

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КАНАЛА УГЛА МЕСТА

Борисов А.Н., Глинченко В.А., Назаров А.А., Исламов Р.В., Сучков П.В.  
Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Богомолов Н.П.

*Сибирский федеральный университет*

Одним из эффективных направлений совершенствования, как радиолокационного вооружения войск ПВО так и гражданских систем является разработка и внедрение алгоритмов адаптации к неизвестной динамической помеховой обстановке. Проведены исследования потенциальных возможностей обнаружения и измерения координат целей и постановщиков помех.

**Целью** является повышение точности определения координат цели в двухпозиционной радиолокационной системе с учетом требований вывода информации в сферической системе координат.

Поставленная цель достигается **решением следующих задач:**

1. Выявлением специфики обработки радиолокационной информации в сферической системе координат.
2. Применением алгоритмов фильтрации Калмана в пассивной части многопозиционной радиолокационной системы.
3. Выявлением особенностей обработки радиолокационной информации в условиях воздействия активных шумовых помех (АШП).
4. Исследование алгоритмов вторичной обработки информации при локации источника АШП.

### **1 Методы и устройства получения локационной информации при использовании собственного излучения цели**

В локации возникают задачи, когда цель является источником излучения. Основными источниками излучения, представляющими интерес с точки зрения решаемых в дисциплине задач, являются постановщики активных помех (ПАП). Принципиальное отличие методов получения локационной информации об излучающих источниках от ранее других методов измерения координат состоит в отсутствии информации о времени излучения.

Поэтому для определения всех координат объекта требуется комплекс двух или нескольких разнесенных пунктов приема, соединенных каналами связи, т. е. пассивный МПРЛС. Определение местоположения целей по их собственным излучениям относят к пассивной локации.

Основные задачи пассивной локации совпадают с задачами активной локации (радиолокации). В зависимости от используемых первичных координат различают следующие методы пассивной локации для определения дальности до цели: угломерный, разностно-дальномерный, угломерно-разностно-дальномерный.

Более перспективным является метод определения координат – угломерный – разностно – дальномерный.

**Угломерный – разностно – дальномерный метод** основан на измерении угловых направлений на источник излучения, так и разности расстояний от него до приемных пунктов. В простейшем случае достаточно иметь два приемных пункта.

Геометрия системы иллюстрируется на рисунке 1.1, местоположение источника соответствует точке пересечения двух плоскостей и поверхности гиперboloида.

Дальность до цели от первичного пункта рассчитывается по измеренным координатам.

$$r_1 = \frac{b^2 - \Delta r^2}{2(b \cos \varepsilon \cos \beta - \Delta r)} \quad (1.1)$$

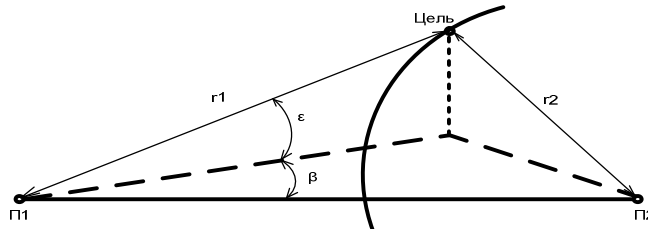


Рисунок 1.1 Угломерный – разностно – дальномерный метод локации

Здесь углы  $\beta$  и  $\varepsilon$  характеризует азимут и угол места источника излучения относительно первого пункта,  $\Delta r$  – разность расстояний от цели до пунктов приема.

Дальность действия пассивных РЛС при резко контрастных объектах может превосходить дальность действия активных (излучающих) РЛС. Точности измерения угловых координат пассивными и активными РЛС примерно одинаковы, точность определения дальности у пассивных РЛС, как правило значительно ниже.

## 2 Имитационное моделирование алгоритмов вторичной обработки РЛИ в сферической системе координат

Исходными данными для математического моделирования являются: априорная (доопытная) матрица ошибок оценки параметров вектора состояния  $C_{k/k-1}^{-1}$ ; координаты начала завязки траектории сопровождаемого объекта  $(r_0, \beta_0, \varepsilon_0)$ . На основе анализа допустимых параметров движения объекта и принятых в данной работе тактико-технических характеристик радиолокационных станций число шагов фильтрации  $k$  оценок координат объекта было выбрано равным 30. Формируется детерминированная траектория объекта в декартовой системе координат без учета шумов моделей движения и шумов измерения. С точки зрения формирования механизмов формирования траектории движения сопровождаемого объекта необходимо отметить, что траекторию можно задавать с помощью математической модели, описывающей физическую модель движения материальной точки. В противном случае, необходимо произвести эксперимент и создать траекторию движения на основе измерений координат объекта

После получения траектории движения объекта  $f(x, y, z)$  в декартовой системе координат, необходимо произвести переход от декартовых координат в сферические  $f(r, \beta, \varepsilon)$ . Реальная траектория движения цели в воздушном пространстве моделировалась путем добавления флуктуационных шумов модели движения цели в турбулентной атмосфере к невозмущенной траектории движения постановщика активных помех.

Далее необходимо рассчитать вектор первичных измерений, в который кроме шумов моделей движения необходимо добавить шумы модели измерения с дисперсиями, соответствующими дисперсиям потенциального оценивая первичных измерений  $\sigma_r, \sigma_\beta, \nu_\varepsilon$ . Закон распределения шумов измерения использовался типа гауссовского шума с нулевым средним значением.

Определяются начальные условия работы фильтра Калмана на первых шагах фильтрации. Следует подчеркнуть, что в реальных условиях работы радиолокационной станции отсутствуют априорные сведения о начальном значении вектора состояния лоцируемой цели. Логично вытекает из этого и то, что матрица дисперсий вектора состояния в начальный момент тоже не определена. После того, как цель будет обнаружена, начальное значение вектора состояния сопровождаемой цели определяется по результатам измерений радиолокационной станции. На первом шаге измерения по полученным данным можно определить только координаты, поэтому для определения скорости их изменения необходимо получить еще хотя бы одно измерение координат сопровождаемой цели. Полный вектор состояния для структуры фильтра с упрощенным вектором состояния можно получить при наличии, как минимум, двух оценок вектора первичных измерений координат цели, полученных в разные моменты времени. Чтобы получить полный вектор состояния для структуры фильтра с расширенным вектором состояния, необходимо оценить также ускорение, которое можно оценить как отношение разности оценок скоростей на текущем и предыдущем такте измерения к периоду поступления информации

$$a_k = \frac{v_k - v_{k-1}}{T} \quad (2.1)$$

Результатом всех проделанных операций является вычисление оценки вектора состояния объекта и соответствующей ей корреляционной матрицы ошибок измерения согласно описанным алгоритмам калмановской фильтрации.

Для подтверждения эффективности применения синтезированных алгоритмов в РЛ системах проведем количественный анализ результатов обработки координатной информации для предложенной системы. Наиболее эффективным в данной ситуации является математическое моделирование, так как натурные эксперименты дороги и затруднительны на данной стадии разработки. Математическое моделирование проведено с использованием пакета прикладных программ Matlab.

### **2.1 Фильтрация оценок дальности в сферической системе координат**

Наиболее важные результаты исследований заключаются в анализе эффективности применения алгоритмов калмановской фильтрации в сферической системе координат с целью повышения точности оценивания координат сопровождаемого объекта.

### **2.2 Особенности работы фильтра Калмана в установившемся режиме и при сопровождении маневрирующего объекта**

Как известно, установившийся режим работы фильтра Калмана наступает к 7-10 шагу фильтрации. Далее СКО оценивания не уменьшается, это обусловлено матрицей дискретного маневра  $Q$ , которая задает полосу пропускания фильтра Калмана и, соответственно, нижний порог матричного коэффициента усиления. Если значение элементов матрицы  $Q$  задать слишком малым, то на интервале установившегося режима работы фильтра Калмана возможно наблюдать расходящийся процесс фильтрации. Величина полосы пропускания задается максимальным возможным ускорением и вероятностью маневрирования. В работе было проведено исследование, заключающегося в выборе параметра  $a_{\max}$  для прямолинейного равномерного движения объекта, величина которого позволяет получить максимальные точностные характеристики фильтров сопровождения. Кроме высокой точности оценивания необходимо обеспечить высокую достоверность выдаваемых фильтрами оценок на различных направлениях. Поэтому была выбрана траектория равномерного прямолинейного движения вдоль координатной оси (кривая 2), изображенная на рисунке 2.2, так как в данном направлении все сферические координаты имеют нелинейный характер изменения.

На рисунке 2.2 представлены зависимости СКО и ошибок оценивания при малых значениях параметра  $a_{\max}$  матрицы дискретного маневра  $Q$ . Из анализа кривых следует, что после того, как наступил установившийся режим работы фильтра Калмана, происходит увеличение СКО и ошибок оценивания. Это объясняется тем, что слишком малое значение  $a_{\max}$  соответствует малому значению матричного коэффициента усиления фильтра Калмана и алгоритм обработки, практически полностью доверяя своему прогнозу, не принимает во внимание текущего измерения, что и приводит к нежелательным последствиям.

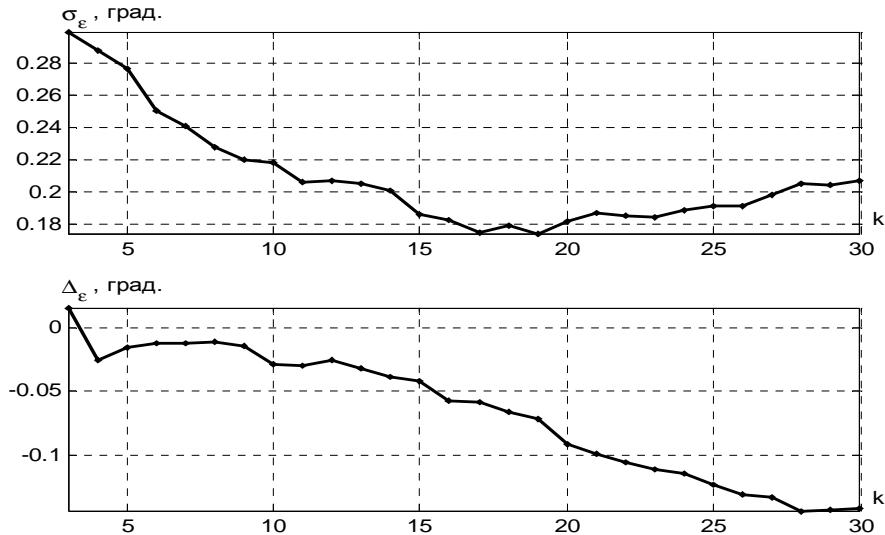


Рисунок 2 – Зависимость СКО  $\sigma_\epsilon$  и ошибок оценивания координаты угла места  $\Delta_\epsilon$  от номера шага фильтрации  $k$

### 2.3 Практическая реализация алгоритмов вторичной обработки при сопровождении неманеврирующего объекта.

При рассмотрении особенностей построения фильтров сопровождения пространственных координат объекта в сферической системе координат, следует остановиться на детальном анализе следующих алгоритмов:

- алгоритм сопровождения объекта на основе УФК-фильтра;
- алгоритм сопровождения объекта на основе классического РФК-фильтра, содержащего в своей структуре матрицу динамического перехода  $B$ , представленную в виде (2.4);

При проведении исследований полагали, что исходные данные для всех алгоритмов сопровождения одинаковые. Координаты начала траектории в декартовой системе координат соответствуют следующим значениям:  $X_0 = 300$  км,  $Y_0 = 300$  км,  $Z_0 = 10$  км. Скорость движения объекта составляет 1000 км/ч. Ошибки первичных измерений составляют 300 метров для канала дальности и 30 минут для угловых координат. Оценить качество фильтрации и сходимость протекающих процессов можно по истечении 25-30 шагов фильтрации. Проведем исследование алгоритмов фильтрации оценок пространственных координат в сферической системе координат для бистатической РЛС при различных траекториях движения объекта. Главным критерием качества фильтрации является минимизация СКО оценок вектора состояния объекта от номера шага фильтрации  $k$ .

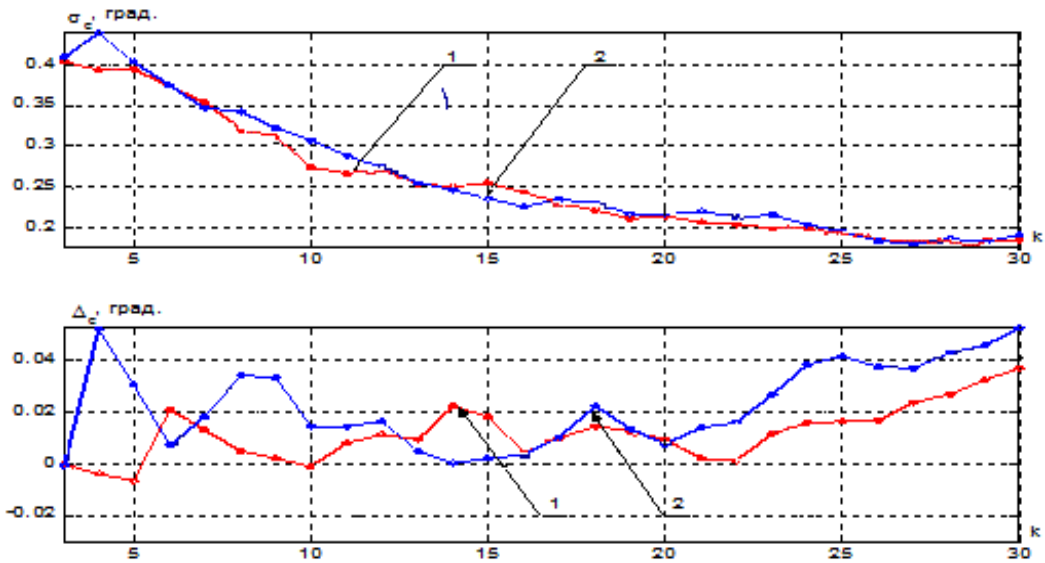


Рисунок 2.4 - Зависимость СКО  $\sigma_\epsilon$  и ошибок оценивания угла места  $\Delta_\epsilon$

На рисунке 2.4 представлены зависимость СКО и ошибки оценок угла места от номера шага фильтрации  $k$ . Анализируя полученные результаты можно отметить, что алгоритмы фильтрации оценок угла места с помощью УФК-фильтра (кривая 1), РФК-фильтра с использованием классической матрицы прогноза В (кривая 2), были получены точностные характеристики. Среднеквадратическая ошибка к десятому шагу фильтрации уменьшается в 1,7 раз, а к двадцатому - в 2,2 раза. Ошибки оценивания угла места лоцируемого объекта для всех исследуемых алгоритмов сходятся к нулю, что говорит об устойчивой работе алгоритмов.