

*В.В. Глызин, А.И. Рыжов\**

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ СИНТЕЗА АЛГОРИТМОВ СОПРОВОЖДЕНИЯ МАНЕВРИРУЮЩИХ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Сопровождение целей является весьма сложной задачей, поскольку в большинстве случаев априорные знания о характере маневра отсутствуют. В связи с чем используются так называемые фильтры сопровождения.

---

\* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. ФГБОУ ВПО «ТГТУ» С.Н. Данилова.

К синтезу фильтров сопровождения применяются различные подходы. Уравнения для этих фильтров различаются по способу получения экстраполированной и уточненной оценок вектора состояния и по способу определения экстраполированной ковариационной матрицы и ковариационной матрицы уточненной оценки.

Одним из наиболее распространенных, до недавнего времени, способов построения радиоэлектронных систем (РЭСС) является синтез на основе алгоритмов теории линейной оптимальной фильтрации.

Теория оптимальной линейной фильтрации основана на гипотезе о точном соответствии моделей динамики состояния системы и измерений исследуемым физическим процессам. Такая априорная информация действительно необходима для создания оценщика с минимальной дисперсией, поскольку и структура фильтра и его параметры должны быть точно «настроены» на ожидаемое состояние. Однако на практике столь полными знаниями о модели располагают довольно редко, чаще имеются лишь оценки (с некоторой неопределенностью) статистических характеристик шума и начального состояния системы. Кроме того, линейная модель часто является лишь приближенным описанием реальных динамических систем и наблюдаемых процессов.

Как правило, параметры маневра цели неизвестны. Ускорение ее обычно учитывается в виде стационарного случайного входного воздействия. Хотя на практике, применительно к одиночной траектории, ускорение представляет собой нестационарный процесс. Решение задачи обеспечения в РЭСС требуемой точности слежения и устойчивости к срыву сопровождения высокоманевренных целей с помощью алгоритмов калмановской и подобных ей (Берга, Сонга) фильтрации не приносит желаемого результата из-за практической независимости коэффициентов усиления фильтра от элементов вектора состояния.

На практике алгоритмы линейной фильтрации реализованы в существующих РЛС в виде  $\alpha$ - $\beta$  и  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ -фильтров.

В радиолокационных комплексах (РЛПК) истребителей в режиме измерения координат используются алгоритмы фильтрации, в которых экстраполяция траектории осуществляется исходя из гипотезы относительного движения с постоянной скоростью. Для решения задачи сопровождения целей по дальности формируется оценка дальности ( $D_0$ ) и скорости сближения ( $V_0$ ) по алгоритму  $\alpha$ ,  $\beta$ -фильтрации:

$$D_3(k+1) = D_0(k) + V(k); \quad D(0) = D_n; \quad (1)$$

$$D_0(k+1) = D_3(k+1) + \alpha \Delta D(k+1); \quad (2)$$

$$V_0(k+1) = V_0(k) + \frac{\beta}{\tau} \Delta D(k+1), \quad V(0) = V_n; \quad (3)$$

$$\Delta D(k+1) = D_n(k+1) - D_3(k+1), \quad (4)$$

где  $D_3(k)$  и  $V_3(k)$  – экстраполированные значения дальности и скорости сближения;  $D_n$  – дальность, измеренная РЛС по времени запаздывания

отраженного от цели сигнала;  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты усиления фильтра ДД обновляющий процесс (невязка). Начальные условия  $D_n$  и  $V_n$  определяются в режиме захвата цели [2]. Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  выбираются из условий компромисса между требованиями точности и устойчивости сопровождения.

Рассмотрим другие подходы к синтезу фильтров сопровождения.

1. Обобщенный полиномиальный фильтр Калмана. Уравнение движения объекта вдоль каждой пространственной координаты в предположении, что шумовые процессы отсутствуют, может быть записано в виде дифференциального уравнения степени  $m$ , решением которого является полином степени  $(m - 1)$ .

2. Полиномиальный  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ -фильтр в отличие от соответствующего фильтра Калмана имеет постоянную весовую матрицу. Уравнения динамики развязаны по трем пространственным координатам.

3. Фильтр Калмана с раздельной обработкой по осям координат. Разновидность обобщенного фильтра Калмана, в котором определение экстраполированной ковариационной матрицы осуществляется в предположении отсутствия связи между координатами.

4. Адаптивный обобщенный фильтр Калмана. Ковариации шумов возмущения и наблюдения определяют в реальном масштабе времени в отличие от обобщенного фильтра Калмана с псевдошумом, где они являются функциями конкретных траекторий и/или переменных состояния. Обобщенный фильтр Калмана с преобразованной весовой матрицей позволяет сократить вычисления за счет упрощенной процедуры вычисления весовой матрицы.

5. Обобщенный фильтр Калмана с кусочно-постоянным усилением позволяет сократить вычисления за счет упрощенной процедуры вычисления весовой матрицы, принимая ее постоянной при обработке  $N$  последовательных отсчетов.

6. Фильтр с ограниченным шумом. Используется, когда шумы возбуждения и наблюдения не известны, за исключением ограничений на их интенсивность. В этих и других видах фильтров предпринимаются попытки учесть совершаемые целью маневры.

Ошибки оценивания для фильтра с переключаемой размерностью вектора состояния меньше по сравнению с фильтром, оценивающим входное воздействие, и приблизительно равны ошибкам фильтра, использующим многогипотезную модель динамики цели. Недостатком первого фильтра является необходимость реинициализации вектора состояния с началом маневра и увеличение времени переходного процесса в системе. Способ сопровождения с оценкой входного воздействия требует [2] до 20 параллельно включаемых фильтров Калмана и расчета функции максимального правдоподобия по каждому фильтру. Использование модифицированной модели ускорения Берга не приводит к существенному уменьшению ошибки оценивания, но время расчета сокра-

щается в 1,5 – 2 раза за счет использования связанной с целью системы координат для определения матрицы ковариации ошибок оценивания.

Алгоритм адаптивной фильтрации с настройкой матриц ковариаций шумов наблюдения  $R$  и шумов модели  $Q$  и оценкой входного воздействия оказывается достаточно эффективным в условиях априорной неопределенности шумов и входных воздействий. Разность действительных и оцененных значений матрицы  $Q$  стремится к нулю, но наблюдается малая скорость сходимости оценок, что может быть неприемлемо в условиях интенсивного маневрирования цели. Оценки матрицы  $R$  с течением времени изменяются в области действительных значений. Результаты моделирования алгоритма показывают, что ошибка оценивания уменьшается на 50 – 60 % к моменту начала маневра, затем резко возрастает и эффективно снижается на этапе маневра. Несмотря на приемлемые результаты, вычислительные затраты, необходимые для реализации данного алгоритма, могут оказаться непомерно большими.

В этом случае задается несколько моделей движения и соответствующих им фильтров, включаемых параллельно.

Некоторые фильтры, входящие в модель, в силу несоответствия моделируемого и реального шумов объекта могут расходиться. В этом случае может производиться их отключение.

**Выводы.** Прделанный анализ позволяет наметить подход к синтезу систем сопровождения целей.

1. Оптимизация адаптивного следящего измерителя может быть осуществлена на основе выбора необходимых компонент вектора наблюдения и состояния.

2. Оптимизация следящего измерителя на основе многомодельных систем может быть осуществлена на основе набора моделей в соответствии с изменяющимся типом обстановки.

3. Неопределенность в движении цели, совершающей неожиданный маневр, может быть значительно снижена на основе накопленных заранее данных (в том числе экспертных) о действиях противника в типовых ситуациях в зависимости от сложившейся обстановки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канащенков, А.И. Облик перспективных бортовых радиолокационных систем. Возможности и ограничения / А.И. Канащенков, В.И. Меркулов, О.Ф. Самарин. – М. : ИПРЖР, 2002. – 176 с.

2. Данилов, С.Н. Алгоритм сопровождения воздушных объектов следящим устройством в режиме обзора на основе аппроксимации области неопределенности оцениваемых параметров эллипсоидом наименьшего размера / С.Н. Данилов // Радиосистемы. – 2006. – Вып. № 97. – № 9. – С. 77 – 81. – (Радиотехника; №5).

*Кафедра «Радиотехника» ФГБОУ ВПО «ТГТУ»*