

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКИ ОТ РАЗНЕСЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

С.В. Нечитайло¹, А.В. Просов¹, Д.В. Рамшов²

(¹Объединенный научно-исследовательский институт ВС, ²в/ч А 2800)

Предложен метод повышения достоверности отождествления результатов раздельной фильтрации прямоугольных координат целей от разнесенных радиолокационных станций за счет упрощенного учета корреляционной связи отфильтрованных координат. Показано, что за счет дополнительного учета корреляционной связи сглаженных координат целей повышается вероятность правильного решения отождествления и снижаются вероятности ошибочного и непринятия решений.

отождествление, разнесенная система локации, радиолокационная станция, фильтрация параметров траектории объекта

Постановка проблемы и анализ литературы. При обработке радиолокационных данных в разнесенной системе локации конечным результатом обычно является построение траектории цели. 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, 2].

На практике в обзорных радиолокационных станциях (РЛС) при фильтрации координат цели широкое применение находят решения, основанные на использовании линейных фильтров Калмана [3]. К числу таких подходов относится, так называемая, упрощенная независимая (раздельная) фильтрация прямоугольных координат цели, полученная на основе расширенного фильтра Калмана [3]. 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 [3].

При одновременном наблюдении нескольких целей в разнесенной радиолокационной системе возникает задача определения принадлежно-

сти полученных в разных позициях замеров тем или иным целям [1]. Перепутывание данных в процессе их объединения приводит к грубым ошибкам. Чтобы избежать этого, необходима операция межпозиционного отождествления (идентификации) данных. Однако для принятого допущения о независимости результирующих оценок прямоугольных координат цели ошибки межпозиционного отождествления данных могут быть существенными.

Цель статьи – разработать метод повышения достоверности отождествления результатов траекторной обработки от разнесенных радиолокационных станций за счет упрощенного учета корреляционной связи отфильтрованных координат объектов.

Изложение основного материала. Рассмотрим разнесенную радиолокационную систему из двух однопозиционных РЛС с базой B_0 и азимутом базы β_0 относительно РЛС № 1. Пусть в обоих РЛС с периодом обзора T_0 проводится независимое равноточное измерение полярных координат N целей (дальности r_{ki} и азимута β_{ki} , $k = 1, 2$ – номер РЛС, $i = \overline{1, N}$ – номер цели), которые на n -ом цикле обновления информации образуют в каждой РЛС вектора наблюдения $\hat{\theta}_{kin}^T = (\hat{r}_{kin}, \hat{\beta}_{kin})$, где T – знак транспонирования. Ошибки этих измерений имеют гауссово распределение с нулевым средним и матрицами точности $C_{0ki} = \text{diag}(1/\sigma_{rki}^2, 1/\sigma_{\beta ki}^2)$. Полагаем, что ошибки топогеодезической привязки источников информации пренебрежимо малы по сравнению с ошибками измерения координат целей.

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

$$\hat{x}_{kin} = \hat{r}_{kin} \sin(\hat{\beta}_{kin}); \hat{y}_{kin} = \hat{r}_{kin} \cos(\hat{\beta}_{kin}), \quad (1)$$

где \hat{x}_{kin} и \hat{y}_{kin} текущие косвенные оценки. Они образуют вектора $\hat{\mathbf{Y}}_{kin}^T = (\hat{x}_{kin}, \hat{y}_{kin})$ с матрицами точности [4]: $C_{\gamma ki} = \mathbf{H}_{1ki}^T C_{0ki} \mathbf{H}_{1ki}$, где $\mathbf{H}_{1ki} = \left\| \partial h_{1ki}^{(m)}(\mathbf{Y}_{kin}) / \partial \gamma_{kin}^{(j)} \right\|_{\mathbf{Y}_{kin} = \hat{\mathbf{Y}}_{kin}}$, матрица частных производных функций вектора наблюдаемых параметров $\mathbf{h}_1(\mathbf{Y})$ по всем составляющим в опорной точке оценки $\mathbf{Y} = \hat{\mathbf{Y}}$, $m = 1, 2, j = 1, 2$.

Обращая матрицу C_{γ} , находят корреляционную матрицу ошибок

C_{γ}^{-1} , диагональные элементы $C_{\gamma_{ii}}^{-1}$ ($i = 1, 2$) 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 раздельная фильтрация [3], при которой текущие косвенные оценки \hat{x}_n , \hat{y}_n с дисперсиями:

$$\sigma_{\hat{x}_n}^2 = C_{\gamma_{11n}}^{-1} = \sin^2(\hat{\beta}_{1n})\sigma_{r1}^2 + \hat{r}_{1n}^2 \cos^2(\hat{\beta}_{1n})\sigma_{\beta 1}^2; \quad (2)$$

$$\sigma_{\hat{y}_n}^2 = C_{\gamma_{22n}}^{-1} = \cos^2(\hat{\beta}_{1n})\sigma_{r1}^2 + \hat{r}_{1n}^2 \sin^2(\hat{\beta}_{1n})\sigma_{\beta 1}^2, \quad (3)$$

соответственно считаются независимыми. Далее с использованием линейных калмановских алгоритмов каждая прямоугольная координата фильтруется независимо в соответствии с моделью прямолинейного и равномерного движения цели [3]. В процессе такой фильтрации независимо формируются вектора состояния $\hat{\mathbf{a}}_{xn}^T = (\hat{x}_n^f \quad \hat{\dot{x}}_n^f)$ и $\hat{\mathbf{a}}_{yn}^T = (\hat{y}_n^f \quad \hat{\dot{y}}_n^f)$ с диагональной матрицей точности C_9 и обратной ей

$$C_9^{-1} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix},$$

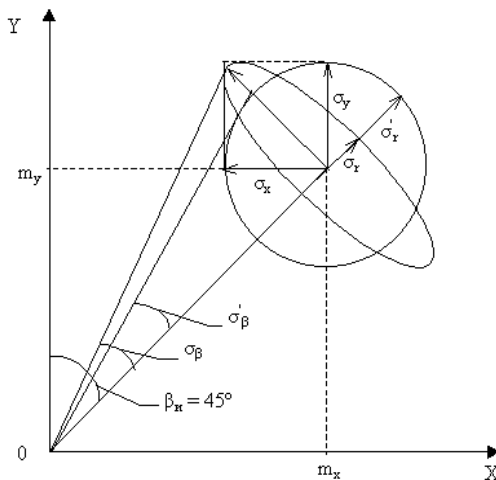


Рис. 1. Эллипсы ошибок первичных измерений и косвенных ошибок

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

Отказ от учета корреляционной связи оценок прямоугольных координат цели приводит к тому, что оси симметрии эллипса ошибок первичных измерений становятся параллельными осям OX , OY . На рис. 1 приведены эллипс ошибок первичных

измерений $\hat{\tau}_n$, $\hat{\beta}_n$ и эллипс косвенных ошибок \hat{x}_n , \hat{y}_n , полученный при отказе от учета коэффициента корреляции ρ_{xy} при азимуте цели $\beta_n = 45^\circ$. Анализ фигур, приведенных на рис. 1 показывает, что при азимуте $\beta_n = 45^\circ$ отказ от учета корреляционного момента приводит к тому, что эллипс ошибок первичных измерений вырождается в окружность. Это можно объяснить тем, что произошла потеря информации о первоначальной ориентации полуосей эллипса.

При межпозиционном отождествлении данных отсутствие учета корреляционных связей может привести к значительным ошибкам обработки радиолокационных измерений.

Пусть результирующие вектора траекторной обработки каждой из РЛС состоят только из сглаженных оценок положения в пространстве цели. Результаты сглаживания приведены к единой прямоугольной системе координат относительно РЛС № 1 с соответствующими корреляционными матрицами точности. Для пространственного отождествления результатов траекторной обработки в каждой РЛС вычислим квадратичную форму [1]:

$$S_{pg}^{(qf)} = (\hat{\xi}_{pq} - \hat{\xi}_{gf})^T (\mathbf{C}_{\xi pq}^{-1} + \mathbf{C}_{\xi gf}^{-1})^{-1} (\hat{\xi}_{pq} - \hat{\xi}_{gf}), \quad (4)$$

где $\hat{\xi}_{pq}$, $\hat{\xi}_{gf}$ – векторы результатов траекторной обработки, соответствующих q-й отметке в p-й позиции и f-й отметке в g-й позиции; $\mathbf{C}_{\xi pq}^{-1}$, $\mathbf{C}_{\xi gf}^{-1}$ – корреляционные матрицы ошибок соответствующих результатов обработки данных. Если $\hat{\xi}_{pq}$ и $\hat{\xi}_{gf}$ относятся к одной цели, то $S_{pg}^{(qf)}$ подчиняется центральному хи-квадрат распределению с числом степеней свободы, равным размерности этих векторов. Задавшись малой вероятностью отбрасывания истинной гипотезы, можно найти порог, с которым следует сравнить значение $S_{pg}^{(qf)}$ для различных гипотез. При превышении порога соответствующая гипотеза считается ложной. Если $\hat{\xi}_{pq}$ и $\hat{\xi}_{gf}$ относятся к разным целям, распределение становится нецентральным и вероятность превышения порога возрастает.

При отдельной фильтрации корреляционные матрицы ошибок $\mathbf{C}_{\xi pq}^{-1}$, $\mathbf{C}_{\xi gf}^{-1}$ являются диагональными. При квазиоптимальной фильтрации осуществляется учет корреляционных связей и элементы корреля-

ционных матриц $C_{\xi_{pq1,2}}^{-1}$ и $C_{\xi_{pq2,1}}^{-1}$, $C_{\xi_{gf1,2}}^{-1}$ и $C_{\xi_{gf2,1}}^{-1}$ в общем случае, не равны нулю.

Предлагается при межпозиционном отождествлении данных, полученных на основе отдельной фильтрации прямоугольных координат целей в обзорных РЛС входящих в состав разнесенной системы локации, осуществлять упрощенный дополнительный учет корреляционной связи оценок прямоугольных координат цели. В работе [5] показано, что элементы корреляционных матриц $C_{\xi_{pq1,2}}^{-1}$ и $C_{\xi_{pq2,1}}^{-1}$, $C_{\xi_{gf1,2}}^{-1}$ и $C_{\xi_{gf2,1}}^{-1}$ характеризующие корреляционный момент $M(\tilde{x}_n \tilde{y}_n)$ между оценками прямоугольных координат по результатам независимой фильтрации можно определить, используя выражение

$$M(\tilde{x}_n \tilde{y}_n) = (K_{x_{n-1}} K_{y_{n-1}} M(\tilde{x}_{n-1}^i \tilde{y}_{n-1}^i)) (1 - K_{y_n} - K_{x_n} + K_{x_n} K_{y_n}) + K_{x_n} K_{y_n} M(\tilde{x}_n^i \tilde{y}_n^i), \quad (5)$$

где $K_{x_{n-1}}$, $K_{y_{n-1}}$, K_{x_n} , K_{y_n} – коэффициенты усиления невязки по координатам x и y на $n-1$ и n шагах обновления информации; $M(\tilde{x}_{n-1}^i \tilde{y}_{n-1}^i)$, $M(\tilde{x}_n^i \tilde{y}_n^i)$ – корреляционные моменты ошибок косвенных измерений \hat{x} и \hat{y} на $n-1$ и n -м циклах обновления информации.

Для отыскания корреляционных моментов ошибок косвенных измерений можно использовать оценку текущего значения корреляционного момента ошибок косвенных измерений [6]. В этом случае $\hat{M}(\tilde{x}_n \tilde{y}_n) \approx \hat{M}(\tilde{x}_{n-1}^i \tilde{y}_{n-1}^i) = \hat{\rho}_{xy} \sigma_{\hat{x}_n} \sigma_{\hat{y}_n}$, где коэффициент корреляции $\hat{\rho}_{xy}$ определяется выражением [4]

$$\hat{\rho}_{xy} = - \frac{\hat{x}_n \hat{y}_n [(1/\sigma_{r1}^2) - (1/\hat{r}_{1n}^2 \sigma_{\beta 1}^2)]}{\sqrt{[(\hat{x}_n^2/\sigma_{r1}^2) + (\hat{y}_n^2/\hat{r}_{1n}^2 \sigma_{\beta 1}^2)] [(\hat{x}_n^2/\hat{r}_{1n}^2 \sigma_{\beta 1}^2) + (\hat{y}_n^2/\sigma_{r1}^2)]}}.$$

Для оценки качества предлагаемого метода повышения достоверности отождествления результатов отдельной фильтрации прямоугольных координат целей в разнесенных радиолокационных системах за счет упрощенного учета корреляционной связи отфильтрованных координат было проведено статистическое моделирование (1000 реализаций).

Пусть на расстоянии $r \approx 100$ км и азимуте $\beta \approx 45^\circ$ относительно РЛС № 1 находится $N = 2$ цели, расположенных как показано на рис. 2, причем азимут цели № 1 равен $\beta_{11} = 45^\circ$ и $r_{11} = 100$ км. Цели движутся прямолинейно и равномерно со скоростью $V = 200$ м/с, сохраняя постоянный азимут движения относительно РЛС № 1. База разнесенной радиолокационной системы равна

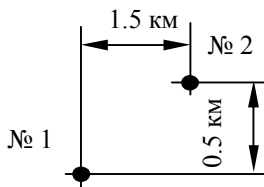


Рис. 2. Взаимное расположение целей

$B = 30$ км, азимут базы $b_0 = 90^\circ$ (азимут отсчитывается от направления на Север). Полагаем, что обе РЛС с периодом обзора $T_0 = 1$ с обеспечивают измерение полярных координат цели $\sigma_{rki} = 250$ м, $\sigma_{\beta ki} = 20'$. В каждой из РЛС осуществляется квазиоптимальная фильтрация, раздельная фильтрация прямоугольных координат и раздельная фильтрация с упрощенным учетом корреляционных связей сглаженных прямоугольных координат целей на основе выражения (5). Результаты траекторной обработки в РЛС № 2 передаются в РЛС № 1 и пересчитываются в единую систему координат. Предполагаем, что цели взяты на сопровождение обеими РЛС одновременно. Пропуски целей и ложные тревоги учитывать не будем.

В табл. 1 приведены оценочные вероятности правильного решения $\hat{P}_{\text{прав}}$ и ошибочного отождествления $\hat{P}_{\text{ош}}$, а также вероятность непринятия решения $\hat{P}_{\text{неопр}}$ (когда квадратичная форма либо превышает, либо нет порог для результатов траекторной обработки как одной и той же, так и разных целей) в РЛС № 1 на 5 такте сглаживания. Вероятность отвергнуть истинную гипотезу (т.е. порог) была выбрана равной 0,01 [1].

Таблица 1

Оценочные вероятности правильного решения, ошибочного отождествления и непринятия решения

Метод учета корреляционных связей	Цель № 1			Цель № 2		
	$\hat{P}_{\text{прав}}$	$\hat{P}_{\text{ош}}$	$\hat{P}_{\text{неопр}}$	$\hat{P}_{\text{прав}}$	$\hat{P}_{\text{ош}}$	$\hat{P}_{\text{неопр}}$
Квазиоптимальный метод	0,975	0,007	0,018	0,971	0,007	0,022
Упрощенного учета (предлагаемый)	0,802	0,002	0,196	0,826	0,004	0,170
Метод раздельной фильтрации	0,352	0,015	0,633	0,370	0,011	0,619

Из данных табл. 1 следует, что при указанных параметрах движения целей относительно расположения пунктов разнесенной системы локации оценочная вероятность правильного решения задачи отождествления за счет предлагаемого метода учета корреляционных связей при раздельной фильтрации повышается с 0,352 до 0,802 для цели № 1 и с 0,370 до 0,826 для цели № 2. Ошибочное решение также принималось реже. Оценочные вероятности непринятия решения снижены с 0,633 до 0,196 для цели № 1 и с 0,619 до 0,170 для цели № 2. Отсутствие решения (при работе порогового алгоритма) обычно менее неприятно, чем ошибочные решения, так как оставляют возможность правильного отождествления с помощью других алгоритмов, например, по минимуму квадратичной формы. Повышение качества решения задачи межпозиционного отождествления можно объяснить восстановлением информации о первоначальной ориентации полусей эллипсов ошибок измерений.

Выводы. 1. Предложен метод повышения достоверности отождествления результатов раздельной фильтрации прямоугольных координат целей от разнесенных радиолокационных станций за счет упрощенного учета корреляционной связи отфильтрованных координат целей.

2. Показано на конкретном примере, что за счет дополнительного учета корреляционной связи сглаженных координат целей вероятность правильного решения отождествления повышается от 0,352 – 0,370 до 0,802 – 0,826, а вероятности ошибочного и непринятия решений снижаются с 0,011 – 0,015 до 0,002 – 0,004 и с 0,619 – 0,633 до 0,170 – 0,196 соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
2. 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.
3. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. – К.: КВиЦ, 2000. – 428 с.
4. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
5. 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.

Поступила 12.04.2005

Рецензент: доктор технических наук, профессор А.В. Кобзев,
Харьковский университет Воздушных Сил.