

## ТРАЕКТОРНАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДВУХПОЗИЦИОННОЙ РЛС С ФИЛЬТРАЦИЕЙ ОЦЕНОК В ПРИЕМНЫХ ПОЗИЦИЯХ

Сидоров О. В.,

научный руководитель: Богомолов Н. П.

*Институт инженерной физики и радиоэлектроники СФУ*

Рассматриваются методы траекторной обработки информации в двухпозиционной радиолокационной системе с калмановской фильтрацией в приемных позициях. В центре обработки информации осуществляются алгоритмы или многоканальной калмановской фильтрации, или комплексирования (объединения) результатов фильтрации оценок векторов состояния, рассчитанных в приемных позициях. Приведены сравнительные результаты имитационного моделирования.

### Постановка задачи

Задача обеспечения высокой точности оценивания фазовых координат – параметров траектории цели может быть решена путем объединения или многоканальной калмановской фильтрации в центре обработки информации (ЦОИ) многопозиционной радиолокационной системы (МПРЛС) результатов фильтрации оценок векторов состояния, рассчитанных в приемных позициях (ПП) с применением алгоритмов фильтрации Калмана.

Алгоритм децентрализованной системы траекторной обработки (ДЦСТО) радиолокационной информации (РЛИ), в котором результаты фильтрации оценок векторов состояния ПП объединяются в ЦОИ, обозначим ФО – алгоритмом. При применении в ЦОИ многоканальной калмановской фильтрации – ФФ – алгоритмом.

Ввиду того, что в работе анализируется и исследуется только алгоритмы фильтрации и объединения оценок параметров траектории цели, то предыдущие этапы траекторной обработки радиолокационных данных в МПРЛС (преобразование отметок цели в единую систему координат, привязки их и в каждой ПП к единому моменту времени, процедуры идентификации отметок с траекториями систем) считаем успешно реализованными.

### Модель измерений и движения цели

Пусть вектор состояния  $\alpha_k$  динамической системы и вектор измеряемых параметров  $\lambda_k$  описываются уравнениями в дискретном времени [5]

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

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

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;

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

$k$  – номер шага измерения

Структура обобщенного алгоритма ДЦСТО в двухпозиционной радиолокационной системе (РЛС) изображена на рис. 1. Где  $\hat{\boldsymbol{\lambda}}_{l,k}$  лямбда – вектор наблюдения с соответствующей матрицей ошибок измерения  $\mathbf{C}_{\lambda,l,k}^{-1}$  на входе ПП ( $l = 1, 2$  – номер приемной позиции);  $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{l,k}, \hat{\boldsymbol{\alpha}}_{p,k}$  – оценки векторов состояния и соответствующие корреляционная матрица точности измерения  $\mathbf{C}_{\alpha,l,k}^{-1}, \mathbf{C}_{\alpha,p,k}^{-1}$  (индекс  $l$  – рассчитанные в ПП,  $p$  – результирующие, рассчитанные в ЦОИ);

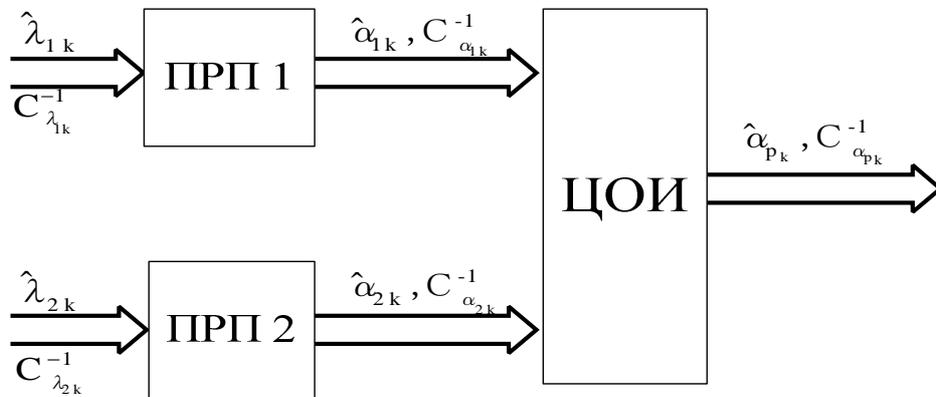


Рис. 1 – Структура обобщенного алгоритма ДЦСТО

Уравнения алгоритма фильтрации Калмана для  $l$ -ой ПП приведены в [2]

Разработка ФФ – алгоритма, который основывается на алгоритме многоканальной калмановской фильтрации в ЦОИ оценок  $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{1,k}$  и  $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{2,k}$ , полученных в результате вторичной обработки в ПП [1].

Результирующую оценку вектора состояния  $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{p,k}$ , рассчитанную в ЦОИ, получим на основе алгоритмов фильтрации Калмана [2]

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{p,k} = \hat{\boldsymbol{\alpha}}_{\delta,k/k-1} + \mathbf{K}_{\delta,k} \cdot \left[ \hat{\boldsymbol{\lambda}}_{\delta,k} - \mathbf{h}_k(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{\delta,k/k-1}) \right], \quad (3)$$

$$\mathbf{C}_{p,k}^{-1} = \mathbf{C}_{p,k/k-1}^{-1} - \mathbf{K}_{p,k} \cdot \mathbf{H}_k \cdot \mathbf{C}_{p,k/k-1}^{-1}, \quad (4)$$

$$\mathbf{K}_{p,k} = \mathbf{C}_{p,k/k-1}^{-1} \cdot \mathbf{H}_k^T \cdot (\mathbf{H}_k \cdot \mathbf{C}_{p,k/k-1}^{-1} \cdot \mathbf{H}_k^T + \mathbf{C}_{\lambda_p,k}^{-1})^{-1}, \quad (5)$$

$$\mathbf{C}_{p,k/k-1}^{-1} = \mathbf{V}_{k-1} \cdot \mathbf{C}_{p,k-1}^{-1} \cdot \mathbf{V}_{k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1}, \quad (6)$$

где  $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{p,k/k-1} = \mathbf{V}_{k-1} \cdot \hat{\boldsymbol{\alpha}}_{p,k-1}$  – прогнозируемая оценка вектора состояния,

$\mathbf{K}_{p,k}$  – матричный коэффициент усиления,

$\mathbf{h}_k(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{k/k-1})$  – прогнозируемая оценка вектора наблюдаемых параметров,

$\mathbf{H}_k$  – матрица статического пересчета измерений вектора состояния в вектор

наблюдаемых параметров

$\hat{\lambda}_{\delta,k} = (\hat{\alpha}_{1,k}^T, \hat{\alpha}_{2,k}^T)^T$  – вектор наблюдений на входе ЦОИ с соответствующей корреляционной матрицей:

$$\mathbf{C}_{\lambda_{p,k}}^{-1} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_{1,k}^{-1} & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_{2,k}^{-1} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Результирующая оценка вектора состояния  $\hat{\alpha}_{\delta,k}$  имеет вид [3]

$$\hat{\alpha}_{\delta,k} = \hat{\alpha}_{\delta,k/k-1} + \sum_{l=1}^2 \mathbf{K}_{1l,k} \cdot (\hat{\alpha}_{l,k} - \hat{\alpha}_{\delta,k/k-1}) \quad (8)$$

Результирующая корреляционная матрица ошибок измерения определяется выражением

$$\mathbf{C}_{p,k}^{-1} = \mathbf{C}_{p,k/k-1}^{-1} - \sum_{l=1}^2 \mathbf{K}_{1l,k} \cdot \mathbf{C}_{p,k/k-1}^{-1} = \left( \mathbf{I} - \sum_{l=1}^2 \mathbf{K}_{1l,k} \right) \cdot \mathbf{C}_{p,k/k-1}^{-1} \quad (9)$$

В экстраполиаторе результирующая оценка вектора состояния, сформированная в ЦОИ, прогнозируется на следующий такт измерения. Невязка  $\mathbf{v}_{l,k} = \hat{\alpha}_{l,k} - \hat{\alpha}_{\delta,k/k-1}$ , рассчитанная в каждом из ПП, с установленным матричным весом добавляется к прогнозированной оценке, что и дает результирующую оценку вектора состояния [2].

Другим способом обработки информации в ЦОИ является комплексирование (объединение) результатов фильтрации оценок вектора состояния, полученных в ПП с весами обратно пропорциональным соответствующим дисперсиям измерения координат элементов вектора  $\alpha$ . Комплексирование можно производить по методике, приведенной в [4]. Дополнительные индексы будем опускать в случаях, когда это не вызывает неоднозначного толкования.

$$p(\alpha) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \cdot |\mathbf{C}_i|^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[ -0,5 \cdot (\alpha - \hat{\alpha}_i)^T \cdot \mathbf{C}_i \cdot (\alpha - \hat{\alpha}_i) \right], \quad (10)$$

где  $\alpha$  – оцениваемый случайный вектор состояния;

$\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2$  – симметричные матрицы точности  $\hat{\alpha}_i$  для первой и второй ПП.

Найдем выражение логарифма совместной плотности вероятности:

$$\ln p(\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2) = -\left(\frac{1}{2}\right) \cdot (\alpha - \hat{\alpha}_1)^T \cdot \mathbf{C}_1 \cdot (\alpha - \hat{\alpha}_1) - \left(\frac{1}{2}\right) \cdot (\alpha - \hat{\alpha}_2)^T \cdot \mathbf{C}_2 \cdot (\alpha - \hat{\alpha}_2) + const. \quad (11)$$

Ввиду того, что оценки векторов состояния, сформированных уравнениями фильтрации Калмана в ПП независимы и подчинены нормальному закону распределения, то для определения результирующей оценки вектора состояния, полученной в результате комплексирования соответствующих оценок в центре обработки информации, применим методику, приведенную в [4].

После изменения постоянной принимает вид:

$$\ln p(\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2) = -\left(\frac{1}{2}\right) \cdot (\alpha - \hat{\alpha}_p)^T \cdot \mathbf{C}_p \cdot (\alpha - \hat{\alpha}_p) + const \quad (12)$$

Определяя отсюда плотность вероятности  $p(\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2)$  и постоянную (14) из условия нормировки, приходим к стандартной форме записи многомерного нормального закона

$$p(\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \cdot |C_p|^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[ -\left(\frac{1}{2}\right) \cdot (\alpha - \hat{\alpha}_p)^T \cdot C_p \cdot (\alpha - \hat{\alpha}_p) \right] \quad (13)$$

Формально введенные величины  $C_p$  и  $\hat{\alpha}_p$  приобретают отчетливый смысл результирующей матрицы точности и результирующей оценки вектора состояния на выходе системы обработки ЦОИ. Последняя сводится к весовой сумме оценок  $\hat{\alpha}_1$  и  $\hat{\alpha}_2$  и определяется выражением

$$\hat{\alpha}_p = C_p^{-1} \cdot (C_1 \cdot \hat{\alpha}_1 + C_2 \cdot \hat{\alpha}_2). \quad (14)$$

Оценка  $\hat{\alpha}_p$  соответствует максимуму послеопытной плотности вероятности  $p(\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2)$ .

где  $\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2$  и  $C_1, C_2$  - оценки вектора состояния и соответствующие им корреляционные матрицы точности измерения.

$C_p^{-1}$  - результирующая корреляционная матрица ошибок измерения, имеющая вид

$$C_p^{-1} = (C_1 + C_2)^{-1}. \quad (15)$$

Тактико-технические характеристики РЛС приемных позиций:

- модель движения цели – равномерная прямолинейная, движения по дуге окружности с перегрузкой равной шести;
- скорость движения цели  $v = 400$  м/с;
- высота полета цели постоянная  $H = 10\,000$  м;
- СКО измерения: по дальности – 300 м, по угловым координатам –  $30'$
- период обзора  $T=10$ с

Рамки исследования:

- цель обнаружена;
- произведена первичная обработка радиолокационной информации;
- погрешности измерения РЛС приемных позиций одинаковы;
- оценки векторов состояния приемных позиций являются независимыми.

Проведем сравнение полученных результатов фильтрации оценок координат цели с известным алгоритмом децентрализованной обработки, который предполагает комплексирование результатов фильтрации оценок координат вектора состояния в ЦОИ. Имеет смысл привести зависимость параметров только для одной декартовой координаты, так как для остальных координат результаты аналогичные.

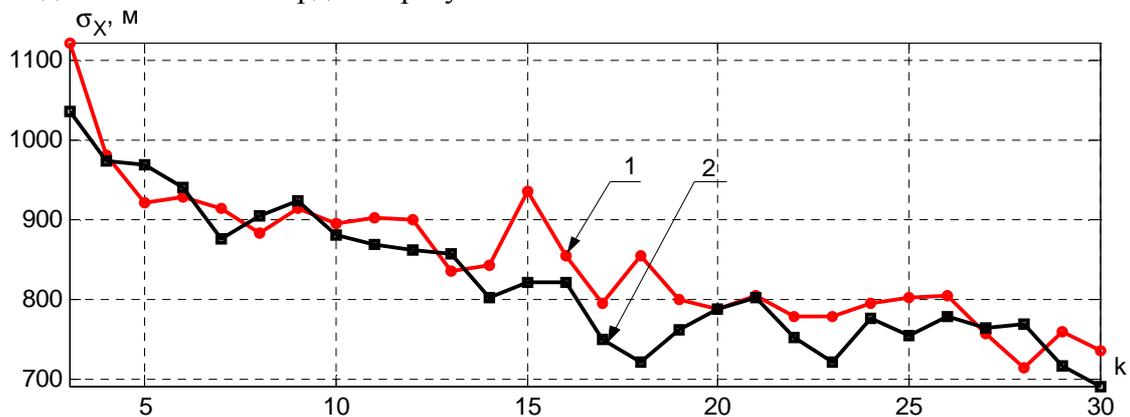


Рис. 2 – Зависимость СКО  $\sigma_x$  координаты  $x$

На рисунке 2 представлены зависимость СКО координаты X цели при прямолинейном равномерном движении, причем кривая 1 соответствует комплексированию информации в ЦОИ, а кривая 2 – обработке оценок вектора состояния цели на основе алгоритмов фильтрации Калмана в ЦОИ, полученных от каждой приемной позиции.

Из анализа кривых следует, что результаты фильтрации оценок координаты X практически одинаковые. Среднеквадратическая ошибка к десятому шагу уменьшается в 1,22 раза, а к двадцатому – в 1,37 раза. К пятнадцатому шагу фильтрации фильтр работает в установившемся режиме. Ошибки оценивания при фильтрации оценок вектора состояния цели в ЦОИ изменяются более плавно, чем в случае их комплексирования.

На рисунке 3 представлены результаты фильтрации оценок координаты X цели на этапе движения по дуге окружности с перегрузкой равной шести.

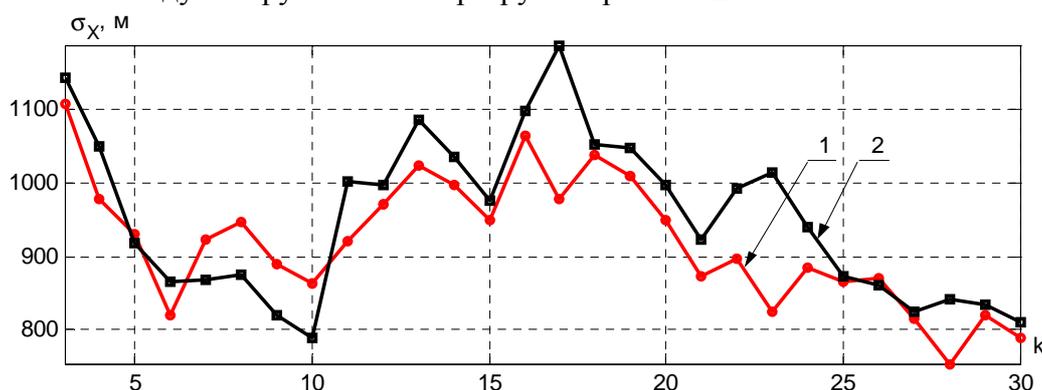


Рис. 3 – Зависимость СКО  $\sigma_x$  координаты  $x$

Кривая 1 соответствует комплексированию информации, полученной от приемных позиций, кривая 2 – фильтрации в ЦОИ, полученной от приемных позиций. Из полученных результатов можно сделать вывод, что СКО при фильтрации в ЦОИ оценок вектора состояния маневрирующей цели, полученных в приемных позициях, соизмеримы с СКО при комплексировании указанных оценок.

Вследствие того, что повышения точности оценивания не наблюдается, рекомендуется использовать в ЦОИ комплексирование оценок вектора состояния лоцируемой цели. Кроме того, операция комплексирования требует меньшей производительности вычислительных средств.

### Список литературы

1. Гришин Б.П., Казаринов Ю.М. Динамические системы, устойчивые к отказам, - М.: Радио и связь, 1985.-176 с.
2. Петров А.В., Яковлев А.А. Анализ и синтез радиотехнических комплексов / Под ред. В.Е. Дулевича, - М., Радио и связь, 1984.-248 с.
3. Богомолов Н.П. Децентрализованные алгоритмы обработки информации в двухканальных измерительных системах. – Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. Вып. в СибГАУ.- Красноярск, 2005.- с.7-11.
4. Черняк, В. С. Многопозиционная радиолокация / В. С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
5. 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.
6. Кузьмин, С. З. Основы проектирования систем цифровой обработки радио-электронной информации / С. З. Кузьмин. – М.: Радио и связь, 1986. – 352с.