

УДК 621.396.96

А.В. Просов

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ КООРДИНАТ ЦЕЛИ ПРИ ОБЪЕДИНЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАЗДЕЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ ОТ РАЗНЕСЕННЫХ РЛС

*Проанализированы результаты объединения данных раздельной фильтрации параметров траектории цели от разнесенных радиолокационных станций. Показано, что для повышения точности оценивания координат цели при объединении результатов раздельной фильтрации параметров траектории необходимо учитывать корреляционную связь между оценками прямоугольных координат цели.*

*фильтрация параметров траектории цели, объединение данных, РЛС, корреляционная связь*

### Постановка проблемы и анализ литературы

В разнесенной радиолокационной системе конечным результатом обычно является получение вектора состояния объекта и построение траектории. При этом возможно осуществлять объединение единичных замеров "первичных координат" в результирующую траекторию цели или объединение траекторий цели, построенных в разных позициях, в результирующую траекторию [1 – 3].

При обработке радиолокационных данных в обзорной радиолокационной станции (РЛС), измеряющей полярные координаты цели, обычно рекуррентной фильтрации подвергаются прямоугольные координаты объекта. Поскольку связь между этими системами координат является нелинейной, то целесообразно использовать алгоритмы оптимальной нелинейной фильтрации [4]. Однако эти нелинейные алгоритмы сложны в реализации. Поэтому на практике находят применение решения, основанные на более полном использовании подходов и структур для линейных фильтров Калмана [2, 5, 6]. К числу таких подходов относится так называемая упрощенная независимая фильтрация прямоугольных координат цели, полученная на основе расширенного фильтра Калмана [2]. При таком сглаживании измеренные координаты (например, радиальная дальность и азимут) пересчитываются в прямоугольную систему координат, и текущие косвенные оценки считаются независимыми. Далее с использованием линейных калмановских алгоритмов каждая прямоугольная координата фильтруется независимо в соответствии с принятой моделью движения цели.

При одновременном наблюдении цели в разнесенной радиолокационной системе возникает задача построения траектории цели по результатам фильтрации координат цели в каждой из РЛС и выдачи информации конечному потребителю, например, в полярных координатах. Однако для принятого допущения о независимости результирующих оценок

прямоугольных координат цели ошибки объединения данных могут быть существенными.

**Цель статьи** – разработать метод повышения точности оценивания координат цели при объединении результатов раздельной фильтрации параметров траектории от разнесенных РЛС.

### Изложение основного материала

Рассмотрим разнесенную радиолокационную систему из двух однопозиционных РЛС с базой  $B_0$  и азимутом базы  $\beta_0$  относительно РЛС № 1. Пусть в обеих РЛС с периодом обзора  $T_0$  проводится независимое равноточное измерение полярных координат цели (дальности  $r_k$  и азимута  $\beta_k$ ,  $k=1,2$  – номер РЛС), которые на  $n$ -м цикле обновления информации образуют в каждой РЛС вектора наблюдения  $\hat{\theta}_{kn}^T = (\hat{r}_{kn}, \hat{\beta}_{kn})$ , где  $T$  – знак транспонирования. Ошибки этих измерений имеют гауссово распределение с нулевым средним и матрицами точности  $C_{\theta k} = \text{diag}(1/\sigma_{rk}^2, 1/\sigma_{\beta k}^2)$ . Полагаем, что ошибки топогеодезической привязки источников информации пренебрежимо малы по сравнению с ошибками измерения координат целей.

Каждая пара измеренных координат  $\hat{r}_{kn}$  и  $\hat{\beta}_{kn}$  пересчитывается в прямоугольную систему

$$\hat{x}_{kn} = \hat{r}_{kn} \sin(\hat{\beta}_{kn}), \quad \hat{y}_{kn} = \hat{r}_{kn} \cos(\hat{\beta}_{kn}),$$

где  $\hat{x}_{kn}$  и  $\hat{y}_{kn}$  – текущие косвенные оценки. Они образуют вектора  $\hat{\chi}_{kn}^T = (\hat{x}_{kn}, \hat{y}_{kn})$  с матрицами точности [7]:  $C_{\chi k} = H_{1k}^T C_{\theta k} H_{1k}$ , где

$H_{1k} = \left\| \frac{\partial h_{1k}^{(m)}(\gamma_{kn})}{\partial \gamma_{kn}^{(j)}} \right\|_{\gamma_{kn} = \hat{\gamma}_{kn}}$ , матрица частных производных функций вектора наблюдаемых параметров  $\mathbf{h}_1(\gamma)$  по всем составляющим в опорной точке оценки  $\gamma = \hat{\gamma}$ ,  $m=1,2, j=1,2$ .

Обращая матрицу  $C_{\gamma k}$ , находят корреляционную матрицу ошибок  $C_{\gamma k}^{-1}$ , диагональные элементы которой характеризуют дисперсии  $\sigma_{\hat{x}_n}^2$  и  $\sigma_{\hat{y}_n}^2$  оценок координат  $\hat{x}_n$  и  $\hat{y}_n$ , а недиагональные элементы  $C_{\gamma 12}^{-1}$ ,  $C_{\gamma 21}^{-1}$  – их корреляционные моменты. Последние, в общем случае, не равны нулю.

Для снижения вычислительных затрат в РЛС обычно осуществляется отдельная фильтрация [2], при которой текущие косвенные оценки  $\hat{x}_{kn}$ ,  $\hat{y}_{kn}$  с дисперсиями

$$\sigma_{\hat{x}_{kn}}^2 = C_{\gamma 11kn}^{-1} = \sin^2(\hat{\beta}_{kn})\sigma_{rk}^2 + \hat{r}_{kn}^2 \cos^2(\hat{\beta}_{kn})\sigma_{\beta k}^2,$$

$$\sigma_{\hat{y}_{kn}}^2 = C_{\gamma 22kn}^{-1} = \cos^2(\hat{\beta}_{kn})\sigma_{rk}^2 + \hat{r}_{kn}^2 \sin^2(\hat{\beta}_{kn})\sigma_{\beta k}^2,$$

соответственно считаются независимыми. Далее с использованием линейных калмановских алгоритмов каждая прямоугольная координата фильтруется независимо в соответствии с моделью прямолинейного и равномерного движения цели [2]. В процессе такой фильтрации независимо формируются вектора состояния  $\hat{\alpha}_{xkn}^T = (\hat{x}_{kn}^f \quad \hat{\dot{x}}_{kn}^f)$  и  $\hat{\alpha}_{ykn}^T = (\hat{y}_{kn}^f \quad \hat{\dot{y}}_{kn}^f)$  с диагональной матрицей точности  $C_{\alpha k}$  и обратной ей

$$C_{\alpha k}^{-1} = \begin{pmatrix} c_{11k} & c_{12k} \\ c_{21k} & c_{22k} \end{pmatrix},$$

где  $c_{11k}$  и  $c_{22k}$  – дисперсии ошибок сглаженных оценок координат  $x$  и  $y$  соответственно, недиагональные элементы матрицы –  $c_{12k}$  и  $c_{21k}$  определяют корреляционный момент сглаженных оценок  $\hat{x}_{kn}^f$  и  $\hat{y}_{kn}^f$ .

Пусть объединение данных результатов траекторной обработки от разнесенных источников радиолокационной информации осуществляется в РЛС № 1. Тогда в декартовой системе координат относительно центра обработки данных результирующая оценка вектора состояния цели на  $n$ -м цикле  $\hat{\alpha}_{pn}^T = (\hat{x}_{pn}^f \quad \hat{\dot{x}}_{pn}^f \quad \hat{y}_{pn}^f \quad \hat{\dot{y}}_{pn}^f)$  характеризуется матрицей точности [1, 7]:

$$C_{\alpha p} = C_{\alpha 1} + C_{\alpha 2}.$$

При выдаче информации потребителю или формированию стробов осуществляется переход к вектору состояния  $\gamma$  в полярной системе координат с матрицей ошибок:

$$C_{\gamma}^{-1} = \left( H_p^T C_{\alpha p} H_p \right)^{-1},$$

где матрица  $H_p$  – матрица пересчета изменений результирующего вектора состояний в полярной системе координат в изменения результирующего вектора состояния в декартовой системе координат.

Диагональные элементы матрицы  $C_{\gamma 11}^{-1}$ ,  $C_{\gamma 22}^{-1}$  характеризуют ошибки по радиальной дальности и азимуту соответственно.

При использовании метода отдельной фильтрации параметров траектории цели матрицы  $C_{\alpha 1}$ ,  $C_{\alpha 2}$  и, соответственно,  $C_{\alpha p}$  являются диагональными вследствие отказа учета корреляционных связей между косвенными ошибками измерений.

При отдельной фильтрации косвенных оценок  $\hat{x}_n$ ,  $\hat{y}_n$ , рассматривая недиагональные элементы матриц  $C_{\alpha 1}$  и  $C_{\alpha 2}$ , на  $n$ -м цикле можно показать, что получить корреляционный момент между оценками прямоугольных координат по результатам упрощенной фильтрации можно по формуле [8]:

$$M(\tilde{x}_n \tilde{y}_n) = \left( K_{xn-1} K_{yn-1} M(\tilde{x}_{n-1}^H \tilde{y}_{n-1}^H) \right) \times \\ \times \left( 1 - K_{yn} - K_{xn} + K_{xn} K_{yn} \right) + K_{xn} K_{yn} M(\tilde{x}_n^H \tilde{y}_n^H),$$

где  $\tilde{x}_n^H = \hat{x}_n - m_{xn}$  – флуктуация случайных величин, полученная по результатам текущего косвенного оценивания;  $m_{xn}$ ,  $m_{yn}$  – МОЖ оцениваемых координат  $\hat{x}_n$ ,  $\hat{y}_n$  соответственно;  $K_{xn-1}$ ,  $K_{yn-1}$ ,  $K_{xn}$ ,  $K_{yn}$  – коэффициенты усиления невязки по координатам  $x$  и  $y$  на  $(n-1)$ -м и  $n$ -м шагах обновления информации;  $M(\tilde{x}_{n-1}^H \tilde{y}_{n-1}^H)$ ,  $M(\tilde{x}_n^H \tilde{y}_n^H)$  – корреляционные моменты ошибок косвенных измерений  $\hat{x}$  и  $\hat{y}$  на  $(n-1)$ -м и  $n$ -м циклах обновления информации.

Для отыскания корреляционных моментов ошибок косвенных измерений можно использовать оценку текущего значения корреляционного момента ошибок косвенных измерений [8, 9]. В этом случае  $\hat{M}(\tilde{x}_n^H \tilde{y}_n^H) \approx \hat{M}(\tilde{x}_{n-1}^H \tilde{y}_{n-1}^H) = \hat{\rho}_{xy} \sigma_{\hat{x}_n} \sigma_{\hat{y}_n}$ , где коэффициент корреляции  $\hat{\rho}_{xy}$  определяется выражением [7]:

$$\hat{\rho}_{xy} = \frac{-\hat{x}_n \hat{y}_n \left( \frac{1}{\sigma_{rk}^2} - \frac{1}{\hat{r}_n^2 \sigma_{\beta k}^2} \right)}{\sqrt{\left[ \frac{\hat{x}_n^2}{\sigma_{rk}^2} + \frac{\hat{y}_n^2}{\hat{r}_n^2 \sigma_{\beta k}^2} \right] \left[ \frac{\hat{x}_n^2}{\hat{r}_n^2 \sigma_{\beta k}^2} + \frac{\hat{y}_n^2}{\sigma_{rk}^2} \right]}}.$$

Таким образом, определив недиагональные элементы матриц  $C_{\alpha 1}$  и  $C_{\alpha 2}$  в центре объединения данных траекторной обработки (например, в РЛС № 1) предлагается восстановить значения корреляционных моментов матриц  $C_{\alpha 1}$  и  $C_{\alpha 2}$  без увеличения вычислительных затрат непосредственно при рекуррентной обработке данных радиолокационных измерений.

Рассмотрим физический смысл восстановления корреляционных связей.

При несмещенных оценках уравнение эллипса ошибок в каноническом виде в системе координат  $\tau$  и  $\beta$  имеет вид [10]:

$$\frac{1}{\sigma_r^2} + \frac{1}{\sigma_\beta^2} = k^2,$$

где  $k$  – постоянная величина, определяющая размер эллипса ошибок.

В системе координат ХУ уравнение эллипса ошибок имеет вид [10]:

$$\frac{x^2}{\sigma_x^2} - 2\rho \frac{xy}{\sigma_x \sigma_y} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} = k^2,$$

где  $\rho$  – коэффициент корреляции ошибок по осям  $x$ ,  $y$ .

Отказ от учета корреляционной связи оценок прямоугольных координат цели приводит к тому, что оси симметрии эллипса ошибок первичных измерений становятся параллельными осям ОХ, ОУ.

При учете корреляционной связи значение полуосей эллипса ошибок в полярной системе координат имеют вид [10]:

$$\sigma_r^2 = \sigma_x^2 \sin^2(\beta) + \rho \sigma_x \sigma_y \sin(2\beta) + \sigma_y^2 \cos^2(\beta), \quad (1)$$

$$\sigma_\beta^2 = \sigma_x^2 \cos^2(\beta) - \rho \sigma_x \sigma_y \cos(2\beta) + \sigma_y^2 \sin^2(\beta). \quad (2)$$

Анализ выражений (1), (2) показывает, что для учета корреляционной связи при обратном переходе из декартовой системы в полярную систему координат необходимо рассчитать коэффициент корреляции  $\rho$ .

Для оценки полученного выигрыша в точности оценивания координат объекта при объединении результатов раздельной фильтрации параметров траектории цели от разнесенных радиолокационных станций за счет дополнительного учета корреляционной связи оценок прямоугольных координат цели были рассчитаны результирующие нормированные средне-квадратические ошибки (СКО) относительно первичных ошибок измерений по дальности и азимуту.

Пусть на расстоянии  $r = 150$  км и азимуте  $\beta \approx 45^\circ$  относительно РЛС № 1 захвачена цель на сопровождение. Цель движется прямолинейно и равномерно со скоростью  $V = 200$  м/с, сохраняя постоянный азимут движения относительно РЛС № 1. База разнесенной радиолокационной системы равна  $B = 30$  км, азимут базы  $b_0 = 90^\circ$  (азимут отсчитывается от направления на Север). Полагаем, что обе РЛС с периодом обзора  $T_0 = 10$  с обеспечивают измерение полярных координат цели  $\sigma_{rk} = 250$  м,  $\sigma_{\beta k} = 20'$ . В каждой из РЛС осуществляется квазиоптимальная фильтрация, раздельная фильтрация прямоугольных координат. Результаты траекторной обработки в РЛС № 2 передаются в РЛС № 1 и пересчитываются в единую полярную систему координат относительно РЛС № 1 в интересах выдачи координат цели потребителю. В РЛС № 1 осуществляется дополнительный упрощенный учет корреляционных связей сглаженных прямоугольных координат целей. Предполагаем, что цели взяты на сопровождение обеими РЛС одновременно. Пропуски целей и ложные тревоги учитывать не будем.

На рис. 1, 2 приведены графики зависимости результирующей нормированной СКО по дальности и азимуту, полученные по результатам расчетов на ЭВМ в зависимости от номера цикла сопровождения  $n$ . Кривая 1 соответствует результатам расчетов

с использованием метода квазиоптимальной фильтрации, кривая 2 соответствует раздельной фильтрации прямоугольных координат и кривая 3 соответствует раздельной фильтрации прямоугольных координат с дополнительным учетом корреляционных связей прямоугольных координат целей.

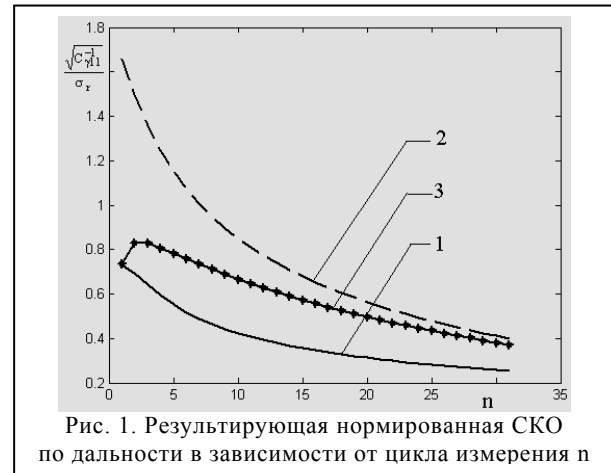


Рис. 1. Результирующая нормированная СКО по дальности в зависимости от цикла измерения  $n$

Из анализа кривых рис. 1 следует, что при отсутствии учета корреляционного момента сглаженных оценок прямоугольных координат (кривая 2) результирующая СКО по дальности превышает результирующую СКО, полученную на основе квазиоптимального метода фильтрации (кривая 1) приблизительно на 100%, а также больше результирующей СКО с упрощенным учетом корреляционных связей прямоугольных координат целей (кривая 3) на 10–100%. Анализ кривой 2 рис. 1 показывает, что пренебрежение учетом корреляционных связей оценок прямоугольных координат при переводе в полярную систему координат, например, при выдаче целеуказания, приводит к тому, что результирующая СКО по дальности, полученная после объединения данных, может быть хуже результатов первичных измерений.

Анализ кривых рис. 2 показывает, что отсутствие учета корреляционной связи оценок прямоугольных координат цели при раздельной прямоугольных координат объекта ведет к завышенной точности оценивания координат цели. Это можно объяснить тем, что произошла потеря информации о первоначальной ориентации полуосей эллипса ошибок измерений объекта, что ведет к ошибкам обработки радиолокационных измерений.

Из анализа кривых рис. 2 следует, что дополнительный упрощенный учет корреляционной связи оценок прямоугольных координат цели позволяет улучшить точность информации на 5–20% по сравнению с методом раздельной фильтрации параметров траектории цели.

Таким образом, повышение точности оценивания координат цели в интересах выдачи потребителю при объединении данных траекторной обработки от разнесенных РЛС может быть получено за счет дополнительного учета корреляционной связи оценок прямоугольных координат цели.

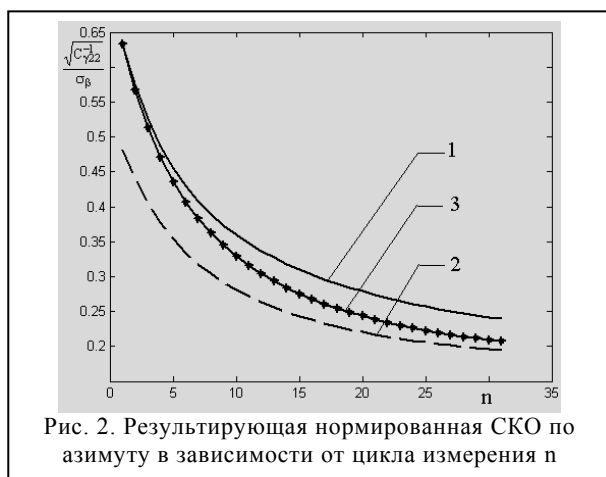


Рис. 2. Результирующая нормированная СКО по азимуту в зависимости от цикла измерения  $n$

## Выводы

1. Предложен метод повышения точности оценивания координат цели при объединении результатов раздельной фильтрации параметров траектории от разнесенных РЛС.

2. Показана целесообразность дополнительного учета корреляционной связи оценок прямоугольных координат цели в пункте выдачи целеуказания потребителю при раздельной фильтрации параметров, что позволяет восстановить первоначальную информацию об ориентации полуосей эллипсов ошибок измерений, что ведет к повышению точности в оценивании координат цели при малых вычислительных затратах.

## Список литературы

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
2. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. – К.: КВиЦ, 2000. – 428 с.
3. Chen H., Kirubarajan T., Bar-Shalom Y. Performance limits of Track-to-track Fusion versus Centralized Estimation: Theory and application // IEEE Trans. on AES. – 2003. – Vol. 39, No 2. – P. 386-398.
4. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. – М.: Связь, 1976. – 496 с.
5. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. – 340 с.
6. Zhao Z., Li X.R., Jilkov V.P. Optimal Linear Unbiased Filtering with Polar Measurements for Target Tracking // Proc. of 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Information Fusion, Annapolis, USA, July 8-10, 2002.
7. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
8. Просов А.В. Метод учета корреляционной связи сглаженных оценок прямоугольных координат цели при раздельной фильтрации параметров траектории в обзорной РЛС // Системи обробки інформації. – Х.: XV ПС, 2005. – Вип. 2 (42). – С. 111-118.
9. Гузько О.Н., Нечитайло С.В. Просов А.В. Расчет корреляционного момента оценок сглаженных прямоугольных координат объекта при раздельной фильтрации параметров траектории в обзорной РЛС // Збірник нау-

кових праць ОНДІ ЗС. – Х.: ОНДІ ЗС, 2007. – Вип. 1(6). – С. 171 - 178.

10. Многопозиционные радиотехнические системы / Под ред. проф. В.В. Цветнова. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.

Поступила в редколлегию 11.02.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Кобзев, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

