

В. И. МЕРКУЛОВ, П. А. САДОВСКИЙ
**ОЦЕНИВАНИЕ ДАЛЬНОСТИ И ЕЕ ПРОИЗВОДНЫХ В
ДВУХПОЗИЦИОННОЙ ПАССИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ
СИСТЕМЕ**

Меркулов В.И., Садовский П.А. Оценивание дальности и ее производных в двухпозиционной пассивной радиолокационной системе.

Аннотация. Пассивные радиолокационные системы позволяют обнаруживать и сопровождать источники радиоизлучения на значительно большей дальности, чем активные системы, обеспечивая при этом повышение скрытности и живучести носителей. Однако для эффективной реализации процесса наведения на источник радиоизлучения необходимо иметь на борту кроме оценок угловых координат оценки дальности и скорости. В случае однопозиционных пассивных систем такие оценки можно получить при полете по специальной траектории, однако их точность даже при сопровождении неподвижных объектов низка. Наиболее рациональным решением данной проблемы является использование многопозиционных пассивных систем.

В статье рассмотрена задача оценивания координат в многопозиционных пассивных радиолокационных системах. На основе аппарата линейной аналого-дискретной фильтрации получен алгоритм оценивания дальности и скорости в двухпозиционной пассивной радиолокационной системе. Проведенное имитационное моделирование полученного алгоритма подтвердило его эффективность при существенно меньшей вычислительной сложности, чем у нелинейных вариантов.

Ключевые слова: пассивная радиолокация, двухпозиционные РЛС, аналого-дискретная фильтрация, оценивание дальности и скорости.

1. Введение. Одна из наиболее устойчивых тенденций развития радиолокационной техники — усиление роли пассивных систем в составе общей бортовой информационно-управляющей системы.

Преимуществами пассивных режимов работы радиолокационной системы (РЛС) являются:

- повышение скрытности, а соответственно, и живучести носителя;
- возможности реализации существенно большей дальности обнаружения носителей источников радиоизлучения (ИРИ) по сравнению с активными РЛС, поскольку обнаружение осуществляется по прямому, а не отраженному сигналу [1];
- возможность управления точностью оценивания местоположения ИРИ за счет траекторного управления наблюдением [2];
- возможность продолжения процедур наведения на постановщика активных помех противоборствующей стороны при подавленных каналах дальности и скорости бортовой РЛС [3].

Необходимо, однако, отметить, что для реализации этого процесса на борту наводимого летательного аппарата (ЛА) необходимо иметь не только оценки угловых координат, но и оценки дальности и скорости [4, 5]. Формирование этих оценок в однопозиционных пеленгационных системах выполняется с очень низкой точностью и требует проведения достаточно длительного маневра [6] носителя.

Более предпочтительным является использование двухпозиционных пассивных радиолокационных систем (ДППРЛС), позволяющих практически мгновенно определить местоположение ИРИ и оценить дальность до него и ее производные на основе триангуляционного способа [7].

Решение этой задачи базируется на знании собственного местоположения позиции Π_1 и Π_2 (x_1, z_1 и x_2, z_2), собственных курсов ψ_1, ψ_2 и бортовых пеленгов φ_1, φ_2 , дающих возможность рассчитать углы навигационного треугольника (α_1, α_2 и $\alpha_{ц}$), размер базы D_6 и угол ее наклона φ_6 (рисунок 1).

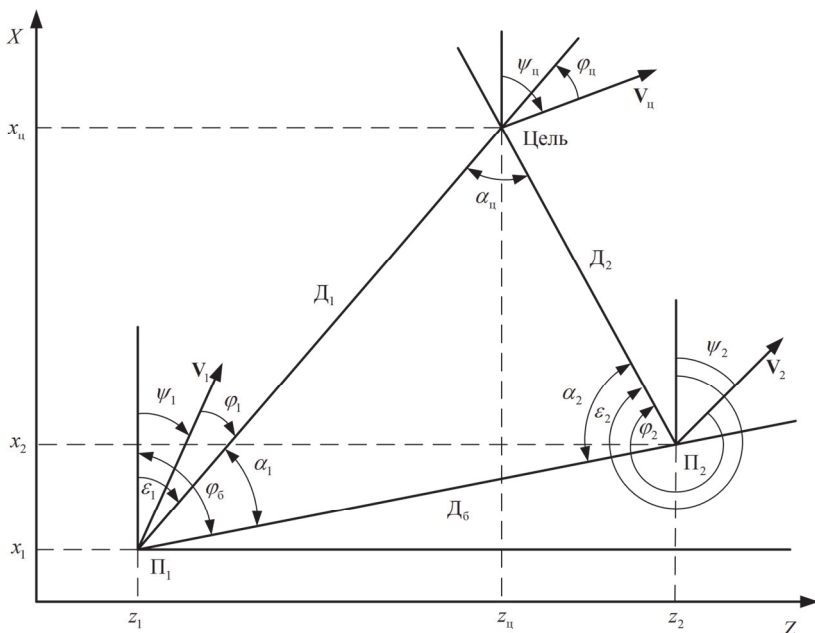


Рис. 1. Геометрия взаимного расположения пеленгационных позиций и цели

Следует отметить, что при одинаковой точности пеленгаторов точность определения местоположения ИРИ цели определяется среднеквадратичной ошибкой [8]:

$$\sigma_{\text{мп}} = \frac{0,0175\sigma_{\varphi}}{\sin \alpha_{\text{ц}}} \sqrt{D_1^2 + D_2^2}, \quad (1)$$

где D_1 и D_2 — расстояния от ИРИ до позиций Π_1 и Π_2 ; σ_{φ} — СКО измерения углов φ_1, φ_2 ; $\alpha_{\text{ц}}$ — бистатический угол между линиями визирования $\Pi_1Ц$ и $\Pi_2Ц$.

Анализ (1) показывает, что точность определения местоположения ИРИ зависит не только от ошибок пеленгации, определяемых значением σ_{φ} , но и от геометрии взаимного расположения, определяемого в основном значением $\alpha_{\text{ц}}$ (рисунок 1).

В связи с этим в практике систем перехвата ИРИ одна из позиций считается ударной, наводимой на него с использованием того или иного метода наведения [4], а вторая — информационной, движущейся по траектории, обеспечивающей выполнение условия $\alpha_{\text{ц}} \rightarrow 90$. В общем случае для реализации такой системы наведения необходимо знание оценок D_1, D_2 и их производных \dot{D}_1, \dot{D}_2 [4, 5].

При этом необходимо учитывать следующие особенности наблюдения источников радиоизлучения.

Во-первых, угловые данные о радиоизлучающих целях могут быть получены в разнесенных приемных позициях в один и тот же момент времени либо в разные моменты. Последний вариант встречается на практике достаточно часто. В принципе при измерениях пеленгов целей в первой и второй позициях в разное время их можно привести к одному моменту, но для этого необходимо дополнительно оценивать угловые скорости вращения линий визирования в каждой приемной позиции либо использовать алгоритмы оценивания с текущей коррекцией прогноза по неодновременно приходящим измерениям [9]. Далее предполагается, что приемные позиции являются подвижными и располагаются на летательных аппаратах. Поэтому требуется также измерять скорости их движения и их курсы. В этом случае по прогнозируемым значениям пеленгов цели и положениям ЛА можно рассчитать дальность до цели.

Во-вторых, в ДППРЛС, как правило, имеет место запаздывание в передаче результатов измерений при обмене радиоданными между летательными аппаратами. Объясняется это тем, что каждому ЛА

предоставляется определенный временной интервал для передачи сообщений. Поэтому обработка результатов измерений в бортовых ЭВМ должна вестись с учетом их временного запаздывания.

Необходимо отметить, что формирование оценок дальности и ее производных в ДППРЛС может осуществляться различными способами, обзор которых представлен в [8]. Наиболее распространенными из них являются:

- алгоритмы адаптивной α, β -фильтрации [10];
- алгоритмы на основе теории чувствительности;
- алгоритмы нелинейного оценивания на основе расширенного

фильтра Калмана.

2. Синтез алгоритма оценивания дальности и ее производных. В общем случае взаимосвязи между линейными и угловыми координатами ДППРЛС определяются нелинейными соотношениями, что предопределяет необходимость использования нелинейных процедур оценивания [11-16]. Однако такому подходу присущи два недостатка. Один из них обусловлен необходимостью решения многомерных уравнений Риккати для вычисления коэффициентов усиления невязок. Второй связан со значительным ухудшением точности и устойчивости функционирования фильтра при несоответствии условий функционирования выбранным нелинейным моделям.

Далее рассматривается существенно более простая и робастная процедура линейной фильтрации, дающая возможность сформировать в двухпозиционной пассивной системе взаимосвязанные оценки местоположения ИРИ, дальностей до него и их производных на основе искусственно сформированных так называемых косвенных моделей состояния и измерений.

Синтез будет осуществляться при условии, что выполняются следующие предположения:

- в состав ДППРЛС входят ударная позиция P_2 , осуществляющая наведение на ИРИ, и информационная позиция P_1 , обеспечивающая наилучшие условия для наблюдения ИРИ и минимизирующая (1), что требует знания оценок дальности и скорости [3];

- на каждой позиции имеются оценки собственных курсов (ψ_1, ψ_2), бортовых пеленгов (φ_1, φ_2), угловых скоростей линии визирования (ω_1, ω_2) и результаты вычисления собственных координат (x_1, z_1 и x_2, z_2) (см. рисунок 1);

- в течение времени формирования оценок дальностей и скоростей цель не изменяет скорости и направления полета;

– от ударной позиции Π_2 на информационную Π_1 поступают оценки собственного местоположения x_2 , z_2 , курса ψ_2 , бортового пеленга φ_2 и их производные.

Исходя из этих условий далее будет рассмотрена процедура фильтрации, выполняемой на информационной позиции Π_1 . При этом синтез будет выполняться на основе аппарата линейной аналого-дискретной фильтрации [12].

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

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{\Phi}(k, k-1)\mathbf{x}(k-1) + \xi_x(k-1) \quad (2)$$

при наличии наблюдений:

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{Q}_z[\mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \xi_n(k)];$$

$$\mathbf{Q}_z(k) = \{Q_{ii}(k)\}, \quad Q_{ii}(k) = \begin{cases} 1, & \text{при } k = nT/\tau, n = 1, 2, 3, \dots, \\ 0, & \text{при } k \neq nT/\tau, \end{cases} \quad (3)$$

сформировать оценки:

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \mathbf{x}_y(k) + \mathbf{K}_\Phi(k)\Delta\mathbf{z}(k), \quad (4)$$

$$\mathbf{x}_y(k) = \mathbf{\Phi}(k, k-1)\hat{\mathbf{x}}(k-1); \quad \hat{\mathbf{x}}_y(0) = \mathbf{x}_0; \quad (5)$$

$$\Delta\mathbf{z}(k) = [\mathbf{z}(k-1) - \mathbf{Q}_z(k)\mathbf{H}(k)\mathbf{x}_y(k)]; \quad (6)$$

$$\mathbf{K}_\Phi(k) = \mathbf{D}(k, k-1)\mathbf{H}^T(k) [\mathbf{H}(k)\mathbf{D}(k, k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{D}_n(k)]^{-1}; \quad (7)$$

$$\mathbf{D}(k) = \begin{cases} [\mathbf{E} - \mathbf{K}_\Phi(k)\mathbf{H}(k)]\mathbf{D}(k, k-1), & \text{при } k = nT/\tau, \\ \mathbf{D}(k, k-1), & \text{при } k \neq nT/\tau, \end{cases} \quad (8)$$

$$\mathbf{D}(k, k-1) = \mathbf{\Phi}(k, k-1)\mathbf{D}(k-1)\mathbf{\Phi}(k, k-1) + \mathbf{D}_x(k-1); \quad \mathbf{D}(0) = \mathbf{D}_0. \quad (9)$$

В этих уравнениях $\mathbf{x}(k)$, $\mathbf{x}_y(k)$, $\hat{\mathbf{x}}(k)$ — векторы состояния, экстраполяции и оценок процесса (2), $\mathbf{\Phi}(k, k-1)$ — матрица перехода; \mathbf{K}_Φ — матричный коэффициент усиления невязки $\Delta\mathbf{z}(k)$; $\mathbf{D}(k)$ и $\mathbf{D}(k, k-1)$ — апостериорная и априорная ковариационные матрицы ошибок фильтрации; $\mathbf{Q}_z(k)$ — матрица признаков прихода измерений;

k — номер шага фильтрации, соответствующий времени $t = k \cdot \tau$; τ — шаг интервала дискретизации; T — интервал прихода измерений.

Вся процедура формирования требуемых оценок $x_{ц}$, $z_{ц}$ и D_i , \dot{D}_i выполняется в три этапа:

– на первом этапе осуществляется расчет координат цели $x_{ц}$, $z_{ц}$ и дальностей D_1 , D_2 , которые послужат основой для косвенных моделей состояния и измерений;

– на втором этапе осуществляется выбор линейных моделей состояния и измерений, обеспечивающих формирование требуемых оценок;

– на третьем этапе формируются алгоритмы линейного оценивания, осуществляющие информационное обеспечение задач наведения ДППРЛС на ИРИ.

На первом этапе координаты цели и дальности до нее с каждой из позиций вычисляются на основе полученных прямых (первичных) измерений координат информационной $x_{1и}$, $z_{1и}$ и ударной $x_{2и}$, $z_{2и}$ позиций, их курсов $\psi_{1и}$, $\psi_{2и}$ и углов линии визирования цели $\varepsilon_{1и}$, $\varepsilon_{2и}$ с них:

$$\begin{aligned} x_{1и} &= x_1 + \xi_{x1и}, & z_{1и} &= z_1 + \xi_{z1и}, & x_{2и} &= x_2 + \xi_{x2и}, & z_{2и} &= z_2 + \xi_{z2и}, \\ \psi_{1и} &= \psi_1 + \xi_{\psi1и}, & \varphi_{1и} &= \varphi_1 + \xi_{\varphi1и}, & \psi_{2и} &= \psi_2 + \xi_{\psi2и}, & \varphi_{2и} &= \varphi_2 + \xi_{\varphi2и}. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь $\xi_{xи}$, $\xi_{zи}$ — шумы определения собственных координат информационной и ударной позиций, $\xi_{\psiи}$ — шумы ошибок определения собственного курса, а $\xi_{\varepsilonи}$ — шумы ошибок измерений углов линии визирования цели с них, характеризуемые СКО $\sigma_{xи}$, $\sigma_{\psiи}$, $\sigma_{\varphiи}$.

Далее любым из подходящих способов, определяемых взаимной геометрией позиций и цели, проводится расчет косвенных (вторичных) измерений. С учетом того, что расстояние от ударной позиции до информационной обычно достаточно велико, был использован триангуляционный метод. Для этого сначала определяется угол наклона базы и ее размер:

$$\varphi_B = \arctg \frac{x_{2и} - x_{1и}}{z_{2и} - z_{1и}}, \quad D_B = \sqrt{(x_{2и} - x_{1и})^2 + (z_{2и} - z_{1и})^2}. \quad (11)$$

Расчет на основе полученного угла наклона базы φ_B и курсов $\psi_{1и}$, $\psi_{2и}$ и бортовых пеленгов $\varphi_{1и}$, $\varphi_{2и}$ внутренних углов пеленгационного треугольника α_1 , α_2 зависит от геометрии расположения цели и позиций. Например, для рисунка 1 они определяются следующим образом:

$$\alpha_1 = \varphi_B - \varphi_1 - \psi_1, \quad \alpha_2 = |\varphi_B - \varphi_2 - \psi_2| - \pi. \quad (12)$$

Зная (11), (12) получаем дальности до цели:

$$D_1 = D_B \frac{\sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}, \quad D_2 = D_B \frac{\sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (13)$$

и ее координаты:

$$x_{ц} = x_{1н} + D_B \cos \varepsilon_{1н}, \quad z_{ц} = z_{1н} + D_B \sin \varepsilon_{1н}. \quad (14)$$

На втором этапе на основе гипотезы движения с постоянной первой производной можно получить модель состояния:

$$\begin{aligned} x_{ц}(k) &= x_{ц}(k-1) + V_{xц}(k-1)\tau, & V_{xц}(k) &= V_{xц}(k-1) + \xi_{xц}, \\ z_{ц}(k) &= z_{ц}(k-1) + V_{zц}(k-1)\tau, & V_{zц}(k) &= V_{zц}(k-1) + \xi_{zц}, \\ D_1(k) &= D_1(k-1) + V_{сб1}(k-1)\tau, & V_{сб1}(k) &= V_{сб1}(k-1) + \xi_{V_{сб1}}, \\ D_2(k) &= D_2(k-1) + V_{сб2}(k-1)\tau, & V_{сб2}(k) &= V_{сб2}(k-1) + \xi_{V_{сб2}}, \\ \varphi_1(k) &= \varphi_1(k-1) + \omega_1(k-1)\tau, & \omega_1(k) &= \omega_1(k-1) + \xi_{\omega_1}. \end{aligned} \quad (15)$$

где ω_1 — угловая скорость цели с информационной позиции.

Уравнения наблюдения относительно косвенных измерений (13), (14), выбранные с учетом выполнения условия наблюдаемости [12], определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} x_{цн}(k) &= Q_x[x_{ц}(k) + \xi_{xн}], & z_{цн}(k) &= Q_z[z_{ц}(k) + \xi_{zн}], \\ D_{1н}(k) &= Q_{D1}[D_1(k) + \xi_{D1н}], & D_{2н}(k) &= Q_{D2}[D_2(k) + \xi_{D2н}], \\ \varphi_{1н}(k) &= Q_{\varphi1}[\varphi_1(k) + \xi_{\varphi1н}], \end{aligned} \quad (16)$$

где $x_{цн}$, $z_{цн}$ определяются (14), $D_{1н}$, $D_{2н}$ — соотношениями (13), $\varphi_{1н}$ измеряется угломером, а Q_x , Q_z , Q_{D1} , Q_{D2} , $Q_{\varphi1}$ — признаки прихода соответствующих измерений.

В математическом плане постановка задачи формулируется следующим образом. Для системы (15) при наличии косвенных измерений (16), полученных из первичных измерений (10) по формулам (11)-(14), необходимо по правилам (4)-(9) получить оценки координат цели $\hat{x}_{ц}$, $\hat{z}_{ц}$, ее скорости в проекциях на оси системы координат $\hat{V}_{xц}$, $\hat{V}_{zц}$, а также дальностей \hat{D}_1 , \hat{D}_2 от информационной и ударной позиций до

цели, скоростей сближения $\hat{V}_{сб1}$, $\hat{V}_{сб2}$ с ней, а также бортового пеленга $\hat{\varphi}_1$ цели с информационной позиции и его угловой скорости $\hat{\omega}_1$.

Пусть векторы состояния и измерений из (2), (3) имеют вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k) &= [x_{ц}, V_{хц}, z_{ц}, V_{зц}, D_1, V_{сб1}, D_2, V_{сб2}, \varphi_{г1}, \omega_{\varphi 1}]^T, \\ \mathbf{z}(k) &= [x_{цн}, z_{цн}, D_{1н}, D_{2н}, \varphi_{1н}]^T. \end{aligned} \quad (17)$$

Поставив в соответствие (15), (16) с (2), (3) и с учетом (17), получим векторно-матричные выражения, необходимые для выполнения процедуры фильтрации на Π_1 :

$$\Phi(k, k-1) = \begin{bmatrix} 1 & \tau & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \tau & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \tau & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \tau & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\xi_x(k-1) = [0, \xi_{хц}, 0, \xi_{зц}, 0, \xi_{V1}, 0, \xi_{V2}, 0, \xi_{\omega\varphi 1}]^T,$$

$$\mathbf{D}_x(k-1) = \text{diag}[0, D_{хц}, 0, D_{зц}, 0, D_{V1}, 0, D_{V2}, 0, D_{\omega\varphi 1}],$$

$$\mathbf{H}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\xi_{н}(k) = [\xi_{нх}, \xi_{нз}, \xi_{нD1}, \xi_{нD2}, \xi_{н\varphi 1}]^T,$$

$$\mathbf{Q} = \text{diag}[Q_x, Q_z, Q_{D1}, Q_{D2}, Q_{\varphi 1}],$$

$$\mathbf{D}_n(k) = \text{diag} [D_{nx}, D_{uz}, D_{uД1}, D_{uД2}, D_{u\phi1}].$$

$$\mathbf{D}(k, k-1) = [d_{ij}(k, k-1)], \quad \mathbf{D}(k) = [d_{ij}(k)], \quad i = \overline{1, 10}, \quad j = \overline{1, 10}. \quad (20)$$

Тогда в соответствии с (4)-(6) можно получить алгоритм фильтрации:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{\text{II}}(k) &= x_{\text{II}0} + k_{\Phi 1,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 1,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 1,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 1,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 1,5} \Delta z_{\phi 1}; \\ \hat{V}_{\text{XII}}(k) &= V_{\text{XII}0} + k_{\Phi 2,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 2,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 2,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 2,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 2,5} \Delta z_{\phi 1}; \\ \hat{z}_{\text{II}}(k) &= z_{\text{II}0} + k_{\Phi 3,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 3,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 3,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 3,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 3,5} \Delta z_{\phi 1}; \\ \hat{V}_{\text{ZII}}(k) &= V_{\text{ZII}0} + k_{\Phi 4,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 4,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 4,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 4,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 4,5} \Delta z_{\phi 1}; \\ \hat{\text{Д}}_1(k) &= \text{Д}_{10} + k_{\Phi 5,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 5,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 5,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 5,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 5,5} \Delta z_{\phi 1}; \\ \hat{V}_{\text{сб1}0}(k) &= V_{\text{сб1}0} + k_{\Phi 6,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 6,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 6,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 6,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 6,5} \Delta z_{\phi 1}; \\ \hat{\text{Д}}_2(k) &= \text{Д}_{20} + k_{\Phi 7,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 7,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 7,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 7,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 7,5} \Delta z_{\phi 1}; \\ \hat{V}_{\text{сб2}0}(k) &= V_{\text{сб2}0} + k_{\Phi 8,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 8,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 8,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 8,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 8,5} \Delta z_{\phi 1}; \\ \hat{\phi}_1(k) &= \phi_{10} + k_{\Phi 9,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 9,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 9,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 9,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 9,5} \Delta z_{\phi 1}; \\ \hat{\omega}_1(k) &= \omega_{10} + k_{\Phi 10,1} \Delta z_{\text{XII}} + k_{\Phi 10,2} \Delta z_{\text{ZII}} + k_{\Phi 10,3} \Delta z_{\text{ДI}} + k_{\Phi 10,4} \Delta z_{\text{ДII}} + k_{\Phi 10,5} \Delta z_{\phi 1}; \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} x_{\text{II}0}(k) &= \hat{x}_{\text{II}}(k-1) + \hat{V}_{\text{XII}}(k-1) \cdot \tau, & x_{\text{II}0}(0) &= x_{\text{II}0}; \\ V_{\text{XII}0}(k) &= \hat{V}_{\text{XII}}(k-1), & V_{\text{XII}0}(0) &= V_{\text{XII}0}; \\ z_{\text{II}0}(k) &= \hat{z}_{\text{II}}(k-1) + \hat{V}_{\text{ZII}}(k-1) \cdot \tau, & z_{\text{II}0}(0) &= z_{\text{II}0}; \\ V_{\text{ZII}0}(k) &= \hat{V}_{\text{ZII}}(k-1), & V_{\text{ZII}0}(0) &= V_{\text{ZII}0}; \\ \text{Д}_{10}(k) &= \hat{\text{Д}}_1(k-1) + \hat{V}_{\text{сб1}0}(k-1) \cdot \tau, & \text{Д}_{10}(0) &= \text{Д}_{10}; \\ V_{\text{сб1}0}(k) &= \hat{V}_{\text{сб1}0}(k-1), & V_{\text{сб1}0}(0) &= V_{\text{сб1}0}; \\ \text{Д}_{20}(k) &= \hat{\text{Д}}_2(k-1) + \hat{V}_{\text{сб2}0}(k-1) \cdot \tau, & \text{Д}_{20}(0) &= \text{Д}_{20}; \\ V_{\text{сб2}0}(k) &= \hat{V}_{\text{сб2}0}(k-1), & V_{\text{сб2}0}(0) &= V_{\text{сб2}0}; \\ \phi_{10}(k) &= \hat{\phi}_1(k-1) + \hat{\omega}_1(k-1) \cdot \tau, & \phi_{10}(0) &= \phi_{10}; \\ \omega_{10}(k) &= \hat{\omega}_1(k-1); & \omega_{10}(0) &= \omega_{\phi 1,0}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \Delta z_{x_1}(k) &= x_{ц1}(k) - Q_x x_{ц0}(k); & \Delta z_{z_1}(k) &= z_{ц1}(k) - Q_z z_{ц0}(k), \\ \Delta z_{Д1}(k) &= D_{1н}(k) - Q_{Д1} D_{1э}(k); & \Delta z_{Д2}(k) &= D_{2н}(k) - Q_{Д2} D_{2э}(k), & (23) \\ \Delta z_{\varphi_1}(k) &= \varphi_{1н}(k) - Q_{\varphi_1} \varphi_{1э}(k), \end{aligned}$$

а коэффициенты $k_{\Phi_{i,j}}$, $i = \overline{1,10}$, $j = \overline{1,5}$, усиления невязок (23) рассчитываются в процессе решения уравнений (7)-(9).

Особенностью полученного алгоритма фильтрации (21)-(23) является использование косвенных измерений (13), (14), позволяющих ограничиться линейной моделью измерений (16) и линейным вариантом калмановской фильтрации, что существенно снижает вычислительную сложность алгоритма [15-16].

Кроме того, использование аналого-дискретной фильтрации (4)-(9) позволяет получать текущие оценки при достаточно редко поступающих измерениях.

3. Исследование работоспособности алгоритма оценивания дальности. Исследование полученного алгоритма проводилось в процессе совместного моделирования движения обеих позиций и цели при следующих условиях.

1. Позиции и цель движутся в горизонтальной плоскости по произвольным траекториям, которые определяются следующими уравнениями:

– для цели:

$$\begin{aligned} x_{ц}^*(k) &= x_{ц}^*(k-1) + V_{ц}^*(k-1) \cdot \sin \psi_{ц}^*(k-1) \tau, & x_{ц}^*(0) &= x_{ц0}^*; \\ z_{ц}^*(k) &= z_{ц}^*(k-1) + V_{ц}^*(k-1) \cdot \cos \psi_{ц}^*(k-1) \tau, & z_{ц}^*(0) &= z_{ц0}^*; \\ V_{ц}^*(k) &= V_{ц}^*(k-1) + a_{ц}^*(k-1) \cdot \tau, & V_{ц}^*(0) &= V_{ц0}^*; \\ a_{ц}^*(k) &= a_{ц}^*(k-1) + \xi_{ц}^*, & a_{ц}^*(0) &= a_{ц0}^*; \end{aligned} \quad (24)$$

– для информационной и ударной позиций:

$$\begin{aligned} x_i^*(k) &= x_i^*(k-1) + V_i^*(k-1) \cdot \sin \psi_i^*(k-1) \tau, & x_i^*(0) &= x_{i0}^*; \\ z_i^*(k) &= z_i^*(k-1) + V_i^*(k-1) \cdot \cos \psi_i^*(k-1) \tau, & z_i^*(0) &= z_{i0}^*; \\ V_i^*(k) &= V_i^*(k-1) + a_i^*(k-1) \cdot \tau, & V_i^*(0) &= V_{i0}^*; \\ a_i^*(k) &= a_i^*(k-1) + \xi_{ai}^*, & a_i^*(0) &= a_{i0}^*; \end{aligned} \quad (25)$$

где $x_{ц}^*$, $z_{ц}^*$ и x_i^* , z_i^* , $i = 1, 2$, — «эталонные» координаты цели и обеих позиций в неподвижной декартовой системе координат соответствен-

но, $V_{ц}^*$, V_i^* , $a_{ц}^*$, a_i^* , $\Psi_{ц}^*$ и Ψ_i^* — их скорость, продольное ускорение и курс соответственно, $\xi_{ц}^*$, ξ_{ai}^* — возмущения движения. Курсы цели $\Psi_{ц}^*(k) = \Psi_{ц}(k)$ и позиций $\Psi_i^*(k1) = \Psi_i(k)$ формируются программным способом и определяются условиями моделирования.

2. Первичные измерения формируются из (24), (25) по правилам:

$$\begin{aligned} x_{1н} &= x_1^* + \xi_{хн}, & z_{1н} &= z_1^* + \xi_{zn}, & x_{2н} &= x_2^* + \xi_{хн}, & z_{2н} &= z_2^* + \xi_{zn}, \\ \psi_{1н} &= \psi_1^* + \xi_{\psiн}, & \psi_{2н} &= \psi_2^* + \xi_{\psiн}, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\varepsilon_{1н} = \arctg \frac{z_{ц}^* - z_i^*}{x_{ц}^* - x_i^*} + \xi_{\varepsilonн}, \quad \varepsilon_{2н} = \arctg \frac{z_{ц}^* - z_i^*}{x_{ц}^* - x_i^*} + \xi_{\varepsilonн}, \quad (27)$$

на основе которых при помощи (11)-(14) получаются косвенные измерения (16).

3. Измерения от обеих позиций приходят одновременно при следующих интервалах $T = 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2$ с. Шаги моделирования и экстраполяции приняты одинаковыми $\tau = 0,01$ с.

4. В качестве показателей эффективности используются текущее среднее квадратичное отклонение ошибок фильтрации, определяемое соотношениями:

$$\sigma_{xi}(k) = \sqrt{\frac{1}{J-1} \sum_{n=1}^J [m_{xi}(k) - \hat{x}_i(k)]^2}, \quad (28)$$

где J — число реализаций.

Целью исследования являлось сравнение теоретической ($T = 0,05$ с) и реальной ($T \sim 1$ с) эффективности алгоритма фильтрации (21)-(23).

Для каждого набора исходных данных проводилось 50 экспериментов, результаты которых были обработаны для получения усредненных значений показателей эффективности.

Начальные параметры движения информационной и ударной позиций и цели для одного из исследовавшихся вариантов представлены в таблице 1, а на рисунке 2 показаны траектории их движения. Показатели точности измерений для обеих позиций приняты одинаковыми и указаны в таблице 2.

Таблица 1. Начальные параметры движения

	x_0 , км	z_0 , км	V_0 , м/с	a_0 , м/с ²	ψ_0 , °	σ_a , м/с ²
Информационная позиция	0	0	250	0	0	0,01
Ударная позиция	0	300	250	0	0	0,01
Цель	250	200	200	0	315	0,01

Таблица 2. СКО ошибок измерений

Прямые измерения		
σ_{xz} , м	σ_{ψ} , °	σ_{φ} , °
100	0,01	0,09
Косвенные измерения		
$\sigma_{нд}$, м	$\sigma_{и,х}$, м	$\sigma_{и,з}$, м
491,2	511,4	402,8

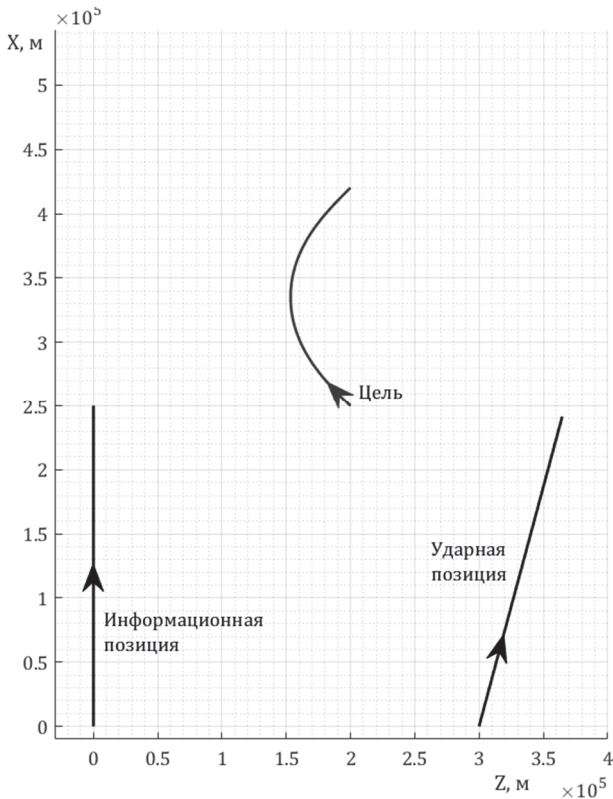


Рис. 2. Траектории полёта информационной и ударной позиций и цели

Графики изменения дальностей от позиций до цели во времени приведены на рисунке 3, а скоростей сближения с ней — на рисунке 4.

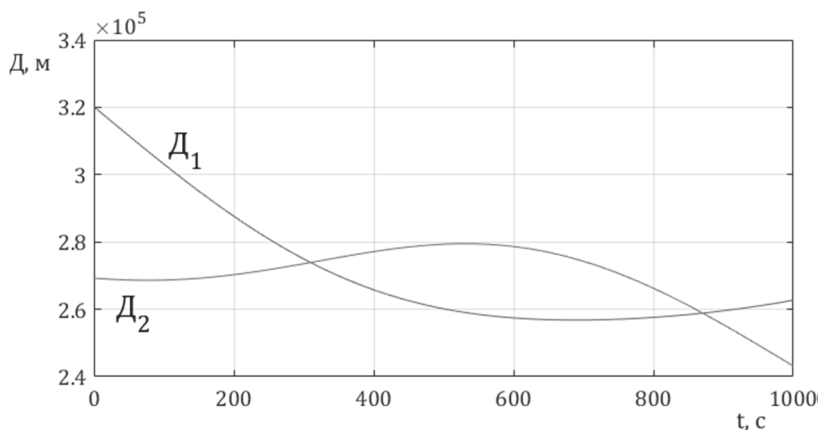


Рис. 3. Изменение дальностей от позиций до цели

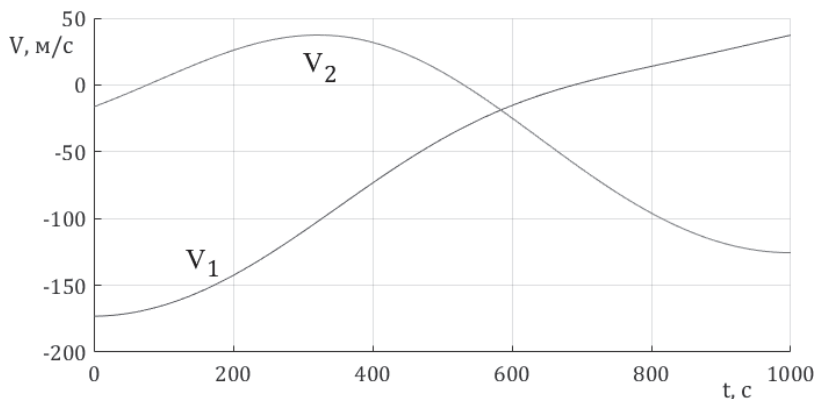


Рис. 4. Изменение скоростей сближения позиций с целью

На рисунках 5-7 показаны результаты моделирования данного варианта для первых 150 с. На рисунке 5 приведены погрешности оценивания координат цели $\Delta x_{ц} = \hat{x}_{ц} - x_{ц}^*$ и $\Delta z_{ц} = \hat{z}_{ц} - z_{ц}^*$ по сравнению с погрешностью косвенных измерений.

На рисунках 6 и 7 — погрешности оценивания дальностей от цели до позиций $\Delta D_i = \hat{D}_i - D_i^*$ и скоростей сближения $\Delta V_i = \hat{V}_i - V_i^*$ с

ними соответственно. Для расчета эталонных дальностей D_i^* и скоростей сближения V_i^* используются (24), (25).

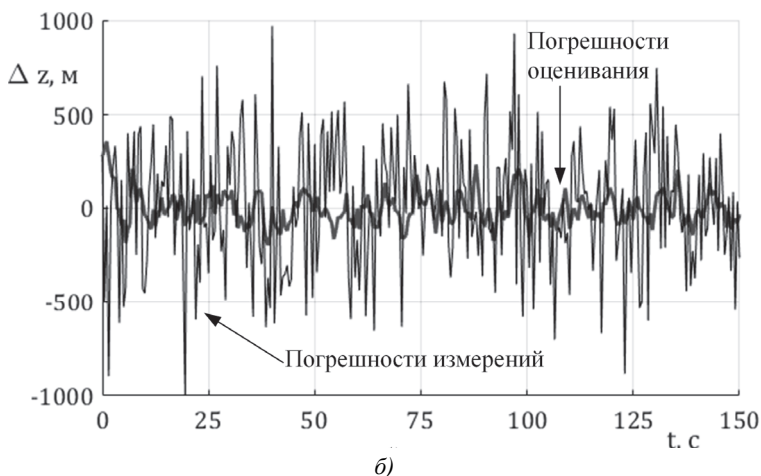
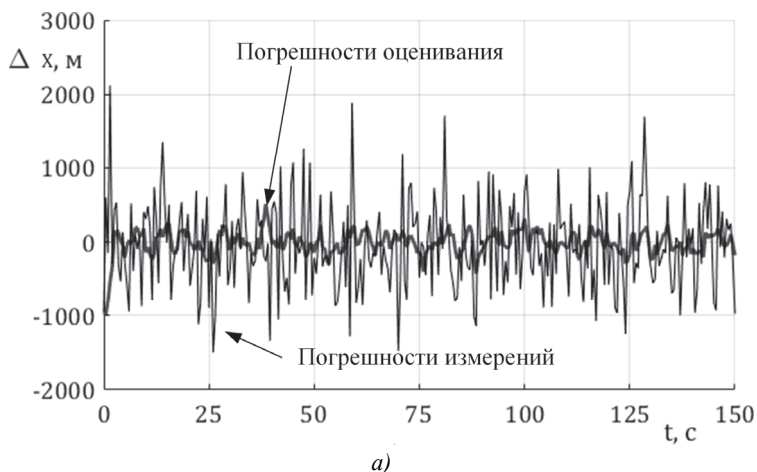


Рис. 5. Графики текущих погрешностей оценивания координат цели

В таблице 3 приведены установившиеся значения среднеквадратичного отклонение ошибок оценивания координат цели, дальностей и скоростей сближения с ней.

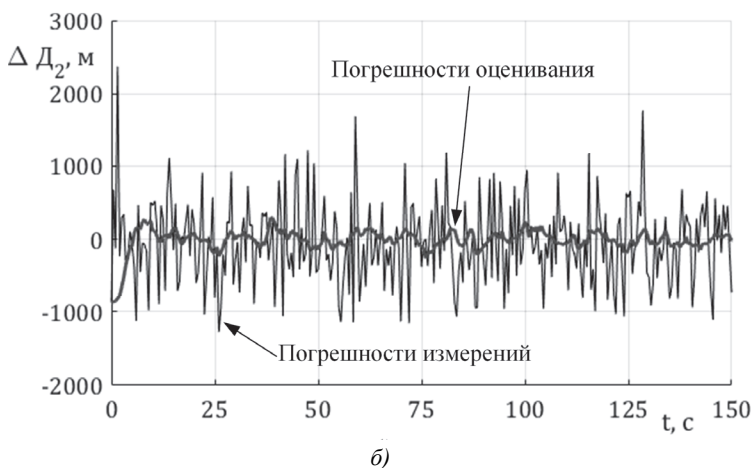
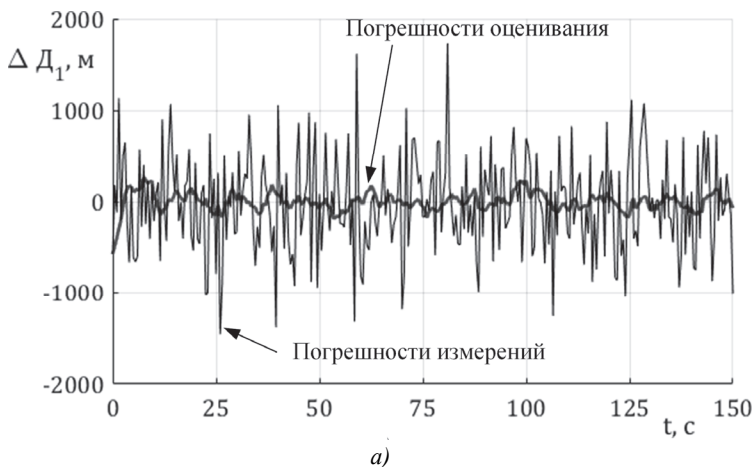
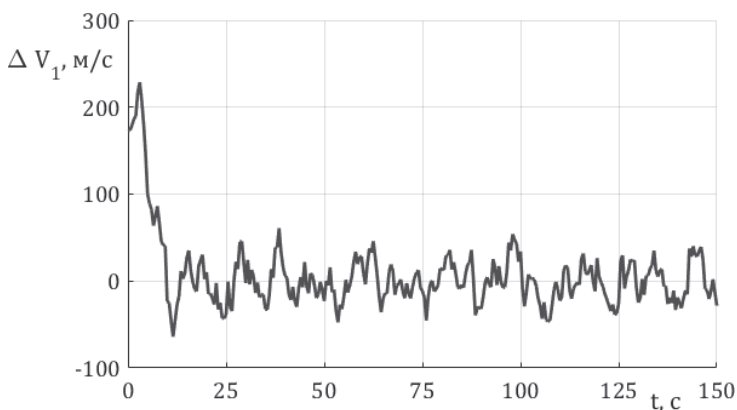
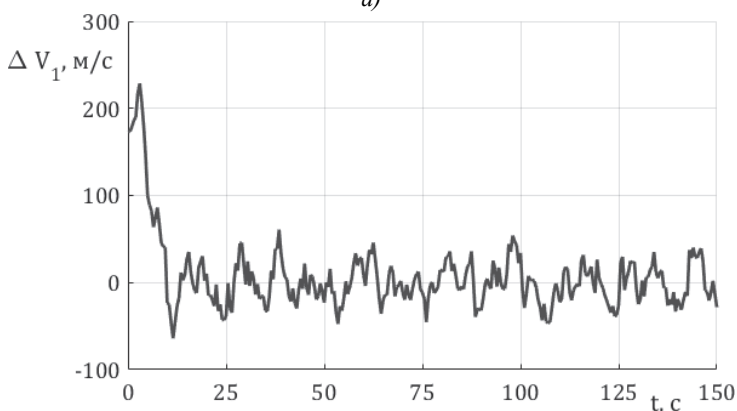


Рис. 6. Графики текущих погрешностей оценивания дальности от цели до ин-
формационной (а) и ударной (б) позиций

Как видно из представленных результатов, полученный фильтр даже в достаточно сложных условиях, сильно отличающихся от гипотез, при которых он был получен, позволяет за короткое время (время регулирования по всем оцениваемым координатам состояния не превышает 10 с) получить достаточно точные оценки. Выигрыш по точности при этом относительно косвенных измерений (см. таблицу 2) составляет порядка 5 раз.



а)



б)

Рис. 7. Графики текущих погрешностей оценивания скорости сближения цели с информационной (а) и ударной (б) позициями

Таблица 3. Устоявшиеся СКО ошибок оценивания координат

$\sigma_x, \text{ м}$	$\sigma_z, \text{ м}$	$\sigma_{д1}, \text{ м}$	$\sigma_{д2}, \text{ м}$	$\sigma_{V1}, \text{ м/с}$	$\sigma_{V2}, \text{ м/с}$
114,1	85,8	87,2	84,9	24,5	22,8

Отдельно исследовалось влияние интервала прихода измерений на показатели эффективности алгоритма. Для этого моделирование было произведено для следующих интервалов: $T = 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2$ с. Графики изменения СКО ошибок оценивания от величины интервала приведены на рисунке 8 (координаты цели), 9 (дальности до цели) и 10 (скорости сближения). Горизонтальными прямыми на рисунках 8 и 9 обозначены СКО соответствующих косвенных измерений.

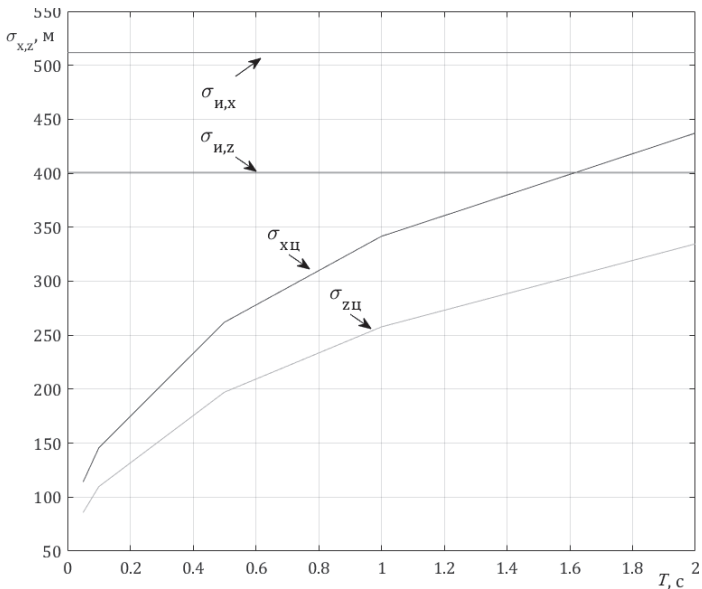


Рис. 8. Зависимость СКО ошибок оценивания координат цели от интервала прихода измерений

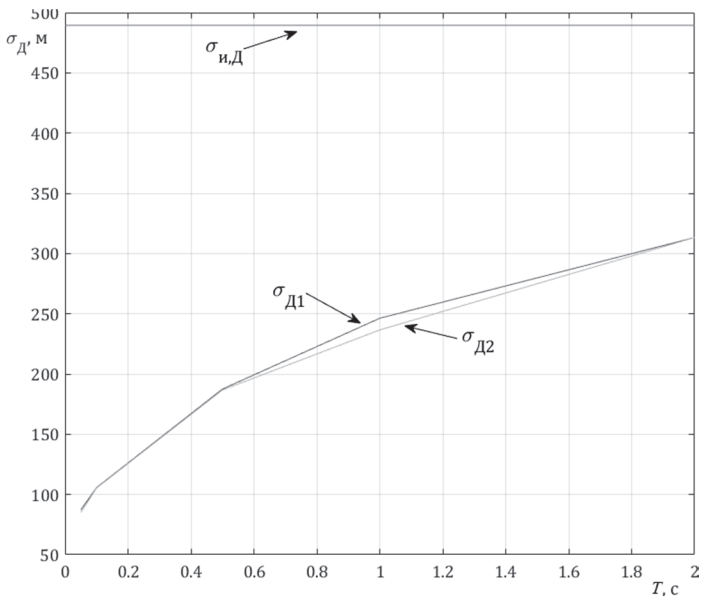


Рис. 9. Зависимость СКО ошибок оценивания дальности от интервала прихода измерений

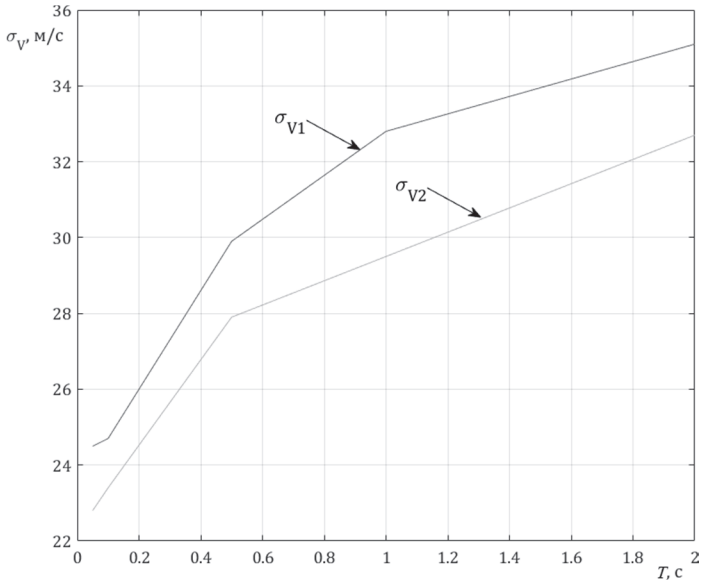


Рис. 10. Зависимость СКО ошибок оценивания скорости сближения от интервала прихода измерений

Как видно из рисунков 8-10, СКО ошибок оценивания возрастает с увеличением интервала прихода измерений и при $T \approx 2 \dots 3$ с практически сравнивается с СКО самих косвенных измерений.

4. Заключение. Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Полученные результаты моделирования подтверждают, что предлагаемые алгоритмы линейной аналого-дискретной фильтрации по косвенным измерениям для пассивных двухпозиционных систем устойчиво обеспечивают достаточно точное оценивание дальности и скорости цели, даже при достаточно редких (дискретных) измерениях бортовых пеленгов.

2. Выигрыш по точности предлагаемого алгоритма достигает 5 раз при интервале прихода измерений $T \approx 0,05, \dots, 0,1$ с.

3. Максимальный допустимый интервал прихода измерений составляет $T \approx 2 \dots 3$ с, при этом СКО ошибок оценивания координат практически сравнивается с СКО самих косвенных измерений.

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

Литература

1. Бортовые системы управления боевыми режимами современных и перспективных самолетов. Книга 1. Аналитический обзор по материалам зарубежных информационных источников. / Под ред. Е.А. Федосова // М.: ГосНИИ АС. 2009.
2. Авиационные системы радиоуправления / Под ред. В.С. Вербы и В.И. Меркулова // М.: Радиотехника. 2014. 376 с.
3. *Верба В.С.* Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования // М.: Радиотехника. 2014. 528 с.
4. *Меркулов В.И. и др.* Авиационные системы радиоуправления. Т. 2. Радиоэлектронные системы самонаведения // М.: Радиотехника. 2003. 390 с.
5. *Меркулов В.И.* Управление пассивными двухпозиционными РЛС в режиме наведения на радиоизлучающую воздушную цель // Радиотехника. 2005. № 6. С. 22–27.
6. *Белик Б.В., Сузанский Д.Н., Чернов В.С.* Способы оценивания дальности до подвижного источника радиоизлучения на основе угломерных данных на борту летательного аппарата // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2014. Т. 12. № 3. С. 19–25.
7. Системы радиоуправления. Кн. 1. Состояния и тенденции развития систем радиоуправления / Под ред. В. С. Вербы // М.: Радиотехника. 2013. 268 с.
8. *Дрогалин В.В. и др.* Алгоритмы оценивания координат и параметров движения радиоизлучающих целей в угломерных двухпозиционных бортовых радиолокационных системах // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2003. Т. 1. № 1. С. 4–24.
9. *Дрогалин В.В. и др.* Оценивание параметров линейной траектории движения цели в угломерной двухпозиционной системе на основе алгоритмов α, β -фильтрации // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2003. Т. 1. № 2-3. С. 14–19.
10. *Меркулов В.И., Чернов В.С., Радоминов О.Е.* Алгоритм обработки неодновременно поступающих данных в пассивных угломерных многопозиционных системах на основе расширенного фильтра Калмана // Радиотехника. 2011. № 6. С. 108–112.
11. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. Ч. 3 / Под ред. В.С. Вербы, В.И. Меркулова // М. Радиотехника. 2010.
12. *Ярлыков М.С., Бозачев А.С., Меркулов В.И., Дрогалин В.В.* Радиоэлектронные комплексы навигации прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов. Т. 1. Теоретические основы // М.: Радиотехника. 2012. 504 с.
13. *He Y., Hiu J., Guan X.* Radar data processing with applications // John Wiley & Sons, Inc. 2016. 536 p.
14. *Dahmani M., Meche A., Keche M., Ouamri A.* A new decoupled unbiased converted measurement adaptive α, β filter developed for target tracking // 2017 Seminar on Detection Systems Architecture and Technologies (DAT). 2017. pp. 1–6.
15. *Kumar R.S.R., Ramaiah M.V., Kumar J.R.* Performance comparison of α - β - γ filter and kalman filter for CA, NCA target tracking using bistatic range and range rate measurements // 2014 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP). 2014. pp. 1462–1466.
16. *Vinaykumar M., Ravi Kumar J.* Performance evaluation of Alpha-Beta and Kalman filter for object tracking // 2014 IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies. 2014. pp. 1369–1373.

Меркулов Владимир Иванович — д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заместитель генерального конструктора, АО "Концерн "Вега". Область научных интересов: оптимизация систем радиолокации и радиоуправления. Число научных публикаций — 588. vegapost2010@gmail.com; Кутузовский пр-т, 34, Москва, 121170; р.т.: +74997534004, доб. 9250. Факс: +74997534004.

Садовский Петр Алексеевич — к-т техн. наук, начальник лаборатории отдела перспектив развития систем радиоуправления и радиолокации, АО «Концерн «Вега». Область научных интересов: оптимизация систем радиоуправления. Число научных публикаций — 17. spapost@gmail.com; Кутузовский пр-т, 34, Москва, 121170; р.т.: +74997534004, доб. 9244, Факс: +74959331563.

Поддержка исследования. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 15-08-04000-а, 16-08-00209-а).

V.I. MERKULOV, P.A. SADOVSKIY
**ESTIMATION OF DISTANCE AND ITS DERIVATIVES IN THE
 BISTATIC PASSIVE RADAR LOCATION SYSTEM**

Merkulov V.I., Sadovskiy P.A. Estimation of Distance and its Derivatives in the Bistatic Passive Radar Location System.

Abstract. Passive radar systems make it possible to detect and track sources of radio emission at a longer range than active systems, while increasing the stealth and survivability of its carriers. However, in order to carry out effective guidance on the emission source, it is necessary to have, on top of the estimates of the angular coordinates, estimates of range and velocity. In the case of single-passive systems, such estimates can be obtained by flying on a special trajectory, but accuracy even when tracking stationary objects is low. The most rational solution to this problem is to use multi-position passive systems.

The problem of estimating the coordinates in multi-position passive radar systems is considered in the article. Based on the apparatus of linear analog-discrete filtering, an algorithm is obtained for estimating the range and speed in a bistatic passive radar system. Results of simulation of the algorithms confirm its effectiveness and lesser computational cost when compared with non-linear algorithms.

Keywords: passive radar, bistatic radar, analog-discrete filtering, distance and velocity estimation.

Merkulov Vladimir Ivanovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, Honored scientist of Russian Federation, deputy chief designer, Radio-engineering Corporation Vega JSC. Research interests: optimization of radar and radiocontrol systems. The number of publications — 588. vegapost2010@gmail.com; 34, Kutuzov avenue, 121170, Moscow, Russia; office phone: +74997534004 ext. 9250, Fax: +74997534004.

Sadovskiy Petr Alekseyevich — Ph.D., head of laboratory, prospects of development of radio control systems and radar department, Radio-engineering Corporation Vega JSC. Research interests: optimization of radiocontrol systems. The number of publications — 17. spapost@gmail.com; 34, Kutuzov avenue, 121170, Moscow, Russia; office phone: +74997534004, ext. 9244, Fax: +74959331563.

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (grants 15-08-04000-a, 16-08-00209-a).

References

1. *Bortovye sistemy upravleniya boevymi rezhimami sovremennyh i perspektivnyh samoletov. Kniga 1. Analiticheskij obzor po materialam zarubezhnyh informacionnyh istochnikov. Pod red. E.A. Fedosova* [On-board control systems for combat modes of modern and prospective aircraft. Book 1. Analytical review on the materials of foreign information sources. Edited by E.A. Fedosov]. M.: GosNII AS. 2009. 172 p. (In Russ.).
2. *Aviacionnye sistemy radioupravleniya. Pod red. V.S. Verby i V.I. Merkulova* [Airborne radio control systems. Edited by V.S. Verba and V.I. Merkulov]. M.: Radiotekhnika. 2014. 376 p. (In Russ.).
3. Verba V.S. *Aviacionnye komplekсы radiolokacionnogo dozora i navedenija. Principy postroenija, problem razrabotki i osobennosti funkcionirovanija* [Airborne systems of

- radar surveillance and guidance. Construction principles, development problems and functioning]. M.: Radiotekhnika. 2014. 528 p. (In Russ.).
4. Merkulov V.I., et al. *Aviacionnye sistemy radioupravlenija. T. 2. Radioelektronnye sistemy samonavedenija*. [Aviation radio control systems. T. 2. Radio-electronic systems of homing]. M.: Radiotekhnika. 2003. 390 p. (In Russ.).
 5. Merkulov V.I. [Control of passive two-position radar in the mode of guidance for a radio-emitting air target]. *Radiotekhnika — Radiotechnics*. 2005. vol. 6. pp. 22–27. (In Russ.).
 6. Belik B.V., Suzansky D.N., Chernov V.S. [Methods of estimating the range to a mobile source of radio emission based on the goniometer data on board an aircraft] *Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy – Information-measuring and control systems*. 2014. Issue 12. vol. 3. pp. 19–25. (In Russ.).
 7. *Sistemy radioupravlenija. Kn. 1. Sostojanie i tendencii razvittija sistem radioupravlenija. Pod red. V.S. Verby* [Radio control systems. Book 1. State and development trends of radio control systems. Edited by V.S. Verba]. M.: Radiotekhnika. 2013. 268 p. (In Russ.).
 8. Drogalin V.V. et al. [Algorithms for estimating the coordinates and parameters of the motion of radio-emitting targets in the goniometric two-position onboard radar systems]. *Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy – Information-measuring and control systems*. 2003. Issue 1. vol. 1. pp. 4–24. (In Russ.).
 9. Drogalin V.V. et al. [Estimation of the parameters of the linear trajectory of the target's motion in the angular two-position system based on the $\alpha\beta$ -filtration algorithms]. *Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy – Information-measuring and control systems*. 2003. Issue 1. vol. 2-3. pp. 14–19. (In Russ.).
 10. Merkulov V.I., Chernov V.S., Radominov O.E. [Algorithm for processing non-simultaneous incoming data in passive goniometric multi-position systems based on Kalman's extended filter]. *Radiotekhnika – Radiotechnics*. 2011. vol. 6. pp. 108–112. (In Russ.).
 11. *Ocenivanie dal'nosti i skorosti v radiolokacionnyh sistemah. Ch. 3. Pod red. V.S. Verby, V.I. Merkulova* [Estimation of range and speed in radar systems. Part 3. Edited by V.S. Verba, V.I. Merkulov]. M.: Radiotekhnika. 2010. (In Russ.).
 12. Yarlykov M.S., Bogachev A.S., Merkulov V.I., Drogalin V.V. *Radioelektronnye komplekсы navigacii pricelivaniya i upravlenija voozruženiem letatel'nyh apparatov. T. 1. Teoreticheskie osnovy* [Radio-electronic navigation systems aiming and controlling aircraft armament. Issue 1. Theoretical Foundations]. M.: Radiotekhnika. 2012. 504 p. (In Russ.).
 13. He Y., Hiu J., Guan X. Radar data processing with applications. John Wiley & Sons, Inc. 2016. 536 p.
 14. Dahmani M., Meche A., Keche M., Ouamri A. A new decoupled unbiased converted measurement adaptive $\alpha\beta$ filter developed for target tracking. 2017 Seminar on Detection Systems Architecture and Technologies (DAT). 2017. pp. 1–6.
 15. Kumar R.S.R., Ramaiah M.V., Kumar J.R. Performance comparison of α - β filter and kalman filter for CA, NCA target tracking using bistatic range and range rate measurements. 2014 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP). 2014. pp. 1462–1466.
 16. Vinaykumar M., Ravi Kumar J. Performance evaluation of Alpha-Beta and Kalman filter for object tracking. 2014 IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies. 2014. pp. 1369–1373.