

УДК 621.396.96

А.В. Просов

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОШИБОК ЛИНЕАРИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ДОСТОВЕРНОСТЬ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ ДАННЫХ ОТ РАЗНЕСЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

Одновременное наблюдение нескольких целей системой разнесенных радиолокационных станций вызывает необходимость решения задачи определения принадлежности полученных в разных позициях замеров тем или иным целям. В работе проанализированы результаты влияния ошибок линеаризации результатов радиолокационных измерений на достоверность отождествления данных от разнесенных радиолокационных станций. Показано, что повысить достоверность отождествления результатов радиолокационных измерений от разнесенных радиолокационных станций можно за счет устранения смещений вносимых методом линеаризации.

**Ключевые слова:** радиолокационное измерение, линеаризация, отождествление.

### Постановка проблемы и анализ литературы

При одновременном наблюдении нескольких целей в многопозиционной системе разнесенных радиолокационных станций (РЛС) возникает задача определения принадлежности полученных в разных позициях замеров тем или иным целям. Перепутывание данных в процессе их объединения приводит к грубым ошибкам. Чтобы избежать этого, необходима операция межпозиционного отождествления данных [1, 2].

При радиолокационных измерениях вектор состояния связан в общем случае с вектором наблюдения детерминированной и нелинейной зависимостью [1 – 3]. Для получения оценки вектора параметров цели, как правило, применяется метод линеаризации [1, 2]. Использование этого метода основано на том, что ошибка оценивания вектора состояния чаще всего не столь велика, чтобы использовать более двух членов разложения функции в ряд Тейлора вокруг оценки вектора состояния [2]. Однако при решении некоторых задач возникает сомнение в применимости метода линеаризации в связи с тем, что диапазон изменений случайных аргументов не настолько мал, чтобы в его пределах функция могла быть с достаточной точностью линеаризована [3 – 6]. Ошибки, вносимые линеаризацией, носят систематический характер, и полученные оценки вектора состояния являются смещенными [3 – 6]. В известной литературе [4 – 7] приведены способы уточнения результатов радиолокационных измерений, полученных методом линеаризации для одной РЛС. На практике часто необходимо отождествлять данные от разнесенных радиолокационных станций, однако, анализ влияния ошибок линеаризации результатов радиолокационных измерений на достоверность отождествления данных отсутствует.

**Цель статьи** – исследование возможностей повышения достоверности отождествления результатов радиолокационных измерений от разнесенных радиолокационных станций за счет устранения погрешностей вносимых методом линеаризации.

### Изложение основного материала

Рассмотрим разнесенную радиолокационную систему из двух однопозиционных РЛС с базой  $B_0$  и азимутом базы  $\beta_0$  относительно РЛС № 1 (рис. 1).

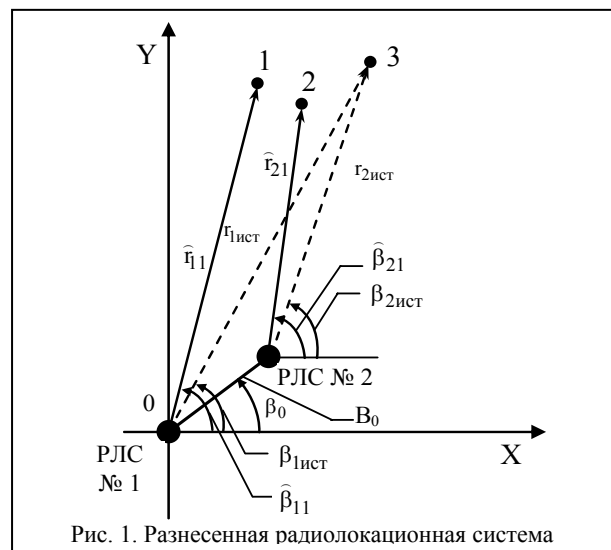


Рис. 1. Разнесенная радиолокационная система

Пусть в обеих РЛС с периодом обзора  $T_0$  проводится независимое равноточное измерение полярных координат цели (дальности  $r_{ki}$  и азимута  $\beta_{ki}$ ,  $k=1,2$  – номер РЛС,  $i=1, N$  – номер цели), которые образуют в каждой РЛС вектора наблюдения  $\hat{\theta}_{ki}^T = (\hat{r}_{ki}, \hat{\beta}_{ki})$ , где  $T$  – знак транспонирования. Ошибки этих измерений имеют гауссово распределение с нулевым средним и матрицами точности  $C_{0ki} = \text{diag}(1/\sigma_{r_{ki}}^2, 1/\sigma_{\beta_{ki}}^2)$ . Полагаем, что ошибки

топогеодезической привязки источников информации пренебрежимо малы по сравнению с ошибками измерения координат целей.

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

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

где  $\hat{x}_{ki}$  и  $\hat{y}_{ki}$  текущие косвенные оценки.

В предположении малости ошибок прогнозируемой оценки они образуют вектора  $\alpha_{ki}^T = (\hat{x}_{ki}, \hat{y}_{ki})$  с матрицами точности [2]:  $C_{\alpha k} = \mathbf{H}_{1k}^T C_{0k} \mathbf{H}_{1k}$ , где  $\mathbf{H}_{1k} = \left\| \partial h_{1k}^{(m)}(\alpha_{ki}) / \partial \alpha_{ki}^{(j)} \right\|_{\alpha_{ki} = \hat{\alpha}_{ki}}$ , матрица частных производных функций вектора наблюдаемых параметров  $\mathbf{h}_1(\alpha)$  по всем составляющим в опорной точке оценки  $\alpha = \hat{\alpha}$ ,  $m = 1, 2, j = 1, 2$ .

Элементы корреляционной матрицы ошибок  $C_{\alpha k}^{-1}$  вектора состояния для  $i$ -й цели в  $k$ -й РЛС равны:

$$c_{11}^{ki} = r_{ki}^2 \sigma_{\beta ki}^2 \sin^2 \beta_{ki} + \sigma_{rki}^2 \cos^2 \beta_{ki}; \quad (2, a)$$

$$c_{22}^{ki} = r_{ki}^2 \sigma_{\beta ki}^2 \cos^2 \beta_{ki} + \sigma_{rki}^2 \sin^2 \beta_{ki}; \quad (2, б)$$

$$c_{21}^{ki} = (\sigma_{rki}^2 - r_{ki}^2 \sigma_{\beta ki}^2) \sin \beta_{ki} \cos \beta_{ki}. \quad (2, в)$$

Для учета поправки характеризующей нелинейность между радиолокационными измерениями и оценками вектора состояния цели воспользуемся результатами приведенными в работах [4 – 7]. Тогда несмещенные оценки вектора параметров цели имеют вид:

$$\hat{y}_{ki}^H = \hat{r}_{ki} \cos(\hat{\beta}_{ki}) - 0,5 \hat{r}_{ki} \cos(\hat{\beta}_{ki}) \sigma_{\beta ki}^2; \quad (3, a)$$

$$\hat{y}_{ki}^H = \hat{r}_{ki} \sin(\hat{\beta}_{ki}) - 0,5 \hat{r}_{ki} \sin(\hat{\beta}_{ki}) \sigma_{\beta ki}^2, \quad (3, б)$$

а элементы корреляционной матрицы ошибок  $C^H$  несмещенного вектора состояния [4 – 6]:

$$\begin{aligned} c_{11ki}^H &= r_{ki}^2 e^{-2\sigma_{\beta ki}^2} [\cos^2 \beta_{ki} (\cosh 2\sigma_{\beta ki}^2 - \cosh \sigma_{\beta ki}^2) + \\ &+ \sin^2 \beta_{ki} (\sinh 2\sigma_{\beta ki}^2 - \sinh \sigma_{\beta ki}^2)] + \\ &+ \sigma_{rki}^2 e^{-2\sigma_{\beta ki}^2} [\cos^2 \beta_{ki} (2 \cosh 2\sigma_{\beta ki}^2 - \cosh \sigma_{\beta ki}^2) + \\ &+ \sin^2 \beta_{ki} (2 \sinh 2\sigma_{\beta ki}^2 - \sinh \sigma_{\beta ki}^2)], \quad (4, a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_{22ki}^H &= r_{ki}^2 e^{-2\sigma_{\beta ki}^2} [\sin^2(\beta_{ki}) (\cosh(2\sigma_{\beta ki}^2) - \cosh(\sigma_{\beta ki}^2))] + \\ &+ \cos^2 \beta_{ki} (\sinh 2\sigma_{\beta ki}^2 - \sinh \sigma_{\beta ki}^2)] + \\ &+ \sigma_{rki}^2 e^{-2\sigma_{\beta ki}^2} [\sin^2 \beta_{ki} (2 \cosh 2\sigma_{\beta ki}^2 - \cosh \sigma_{\beta ki}^2) + \\ &+ \cos^2 \beta_{ki} (2 \sinh 2\sigma_{\beta ki}^2 - \sinh \sigma_{\beta ki}^2)]; \quad (4, б) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_{12ki}^H &= \sin \beta_{ki} \cos \beta_{ki} e^{-4\sigma_{\beta ki}^2} \times \\ &\times \left[ \sigma_{rki}^2 + (r_{ki}^2 + \sigma_{rki}^2)(1 - e^{-\sigma_{\beta ki}^2}) \right]. \quad (4, в) \end{aligned}$$

На рис. 1 положение отметок № 1 и № 2 соответствует оценке местоположения цели по результатам радиолокационных измерений в первой и второй РЛС соответственно. Положение отметки № 3 соответствует истинным координатам объекта в пространстве. Общий подход к задаче отождествления основан на использовании статистических свойств оценок координат и параметров целей [1]. Для пространственного отождествления результатов радиолокационных измерений в каждой РЛС вычислим квадратичную форму [1]:

$$S_{pg}^{(qf)} = (\hat{\alpha}_{pq} - \hat{\alpha}_{gf})^T (C_{\alpha pq}^{-1} + C_{\alpha gf}^{-1})^{-1} (\hat{\alpha}_{pq} - \hat{\alpha}_{gf}),$$

где  $\hat{\alpha}_{pq}$ ,  $\hat{\alpha}_{gf}$  – оценки векторов состояния целей полученных по результатам радиолокационных измерений, соответствующих  $q$ -й отметке в  $p$ -й позиции и  $f$ -й отметке в  $g$ -й позиции;  $C_{\alpha pq}^{-1}$ ,  $C_{\alpha gf}^{-1}$  – корреляционные матрицы ошибок соответствующих результатов обработки данных. Если  $\hat{\alpha}_{pq}$  и  $\hat{\alpha}_{gf}$  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  $\hat{\alpha}_{pq}$  и  $\hat{\alpha}_{gf}$  относятся к разным целям, распределение становится нецентральным и вероятность превышения порога возрастает.

Пусть на расстоянии  $r \approx 150$  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  $r_{11} = 150$  км. База разнесенной радиолокационной системы равна  $B = 30$  км, азимут базы  $b_0 = 0^\circ$  (азимут отсчитывается от оси  $X$  против часовой стрелки). Результаты оценивания векторов состояния приведены к единой прямоугольной системе координат относительно РЛС № 1 с соответствующими корреляционными матрицами точности. В каждой из РЛС осуществляется оценивание векторов состояния цели на основе обычного метода линеаризации, выражения (1), (2) и обработка радиолокационных измерений с корректировкой смещения, выражения (3), (4). 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  $\hat{P}_{\text{ош}}$  (ошибочного отождествления), 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). Вероятность отвергнуть истинную гипотезу (т.е. порог) была выбрана равной 0,01.

Таблица 1  
Оценочные вероятности правильного решения, ошибочного отождествления и непринятия решения при  $\sigma_r = 0,1$  км и  $\sigma_\beta = 1^\circ$

Исследуемые методы	Данные по № 1		
	$\hat{P}_{\text{прав}}$	$\hat{P}_{\text{ош}}$	$\hat{P}_{\text{неопр}}$
Метод линеаризации	0,674	0,010	0,316
Метод с корректировкой смещения	0,631	0,009	0,360
	Данные по цели № 2		
Метод линеаризации	0,342	0,008	0,650
Метод с корректировкой смещения	0,649	0,004	0,347

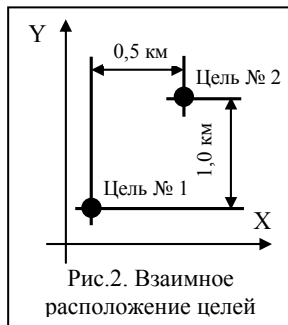


Рис.2. Взаимное расположение целей

Из данных табл. 1 следует, что при указанных первичных ошибках измерения местоположения целей, параметров разнесенной системы и взаимном расположении целей оценочная вероятность правильного решения задачи отождествления за счет использования метода корректировки смещения, обусловленного линеаризацией повысилась с 0,342 до 0,649 для цели № 2 и, незначительно изменилась с 0,674 до 0,631 для цели № 1. Оценочные вероятности непринятия решения снизились с 0,650 до 0,347 для цели № 2 и повысились с 0,316 до 0,360 для цели № 1.

Анализ результатов моделирования показывает, что при использовании метода линеаризации результатов радиолокационных измерений наибольшее влияние на погрешность определения достоверности отождествления данных от разнесенных радиолокационных станций оказывают соотношение ошибок по азимуту, дальности и отдаленности цели  $(\tau_{ki}\sigma_{\beta ki} / \sigma_{rki})$  [4 – 6], взаимное удаление целей и параметры разнесенной системы.

Анализ результатов моделирования показывает, что при использовании метода линеаризации результатов радиолокационных измерений наибольшее влияние на погрешность определения достоверности отождествления данных от разнесенных радиолокационных станций оказывают соотношение ошибок по азимуту, дальности и отдаленности цели  $(\tau_{ki}\sigma_{\beta ki} / \sigma_{rki})$  [4 – 6], взаимное удаление целей и параметры разнесенной системы.

### АНАЛІЗ ВПЛИВ ПОХИБОК ЛІНЕАРИЗАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ВИМІРЮВАНЬ НА ВІРОГІДНІСТЬ ОТОТОВЖЕННЯ ДАНИХ ВІД РОЗНЕСЕНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ

А.В. Просов

Одновременное спотереження декількох цілей системою рознесених радіолокаційних станцій викликає необхідність рішення задачі визначення приналежності отриманих в різних позиціях вимірів тім або іншим цілям. В статті проаналізовано результати впливу похибок лінеаризації результатів радіолокаційних вимірювань на вірогідність ототожнення даних від рознесених радіолокаційних станцій. Наведено, що для підвищення вірогідності ототожнення результатів радіолокаційних вимірювань можливо за рахунок усунення зсуву, що вносяться методом лінеаризації.

**Ключові слова:** радіолокаційне вимірювання, лінеаризація, ототожнення.

### ANALYSIS OF EFFECT OF LINEARIZATION ERRORS OF RADAR MEASUREMENTS ON CONFIDENCE OF DATA ASSOCIATION FROM SPATIAL RADARS

A.V. Prosov

Simultaneous observation of several targets by a system of spatial radars causes of necessity to solve the problem of determination of data association received in different positions. In this paper the results of effect of linearization errors of radar measurements on confidence of data association from spatial radars are analysed. It is shown to increase confidence of association of radar measurements from spatial radars it is possible to eliminate the bias brought in by a linearization method.

**Keywords:** radar observation, linearization, association.

Анализ условий применения метода линеаризации радиолокационных измерений был проведен в работах [3 – 5] для частных случаев, поэтому исследование диапазона применимости указанного метода необходимо провести в дальнейшем.

### Выводы

1. Проанализированы результаты влияния ошибок линеаризации результатов радиолокационных измерений на достоверность отождествления данных от разнесенных радиолокационных станций.

2. Показано, что в разнесенной радиолокационной системе при определенном соотношении ошибок по азимуту, дальности и отдаленности цели и взаимном удалении цели целесообразно проводить корректировку ошибок, вносимые методом линеаризацией для повышения достоверности отождествления данных.

### Список литературы

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
2. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
3. Miller K.S., Leskiw M. D. Nonlinear Estimation with Radar Observations // IEEE Transactions on AES. – Vol. 18, No. 2. – March 1982. – P. 192-200.
4. Lerro D., and Bar-Shalom Y. Tracking with Debaised Consistent Converted Measurements versus EKF // IEEE Transactions On AES. – Vol. 29, No. 3. – July 1993. – P. 1015-1022.
5. Unbiased Converted Measurements for Tracking / Y. Bar-Shalom, M. Longbin, S. Xiaoquan, Z. Ynu, S. Z. Kang // IEEE Transactions on AES. – Vol. 34, No. 3. – 1998. – P. 1023-1027.
6. Schlosser M., Kroschel K. Limits in Tracking with Extended Kalman Filters // IEEE Transactions on AES. – Vol. 40, No. 4. – Oct 2004. – P. 1351-1359.
7. Просов А.В. Анализ влияния линеаризации результатов радиолокационных измерений на точность оценок вектора состояния цели // Системи обробки інформації. – X.: XV ПС, 2008. – Вип. 2 (69). – С. 94-97.

Поступила в редколлегию 21.07.2008

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