

*Д.В. Коростин, Б.Б. Мамеев, Д.В. Пальчиков, А.И. Рымов  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

### **Исследование точности оценки дальности до воздушной цели и её производных в многопозиционной радиолокационной системе воздушного базирования**

В настоящее время при решении боевых задач в различных условиях воздушной обстановки к радиолокационным системам (РЛС) предъявляются повышенные требования к таким показателям качества функционирования, как точность, информативность, помехоустойчивость и надежность выполнения боевой задачи. Это в свою очередь ведет к усложнению функционирования системы, увеличению массогабаритных характеристик аппаратуры, а следовательно и к ее удорожанию. Причем данные РЛС должны быть оптимизированы для работы в условиях быстро меняющейся радиолокационной обстановки. Поэтому, в последнее время, большие перспективы возлагаются на использование многопозиционных РЛС, которые состоят из нескольких приемопередающих позиций и осуществляют совместную обработку радиолокационной информации, получаемой этими позициями [1].

Благодаря возможности совместной обработки информации о целях противника достигаются основные достоинства многопозиционных РЛС: помимо более полного использования энергии в системе и повышения разрешающей способности, еще и повышение точности определения пространственных координат облучаемого объекта (цели). Помимо перечисленных преимуществ существует и другие, однако возможность более точного определения координат является приоритетной при рассмотрении особенностей построения таких систем и измерения ими параметров объектов противника, поскольку она сильно влияет на повышение качества и надежности выполнения боевой задачи.

Основной боевой единицей авиации различных стран при решении боевых задач является пара или звено истребителей. Поэтому в данной статье многопозиционные РЛС будут рассматриваться как РЛС воздушного базирования, что подчеркивает актуальность поднимаемой проблемы. Поскольку в условиях реального воздушного боя противник будет активно использовать различные виды помех, следовательно, применяемые многопозиционные РЛС, способны обеспечить повышение живучести не только авиационного радиоэлектронного комплекса, но и пары или звена истребителей, так как противник будет сталкиваться с трудностями при постановке помех сразу на несколько позиций.

В общем случае алгоритмы аналого-дискретной фильтрации позволяют для процессов:

$$x(k) = \Phi(k, k-1)x(k-1) + \xi_x(k-1) \quad (1)$$

При наличии наблюдений:

$$z(k) = Q_z[H(k)x(k) + \xi_n(k)];$$

$$Q_z(k) = \{Q_{ij}(k)\} \quad Q_{ij}(k) = \begin{cases} 1, & \text{при } k = \frac{nT}{\tau}, \\ 0, & \text{при } k = \frac{nT}{\tau}, \end{cases} \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (2)$$

сформировать оценки:

$$\hat{x}(k) = x_3(k) + K_\Phi(k)\Delta z(k) \quad (3)$$

$$x_3(k) = \Phi(k, k-1)\hat{x}(k); \quad x_3(0) = M\{x_0\} \quad (4)$$

$$\Delta z(k) = z(k) - Q_z(k)H(k)x_3(k) \quad (5)$$

$$K_\Phi(k) = D(k)H^T(k)D_I^{-1}(k) \quad (6)$$

$$D(k) = \begin{cases} E - K_{\phi}(k)H(k)D_3(k) & \text{при } k = \frac{nT}{\tau}, \\ D_3(k) & \text{при } k = \frac{nT}{\tau}, \end{cases} \quad (7)$$

$$D_3(k) = \Phi(k, k-1)D(k-1)\Phi^T(k, k-1) + D_x(k-1), D_3(0) = D_0 \quad (8)$$

В этих уравнениях  $\hat{x}(k)$ ,  $x_3(k)$  — векторы состояния, экстраполяции и оценок процесса,  $\Phi(k, k-1)$  — матрица перехода;  $K_{\phi}$  — матричный коэффициент усиления невязки  $Dz(k)$ ;  $Q_z(k)$  — матрица признаков прихода измерений;  $D(k)$  и  $D_3(k)$  — апостериорная и априорная ковариационные матрицы ошибок фильтрации;  $E$  — единичная матрица;  $k$  — номер шага фильтрации, соответствующий времени  $t = k * \tau$ ;  $\tau$  — шаг интервала дискретизации;  $T$  — интервал прихода измерений.

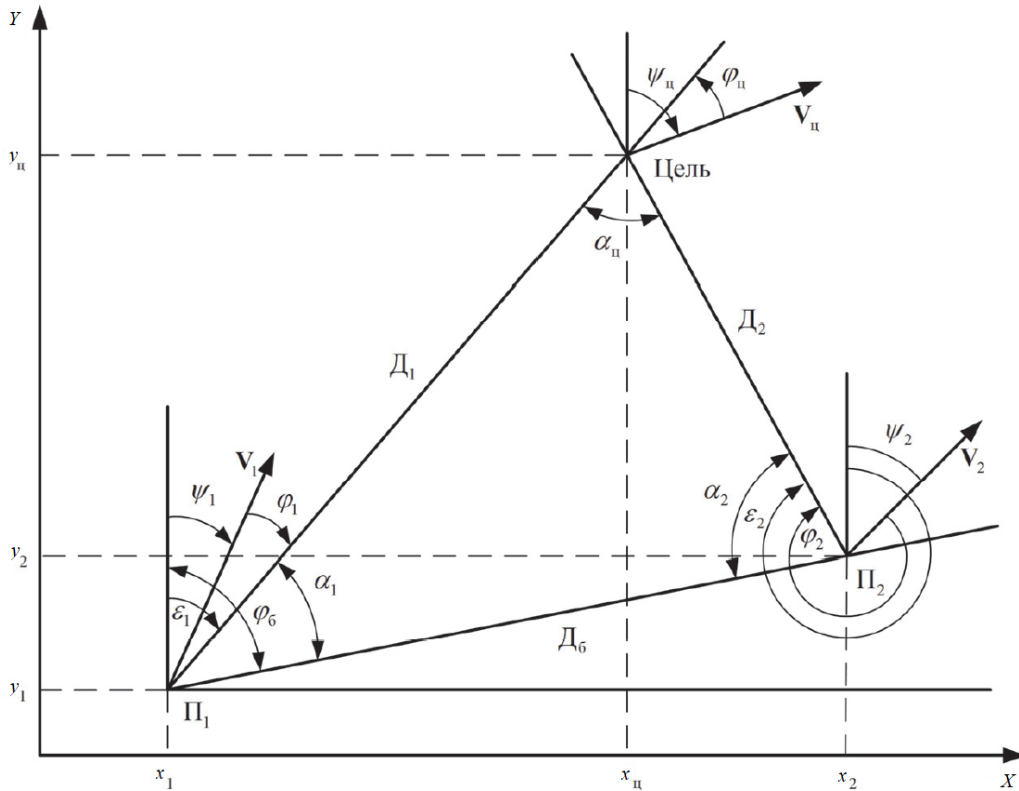


Рис. 1. Геометрия взаимного положения РЛС1, РЛС2 и цели

Итак, будем полагать что комплексирование измерений в двухпозиционной активной системе, выполняется в РЛС 2 при следующих условиях.

1. РЛС1, РЛС2 и цель перемещаются в пространстве произвольным образом.
2. На каждой позиции имеются измерители собственного местоположения(  $x_1, y_1$ , и  $x_2, y_2$ ), курсов  $\psi_1$  и  $\psi_2$  а также измерители дальности и скорости сближения с целью, бортовых пеленгов цели  $\phi_1$  и  $\phi_2$  и углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  позиционного треугольника.
3. РЛС1 и РЛС2 работают на разных несущих частотах, причем: РЛС2 – импульсно-доплеровская система, измеряющая дальность и скорость сближения с периодом повторения  $T_2$ :

$$\begin{aligned} D_{и2} &= D_2 + \xi_{Dи2} \\ V_{и2} &= V_2 + \xi_{Vи2} \end{aligned} \quad (9)$$

РЛС1 – некогерентная система, измеряющая только дальность с периодом повторения  $T_1$

$$D_{и1} = D_1 + \xi_{Ди1} \quad (10)$$

При этом допускаются любые сочетания значений  $T_1$  и  $T_2$  и временных сдвигов прихода измерений на позиции.

4. Позиции обмениваются не только измерениями дальности и скорости, но и информацией о собственном местоположении ( $x_1, y_1$ , и  $x_2, y_2$ ) и курсов  $\psi_1$  и  $\psi_2$ , дающей возможность рассчитывать на каждой позиции величину базы.

$$D_{Би} = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2} + \xi_{мп1} + \xi_{мп2} \quad (11)$$

где  $\xi_{мп1}, \xi_{мп2}$ , – центрированные гауссовские шумы измерений собственного местоположения позиции 1 и 2.

Знание (10) и (11) даёт возможность сформировать в РЛС2 ещё и косвенные измерения

$$D_{к2} = \sqrt{D_{и1}^2 + D_{Би}^2 - D_{и1}D_{Би}\cos\alpha_1} \quad (12)$$

В математическом плане задача формулируется следующим образом.

Для модели состояния, соответствующей гипотезе равноускоренного движения,

$$\begin{aligned} D_2(k) &= D_2(k-1) + V_2(k-1)\tau + \frac{a_2(k-1)\tau^2}{2} \\ V_2(k) &= V_2(k-1) + a_2(k-1)\tau \\ a_2(k) &= a_2(k-1) + \xi_{a2}(k-1) \end{aligned} \quad (13)$$

В соотношениях (10)–(14):  $\xi_{Ди1}, \xi_{Ди2}, \xi_{Ви2}$  — центрированные гауссовские шумы измерений и состояния с известными среднеквадратическими ошибками  $\sigma_{Ди1}, \sigma_{Ди2}, \sigma_{Ви2}, \sigma_{мп1}, \sigma_{мп2}, \sigma_{a2}$ .

где  $\tau$  – интервал дискретизации прогноза ( $\tau \ll T_1, \tau \ll T_2$ ) на основе измерений (9)–(13) и с учетом матрицы признаков прихода измерений

$$Q_z = \begin{bmatrix} Q_{D2} & 0 & 0 \\ 0 & Q_{V2} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{D1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

составим исходные матрицы для получения в РЛС2 оптимальных оценок дальности  $D_2$  до цели, скорости  $V_2$  и ускорения  $a_2$  сближения с нею.

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} D_2 \\ V_2 \\ a_2 \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} 1 & \tau & \frac{\tau^2}{2} \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad z = \begin{bmatrix} D_{и2} \\ V_{и2} \\ D_{к2} \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \xi_x &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \xi_z = \begin{bmatrix} \xi_{Ди2} \\ \xi_{Ви2} \\ \xi_{Экв} \end{bmatrix}, \quad D_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_a \end{bmatrix}, \quad D_{и} = \begin{bmatrix} D_{Ди2} & 0 & 0 \\ 0 & D_{Ви2} & 0 \\ 0 & 0 & D_{Экв} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

На основании (2), (5) и (15) получаем:

$$z(k) = \begin{bmatrix} Q_{D2} & 0 & 0 \\ 0 & Q_{V2} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{D1} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_2(k) \\ V_2(k) \\ a_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_{Dи2}(k) \\ \xi_{Vи2}(k) \\ \xi_{ЭКВ}(k) \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} Q_{D2}D_{и2}(k) \\ Q_{V2}V_{и2}(k) \\ Q_{D1}D_{к2}(k) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\Delta z(k) = \begin{bmatrix} Q_{D2}D_{и2}(k) - Q_{D2}D_{э2}(k) \\ Q_{V2}V_{и2}(k) - Q_{V2}V_{э2}(k) \\ Q_{D1}D_{к2}(k) - Q_{D1}D_{э2}(k) \end{bmatrix} \quad (17)$$

На основании (1)–(8),(15),(17) получаем алгоритм фильтрации:

$$\begin{aligned} \widehat{D}_2(k) &= D_{э2}(k) + K_{11}(k)\Delta z_1(k) + K_{12}(k)\Delta z_2(k) + K_{13}(k)\Delta z_3(k) \\ \widehat{V}_2(k) &= V_{э2}(k) + K_{21}(k)\Delta z_1(k) + K_{22}(k)\Delta z_2(k) + K_{23}(k)\Delta z_3(k) \\ \widehat{a}_2(k) &= a_{э2}(k) + K_{31}(k)\Delta z_1(k) + K_{32}(k)\Delta z_2(k) + K_{33}(k)\Delta z_3(k) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} D_{э2}(k) &= \widehat{D}_2(k-1) + \widehat{V}_2(k-1)\tau + \frac{\widehat{a}_2(k-1)\tau^2}{2}, & D_{э2}(0) &= D_{э2}; \\ V_{э2}(k) &= \widehat{V}_2(k-1) + \widehat{a}_2(k-1)\tau, & V_{э2}(0) &= V_{э2}; \\ a_{э2}(k) &= \widehat{a}_2(k-1), & a_{э2}(0) &= a_{э2}; \end{aligned} \quad (19)$$

Рассматривалась ситуация, для которой  $\sigma_{Dи2}(0) = 150$  м,  $\sigma_{Vи2}(0) = 10$  м/с,  $\sigma_{мп1}(0) = 100$  м,  $\sigma_{мп2}(0) = 100$  м,  $\sigma_{ЭКВ}(0) = 200$  м,  $\sigma_a(0) = 0.6323$  м/с<sup>2</sup>, интервал обращения к цели  $T_1 = T_2 = 1$  с. Траектории движения РЛС1, РЛС2 и цели показаны на рис. 3.3, при этом в начальный момент времени РЛС1 и РЛС2 имеет координаты (5 000, 40 000 м), (25 000, 150 000 м), цель (400 000, 100 000 м). Все три объекта движутся с скоростью  $V_1 = 350 \frac{м}{с}$ ,  $V_2 = 300 \frac{м}{с}$ ,  $V_ц = 350 \frac{м}{с}$ , и ускорением  $a_1 = 5 \frac{м}{с^2}$ ,  $a_2 = 10 \frac{м}{с^2}$ ,  $a_ц = 2 \frac{м}{с^2}$ , при этом максимальная скорость РЛС1 и РЛС2  $V_{1,max} = 695 \frac{м}{с}$ ,  $V_{2,max} = 695 \frac{м}{с}$  и цели  $V_{ц,max} = 555 \frac{м}{с}$ .

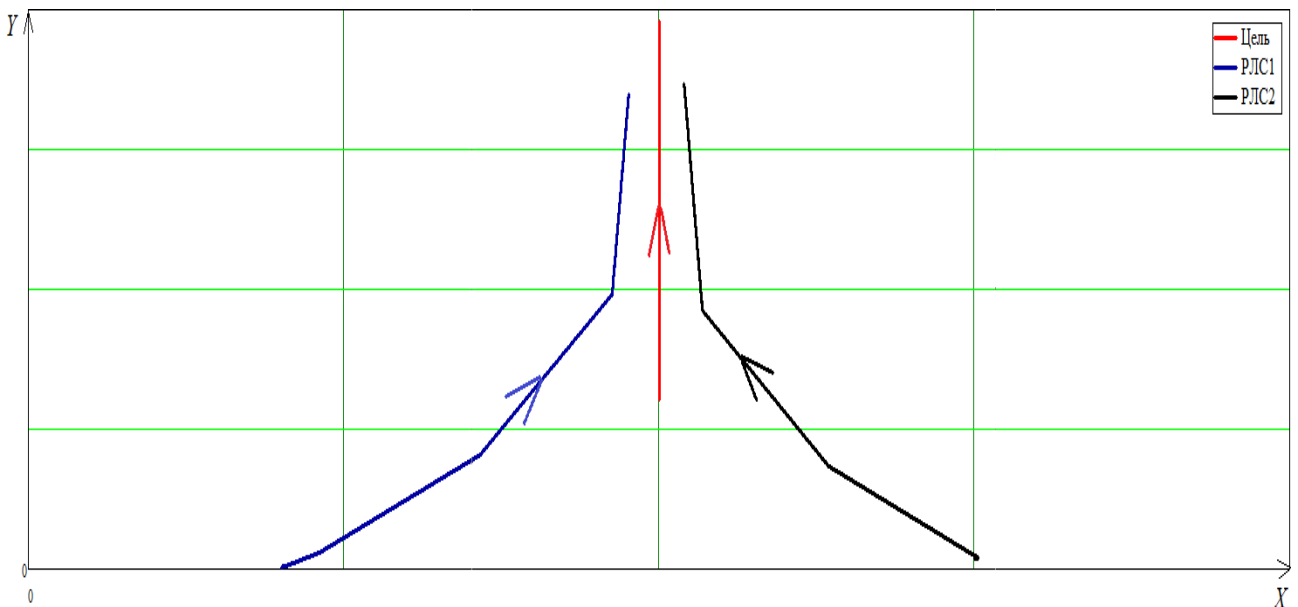


Рис. 2. Траектории движения РЛС1, РЛС2 и цели.

В качестве показателей эффективности использования данного алгоритма использовались: среднее квадратичное отклонение ошибок фильтрации, коэффициент эффективности применения оценки и процентное соотношение в эффективности применения алгоритма определяемые соотношениями:

$$\sigma_x(k) = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{n=1}^k [m_x(k) - \hat{x}(k)]^2} \quad (20)$$

$$K_{\text{эфф}x} = \sigma_x(k) / \sigma_{\hat{x}}(k) \quad (21)$$

$$\Delta\%_x = (\sigma_x - \sigma_y / \sigma_{\text{оц}2}) 100 \quad (22)$$

где  $k$  — число реализаций,  $x, y$  — дальность истинная  $D_2$ , измеренная прямым  $D_{и2}$ , и косвенным методами  $D_{к2}$ , оценка дальности при получении данных с двух РЛС  $D_{оц2}$ , с РЛС2  $D_{оц2.1}$ , только с РЛС1  $D_{оц.к2}$ .

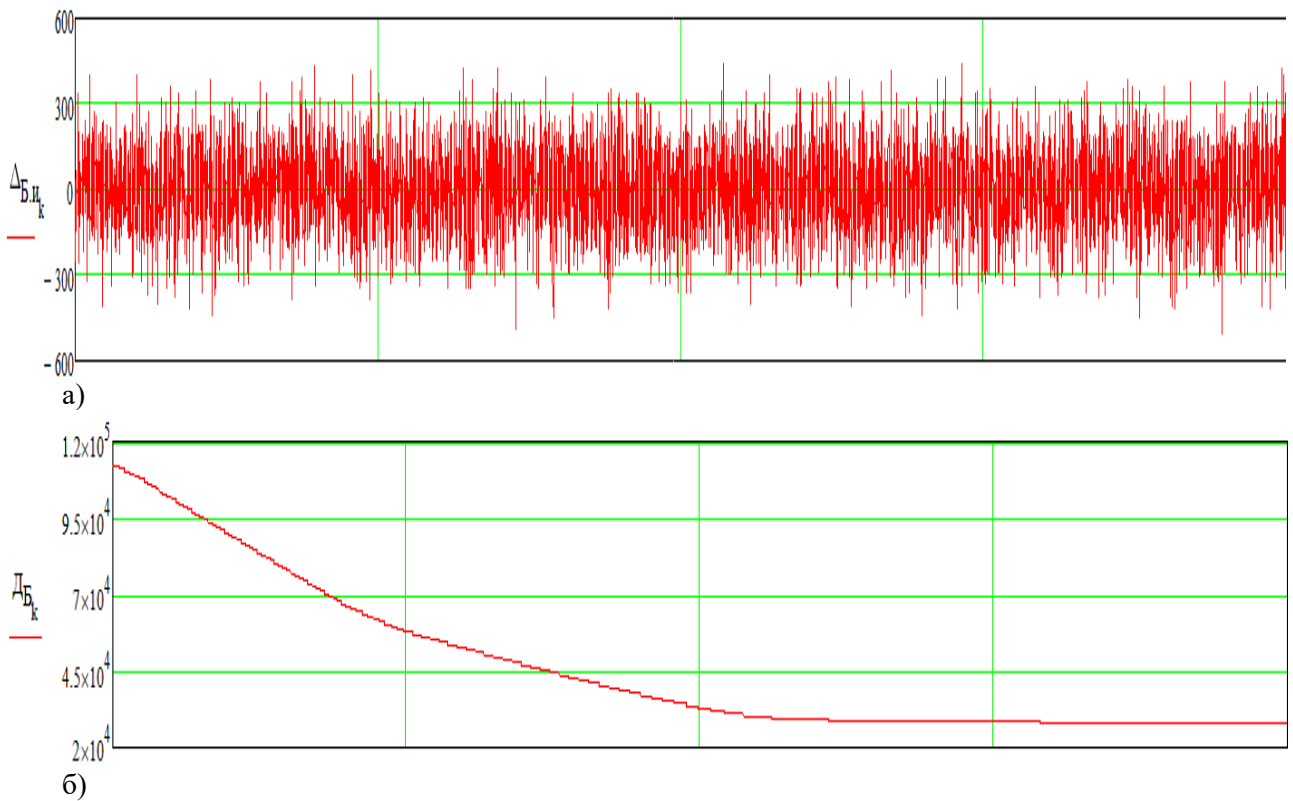
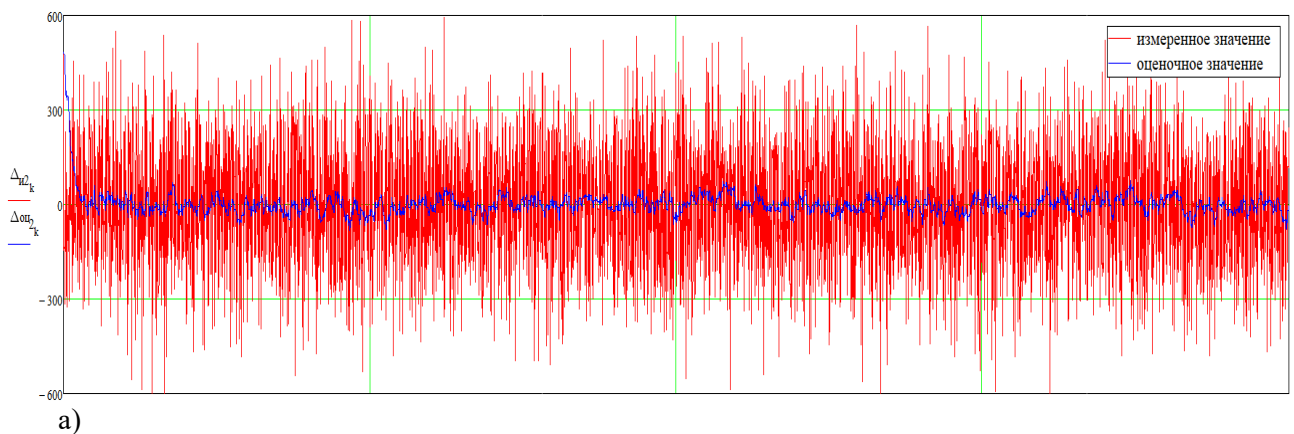


Рис. 3. Графики текущих ошибок измерения величины базы между РЛС1 и РЛС2 (а) и самой величины базы между ними (б).



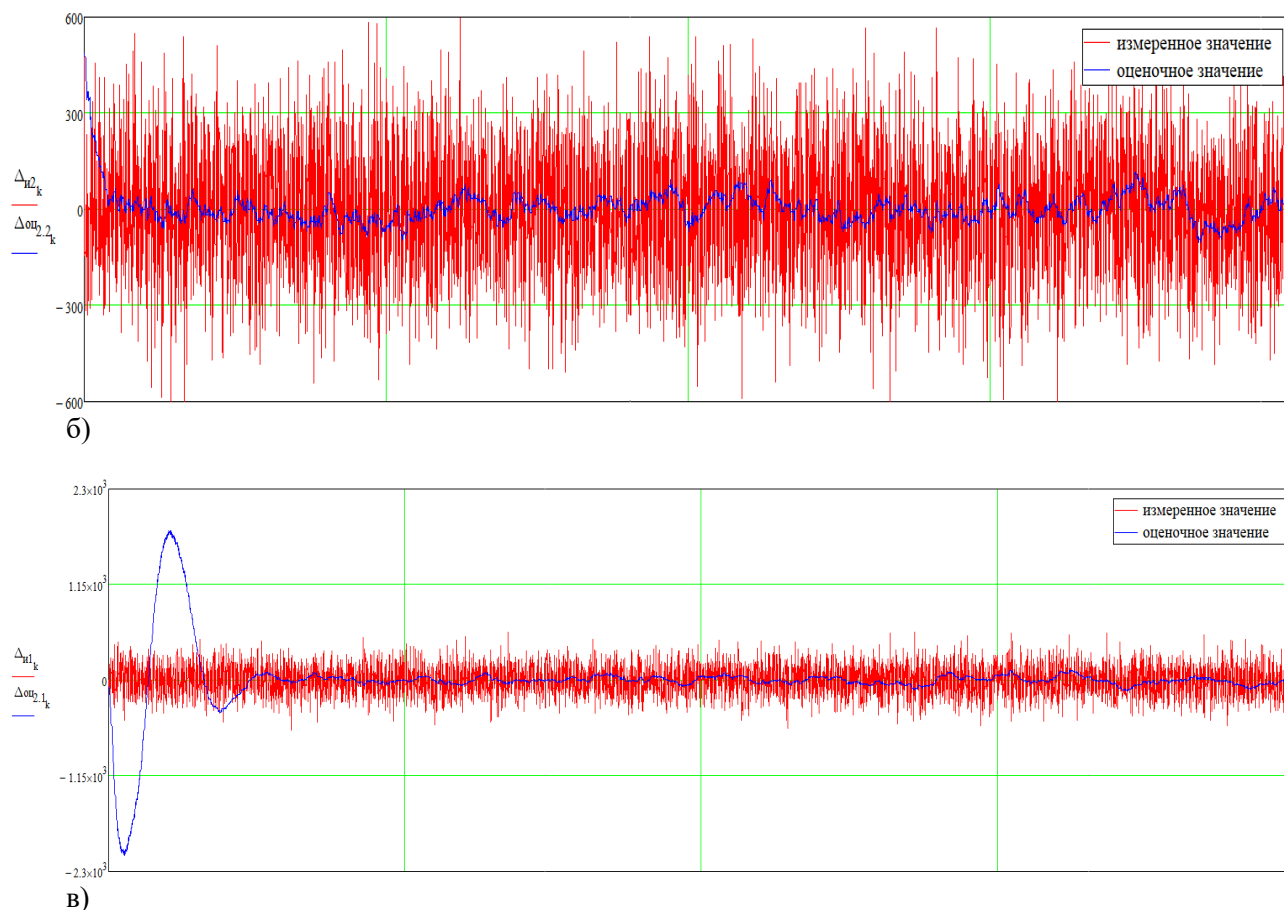


Рис. 4. Графики текущих погрешностей оценивания координат цели при получении данных от двух позиций (а), только с РЛС2 (б), и только с РЛС1 (в).

В таблице 1 приведены полученные показатели эффективности использования данного алгоритма (20)–(22).

Таблица 1. Показатели эффективности использования данного алгоритма.

СКО ошибок измерения			
$\sigma_{D2}, \text{ м}$	$\sigma_{\text{оц.2.D2}}, \text{ м}$	$\sigma_{\text{оц.2.1.D2}}, \text{ м}$	$\sigma_{\text{оц.1.к2}}, \text{ м}$
150	20.317	29.454	37.809
Коэффициенты эффективности применения оценки			
$K_{\text{эфф.оц2.D2}}, \text{ раз}$	$K_{\text{эфф.оц2.D2}}, \text{ раз}$	$K_{\text{эфф.оц2.D2}}, \text{ раз}$	
7.383	5.093	3.967	
Процентные соотношения в эффективности применения алгоритма по отношению к оценке дальности при получении данных с двух позиций.			
$\Delta\%_{\Delta\text{оц2.1}/\Delta\text{оц2}}, \%$	$\Delta\%_{\Delta\text{оц1}/\Delta\text{оц2}}, \%$	$\Delta\%_{\sigma_{D2}/\Delta\text{оц2}}, \%$	
44.976	86.101	638.314	

Как видно из полученных результатов, полученный алгоритм работает даже при кратковременном или полностью пропадании сигнала с РЛС1 или же подавлении самой РЛС2. Из графиков 3 (а)–(в) видно что время установления устойчивой работы алгоритма для (а) и (б) не превышает 100 отсчётов, а для (в) 700 отсчётов. При получении данных считались показатели с  $k=100$  для оценки дальности при поступлении данных с двух РЛС и только от

РЛС2 и  $k=700$  при поступлении данных только от РЛС1. Выигрыш по точности при этом относительно обычных измерений составил порядка 7.5 раз, или же СКО стала порядка 20 м вместо 150 м.

Также ещё можно отметить ещё достоинства данного алгоритма.

1. инвариантность процедуры вычисления коэффициентов усиления (6) ко времени прихода измерений.

2. Полученные результаты не накладывают ограничений на возможность их реализации, при этом вычислительные затраты полученного метода существенно меньше, чем для нелинейных вариантов фильтра Калмана.

3. Рассмотренный вариант применения алгоритма не ограничивается применением двух РЛС, он также будет работать и при применении более двух РЛС, где будет повышаться живучесть многопозиционной системы в целом и точностные характеристики системы.

### Литература

1 Меркулов В.И., Верба В.С., Ильчук А.Р. Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Второй том. М.: Радиотехника, 2018г. 486 с.

2 Меркулов В.И., Верба В.С., Ильчук А.Р. Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Первый том. М.: Радиотехника, 2018г. 360 с.

3 Зайцев Д.В. Многопозиционные радиолокационные системы. М.: Радиотехника 2007г. 115 с.

4 Дудник П.И. Авиационные радиолокационные комплексы и системы. ВВИА имени профессора Н.Е Жуковского, 2006г. 1112 с.

5 Сколник И.М. Справочник по радиолокации. М.: Техносфера, 2014, 672 с.