

**АЛГОРИТМЫ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В  
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ МАТРИЦЫ  
ДИНАМИЧЕСКОГО ПЕРЕСЧЕТА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КООРДИНАТЫ УГЛА  
МЕСТА**

**Яницкий А.А.**

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

Исследованы алгоритмы калмановской фильтрации в бистатической радиолокационной системе с различными видами матрицы динамического пересчета для оценки координаты угла места. Проведен анализ алгоритмов вторичной обработки информации при равномерном прямолинейном движении цели .

### 1. Постановка задачи

В настоящее время актуальной является задача защиты РЛС от применения противником искусственных помех. Бистатическая РЛС, состоящая из разнесенных в пространстве передающей и приемной позиций, является одним из вариантов реализации поставленной задачи [1,3]. В работе произведено исследование алгоритма фильтрации Калмана. Выбор сферической системы координат устраняет необходимость преобразования полученных оценок вектора состояния цели из одной системы координат в другую. Кроме того, в связи с независимостью и стационарностью ошибок измерений фильтр может быть представлен в виде совокупности трех простых фильтров, в каждом из которых отдельно обрабатываются результаты измерений дальности, азимута и угла места [4]. В ССК движение цели не может быть описано линейными разностными уравнениями (1) и соответствующая фильтрация становится нелинейной [3–4]. Вследствие этого, при применении алгоритмов фильтрации Калмана, будут накапливаться ошибки прогнозирования. В целях уменьшения данных ошибок в работе прилагается простой и в тоже время эффективный подход который заключается в применении модифицированной матрицы  $\mathbf{V}_{k,m}$ , в которой применяется коррекция скорости цели в зависимости от ее пространственного положения ( $k$  – номер такта измерения). Алгоритм фильтрации Калмана с матрицей  $\mathbf{V}_{k,m}$  обозначим РФКМ – алгоритмом.

### 2. Математическая модель движения и измерения

При разработке системы вторичной обработки РЛИ в бистатической радиолокационной системе важное значение имеет выбор модели движения цели, модели измерения и параметры цели, измеряемые в данной РЛС (дальность, угловые координаты, радиальные скорость и ускорения и др.). Модель движения цели и модель измерения заданы линейными разностными векторными уравнениями [1–3]:

$$\boldsymbol{\alpha}_k = \mathbf{V}_{k-1} \cdot \boldsymbol{\alpha}_{k-1} + \boldsymbol{\mu}_k, \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\lambda}_k = \mathbf{h}_k(\boldsymbol{\alpha}_k) + \boldsymbol{\eta}_k, \quad (2)$$

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

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

$\boldsymbol{\eta}_k$  – 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;

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

### 3. Алгоритм фильтрации Калмана

Алгоритм обобщенного дискретного фильтра Калмана (ФК) для дискретной линейной модели движения цели в ССК описывается следующими соотношениями [1-3]:

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}}_k = \hat{\boldsymbol{\alpha}}_{k-1} + \mathbf{K}_k \cdot (\hat{\boldsymbol{\lambda}}_k - \hat{\boldsymbol{\lambda}}_{k/k-1}), \quad (3)$$

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{k/k-1} = \mathbf{K}_{k-1} \cdot \hat{\boldsymbol{\alpha}}_{k-1}, \quad (4)$$

$$\mathbf{C}_{k/k-1}^{-1} = \mathbf{B}_{k-1} \cdot \mathbf{C}_{k-1}^{-1} \cdot \mathbf{B}_{k-1}^T \cdot \mathbf{Q}_k, \quad (5)$$

$$\mathbf{C}_k^{-1} = (\mathbf{C}_{k/k-1} + \mathbf{C}_{\lambda,k})^{-1}, \quad (6)$$

$$\mathbf{K}_k = (\mathbf{C}_{k/k-1} + \mathbf{C}_{\lambda,k})^{-1} \cdot \mathbf{C}_{\lambda,k}, \quad (7)$$

где  $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_k$  - оценка вектора состояния;

$\hat{\boldsymbol{\lambda}}_k$  - вектор наблюдения;

$\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{k/k-1}$  - прогнозируемая оценка вектора состояния;

$\mathbf{C}_{k/k-1}^{-1}$  - априорная матрица ошибок измерения вектора  $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{k/k-1}$ ;

$\mathbf{C}_k^{-1}$  - апостериорная матрица ошибок измерения вектора  $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_k$ ;

$\mathbf{C}_{\lambda,k}^{-1}$  - матрица ошибок измерения вектора  $\hat{\boldsymbol{\lambda}}_k$ ;

$\mathbf{K}_k$  - матричный коэффициент усиления.

### 4. Алгоритм фильтрации Калмана с модифицированной матрицей динамического пересчета

При этом были рассмотрены три алгоритма ФК с различной структурой оценки вектора состояния: в первом присутствует оценка координаты угла места  $\hat{\varepsilon}_k$  и оценка ее скорости  $\hat{\dot{\varepsilon}}_k$  (УФК – алгоритм), во втором – кроме вышеназванных и оценка ускорения  $\hat{\ddot{\varepsilon}}_k$  (РФК – алгоритм). Третий алгоритм отличается от второго применением матрицы  $\mathbf{B}_{k,m}$ .

В РФК алгоритме закон изменения скорости имеет линейный характер и описывается выражением

$$\hat{\varepsilon}_k = \hat{\varepsilon}_k + \hat{\varepsilon}_k \cdot T \quad (8)$$

На практике скорость изменения координаты меняется нелинейно, поэтому при применении данной матрицы будут накапливаться ошибки прогнозирования.

Таким образом, необходимо сформировать матрицу  $\mathbf{V}_{k,m}$ , которая бы соответствовала закону изменения скорости оцениваемой координаты. Для решения этой задачи предлагается метод, который заключается в изменении значений элементов матрицы  $\mathbf{V}_{k,m}$  в соответствии с пространственным положением цели. Закон изменения скорости запишем в следующем виде

$$\hat{\varepsilon}_k = \hat{\varepsilon}_k + \hat{\varepsilon}_k \cdot K(\varepsilon_k) \cdot T, \quad (9)$$

где  $K(\varepsilon_k)$  - коэффициент коррекции.

Для оценки координаты угла места коэффициент коррекции рассчитывается на основании того, что скорость изменения угла места изменяется нелинейно при приближении лоцируемой цели к РЛС.

В этом случаях для повышения точности сопровождения предлагается использовать динамическую матрицу пересчета с коэффициентом коррекции скорости изменения угла места следующего вида

$$K(\varepsilon_k) = e^{-\frac{\varepsilon_k - D_{max}}{\varepsilon_k}} \quad (10)$$

Зависимость коэффициента коррекции для канала угла места от расстояния до цели показана на рисунке 1.

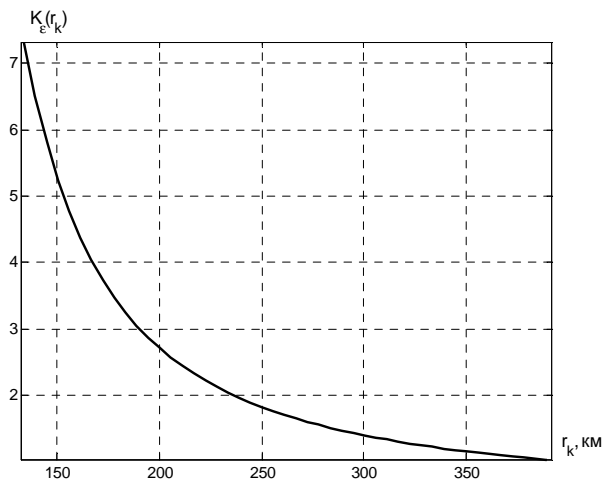


Рисунок 1. – Зависимость коэффициента коррекции для канала угла места

Модифицированная матрица динамического пересчета для алгоритмов обработки координатной информации была получена экспериментальным путем и может быть представлена для координаты угол места в виде:

$$\mathbf{V}_{k,m} = \begin{pmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & K(\varepsilon_k) \cdot T \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

## 5. Исследование фильтрации оценки координаты угла места методом статистического моделирования

В работе приведены сравнительные результаты имитационного статистического моделирования (методом Монте-Карло) при различных моделях движения.

При моделировании было принято: слежение за целью начинается с 300 км, высота полета цели 10 км, СКО измерения координаты угла места – 30 минут, модель движения – равномерное прямолинейное со скоростью 1500 км/час в направлении на РЛС.

Оценить качество фильтрации и сходимость протекающих процессов можно по истечении 30 шагов фильтрации. Проведем исследование алгоритмов фильтрации оценок пространственных координат в ССК для РЛС при различных траекториях движения цели. Главным критерием качества фильтрации является минимизация СКО оценок вектора состояния цели от номера такта фильтрации  $k$ .

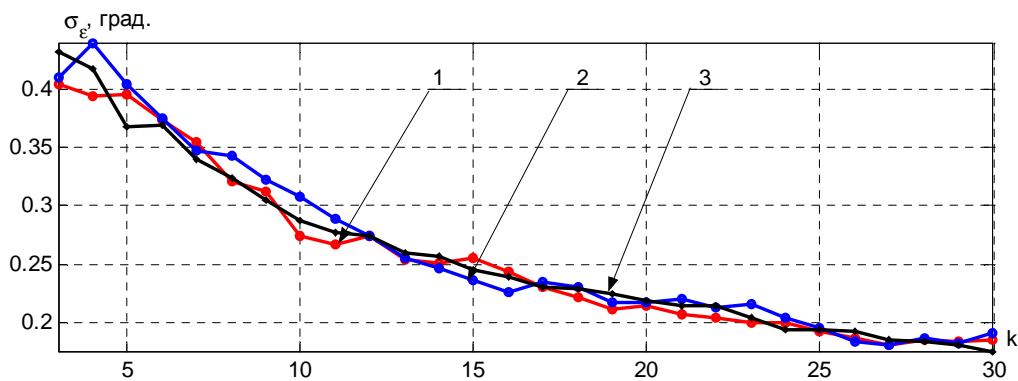


Рисунок 2. – Зависимость СКО измерения угла места цели от  $k$

На рисунке 2 представлены зависимость СКО измерения координаты угла места в градусах от номера такта фильтрации  $k$ . Из анализа кривых 1-3 следует, что алгоритмы фильтрации оценок координаты угла места с применением УФК-фильтра (кривая 1), РФК-фильтра – с классической матрицей прогноза  $\mathbf{B}$  (кривая 2), а также РФКМ-фильтра с модифицированной матрицей прогноза, показали практически одинаковые точностные характеристики. СКО измерения к десятому шагу фильтрации уменьшается в 1,7 раз, а к двадцатому - в 2,2 раза.

### Выводы

1. Исследованы возможности применения алгоритмов вторичной обработки информации сопровождаемой цели на основе бистатической РЛС. Предложена простая в реализации матрица динамического пересчета, позволяющая с высокой точностью оценивать координату угла места цели в сферической системе координат.

2. Ошибки оценивания координаты угла места цели для исследуемых алгоритмов сходятся к нулю, что говорит об устойчивой работе алгоритмов.

### Список литературы

1. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред Я. Д. Ширман. – М.: Радиотехника, 2007.—512 с.: ил.
2. Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация / В. С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416с.

3. Фарина, А. Цифровая обработка радиолокационной информации / А. Фарина, Ф. Студер. – М.: Радио и связь, 1993. – 319 с.

4. N.H. Gholson and R.L. Moose, «Maneuvering target tracking using adaptive state estimation», IEE Transactions on Aerospace and Electronic, Systems, May 1977.