

УДК 621.396.96

ВЛИЯНИЕ ОЦЕНОК ЧАСТОТЫ ДОПЛЕРА ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА НА ФИЛЬТРАЦИЮ ПОЛЯРНЫХ КООРДИНАТ НЕМАНЕВРИРУЮЩЕГО ОБЪЕКТА

С.А. ГОРШКОВ, В.Н. ЗАВИЖЕНЕЦ

Военная академия Республики Беларусь
Минск, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 9 ноября 2012

Проведен анализ потенциальных возможностей обзорных РЛС, связанных с использованием канала оценивания частоты Доплера отраженных от цели сигналов с точки зрения фильтрации координат и параметров движения целей в полярной системе.

Ключевые слова: фильтрация, метод наименьших квадратов, фильтрация по конечной выборке, неоднозначная оценка частоты Доплера, оценка радиальной скорости.

Введение

Одним из этапов обработки отраженного сигнала (ОС) в радиолокационных системах является этап его междупериодного накопления [1, 2]. Такое накопление может быть когерентным (КН) или некогерентным (НН). Если рассматривать этап накопления слабых сигналов только с точки зрения повышения условной вероятности правильного обнаружения целей, то НН в этом смысле проигрывает КН. Возникающие при этом потери выражаются в снижении условной вероятности правильного обнаружения слабых сигналов и количественно определены в известных работах [1–3] и других авторов.

Исходя из данных, приведенных в этих работах, энергетические потери, возникающие вследствие перехода от КН к НН, невелики (единицы дБ) при малом числе импульсов в пачке ОС и постепенно увеличиваются при росте числа накапливаемых импульсов [2, 3].

Обычно для импульсной радиолокационной станции (РЛС) обзора число импульсов ОС в пачке невелико (в среднем 10–15 импульсов). Поэтому при построении аппаратуры обработки ОС в таких РЛС этап КН заменяют, как правило, некогерентным накоплением. Тем не менее, есть ряд РЛС с достаточно «богатой» пачкой отраженных импульсов, число которых составляет несколько десятков или даже сотен. Однако в таких РЛС результаты КН используются только для повышения вероятности правильного обнаружения. Хотя задачами обнаружения отнюдь не исчерпывается весь перечень задач, для которых могут быть использованы результаты КН. Их насчитывается еще как минимум две: селекция скоростных целей на фоне дискретных мешающих отражений (ДМО) и повышение точности оценивания координат и других параметров траекторий воздушных объектов. Если первому из вопросов посвящен ряд работ в открытой литературе [4–12], то второй вопрос активно не обсуждался, хотя в практику постепенно внедряется все большее число РЛС обзора обладающих технической возможностью КН ОС.

Основная причина того, что КН ОС в РЛС обзора можно рассматривать как правило, а как исключение является проблема неоднозначности измерения частоты Доплера и соответственно радиальной скорости цели, при обязательно однозначной оценке наклонной дальности. При этом в ряде публикаций теоретически обосновывается практическая возможность устранения возникающих неоднозначностей различными способами [5–9]. В этой связи возникает вопрос о необходимости анализа точностных характеристик радиолокатора обзора различных

диапазонов длин волн при использовании вычисляемых различным образом оценок радиальной скорости через оценки частоты Доплера воздушных объектов.

Цель настоящей статьи заключается в анализе точностных характеристик РЛС обзора, использующих оценки доплеровской частоты для фильтрации параметров прямолинейных траекторий в полярной системе координат на основе дискретных линейных фильтров первого порядка [4].

Поскольку потенциальные точностные характеристики фильтров Винера и Калмана одинаковы [10], в дальнейшем мы будем анализировать работу фильтров по конечной выборке.

Постановка задачи

Будем считать, что имеются результаты наблюдений РЛС кругового обзора. В результате наблюдения входят разовые оценки за k обзоров: по дальности $\hat{\mathbf{r}}_{f_k} = \|\hat{r}_{f_1}, \hat{r}_{f_2}, \dots, \hat{r}_{f_k}\|^T$; по азимуту $\hat{\beta}_{f_k} = \|\hat{\beta}_{f_1}, \hat{\beta}_{f_2}, \dots, \hat{\beta}_{f_k}\|^T$ и радиальной скорости $\hat{\mathbf{v}}_{r_k} = \|\hat{v}_{r_1}, \hat{v}_{r_2}, \dots, \hat{v}_{r_k}\|^T$, полученные в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_k . При этом предполагается, что измерения производятся в равноотстоящие моменты времени с интервалом обновления данных $T_{\text{обз}} = t_{i+1} - t_i \quad i = 1 \dots k - 1$. Дисперсии ошибок измерения дальности, азимута и радиальной скорости не зависят друг от друга и от шага измерения (случай равноточного измерения) и равны, соответственно, σ_r^2 , σ_β^2 и $\sigma_{v_r}^2$.

Предположим также, что оценка радиальной скорости, полученная по результатам восстановления однозначной частоты Доплера, достоверна. Влияние оценок угла места на результаты оценок вектора состояния не рассматриваются.

В статье проведен анализ влияния оценок радиальной скорости на точность фильтрации вектора состояния α , включающего в себя полярные координаты r, β и их первые производные $\alpha_{r\beta} = \|r \quad V_r \quad \beta \quad V_\beta\|^T$, по конечной выборке. Анализ влияния использования оценок V_r в работе проводится методом математического моделирования результатов фильтрации вектора наблюдения, состоящего из r, β и r, β, V_r .

Обобщенное уравнение дискретной квазилинейной фильтрации по конечной выборке

В общем случае уравнение в векторно-матричной форме [11] определяет результирующую оценку вектора состояния α на момент окончания выборки t_k и результирующую матрицу точности его оценки \mathbf{Q} :

$$\hat{\alpha} = \mathbf{P}\mathbf{H}^T \Theta_0 \hat{\Theta}, \quad (1)$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{R}^{-1} = \mathbf{H}^T \mathbf{Q}_0 \mathbf{H}, \quad (2)$$

где $\hat{\Theta}$ – вектор наблюдаемых параметров, включающий все оценки наблюдения с первого по k -й контакт с объектом; \mathbf{Q}_0 – матрица точности наблюдения, размерностью $k \times k$ (диагональная для случая независимых результатов наблюдения); статическая матрица пересчета \mathbf{H} определяет векторное уравнение преобразования Θ в α ; \mathbf{Q} – результирующая матрица точности вектора состояния на момент времени t_k .

Для определения матрицы \mathbf{H} используют вектор-функцию \mathbf{h} такую, что $\Theta = \mathbf{h} \alpha$. В этом случае статическая матрица пересчета \mathbf{H} изменений вектора состояния α размерностью m в изменения вектора наблюдаемых параметров равна:

$$\mathbf{H} = \left\| \frac{\partial h^i}{\partial \alpha^{(j)}} \right\| \text{ для } i = 1 \dots k \text{ и } j = 1 \dots m, \quad (3)$$

где $\partial h^i / \partial \alpha^{(j)}$ – частная производная i -ой строки вектор-функции \mathbf{h} по j -му элементу вектора состояния.

Фильтрация вектора состояния в полярной системе координат

Фильтрация по методу наименьших квадратов (по конечной выборке) рассматривалась ранее в [11, 12].

Алгоритм дискретной квазилинейной фильтрации при наблюдении r и β . Ввиду независимости полученных оценок дальности и азимута результирующую оценку вектора состояния α , включающую в себя r V_r β V_β можно рассматривать как результат оценивания двух независимых векторов состояния [11]: $\alpha_r = \| r \ V_r \|^T$ и $\alpha_\beta = \| \beta \ V_\beta \|^T$. Таким образом $\alpha = \| \alpha_r \ \alpha_\beta \|^T$.

Для рассматриваемого случая алгоритмы фильтрации векторов α_r и α_β будут одинаковыми. Рассмотрим более подробно дискретную квазилинейную фильтрацию по конечной выборке на примере оценки вектора α_r , после чего обобщим результат на вектор α_β .

Вектор $\hat{\Theta}_k$ при наблюдении дальностей включает в себя разовые оценки дальностей с первого по k -й обзор $\hat{\Theta}_k = \| \hat{r}_{f_1} \ \hat{r}_{f_2} \ \dots \ \hat{r}_{f_k} \|^T$ с диагональной матрицей точности

$$\mathbf{Q}_{\Theta k(i,j)} = \begin{cases} 1/\sigma_r^2, & \text{для } i = j \\ 0, & \text{для } i \neq j \end{cases}, \text{ где } i=1\dots k \ j=1\dots k.$$

Определим динамическую матрицу пересчета малых приращений вектора состояния в приращении вектора наблюдаемых параметров путем частного дифференцирования. Матрица \mathbf{H} для данного случая находится через выражение (3), а ее конечный вид приводился в [11]:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & -\mathbf{C} - 1 \mathcal{T}_{\text{обз}} \\ 1 & -\mathbf{C} - 2 \mathcal{T}_{\text{обз}} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -\mathbf{C} - k \mathcal{T}_{\text{обз}} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Подставив полученные выше значения в выражения (1), (2) и произведя элементарные преобразования, получим окончательные формулы [11], для оценки параметров линейной траектории при равнодискретных и равноточных измерениях:

$$\alpha_r = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^k \frac{6i - 2k - 2}{k(k+1)} \hat{r}_{f_i} \\ \sum_{i=1}^k \frac{12i - 6k - 6}{T_{\text{обз}} k(k^2 - 1)} \hat{r}_{f_i} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Матрица точности \mathbf{Q}_{rk} имеет следующий вид:

$$\mathbf{Q}_{rk}^{-1} = \mathbf{R}_{rk} = \sigma_r^2 \begin{pmatrix} \frac{2(\mathbf{C}k - 1)}{k(\mathbf{C} + 1)} & \frac{6}{T_{\text{обз}} k(\mathbf{C} + 1)} \\ \frac{6}{T_{\text{обз}} k(\mathbf{C} + 1)} & \frac{12}{T_{\text{обз}}^2 k(\mathbf{C}^2 - 1)} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Выражения для фильтрации азимута α_β и корреляционная матрица точности азимута $\mathbf{Q}_{\beta k}$ определяются аналогичными выражениями с учетом соответствующей замены \hat{r}_{f_i} на $\hat{\beta}_f$ и σ_r^2 на σ_β^2 .

Анализ выражения (6) показывает, что значения элементов матрицы зависят только от числа измерений. Дисперсия ошибки оценки сглаженной координаты, например, по трем равноточным измерениям ($k=3$) составляет 5/6 дисперсии погрешности одиночного измерения. Дисперсия ошибки оценки приращения координаты из-за неточной оценки скорости составляет половину дисперсии одиночного измерения, а ковариационный момент связи между ошибками оценки координаты и ее приращения равен половине дисперсии одиночного измерения координаты [11].

Оптимальная линейная фильтрация параметров траектории по фиксированной выборке оценок дальности и радиальной скорости. Дополнение вектора наблюдаемых параметров $\hat{\Theta}$ оценками радиальной скорости приведет к увеличению матрицы-столбца до $2k$ элементов:

$$\hat{\Theta} = \left\| \hat{r}_{f_1} \quad \dots \quad \hat{r}_{f_k} \quad \hat{V}_{r_{f_1}} \quad \dots \quad \hat{V}_{r_{f_k}} \right\|^T. \quad (7)$$

Выводы значений матрицы пересчета \mathbf{H}_k и матрицы точности входных данных $\mathbf{Q}_{\Theta k}$ для данного случая рассмотрены в [11].

Явные выражения для оценок дальности и радиальной скорости имеют вид [11]:

$$\hat{\alpha} = \left\| \begin{array}{l} \frac{2k-1}{k} \frac{k^2-1+12C_{\Theta}}{k^2-1+12C_{\Theta}} \left[\sum_{i=1}^k \left(3i-k-1 + \frac{6C_{\Theta}}{k-1} \right) \hat{r}_{f_i} + 3C_{\Theta} \sum_{i=1}^k T_{\text{об3}} \hat{V}_{r_{f_i}} \right] \\ \frac{6}{T_{\text{об3}} k} \frac{k^2-1+12C_{\Theta}}{k^2-1+12C_{\Theta}} \left[\sum_{i=1}^k 2i-k-1 \hat{r}_{f_i} + 2C_{\Theta} \sum_{i=1}^k T_{\text{об3}} \hat{V}_{r_{f_i}} \right] \end{array} \right\|, \quad (8)$$

где $C_{\Theta} = \sigma_r^2 / T_{\text{об3}}^2 \sigma_{V_r}^2$ – безразмерный коэффициент, который принимает только положительные значения [11]. Величина его численно характеризует отношение дисперсии ошибки оценивания дальности к квадрату ее приращения за $T_{\text{об3}}$ вследствие ошибочного оценивания радиальной скорости.

Можно показать, что с учетом приведенных выше данных корреляционная матрица ошибок фильтрации для произвольного k числа отсчетов (в отличие от [11, с. 227], где результат приведен для конечной выборки из двух элементов), равна:

$$\mathbf{R}_{rVrk} = \sigma_r^2 \left\| \begin{array}{cc} \frac{2}{k} \frac{2k-1}{k^2-1+12C_{\Theta}} \frac{k-1+6C_{\Theta}}{k^2-1+12C_{\Theta}} & \frac{6}{T_{\text{об3}} k} \frac{k-1}{k^2-1+12C_{\Theta}} \\ \frac{6}{T_{\text{об3}} k} \frac{k-1}{k^2-1+12C_{\Theta}} & \frac{12}{T_{\text{об3}}^2 k} \frac{k^2-1+12C_{\Theta}}{k^2-1+12C_{\Theta}} \end{array} \right\|. \quad (9)$$

Коэффициент C_{Θ} принимает значения от 0 (отсутствие оценок радиальной скорости) до ∞ (при $T_{\text{об3}} \sigma_{V_r} \rightarrow 0$). Значение $C_{\Theta} = 1$ охватывает случаи равенства ошибок оценивания дальности σ_r произведению $T_{\text{об3}} \sigma_{V_r}$. Уменьшение коэффициента C_{Θ} (особенно $C_{\Theta} < 1$) свидетельствуют о небольшом вкладе оценок радиальной скорости с точки зрения фильтрации координат целей. И наоборот, значения $C_{\Theta} \gg 1$ свидетельствуют о существенном вкладе оценок \hat{V}_r в точность фильтрации траекторных параметров объекта.

Анализ влияния оценок радиальной скорости на точностные характеристики двухкоординатных РЛС кругового обзора при использовании дискретных квазилинейных фильтров первого порядка

Зависимости нормированных элементов корреляционной матрицы ошибок оценки параметров линейной траектории от числа измерений, рассчитанные в соответствии с выражением (9), представлены на рис. 1.

Из графиков следует, что использование оценок радиальной скорости уменьшает значение ошибки фильтрации как дальности (рис. 1, а), так и радиальной скорости (рис. 1, б).

Даже при небольших значениях коэффициента C_{\ominus} и фиксированной длине выборки отличие ошибок фильтрации (Δ) существенно. Таким образом, заданная точность фильтрации дальности может быть достигнута при длине выборки на Δk отсчетов меньшей. Увеличение значения коэффициента C_{\ominus} увеличивает скорость сходимости ошибок фильтрации дальности. При этом существенное увеличение коэффициента C_{\ominus} (например, свыше 64) теряет свою эффективность в целом. Использование же оценок радиальной скорости на этапе захвата (3–7 обзоров) не теряет своей эффективности и при $C_{\ominus} = 4$.

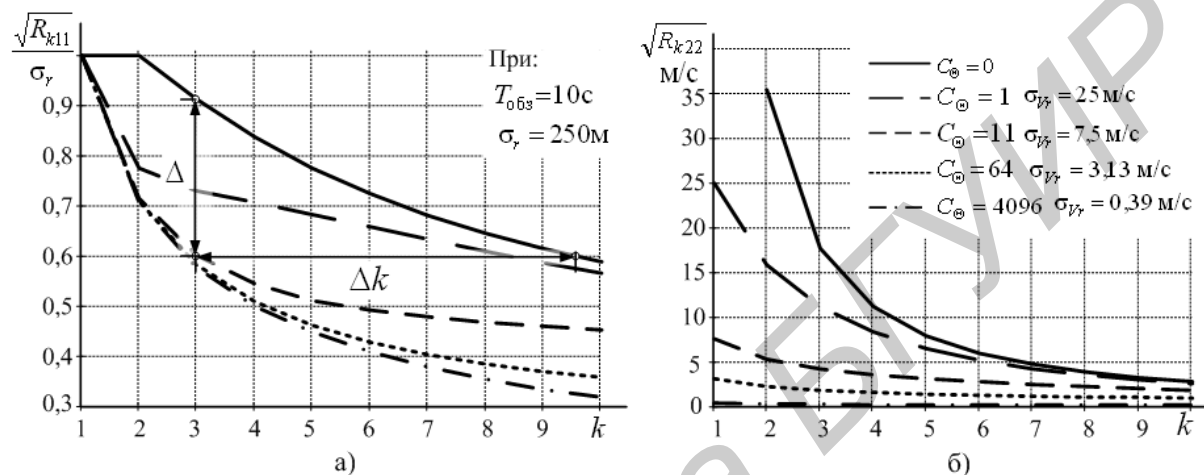


Рис. 1. Зависимость ошибок фильтрации от длины выборки и значения коэффициента C_{\ominus} :
а – нормированной ошибки дальности; б – СКО ошибки радиальной скорости.

Использование оценок радиальной скорости по частоте Доплера повышает также скорость сходимости ошибок фильтрации данного параметра. Важно также и то, что оценки радиальной скорости вводятся в алгоритм с первого шага фильтрации. Это особенно важно с точки зрения задачи целеуказания внешним потребителям информации.

Заключение

В статье впервые получено выражение для корреляционной матрицы ошибок фильтрации дальности и радиальной скорости для произвольного шага наблюдения. Используемый коэффициент C_{\ominus} характеризует отношение квадрата ошибки прямого разового оценивания радиальной дальности и косвенно (через оценки радиальной скорости) оценивания ошибки ее приращения за период обзора.

Использование разовых оценок радиальной скорости, получаемых за счет оценивания частоты Доплера, позволяет для радиолокаторов обзора:

- существенно повысить скорость сходимости ошибок фильтрации как радиальной дальности, так и радиальной скорости;
- получать уже на первом шаге наблюдения оценки радиальной скорости цели, что может оказаться особенно важным с точки зрения задачи целеуказания внешним потребителям траекторной информации.

Следует отметить, что в данной статье рассмотрены лишь вопросы влияния оценок частоты Доплера в РЛС обзора лишь на показатели фильтрации:

- в полярной системе координат;
- только для фильтров первого порядка.

Анализ ошибок фильтрации в прямоугольной системе координат и с использованием фильтров второго порядка будет проведен в последующих работах.

DOPPLER FREQUENCY OF REFLECTED SIGNAL ESTIMATION EFFECT ON POLAR COORDINATES OF NOT MANEUVERING TARGET FILTRATION

S.A. GORSHKOV, V.A. ZAVIZHENETS

Abstract

The analysis of surveillance radar capabilities, connected with polar coordinates state estimation using Doppler frequency measurement is considered.

Список литературы

1. *Охрименко А.Е.* Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч.1. Основы радиолокации. М., 1983.
2. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Ширмана. М., 2007.
3. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Скольника. Том 1. Основы радиолокации. М., 1976.
4. *Горшков С.А., Завиженец В.Н., Солонар А.С. и др.* / Сб. тез. докл.10-й Юбилейной межд. науч. конф. «Теория и техника передачи, приема и обработки информации». Часть 1. Украина, Харьков–Туапсе, 28 сентября– 1 октября 2004 г. С. 193–194.
5. *Горшков С.А., Завиженец В.Н.* // Вест. Воен. акад. Респ. Бел. 2006. №3. С. 48–52.
6. *Горшков С.А., Завиженец В.Н.* // Докл. БГУИР. 2006. №3. С. 5–11.
7. Патент РБ № 12317. Способ измерения радиальной скорости импульсной радиолокационной станцией / Горшков С.А., Завиженец В.Н.
8. *Горшков С.А., Крикливый М.В.* // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2005. № 6. С. 3–7.
9. *Леховицкий Д.И., Рачков Д.С., Семеняка А.В. и др.* // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. №3. С. 25–45.
10. *Охрименко А.Е.* Основы обработки и передачи информации. Минск, 1990.
11. *Кузьмин С.З.* Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М., 1974.
12. *Фарина А., Студер Ф.* Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. М., 1993.