

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКИ  
ИНФОРМАЦИИ В ДВУХПОЗИЦИОННОЙ РЛС С ФИЛЬТРАЦИЕЙ ОЦЕНОК  
КООРДИНАТ ЦЕЛИ В ПРИЕМНЫХ ПОЗИЦИЯХ И ЦЕНТРЕ ОБРАБОТКИ  
ИНФОРМАЦИИ**

**Баранов В.Г.**

**научный руководитель профессор Н.П. Богомолов  
Институт инженерной физики и радиоэлектроники СФУ**

Рассматриваются алгоритмы траекторной обработки информации в двухпозиционной радиолокационной системе с вторичной обработкой оценки векторов состояния в приемных позициях. В центре обработки информации осуществляются алгоритмы многоканальной калмановской фильтрации. Проведен сравнительный анализ результатов имитационного математического моделирования при различных вариантах применения упрощенного и расширенного фильтров Калмана в приемных позициях и в центре обработки информации.

**Модель измерений и движения цели.**

Пусть вектор состояния  $\alpha_k$  динамической системы и вектор измеряемых параметров  $\lambda_k$  описываются уравнениями в дискретном времени

$$\alpha_k = \mathbf{B}_{k-1} \cdot \alpha_{k-1} + \mu_k, \quad (1)$$

$$\lambda_k = \mathbf{h}_k(\alpha_k) + \eta_k, \quad (2)$$

где  $\mathbf{B}_{k-1}$  – динамическая матрица пересчета вектора состояния на следующий шаг измерения (матрица прогноза);

$\mu_k$  – вектор шумов модели движения цели, являющийся случайной величиной, подчиняющийся нормальному закону распределения с нулевым средним значением и корреляционной матрицей дискретного маневра цели  $\mathbf{Q}_k = \overline{\mu_k \cdot \mu_k^T}$ ;

$\eta_k$  – вектор ошибок измерений, элементы которого являются белым шумом с нулевым средним значением и корреляционной матрицей  $\mathbf{C}_{\lambda,k}^{-1}$ , в которой диагональные элементы соответствуют дисперсиям ошибок измерения дальности  $\sigma_{r,k}^2$ , азимута -  $\sigma_{\beta,k}^2$  и угла -  $\sigma_{\varepsilon,k}^2$  места цели, а вне диагональные элементы равны нулю;

$\mathbf{h}_k(\alpha_k)$  – нелинейная векторная функция пересчета вектора состояния в вектор измеряемых параметров.

$k$  – номер шага измерения

**Алгоритм децентрализованной вторичной обработки с фильтрацией информации  
в ЦОИ (ФФ - алгоритм).**

В данном алгоритме фильтрация Калмана осуществляется как в ПП, так и в ЦОИ. Результирующая оценка вектора состояния на выходе ЦОИ имеет вид

$$\hat{\alpha}_{p(k+1)} = \hat{\alpha}_{(k+1)/k} + \mathbf{K}_{(k+1)/k} \cdot \begin{pmatrix} \hat{\alpha}_{(k+1),1} - \hat{\alpha}_{(k+1)/k} \\ \hat{\alpha}_{(k+1),2} - \hat{\alpha}_{(k+1)/k} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $\hat{\alpha}_{k+1/k}$  - результирующая экстраполированная оценка вектора состояния,  $\mathbf{K}_{k+1}$  - матричный коэффициент усиления, который зависит от результирующей экстраполированной корреляционной матрицы ошибок измерений ( $\mathbf{C}_{(k+1)/k}^{-1}$ ) и корреляционных матриц ошибок измерений  $\mathbf{C}_{\alpha(k+1),i}^{-1}$  оценок векторов состояния  $\bar{\alpha}_{(k+1),i}$  на выходах ПП. В виду того, что аналитическое выражение  $\mathbf{K}_{k+1}$  имеет громоздкий вид, то в тезисах доклада оно не приводится.

Результирующая корреляционная матрица ошибок измерений определяется выражением.

$$\mathbf{C}_{p(k+1)}^{-1} = \left( \mathbf{C}_{(k+1)/k} + \sum_{i=1}^m \mathbf{C}_{\alpha(k+1),i} \right)^{-1}, \quad (4)$$

В зависимости от принятой модели движения цели – прямолинейное равномерное, прямолинейное равноускоренное и т.д., структура векторов и матриц, входящих в соответствующие алгоритмы фильтрации Калмана, может быть различной.

Алгоритм фильтра Калмана, в оценке вектора состояния которого присутствуют оценка координат и скорости их изменении, обозначают УФК-алгоритм, если в оценке вектора состояния имеется и оценка ускорения, то это РФК-алгоритм.

Рассмотрим следующие модификации способов обработки в декартовой системе координат:

- фильтрация в ПРП УФК-фильтр + фильтрация в ЦОИ УФК-фильтр (УФК-УФК алгоритм);
- фильтрация в ПРП УФК-фильтр + фильтрация в ЦОИ РФК-фильтр (УФК-РФК алгоритм);
- фильтрация в ПРП РФК-фильтр + фильтрация в ЦОИ УФК-фильтр (РФК-УФК алгоритм);
- фильтрация в ПРП РФК-фильтр + фильтрация в ЦОИ РФК-фильтр (РФК-РФК алгоритм).

### **Имитационное математическое моделирование.**

Результаты имитационного математического моделирования с применением метода Монте – Карло приведены в виде графической зависимости среднеквадратической ошибки  $\sigma_x$  и ошибок оценивания  $\Delta_x$  в нормированных к базе единицах, которая соответствует расстоянию между ЦОИ и ПП от номера такта измерения k для декартовой координаты X. Для двух других координат (Y и Z) результаты аналогичны.

Для полного анализа достаточно исследовать качество фильтрации оценок координат объекта при двух траекториях его движения:

- равномерное прямолинейное движение объекта в направлении на РЛС;
- движение по окружности с перегрузкой для выявления возможностей

сопровождения маневрирующих объектов.

– равномерная прямолинейная и скорость движения  $v_d=500$  м/с, высота полета цели  $H=10000$ м, СКО : по дальности - 300м, по угловым координатам -30 минут.

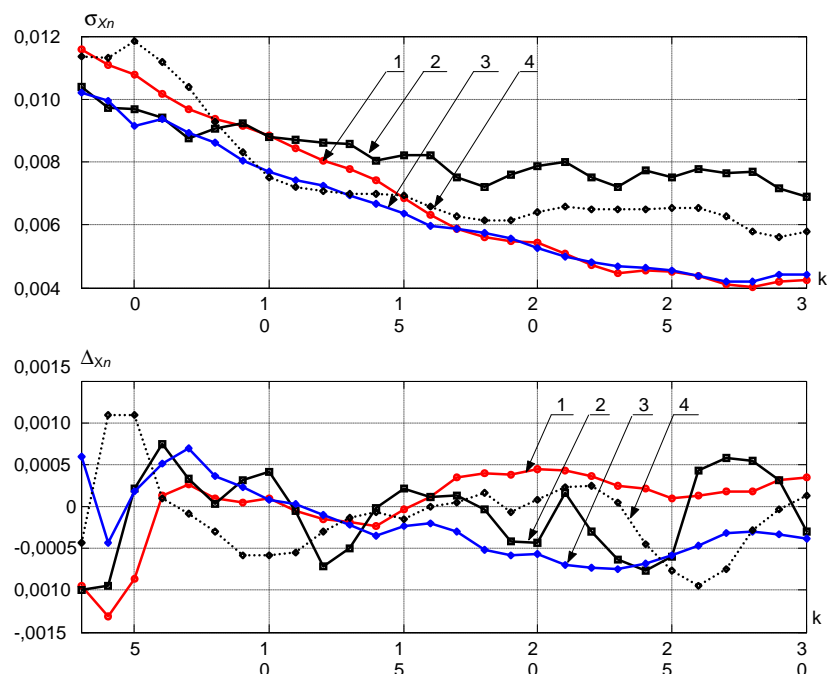
Рамки исследования:

– фильтрация в декартовой системе координат;  
– первичная обработка РЛИ произведена;  
– шумы модели движения и измерения - гауссовские;  
– вопросы, связанные с синхронизацией блоков и устройств РЛС приемных позиций, а также согласование их диаграмм направленности ФАР, в работе не рассматриваются.

Рассмотрим эффективность функционирования каждой системы обработки информации погрешностей фильтрации на этапе равномерного прямолинейного движения. На рис. 1 представлены зависимости СКО и ошибки оценивания координаты  $X$  в метрах от такта измерения для всех предлагаемых к исследованию алгоритмов сопровождения (УФК-УФК – кривая 1, РФК-РФК – кривая 2, УФК-РФК – кривая 3, РФК-УФК – кривая 4). Из анализа приведенных графиков следует, что УФК-УФК алгоритм при слежении за не маневрирующим объектом имеет более лучшие качественные показатели измерений, СКО оценивания в 1.5 раза меньше СКО алгоритмов, основанных на расширенных фильтрах Калмана. РФК-РФК алгоритм имеет максимальные среднеквадратические ошибки. Это объясняется тем, что при сопровождении объекта движущегося равномерно и прямолинейно в декартовой системе координат, учет второй производной (ускорения) в векторе состояния приводит к увеличению ошибок оценивания. УФК-РФК алгоритм имеет результаты фильтрации оценок координат сравнимые с УФК-УФК алгоритмом. Это указывает на то, что применение в приемных позициях фильтров с упрощенным вектором состояния позволяет получать высокие точности оценивания вектора состояния при сопровождении объектов с прямолинейной равномерной траекторией движения. РФК-УФК алгоритм занимает промежуточное положение среди анализируемых алгоритмов. Таким образом, среднеквадратическая ошибка для УФК-УФК алгоритма к десятому шагу фильтрации уменьшается в 1,2 раза, к двадцатому шагу – в два раза. Для модификации РФК-РФК результаты следующие - к десятому шагу фильтрации СКО уменьшается в 1,2 раза, а к двадцатому в 1,4 раза. Из данных результатов видно, что до десятого шага фильтрации результаты практически одинаковые, а потом фильтры сопровождения с упрощенным вектором состояния имеют значительный выигрыш в точности оценивания вектора состояния.

Работа рассматриваемых алгоритмов сопровождения имеет несколько особенностей. Как видно из структурной схемы (см. рисунок 1) при сопровождении объектов используется несколько фильтров Калмана. Каждый из фильтров можно настраивать, учитывая особенности внешних и внутренних факторов, влияющих на точность оценивания. Основным элементом управления в фильтре Калмана является матрица дискретного маневра  $Q_k$ , физический смысл которой заключается в регулировании полосы пропускания фильтра. Необходимо выбрать такой нижний порог полосы пропускания фильтра, который позволит с минимальными ошибками оценивать координаты объекта и, в то же время, не будет наблюдаться процесс

расходимости фильтра. Если полоса пропускания фильтра уменьшается, то фильтр при поступлении обновляющей информации начинает слабо реагировать на нее и основной вес в результирующей оценке в этом случае имеет прогнозируемое значение оцениваемого параметра.



**Рис. 1** – Зависимость СКО  $\sigma_x$  и ошибок оценивания  $\Delta_x$  координаты  $x$  от номера шага фильтра  $k$

Чрезмерное уменьшение полосы пропускания приводит к тому, что фильтр практически полностью доверяет прогнозируемому значению, не принимая во внимание обновляющую информацию. В этом случае может наблюдаться процесс расходимости фильтра сопровождения, который заключается в увеличении ошибок оценивания. В случае, если ошибки оценивания значительно превышают ошибки первичных измерений, то здесь речь идет о срыве сопровождения объекта.

### Список литературы.

1. Черняк, В. С. Многопозиционная радиолокация / В. С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
2. Петров, А. В. Анализ и синтез радиотехнических комплексов / А. В. Петров, А. А. Яковлев. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.
3. Bogomolov, N. Algorithm of decentralized secondary processing radar information / N. Bogomolov, S. Grebenjuk, V. Sidorov, G. Shydurov; 2002 6<sup>TH</sup> International conference on actual problems of electronic instrument engineering proceedings «APEIE-2002». Vol. 1. Novosibirsk, Russia. 2002. P. 155–159.
4. Ширман, Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
5. Кузьмин, С. З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиоэлектронной информации / С. З. Кузьмин. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.