых фильтров и алгоритмов.

Отчет о работе содержит постановку задачи, графики последовательностей, выводимых на печать, анализ результатов, выводы и заключение. При вычерчивании графиков рекомендуется совмещать их на рисунках так, чтобы удобно было проводить сравнение и анализ. Допускается вычерчивать графики не в полную длину, а только характерные участки. Отчет должен быть связным, в его текстовой части обязательны ссылки на графическую часть. Выводы и заключение должны быть аргументированными. Отчет должен соответствовать требованиям ГОСТов.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Характеристика основных операций вторичной обработки сигналов в РЛС обзорного типа

В радиолокации обработку информации подразделяют на первичную и вторичную. Обнаружение целей и измерение их текущих координат составляет задачу первичной обработки. В обзорной РЛС полный цикл первичной обработки выполняется в каждом периоде обзора пространства сканирующей антенной радиолокатора (рис. I). Во вторичную (траекторную) обработку вовлекается информация, полученная во многих циклах обзора пространства. В процессе вторичной обработки решаются задачи обнаружения (идентификации) траекторий и слежения за траекториями.

На раннем этапе развития систем радиолокации обнаружение траекторий и слежение осуществлялось оператором РЛС при наблюдении им радиолокационного изображения на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). Применение ЭВМ позволило автоматизировать процесс вторичной обработки. Рассмотрим кратко суть такой обработки информации.

Обнаружение траекторий производится путем сопоставления последовательности измеренных значений координат целей (отметок) с возможной траекторией, принятой в качестве модели. Модель траектории

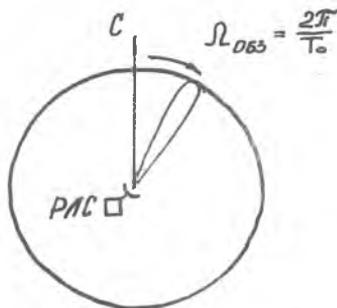


Рис. I

выбирается на основании априорных гипотез о характере возможного движения целей. Типичная процедура обнаружения состоит в следующем (рис.2) /1/. Любая одиночная отметка I, появившаяся в некоторой точ-

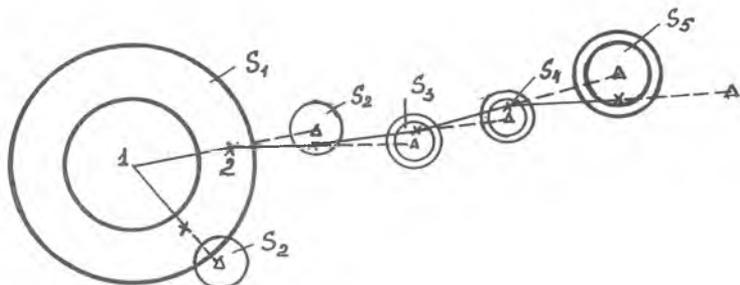


Рис.2

ке в пределах рабочей зоны РЛС, принимается за начальную точку траектории новой цели. Вокруг начальной точки строится кольцевая область S_1 , внутренний радиус которой $R_{\min} = V_{\min} \cdot T_0$, а внешний $R_{\max} = V_{\max} \cdot T_0$, здесь V_{\max} , V_{\min} - максимальная и минимальная возможные скорости движения цели, T_0 - период обзора пространства антенной РЛС.

Заметим, что операция формирования области S называется **с т р о б и р о в а н и е м**, а сама эта область - **с т р о б о м**. Ясно, что следующая отметка 2, в случае ее принадлежности к возможной траектории, должна находиться в пределах строба S_1 . В строб могут попасть отметки не одной, а нескольких целей (истинных или ложных). Каждую из таких отметок следует считать как возможное продолжение предполагаемой траектории. По двум отметкам можно вычислить скорость и направление движения каждой из предполагаемых целей, а затем рассчитать возможное положение отметки на следующий (третий) обзор. Операция расчета значений параметра (скорости, направления движения) называется **о ц е н к о й** значений, а операция расчета упрежденного положения отметки на следующий обзор - **э к с т р а п о л я ц и е й** (предсказанием). Вокруг экстраполированных отметок (которые на рис.2 обозначены треугольниками) строятся круговые (в некоторых случаях прямоугольные) стробы. Размеры стробов определяют исходя из возможных ошибок измерения координат и экстраполяции. Если в строб S_2

в третьем обзоре попала отметка, то она считается принадлежащей к обнаруживаемой траектории и траектория продолжается.

Одновременно производится проверка выполнения принятого критерия обнаружения. Траектории, удовлетворяющие критерию, считаются обнаруженными и передаются на автосопровождение. В процессе автосопровождения выполняются следующие операции: оценка параметров траектории по результатам текущего и предшествующих измерений координат; экстраполяция параметров на следующий период обзора; выделение упрежденной области (строба), в которой с некоторой вероятностью ожидается появление следующей отметки цели; селекция отметок.

Как видно, при обнаружении траекторий и при слежении выполняются подобные операции, однако автослежение за траекториями характеризуется более высокой точностью. Такое повышение точности достигается сглаживанием случайных ошибок отдельных измерений координат, а также случайных возмущений, воздействующих на объект (цель). В самом деле, скорость и направление движения, вследствие инерционности цели, мало изменяются за период обзора пространства радиолокатором. Напротив, случайные ошибки измерений и помехи слабо коррелированы. При последовательном сглаживании координат происходит усреднение некоррелированных ошибок - в результате точность оценок координат повышается.

Помимо отмеченного выше в интересах потребителей радиолокационной информации при вторичной обработке могут выполняться также различные траекторные расчеты, сущность которых наиболее часто состоит в получении оценок координат целей, экстраполированных на большие интервалы времени. Такие задачи возникают, например, при наведении истребителей на воздушные цели и в некоторых других случаях.

Структурная схема, отображающая взаимосвязь основных функциональных блоков системы вторичной обработки, изображена на рис.3. Заметим, что при технической реализации деление системы на физические блоки может отличаться от принятого на схеме, например, может быть одна ЭВМ или несколько цифровых процессоров в совокупности с аппаратными средствами.

Радиолокатор обзорного типа осуществляет обнаружение целей и измерение их текущих координат в каждом цикле обзора пространства. Дискретная последовательность отсчетов координат (отметки целей), представленных двоичным многоуровневым кодом, с периодом обзора T_0 поступает с выхода устройства первичной обработки (УПО) РЛС в буферное запоминающее устройство (БЗУ). Каждая отметка - вектор координат $\theta_k = (D, \alpha, \beta, \pm \kappa)$, в зависимости от числа измеряемых координат, содержит информацию о дальности D , азимуте α , угле места цели β

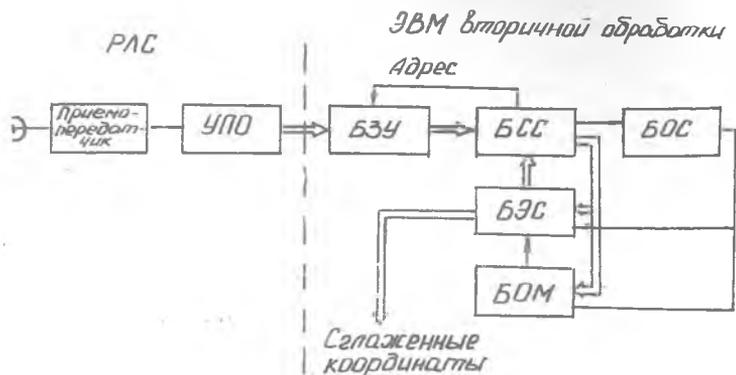


Рис. 3

и времени $t_k = kT_0$, $k=0, 1, 2, \dots$ БЗУ служит для развязки РЛС и ЭВМ вторичной обработки.

Из БЗУ отметки поступают в блок стробирования и селекции (БСС), где производится отбор отметок, попадающих в строб - ограниченную и предварительно рассчитанную область пространства координат. Информация о положении и размерах строба поступает из блока экстраполяции и сглаживания (БЭС). Операцию стробирования в ЭВМ можно осуществить путем выделения в БЗУ ряда ячеек, в которых ожидается с некоторой вероятностью информация о наблюдаемой цели. Операции стробирования и селекции, при необходимости, могут сопровождаться изменением системы координат.

В блоке обнаружения и сброса траекторий (БОС) в соответствии с заданными статистическими критериями решаются задачи автозахвата и сброса автосопровождения. Информация, полученная в БОС, используется для управления режимом работы системы вторичной обработки.

Отметки целей, отсементированных в БСС, поступают в БЭС и в блок обнаружения маневра (БОМ). В БЭС вычисляются экстраполированные (упрежденные на период обзора T_0) координаты строба и сглаженные оценки координат (в режиме автослежения).

В БОМ обнаруживаются ситуации, когда характер отслеживаемой траектории отличается от априори принятой модели движения. В таких случаях осуществляется изменение алгоритма слежения.

При обнаружении траекторий по результатам наблюдения в ряде циклов обзора пространства используют методы, разработанные для обнару-

жения пачки (пакета) импульсных сигналов, с той, однако, разницей, что вместо одиночного импульса принимается отметка цели, попавшая в строб. В частности, находят применение оптимальные методы обнаружения, основанные на вычислении отношения правдоподобия. Эти методы детально рассмотрены в работах /1,2/. Однако оптимальные алгоритмы в ряде случаев оказываются непомерно громоздкими, поэтому наряду с оптимальными используют также неоптимальные методы. Из них наиболее широкое распространение получили метод "K из N" и его разновидность - метод совпадений "L из L".

Согласно принципу действия системы вторичной обработки каждой отметке цели, появившейся в стробе, в блоке обнаружения и сброса ставится в соответствие "единица". В случае отсутствия отметок в стробе сигнал на выходе БОС принимает значения "нуль". Таким образом, на выходе БОС информация о целях имеет вид бинарно квантованного сигнала, т.е. представляет собой последовательность нулей и единиц. Решение об обнаружении траектории принимается при числе "единиц" $L \geq K$ в последовательности из L элементов. Обнаруженные траектории передаются на автосопровождение. Ясно, что окончившиеся траектории должны сбрасываться. Простейшим критерием сброса траектории может быть следование в бинарном сигнале L нулей подряд.

Слежение за траекториями, по сути дела, заключается в оценивании параметров движения объектов (целей) по данным координатного измерителя (ЛИС). Для такого оценивания применяются рекуррентные алгоритмы последовательного сглаживания (фильтрации) параметров траекторий. Характерной особенностью таких алгоритмов является использование информации, полученной в предшествующих циклах измерений, в совокупности с последовательным (на каждом шаге) уточнением параметров траектории по результатам новых измерений. Наибольшее распространение в задачах вторичной обработки получили алгоритмы, основанные на фильтре Калмана (см. разд. "Понятие о фильтрах Калмана").

Моделирование движения радиолокационных целей

При проектировании систем вторичной обработки радиолокационной информации обычно задаются некоторыми предположениями (гипотезами) о характеристиках ожидаемых сигналов, которые, в свою очередь, определяются закономерностью изменения состояния объекта (цели) во времени. При этом исходят из более или менее правдоподобной модели движения цели. Математическая модель движения цели должна, с одной

стороны, достаточно адекватно описывать движение объекта, а, с другой — быть удобной для реализации на ЭВМ.

При проектировании системы траекторной обработки информации за основу берут полиномиальное представление траектории. Запишем уравнения для одной координаты движения, хотя будем иметь в виду, что в общем случае движение объекта происходит в трехмерном пространстве, итак, полиномиальная модель имеет вид

$$x(\bar{\theta}, t) = \theta_0 + \theta_1 t + \theta_2 \frac{t^2}{2} + \dots + \theta_M \frac{t^M}{M!} = \sum_{l=0}^M \theta_l \frac{t^l}{l!}, \quad (I)$$

где x — декартова координата, коэффициенты θ_l полинома в правой части выражения (I) являются случайными величинами и должны быть оценены по данным радиолокационного наблюдения. Совокупность этих величин образует M -мерный вектор параметров траектории наблюдаемого объекта $\bar{\theta} = [\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_M]^T$ (надстрочный индекс T означает символ транспонирования). По мере увеличения порядка M требуемые для реализации алгоритмов обработки объемы вычислений и памяти ЭВМ существенно возрастают. С другой стороны, траектории реальных воздушных целей обычно удается разделить на участки прямолинейного равномерного движения и участки маневрирования. Кроме того, обычно полагают, что маневрирование воздушной цели осуществляется независимо по каждой из наблюдаемых координат. В простейшем случае различают два вида маневрирования: равноускоренное движение по прямой (маневр по скорости) и вираж по курсу на постоянной высоте и с постоянным нормальным ускорением, т.е. движение по дуге окружности. В этом случае проекция траектории на горизонтальную плоскость представляет собой последовательность прямолинейных отрезков, сопряженных дугами различного радиуса.

На практике в уравнении (I) ограничиваются первой или второй степенью полинома $/I/$. При $M = I$ получаем уравнение

$$x(t, x_0, V_x) = x_0 + V_x t, \quad (2)$$

справедливое для участков траектории, соответствующих равномерному прямолинейному движению цели.

Для участков маневра наиболее часто в модели берут полином второй степени ($M = 2$)

$$x(t, x_0, V_x, a_x) = x_0 + V_x t + a_x t^2 / 2. \quad (3)$$

В уравнениях (2), (3) x_0 — начальное значение координаты x ; V_x — составляющая скорости движения цели вдоль оси x ; a_x — составляющая ускорения.

Участки траектории, соответствующие равномерному прямолинейному движению и маневру, могут чередоваться случайным образом, поэтому в системе автослежения за траекториями возникает задача обнаружения маневра. Заметим, что параметры маневров ограничиваются допустимыми перегрузками. Для самолетов нормальное ускорение может достигать $3 \dots 5 g$, тангенциальное ускорение не превышает $0,8-1g$ ($g = 9,8 \text{ м/с}^2$). Для объектов других классов перегрузки могут быть большими.

В уравнениях (1) - (3) не учтены случайные возмущения, воздействующие на объект. При учете этих возмущений движение объекта описывается стохастическими уравнениями, которые будут рассмотрены в следующем разделе.

Метод пространства состояний

В современной теории управления и фильтрации при составлении математической модели некоторой физической системы для описания ее динамики находит применение метод пространства состояний. Он используется также в алгоритмах последовательного сглаживания параметров траекторий.

В основу метода положено понятие абстрактного многомерного пространства состояний. Система в таком пространстве описывается переменными состояниями. Переменные состояния аналогичны обобщенным координатам в классической механике, а пространство состояний является фазовым. Для описания динамики системы в пространстве состояний характерно использование дифференциальных уравнений первого порядка относительно переменных состояния, при этом дифференциальные уравнения высокого порядка заменяются системой уравнений первого порядка. Ясно, что при таком описании любая сложная система представляется как многомерная. Совокупность фазовых координат, характеризующих состояние системы в любой текущий момент времени, объединяется в вектор состояния.

При некоторых допущениях для воздушных (аэродинамических) целей справедливо линейное стохастическое уравнение с постоянными коэффициентами вида

$$\frac{d\bar{q}}{dt} = \bar{F}\bar{q}(t) + \bar{G}\bar{W}(t), \quad (4)$$

где $\bar{q}(t)$ - n -мерный вектор состояния системы;

$\bar{W}(t)$ m - мерный вектор помех;

\bar{F} и \bar{G} - известные матрицы размером $n \times n$ и $n \times m$ соответственно.

В частном случае в прямоугольной системе координат при $n = 6$

$$\bar{q}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \\ \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{z}(t) \end{pmatrix}; \quad F = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Вектор $\bar{W}(t)$ и матрица \bar{G} определяются видом помехи и способом ее воздействия на систему. Нетрудно заметить, что при $\bar{W}(t) = 0$ стохастическое уравнение (4) обращается в детерминированное, соответствующее случаю прямолинейного равномерного движения. Ясно, что при увеличении размерности n матричного уравнения (4) возможно более полно описать движение цели, например учесть ускорения движения и так далее.

При заданном векторе начальных условий $\bar{q}(t_0)$ решение неоднородного уравнения (4) в произвольный момент времени t определяется формулой Коши

$$\bar{q}(t) = \bar{\Phi}(t, t_0) \bar{q}(t_0) + \int_{t_0}^t \bar{\Phi}(t, \tau) \bar{G} \bar{W}(\tau) d\tau, \quad (6)$$

где $\bar{\Phi}(t, t_1) = e^{-\bar{F}(t-t_1)}$ - переходная матрица уравнения (4),

$$\bar{\Phi}(t, t) = I;$$

I - единичная матрица соответствующей размерности.

РЛС обзорного типа выдает информацию о целях в дискретные моменты времени. При переходе от непрерывного времени к дискретному $t_k = kT$, $k = 0, 1, 2, \dots$ движение объекта (цели) можно описать разностным матричным уравнением первого порядка

$$\bar{q}(k) = \bar{\Phi}(k, k-1) \bar{q}(k-1) + \bar{G}(k) \bar{W}(k). \quad (7)$$

Уравнение (7) следует рассматривать как аналог уравнения (6) в дискретном времени.

Понятие о фильтрах Калмана

Траектория движения цели на входе устройства вторичной обработки представляется дискретной последовательностью отсчетов координат, поступающей с выхода устройства первичной обработки РЛС. Эта после-

довательность является случайной вследствие воздействия помех и ошибок измерений. Задача сглаживания траекторий состоит в оценивании отсчетов координат с минимальной средней квадратической ошибкой. Процедура такого сглаживания эквивалентна цифровой фильтрации. В настоящее время известны линейные рекуррентные алгоритмы, обеспечивающие получение оптимальных, в смысле минимума среднеквадратической ошибки, оценок. Эти алгоритмы носят название фильтров Калмана /1,3,4,5/.

Теория фильтров Калмана весьма сложна /4/, поэтому излагать ее мы не имеем возможности. Попытаемся пояснить суть калмановской фильтрации исходя из физической сущности рассматриваемой задачи и на основе структурной схемы (рис.4).

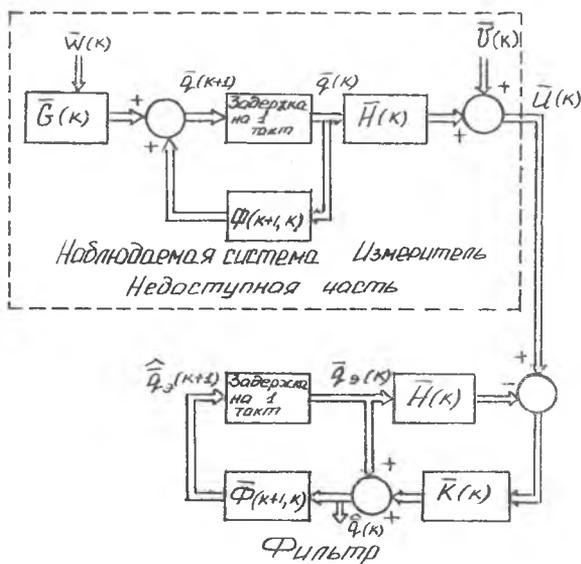


Рис. 4

Пусть задана некоторая наблюдаемая система. Для определенности предположим, что это движущаяся воздушная цель. Движение этой цели описывается матричным разностным уравнением первого порядка (7).

Перепишем его в виде

$$\bar{q}(k+1) = \bar{\Phi}(k+1, k)\bar{q}(k) + \bar{G}(k)\bar{W}(k), \quad (7a)$$

здесь матрицы $\bar{\Phi}(k+1, k)$, $\bar{G}(k)$ являются известными. Кроме того, полага-

гается заданным вектор начального состояния $\bar{q}(0)$.

Ясно, что непосредственная идентификация вектора состояния системы $\bar{q}(k)$ невозможна. Наблюдение изменяющегося во времени состояния объекта осуществляется измерителем. В нашем случае таким измерителем является РЛС.

Таким образом, можно считать, что наблюдаемая система находится в недоступной области физического пространства, а вектор состояния $\bar{q}(k)$ - сообщение, поступающее из этой области. Измеритель (РЛС) описывается матрицей наблюдения $\bar{H}(k)$. Наблюдение происходит на фоне помехи $\bar{J}(k)$. Таким образом, процесс измерения можно описать матричным алгебраическим уравнением наблюдения

$$\bar{U}(k) = \bar{H}(k)\bar{q}(k) + \bar{J}(k). \quad (8)$$

Ясно, что в нашей задаче векторы $\bar{U}(k)$ есть отметки целей, или иначе, это информация о целях, поступающая с выхода УПО РЛС на вход системы вторичной траекторной обработки.

Для получения оценок вектора состояния $\hat{\bar{q}}(k)$ используется следующее устройство - фильтр. В фильтре Калмана реализуется идея "предсказание-коррекция", суть которой состоит в предсказании состояния системы на основании информации, накопленной в предшествующих интервалах времени, и коррекции оценки вектора состояния по результатам текущего наблюдения.

Для предсказания значений вектора состояния системы на последующие моменты времени в фильтре моделируется процесс движения объекта (цели) на траектории. В этом моделировании используется известная переходная матрица системы $\bar{F}(k+1, k)$, связывающая последующее значение вектора состояния с предыдущим. В начале моделирования в качестве оценки вектора состояния берется вектор начального состояния $\bar{q}(0)$, который, как отмечалось, полагается известным. Ясно, что при таком моделировании неизбежны ошибки. Для минимизации ошибок логично использовать информацию, получаемую при наблюдении за движением реального объекта. Для этого сравниваются экстраполированные (предсказанные) и наблюдавшиеся значения переменных состояния. Полученные таким образом невязки (рассогласование) используются для коррекции оценок вектора состояния системы.

Рассмотрим сущность и особенности алгоритма фильтрации Калмана подробнее. Итак, фильтр Калмана, используя последовательность векторов наблюдения $\bar{U}(k)$ и начальные условия, должны выдавать последовательность сглаженных оценок $\hat{\bar{q}}(k)$. Модель сообщения (7) и модель наблюдения (8) рассмотрены выше. Пусть по результатам предшествующих

измерений получена некоторая оценка вектора состояния $\hat{q}(k)$. Как отмечалось, вначале за такую оценку берется вектор начального состояния $\hat{q}(0)$. Оценка $\hat{q}(k)$ экстраполируется на один шаг (период обзора пространства антенной РЛС) вперед:

$$\hat{q}_3(k+1) = \bar{\Phi}(k+1, k) \hat{q}(k), \quad (9)$$

здесь $\hat{q}_3(k+1)$ - экстраполированная (предсказанная) оценка в соответствии с известной переходной матрицей $\bar{\Phi}(k+1, k)$, характеризующей в уравнении движения (7) переход системы из k -го в $(k+1)$ - состояние. В общем случае эта матрица зависит от текущего времени, т.е. от значений переменной k .

В последующем такте работы фильтра полученная по формуле (9) экстраполированная оценка будет фигурировать уже как $\hat{q}_3(k)$. В этом такте новая (сглаженная) оценка вектора состояния образуется путем суммирования экстраполированной оценки (9) и корректирующей поправки,

$$\hat{q}(k) = \hat{q}_3(k) + \bar{K}(k) [\bar{C}(k) - \bar{H}(k) \hat{q}_3(k)] \quad (10)$$

В формуле (10) выражение $[\bar{C}(k) - \bar{H}(k) \hat{q}_3(k)]$ - суть невязка, т.е. расхождение между наблюдавшимся в текущем такте значением вектора состояния $\bar{C}(k)$ и предсказанным значением $\bar{H}(k) \hat{q}_3(k)$. Это предсказание образуется на основе экстраполированной оценки $\hat{q}_3(k)$ и известной матрицы наблюдения $\bar{H}(k)$.

Рассмотрим подробнее смысл выражения (10). В правой части этого равенства первое слагаемое несет информацию о текущем состоянии объекта наблюдения (цели), основанную на всех предшествующих измерениях. Новая информация о векторе состояния заключена в расхождении (невязке) между текущим наблюдаемым измерением и предсказанным наблюдением. При суммировании невязка взвешивается с некоторым весом $\bar{K}(k)$, здесь $\bar{K}(k)$ - матрица весовых коэффициентов соответствующей размерности.

На рис. 5 представлена структурная схема фильтра Калмана в удобном для дальнейшего анализа виде. Из схемы исключена наблюдаемая система (источник сообщения), так как она собственно в фильтр не входит.

Формулы (9) и (10) и схема рис.5 показывают способ получения сглаженных оценок вектора состояния по рекуррентному алгоритму Калмана. Как видно, на основе сглаженной оценки вектора состояния с помощью переходной матрицы и матрицы наблюдения формируются предсказанные на следующий такт оценки векторов состояния и наблюдения. В этом (следующем) такте текущее наблюдение сравнивается с предсказанным

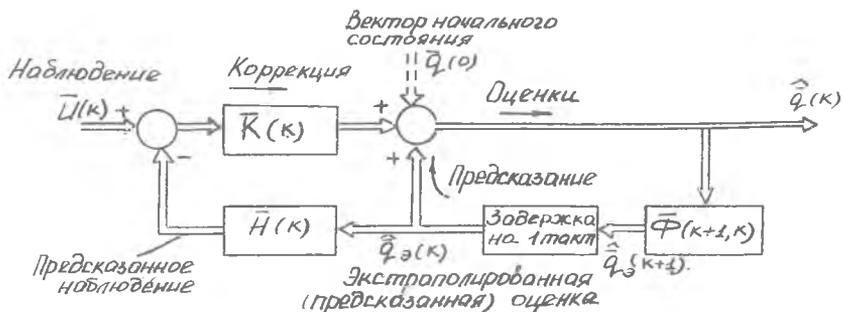


Рис. 5

наблюдением и определяется невязка. Невязка преобразуется в корректирующее воздействие и суммируется с экстраполированной оценкой вектора состояния. В результате образуется оценка вектора состояния (выходной сигнал фильтра) в текущем такте. Далее процесс фильтрации повторяется. Вначале в качестве оценки берется известный вектор начального состояния $\hat{q}(0)$.

Однако описанная процедура не полностью отображает сущность фильтрации по Калману, так как в ней не описывается процесс модификации матрицы весовых коэффициентов $\bar{K}(k)$. Коэффициенты этой матрицы на каждом такте работы фильтра получают новые, отличные от предшествующих значения - в этом и состоит характерная особенность калмановской фильтрации.

Процесс модификации весовых коэффициентов в фильтре Калмана имеет принципиальное значение, поэтому рассмотрим его подробнее.

В алгоритме Калмана операция взвешивания имеет следующий смысл. Как видно, экстраполированная оценка $\hat{q}_z(k)$, так и невязка $\bar{L}(k) - \bar{H}(k)\hat{q}_z(k)$ являются случайными величинами. Для получения минимальной дисперсии оценки вектора состояния $\hat{q}(k)$ в правой части равенства (10) необходимо учесть меру случайности экстраполированной оценки и невязки (соотношение их дисперсий). В самом деле, если экстраполированная оценка $\hat{q}_z(k)$ ненадежна, т.е. обладает относительно большой дисперсией, то необходимо использовать новую информацию. Весовые коэффициенты (их называют также коэффициентами усиления или коэффициентами сглаживания) в матрице $\bar{K}(k)$ в этом случае должны быть большими. Наоборот,

если оценка $\hat{z}_s(k)$ имеет малую дисперсию по сравнению с дисперсией невязок, то новые наблюдения мало прибавят к точности оценки вектора состояния (весовые коэффициенты при этом должны быть малыми).

Благодаря такому взвешиванию, учитывающему соотношение дисперсий переменных, циркулирующих в фильтре Калмана, с одной стороны, обеспечивается оптимальность этих фильтров в смысле минимума средней квадратической ошибки, с другой стороны, возникает необходимость постоянного обновления матрицы весовых коэффициентов.

Модификация весовых коэффициентов в процессе работы алгоритма сопряжена с существенным усложнением фильтров Калмана и осуществляется рекуррентным способом. Для справки приведем без обоснования эту рекуррентную процедуру /4,5/. В текущем k -м цикле работы фильтра матрица весовых коэффициентов определяется по формуле

$$\bar{K}(k) = \bar{R} \hat{q}_s(k) \bar{H}^T(k) [\bar{H}(k) \bar{R} \hat{q}_s(k) \bar{H}^T(k) + \bar{R}_w(k)]^{-1}, \quad (II)$$

где $\bar{R}_w(k)$ - корреляционная матрица ошибки наблюдения;

$\bar{R} \hat{q}_s(k)$ - корреляционная матрица ошибки экстраполированной (предсказанной) оценки, полагается, что матрица $\bar{R} \hat{q}_s(k)$ вычислена на предшествующем $(k-1)$ -м шаге работы фильтра.

Корреляционная матрица ошибки сглаженных оценок вектора состояния, т.е. корреляционная матрица выходного сигнала фильтра в k -м цикле вычисляется по формуле

$$\begin{aligned} \bar{R} \hat{q}_s(k) &= \bar{R} \hat{q}_s(k) - \bar{K}(k) \bar{H}(k) \bar{R} \hat{q}_s(k) = \\ &= [I - \bar{K}(k) \bar{H}(k)] \bar{R} \hat{q}_s(k), \end{aligned} \quad (I2)$$

где I - единичная матрица.

Обратим внимание на то, что в формуле (I2) корреляционная матрица ошибки, выдаваемой фильтром оценки, зависит от корреляционной матрицы ошибки экстраполированной оценки и матрицы весовых коэффициентов.

На следующий $(k+1)$ -й цикл работы фильтра корреляционная матрица ошибки экстраполированной оценки вычисляется по формуле

$$\begin{aligned} \bar{R} \hat{q}_s(k+1) &= \bar{\Phi}(k+1, k) \bar{R} \hat{q}_s(k) \bar{\Phi}^T(k+1, k) + \\ &+ \bar{G}(k) \bar{R}_w(k) \bar{G}^T(k), \end{aligned} \quad (I3)$$

где $\bar{R}_w(k)$ - корреляционная матрица возмущений, воздействующих на объект (цель).

Напомним, что рассматриваемая нами процедура, рекуррентная. В формуле (13) происходит переход от величин, относящихся к k -му циклу, к величинам, свойственным следующему $(k+1)$ - му циклу работы фильтра. Ясно, что после этого следующий цикл становится текущим, и в нем величина $\hat{R}_{\hat{q}_2}(k+1)$, вычисленная по формуле (13), должна рассматриваться как $\hat{R}_{\hat{q}_2}(k)$.

Заметим, что в теории фильтров Калмана накладываются некоторые ограничения на характер сигналов и шумов, в частности, помехи $v(k)$ и $w(k)$ полагаются белыми шумами /4/.

Структурная схема вычислений по алгоритму Калмана приведена на рис.6. В качестве начального значения вектора состояния могут быть приняты параметры движения цели, полученные при обнаружении траектории.

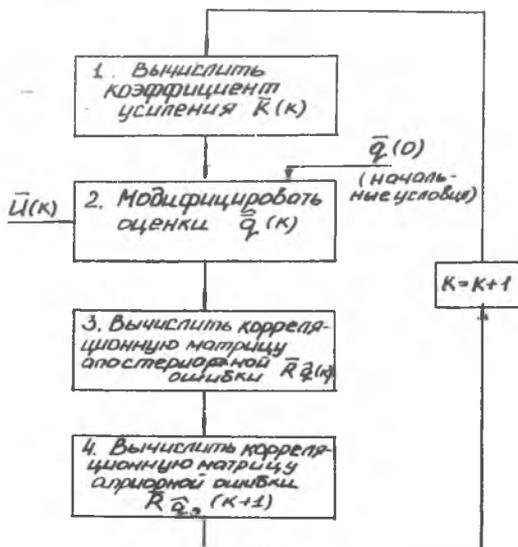


Рис. 6

Реализация фильтров Калмана сопряжена со значительными вычислительными затратами, что является одним из недостатков таких фильтров. Однако его можно ослабить при соответствующей организации вычислительного процесса. В самом деле, как видно из формул (II), (I2),

(13), в значения матриц коэффициентов усиления $\bar{K}(k)$, корреляционных матриц $\bar{R}q_0(k)$, $\bar{R}q(k)$ не входят результаты текущих измерений, поэтому эти матрицы могут быть рассчитаны заранее и внесены в память ЭВМ.

Фильтры Калмана обладают существенной особенностью, которую необходимо учитывать при их практическом использовании. В определенных условиях фактическая ошибка оценки вектора состояния может принимать значения, много большие расчетной величины, вытекающей из выражения (12). Это явление часто называют расходимостью фильтров Калмана. Причину расходимости можно понять, если учесть, что теоретически ошибка оценки вектора состояния в фильтре Калмана должна неограниченно уменьшаться по мере течения времени фильтрации. В самом деле, в задаче фильтрации принимается, что движение объекта происходит по траектории, модель которой известна априори. Другие начальные условия также заданы. По мере накопления информации о траектории значение каждого нового измерения в этой совокупной информации уменьшается. Поэтому по мере увеличения времени k в фильтре уменьшаются величины элементов в матрице коэффициентов $\bar{K}(k)$. В пределе при $k \rightarrow \infty$ фильтр выдает оценки $\hat{q}(k)$ только на основе информации, полученной в предшествующих тактах работы. Теоретически такой режим работы фильтра Калмана может мыслиться при абсолютно точном задании процесса, моделирующего сообщение, т.е. при полном соответствии фактической траектории принятой модели.

Нетрудно заметить, что из-за отсутствия полной информации о реальной системе, неизбежной неопределенности в формулировке задачи, линеаризации уравнений, неучтенных возмущений невозможно иметь ошибку равную нулю. Поэтому с уменьшением значений элементов матрицы коэффициентов усиления ниже некоторого уровня расчетная ошибка продолжает уменьшаться, в то время как фактическая ошибка увеличивается.

Для устранения расходимости фильтров Калмана разработано много способов /4/, простейшими из которых являются ограничение снизу значений величины элементов матрицы коэффициентов усиления или ограничение времени работы фильтра.

В простейшем случае при сглаживании параметров движения неманеврирующей цели, т.е. для случая прямолинейного равномерного движения (см. формулу (2), и при равноточных измерениях, уравнения фильтра Калмана для одной декартовой координаты принимают вид /1,2/

$$\begin{aligned} \hat{x}(k) &= \hat{x}_0(k) + \alpha(k)[x(k) - \hat{x}_0(k)], \\ \Delta \hat{x}(k) &= \Delta \hat{x}(k-1) + \beta(k)[x(k) - \hat{x}_0(k)], \\ \hat{x}_0(k) &= \hat{x}(k-1) + \Delta \hat{x}(k-1), \end{aligned} \quad (14)$$

(14)

где $\Delta x(k) = \Delta V(k) T_0$ - приращение координаты за обзор (эквивалент скорости);

$\alpha(k)$ - коэффициент сглаживания координаты;

$\beta(k)$ - коэффициент сглаживания скорости.

В свою очередь,

$$\alpha(k) = \frac{2(2k-1)}{k(k+1)} \quad ; \quad \beta(k) = \frac{6}{k(k+1)} \quad (15)$$

Графики зависимости коэффициентов сглаживания от времени приведены на рис.7.

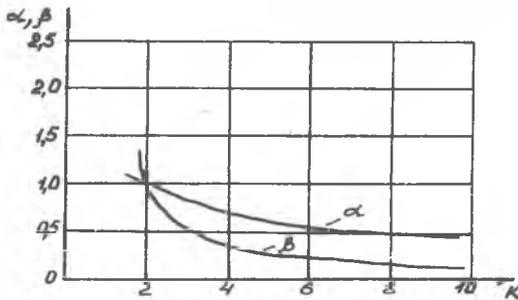


Рис.7

Из формул (15) и рис.7 видно, что коэффициенты усиления (сглаживания) в фильтре Калмана уменьшаются по мере увеличения времени k . Как отмечалось, при достаточно малых значениях коэффициентов возможно возникновение явления расходимости. Учитывая это обстоятельство, а также вычислительные трудности, часто величины коэффициентов сглаживания берут постоянными. Однако, при этом фильтр будет уже не оптимальным, а квазиоптимальным.

Сглаживающий цифровой фильтр

Структурная схема цифрового фильтра, соответствующего алгоритму (14), приведена на рис.8. На схеме символом Z^{-1} обозначена задержка

на время одного такта обзора T_0 . Полагается, что начальные значения координаты x_0 и ее приращения за период Δx_0 вводятся извне.

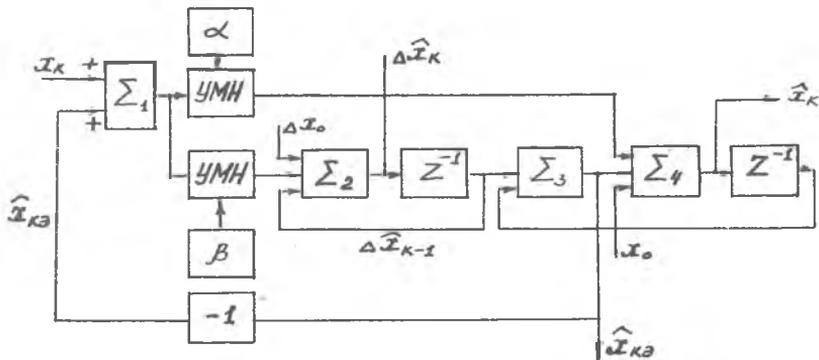


Рис. 8

На выходе сумматора Σ_1 образуется рассогласование наблюдавшегося и экстраполированного значений координаты. В умножителях УМН происходит взвешивание этого рассогласования.

Для того, чтобы показать, что на выходе сумматора Σ_2 образуется сглаженная оценка скорости, предположим сначала условно, что в некотором цикле обзора на выходе сумматора действительно получена такая оценка. Тогда в следующем цикле эта оценка $\Delta \hat{x}(k)$, задержанная на время T_0 в устройстве задержки Z^{-1} , будет иметь смысл оценки $\Delta \hat{x}(k-1)$. Далее путем суммирования этой оценки, поступающей на вход Σ_2 по цепи обратной связи, со взвешенным рассогласованием $\beta(k)[x(k) - \hat{x}(k)]$ (как следует из формулы (I4), получаем оценку $\Delta \hat{x}(k)$.

Рассуждая подобным образом, можно получить, что на выходе сумматора Σ_4 образуется сглаженная оценка координаты, а на выходе сумматора Σ_3 - экстраполированная оценка.

Устройство, соответствующее структурной схеме на рис.8, - рекурсивный цифровой фильтр. Передаточная функция этого фильтра имеет вид

$$H(z) = \frac{\alpha + (\beta - \alpha)z^{-1}}{1 - (2 - \alpha - \beta)z^{-1} + (1 - \alpha)z^{-2}} \quad (I6)$$

Для случая постоянных величин α и β с помощью выражения (I6) методами теории линейных дискретных систем можно получить все основные показатели цифрового фильтра: устойчивость, переходной про-

песс, случайные и динамические ошибки. В частности, для обеспечения устойчивости необходимо, чтобы полюсы передаточной функции (I6) находились в Z - плоскости внутри единичного круга $|Z|=1$. Исследование системы на устойчивость по критерию Раунса-Гурвица приводит к следующим условиям устойчивости: $\alpha > 0; \beta > 0; (2\alpha + \beta) < 4$.

Дисперсию случайной ошибки на выходе фильтра $G_{\text{вых}}^2$ можно получить по формуле

$$G_{\text{вых}}^2 = \frac{G_{\text{вх}}^2}{2\pi} \oint_{|z|=1} H(z) H(z^{-1}) z^{-1} dz, \quad (I7)$$

где $G_{\text{вх}}^2$ - дисперсия входного шума, здесь входной шум полагается белым.

После подстановки формулы (I6) в (I7) и решения в уравнении (I7) интеграла можно получить

$$G_{\text{вых}}^2 = \frac{2\alpha^2 + d\beta + 2\beta}{\alpha(4 - 2\alpha - \beta)} G_{\text{вх}}^2 \quad (I8)$$

На рис.9 приведены графики относительной дисперсии $G_{\text{вых}}^2/G_{\text{вх}}^2$ в зависимости от коэффициентов сглаживания α, β . Из этих графиков

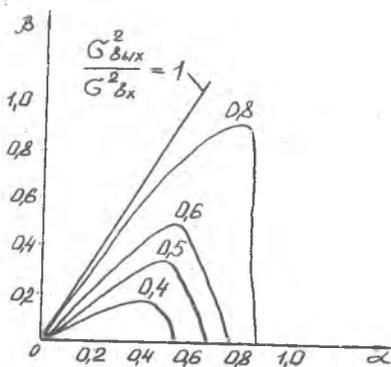


Рис. 9

и из выражения (I8) следует, что малые случайные ошибки достигаются соответственно при малых значениях коэффициентов α и β . Кроме того, на величину ошибки влияет соотношение коэффициентов α и β .

Можно показать /1/, что для уменьшения динамических ошибок следует выбирать большие значения коэффициентов сглаживания. Ясно, что коэффициенты сглаживания надлежит выбирать из условия минимума суммарной ошибки.

Аналитические выражения, определяющие условия оптимизации коэффициентов α и β , при которых обеспечивается минимум совокупной ошибки, весьма сложны. Поэтому ограничимся лишь тем, что приведем выражение, определяющее соотношение между оптимальными значениями коэффициентов /1, с.391/,

$$\alpha_{\text{опт}} = \sqrt{4\beta_{\text{опт}} - \beta_{\text{опт}}^2} / 2. \quad (I9)$$

В заключение отметим, что в общем случае при движении цели в пространстве составляющие этого движения в трехмерной системе координат взаимосвязаны. Однако, как уже отмечалось, траектории аэродинамических целей (например самолетов) таковы, что эти составляющие их движения можно полагать взаимонезависимыми. В таких случаях для сглаживания пространственной траектории необходимы три цифровых фильтра рассмотренного вида, работающие независимо друг от друга.

Общие сведения об алгоритмах обнаружения маневра

Как отмечалось, траектории движения радиолокационных целей состоят из участков с маневром и без маневра. Практически на этих участках используются разные алгоритмы слежения за траекториями. Для различения участков траектории с маневром и без маневра обычно вводят обнаружители маневра, которые позволяют определить моменты изменения характера движения. Результаты оценивания вектора состояния объекта, полученные до момента смены характера движения, используются для формирования начальных условий работы алгоритма на последующем участке. Общий подход к синтезу обнаружителей маневра основан на анализе невязок:

$$\Delta \bar{U}(k) = \bar{U}(k) - \bar{H}(k) \hat{Q}(k-1), \quad k=1, 2, \dots \quad (20)$$

Если уравнение движения (модель траектории цели) соответствует характеру движения цели, то последовательность невязок является случайным процессом с нулевым средним $E\{\Delta \bar{U}(k)\} = 0$, где $E\{\cdot\}$ - символ усреднения. Если уравнение движения, используемое в алгоритме оценивания состояния объекта, не соответствует характеру движения, то $E\{\Delta \bar{U}(k)\} \neq 0$, т.е. в невязках появляется смещение. В зависимости от априорных сведений о смещении невязок могут быть построены различные алгоритмы обнаружения маневра. Здесь простейшим будет случай, когда закон изменения смещения во времени точно известен, а неизвестным остается только момент времени начала маневра. Более сложными оказываются ситуации, в которых известна общая закономерность изменения смещения, но неизвестны параметры этой закономерности, например величина приращения между измерениями. Корреляционная матрица невязок всегда полагается известной.

Во всех таких случаях для обнаружения маневра могут быть построены оптимальные алгоритмы, основанные на вычислении отношения правдоподобия и испытании его на порог. Алгоритмы такого рода подробно обсуждаются в разд. "Обнаружение сигналов" курса радиотехнических

систем /2/. Кроме оптимальных алгоритмов обнаружения маневра используются также неоптимальные. Основы алгоритмов обнаружения маневра излагаются в литературе /1/ и /3/.

МАШИННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И ПРОГРАММА

Машинный эксперимент

В задачу машинного эксперимента входит оценка работоспособности и исследование эффективности двух видов алгоритмов последовательного сглаживания параметров траекторий: оптимального фильтра Калмана и неоптимального фильтра с постоянными коэффициентами.

Мы исследуем простейшие алгоритмы (I4), (I5), (I6), в основу которых положена гипотеза о прямолинейном и равномерном движении цели по траектории. В качестве модели движения также выберем простейший одномерный случай, которому для наглядности дадим конкретную физическую интерпретацию.

Пусть цель движется прямолинейно строго от радиолокатора (или на РЛС), при этом единственной изменяющейся во времени координатой цели является дальность. Дальность измеряется радиодальномером. Отсчеты дальности с периодом, зависящим от скорости вращения антенны обзорной РЛС (см.рис.1), выдаются в устройство вторичной обработки. Заметим, что в реальных РЛС скорость вращения антенны наиболее часто составляет 6 об/мин. Соответственно этому примем период вращения антенны 10с. Измерение дальности сопровождается ошибками. Логично предположить, что точность дальномера известна и ошибки отсчетов дальности, следующих с периодом вращения антенны, взаимно независимы. Кроме того, учтем, что ошибки радиодальномера не зависят от текущей дальности и имеют нормальный закон распределения. Таким образом, все условия для применения фильтра Калмана выполняются.

В отношении скорости движения цели возьмем две гипотезы. В первой из них примем скорость постоянной, а движение - равномерным и прямолинейным. Во втором варианте предположим наличие маневра по скорости, в этом случае траектория состоит из двух участков равномерного и прямолинейного движения, разделенных некоторым интервалом, на котором цель движется равноускоренно. Таким образом, для эксперимента выбираются две различные траектории движения цели: одна, принадлежащая к виду, для которого условия оптимальности фильтра Калмана выполняются, и вторая - не соответствующая этому виду.

Моделирование траекторий осуществляется в следующем порядке.

Сначала формируются идеальные траектории, строго соответствующие предполагаемому характеру движения цели, назовем их истинными. Затем моделируется траектория, возмущенная помехой, для чего в отсчеты идеальной траектории вводятся случайные отклонения, обусловленные ошибками радиодальномера.

В соответствии со сказанным в памяти ЭВМ строятся истинные траектории двух видов. Начальное значение координаты в обоих случаях принимается равным 10^4 м. "Длительность" траекторий также выбрана постоянной - 100 отсчетов. При периоде обзора РЛС, равном 10с, это означает, что цель находится в рабочей зоне РЛС 1000с. В эксперименте задаются начальное значение скорости, приращение скорости за период обзора (10с) в траектории второго вида и номер отсчета начала участка равноускоренного движения. Длительность этого участка выбрана постоянной - 10 отсчетов.

При моделировании траектории, возмущенной помехой, случайные числа, соответствующие ошибке радиодальномера, берутся от датчика нормально распределенных случайных чисел алгоритмического языка Фортран. Числа, выдаваемые датчиком, взаимно независимы. Таким образом моделируется дискретный белый шум. Дисперсия этой помехи (дисперсия ошибки дальномера) задается.

В основу алгоритма Калмана положены формулы (14), (15). По истечении десяти тактов работы фильтра дальнейшая модификация весовых коэффициентов в алгоритме прекращается ввиду их малых значений.

Помимо оптимального калмановского фильтра моделируется неоптимальный фильтр с постоянными коэффициентами сглаживания. В основу этой модели положена формула (14). Моделирование производится при двух парах значений коэффициентов сглаживания α и β , величины этих коэффициентов задаются.

При фильтрации отсчетов траектории, не удовлетворяющей гипотезе о равномерном прямолинейном движении, с помощью фильтра Калмана, проводят эксперименты двух видов. В первом случае несоответствие между характером траектории и гипотезой о траектории, принятой в алгоритме Калмана, никак не учитывается. Во втором случае предполагается, что маневр цели обнаруживается. В машинном эксперименте обнаружение маневра моделируется упрощенно: в начале участка равноускоренного движения фильтр Калмана переключается в неоптимальный с постоянными коэффициентами сглаживания, при этом, естественно, значения коэффициентов скачкообразно изменяются. Величины коэффициентов устанавливаются большими из двух пар значений, выбранных для неоптимальной фильтрации. По окончании участка равноускоренного движения алгоритм сглажи-

вания снова переключается в калмановский фильтр. Однако при этом прерванный процесс модификации коэффициентов усиления фильтра Калмана не восстанавливается. Коэффициенты в этот момент переключения принимают максимальные значения, соответствующие $K = I$ в формулах (15). Далее аргумент в этих формулах возрастает ($K = 1, 2, 3, \dots$) и значения коэффициентов модифицируются в соответствии с этим.

Очевидно, что функции сглаживающего фильтра состоят в воспроизведении истинной траектории и подавлении случайных помех. При этом возникают ошибки двух видов: случайные, обусловленные неполным сглаживанием случайной помехи, и динамические, являющиеся следствием инерционности фильтра. Так как фильтр-система линейная, то применим принцип суперпозиции, благодаря чему возможно разделить случайные и динамические ошибки. Пропустив через фильтр последовательность отсчетов траектории без помехи и сравнив выходной и входной сигналы, можно определить динамическую ошибку. При фильтрации сигнала, соответствующего траектории, возмущенной помехой, случайная ошибка определяется как разность полной и динамической ошибок. На печать выводятся случайные отклонения траектории, возмущенной помехой, от истинной траектории, динамические и случайные ошибки сглаженных траекторий. Кроме того, вычисляются оценки дисперсий случайных ошибок. На основе полученных данных выносятся суждения о характере преобразования сигналов в фильтрах, проводится качественное сравнение их свойств в различных условиях работы.

Программа машинного эксперимента

Программа написана на алгоритмическом языке Фортран. Распечатка программы приведена в приложении.

Программа состоит из трех структурных единиц: основной программы и двух подпрограмм. В подпрограмме *SUBROUTINE TRAEKT* моделируются траектории двух видов, о которых говорилось раньше. В подпрограмме *SUBROUTINE FILTR* реализуется алгоритм фильтрации - сглаживания отсчетов координат.

Структурная схема основной программы приведена на рис.10. Основная программа начинается операторами ввода данных и присваивания значений константам. Далее формируется помеха путем обращения к системному датчику случайных нормально распределенных чисел. Обращение к датчику происходит с помощью оператора *CALL GAUSS*. Полученный таким образом массив чисел-отсчетов помехи используется в даль-

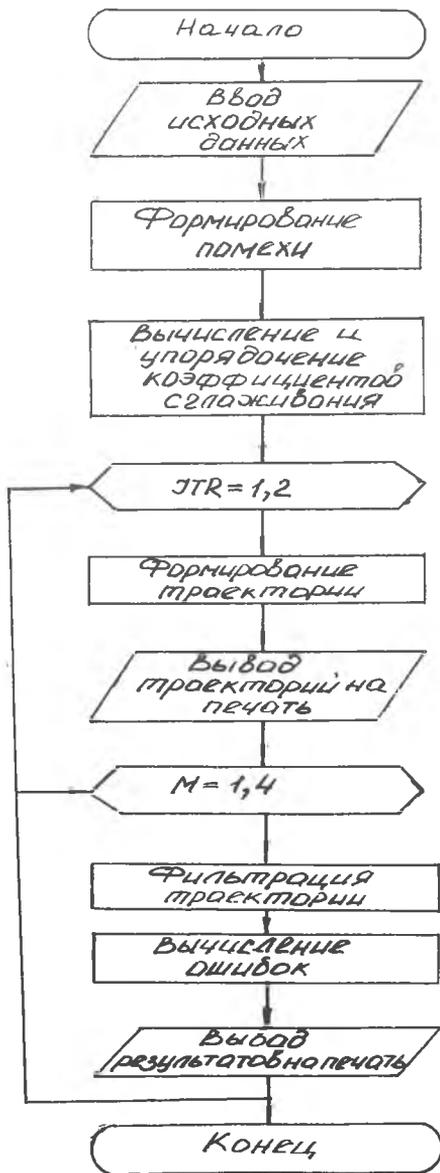


Рис.10

нейшем для формирования траектории, возмущенной помехой.

Далее по формулам (15) вычисляются 10 значений коэффициентов сглаживания фильтра Калмана. В массив коэффициентов включаются также две пары коэффициентов фильтров с постоянными, которые задаются в исходных данных. Порядок включения в массив этих коэффициентов упорядочивается: сначала следуют коэффициенты большей величины, а затем меньшей.

Далее следует оператор цикла $UTP = 1, 2$, с помощью которого последующая часть программы выполняется дважды: для случая равномерного и прямолинейного движения и для случая маневра по скорости. Для каждого случая с помощью подпрограммы формируются модели соответствующих траекторий. Массивы чисел-отсчетов траекторий выводятся на печать. С помощью оператора цикла $M = 1, 4$ обеспечивается повторение операций фильтрации для различных сочетаний моделей траекторий и фильтров. Операторы фильтрации, неоднократно повторяющиеся в программе, выделены в подпрограмму `FILTER`. Далее определяются ошибки фильтрации, которые затем выводятся на печать.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В чем назначение вторичной обработки радиолокационных сигналов и какие задачи она решает?
2. В чем состоит сущность основных операций вторичной обработки радиолокационных сигналов?
3. Каким образом осуществляется моделирование движения радиолокационных целей и каковы особенности их моделей?
4. Сущность метода пространства состояний.
5. Что такое "фильтр Калмана" и каково его назначение?
6. Сущность алгоритма фильтра Калмана. Расскажите о последовательности основных операций в алгоритме калмановской фильтрации.
7. Каковы характерные особенности фильтров Калмана, благодаря которым достигается оптимальность калмановской фильтрации?
8. В чем заключается эффект расходимости фильтров Калмана? Каковы причины возникновения этого эффекта и какие существуют простейшие способы его устранения?
9. Опишите алгоритм сглаживания параметров движения неманеврирующей цели. В чем состоит его сущность?
10. Как реализуется алгоритм сглаживания параметров движения неманеврирующей цели? Какова структура сглаживающего цифрового фильтра?

11. Расскажите о способе функционирования сглаживающего фильтра и об особенностях выбора параметров этого фильтра?

12. Каковы задачи машинного эксперимента и каким образом они решаются? Каким образом выбирают исходные данные для машинного эксперимента и как они вводятся в ЭВМ?

Библиографический список

1. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Советское радио, 1974.-432с.
2. Дымова А.И., Альбац М.Е., Бонч-Бруевич А.М. Радиотехнические системы/Под ред. А.И. Дымовой. М.: Советское радио, 1975.-440с.
3. Гриценко Н.С. и др. Оценивание параметров движения маневрирующих объектов.-Зарубежная радиоэлектроника, 1983, № 4, с.4-30.
4. Сейдож Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении: Пер. с англ./Под ред. Б.Р. Левина. М.: Связь, 1976.-496с.
5. Фалькович С.Е., Хомяков Э.Н. Статистическая теория измерительных радиосистем. М.: Радио и связь, 1981.-288с.

Распечатка машинной программы

```

//RADAR JOB (51301"RTU);MSGLEVEL=(2,0);REGION=80K
// EXEC FORTGCLG,PARM='NOXREF'
//FORT.SYSIN DD *
  REAL X(2,100),YSG(2,100),P(100),VIN(100),SLEN(100)
C
  REAL ALPHA(12),BETA(12)
  PWD ИСХОДНЫХ ДАННЫХ
  READ 1,V,DV,IX
  1 FORMAT (2(F5.1,2X),I2)
  READ 5,AL1,BET1,AL2,BET2
  5 FORMAT (4(F4.2,2X))
  READ 10,D
  10 FORMAT (F7.1)
  WRITE(6,15)
  15 FORMAT (10X,'КАФЕДРА РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ,
  *РАБОТА: ВТОРИЧНАЯ ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ/')
  WRITE(6,20)V,DV,IX,AL1,BET1,AL2,BET2,D
  20 FORMAT(5X,'ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ: V=',F5.1,'DV=',F5.1,'IX=',
  *I2,'AL1=',F4.2,'BET1=',F4.2,'AL2=',F4.2,'BET2=',F4.2,'D=',F7.1
  * /2X,100(' ')')
  N=100
  IP=5555555
  SKO=SQR(D)
  DO 30 I=1,N
  CALL GAUSS(IP,SKO,0.,2)
  30 P(I)=2
C
  ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФИЦИЕНТОВ СГЛАЖИВАНИЯ
  DO 35 I=1,10
  ALPHA(I)=2.*(I=1.)/(I=(I+1.))
  35 BETA(I)=6./(I*(I+1.))
  ALPHA(11)=AL1
  BETA(11)=BET1
  ALPHA(12)=AL2
  BETA(12)=BET2
  IF (AL1.CT.AL2) GOTO 37
  ALPHA(11)=AL2
  BETA(11)=BET2
  ALPHA(12)=AL1
  BETA(12)=BET1
  37 CONTINUE
  DO 2*X JTR=1,2
  CALL ТРАКТ(N,JTR,X,P,IX,V,DV)
  IF(JTR.EQ.1) PRINT 40
  IF(JTR.EQ.2) PRINT 45
  40 FORMAT(10X,'СЛУЧАЙ РЯНОЛИНЕЙНОГО РАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ/')
  45 FORMAT(10X,'СЛУЧАЙ МАНЕВРА ПО СКОРОСТИ/')
  PRINT 50
  50 FORMAT(10X,'ИДЕАЛЬНАЯ ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ/')
  PRINT 55,(X(I,I),I=1,N)
  55 FORMAT(1X,10E10.3)
  DO 60 I=1,N

```

```

60 SLCH(I)=X(2,I)-X(1,I)
   PRINT 70
70  FORMAT(1X//10X,'СЛУЧАЙНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ//')
   PRINT 55,SLCH
   DO 200 M=1,4
   IF((JTR.EQ.1).AND.(M.EQ.4)) GOTO 200
   CALL FILTR(M,N,X,XSGL,P,ALPHA,BETA,I,N)
   DISP=0.
   ВЪЧИСЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ И СЛУЧАЙНОЙ ОШИБКИ,
   А ТАКЖЕ ДИСПЕРСИИ СЛУЧАЙНОЙ ОШИБКИ
   DO 90 I=1,N
   DIN(I)=XSGL(1,I)-X(1,I)
   SLCH(I)=XSGL(2,I)-XSGL(1,I)
90  DISP=DISP+SLCH(I)*SLCH(I)
   DISP=DISP/N
   IF(M.EQ.1) PRINT 100
100  FORMAT(1X,100('=')//10X,'ФИЛЬТР КАЛМАНА//')
   IF(M.EQ.2) PRINT 105,AL1,BET1
105  FORMAT(1X//10X,'ФИЛЬТР С ПОСТОЯННЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ПРИ AL1=',
   *F5.2,2X,'BET1=',F5.2//)
   IF(M.EQ.3) PRINT 110,AL2,BET2
110  FORMAT(1X//10X,'ФИЛЬТР С ПОСТОЯННЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ПРИ AL2=',
   *F5.2,2X,'BET2=',F5.2//)
   IF(M.EQ.4) PRINT 115
115  FORMAT(10X,'ФИЛЬТР КАЛМАНА СОВМЕЩЕНО С ОБНАРУЖЕНИЕМ НАМЕВРА//')
   PRINT 120
120  FORMAT(10X,'ДИНАМИЧЕСКАЯ ОШИБКА//')
   PRINT 55,DIN
   PRINT 125
125  FORMAT(10X,'СЛУЧАЙНАЯ ОШИБКА//')
   PRINT 55,SLCH
   PRINT 130,DISP
130  FORMAT(10X,'ДИСПЕРСИЯ СЛУЧАЙНОЙ ОШИБКИ DISP=',E12.5//)
200  CONTINUE
      STOP
      END
      SUBROUTINE ТРАЕКТ(N,J,X,P,IX,V,DV)
      СОДПРОГРАММА ПОДЕЛИТСВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ
      REAL X(2,100),P(100)
      X0=10000
      IF(J.EQ.2) GOTO 20
      V1=V*10.
      DO 10 I=1,N
      X(1,I)=X0+V1*(I-1)
10  X(2,I)=X(1,I)+P(I)
      GOTO 50
20  CONTINUE
      V2=V*10.
      IX10=IX+10
      DO 30 J=1,N
      X(1,J)=X0+V2*(J-1)
      IF((J.GE.IX).AND.(J.LT.IX10)) V2=V2+DV
30  X(2,J)=X(1,J)+P(J)
50  CONTINUE
      RETURN
      END

```

```

SUBROUTINE FILTR(M,N,X,XSGL,P,ALPHA,BETA,IX)
MODELЬ СПЛАКМЕАКВЕРС ФИЛЬТРА
REAL X(2,100),XSGL(2,100),HBZK(100),YFF(100),ALPHA(12),BETA(12)
AF=-7,8
PF=0,2
X0=10000,
DO 5 J=1,2
XEXT=X0
DY=0,
YF=0,
K=0
IX10=IX+10
DO 12 I=1,N
K=K+1
IF(K,GT,10) K=10
IF(M,EQ,2) K=11
IF(M,EQ,3) K=12
IF(M,NE,4) GOTO 5
IF((I,GE,IX).AND.(I,LT,IX10)) K=11
IF(I,EQ,IX10) K=1
5 CONTINUE
RS=X(J,I)-XEXT
DX=DX+BETA(K)*RS
XSGL(J,I)=XEXT+ALPHA(K)*RS
XEXT=XSGL(J,I)+DX
10 CONTINUE
52 CONTINUE
RETURN
END

```

СОДЕРЖАНИЕ

Цель и порядок выполнения работы.....	3
КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ.....	5
Характеристика основных операций вторичной обработки сигналов в РЛС обзорного типа.....	5
Моделирование движения радиолокационных целей.....	9
Метод пространства состояний.....	11
Понятие о фильтрах Калмана.....	12
Сглаживающий цифровой фильтр.....	20
Общие сведения об алгоритмах обнаружения маневра.....	23
МАШИННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И ПРОГРАММА.....	24
Машинный эксперимент.....	24
Программа машинного эксперимента	26
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	28
Библиографический список.....	29
Приложение	

Составитель Виктор Дмитриевич Кузенков

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Редактор Е.Д.Антипова
Техн.редактор Н.М.Каленюк

Подписано в печать 10.08.85. Формат 60x84^I/16.

Бумага оберточная. Печать оперативная.

Усл.п.л. 2,09 . Уч.-изд.л. 1,9 . Тираж 200 экз.

Заказ 4464 Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева,
г.Куйбышев, ул.Молодогвардейская, 151.

Областная тип.им.В.П.Мяги,
г.Куйбышев, ул.Венцека, 60.