

ВЛИЯНИЕ ПОМЕХ НА ДАЛЬНОМЕРНЫЙ КАНАЛ БОРТОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

В. О. Скрипачев, А. Н. Белов

При синтезе радиоэлектронной системы радиоуправления зачастую принято использовать в качестве помех белый гауссовский шум. Однако для разработки перспективной системы управления может потребоваться учет других возмущений. В данной работе на примере дальномерного канала бортовой радиолокационной станции представлены оценки дальности и скорости при различных видах входных воздействий, и проведена оценка эффективности фильтрации этих помех фильтром Калмана. Проведен ряд испытаний, в которых путем компьютерного моделирования изучалось влияние случайного, белого гауссовского и дробного шума на эффективность сопровождения дальномерным каналом воздушного средства. В качестве основных показателей эффективности были выбраны дальность от объекта наблюдения до объекта управления, скорость сближения объекта наблюдения, а также значения дисперсий по скорости и дальности.

Ключевые слова: статистическая теория радиоуправления, беспилотные летательные средства, бортовая радиолокационная станция, фильтр Калмана, дальномерный канал, алгоритм управления дальномерным каналом.

Введение

Каналы дальности бортовой радиолокационной станции (БРЛС) предназначены для формирования оценок дальности до цели, скорости сближения с ней, абсолютной скорости цели и автоматической селекции сигналов цели по времени запаздывания отраженного сигнала (дальности) и доплеровской частоте (скорости сближения). В силу важности последней задачи указанные измерители часто называют автоселекторами дальности и скорости.

Сформированные оценки дальности \hat{D} и скорости сближения $\hat{V}_{от} = -\dot{\hat{D}}$ используются в алгоритмах траекторного управления, реализующих различные методы сопровождения [1].

Выбор и обоснование метода оптимизации алгоритма сопровождения по дальности

При синтезе радиоэлектронных систем радиоуправления, в которых можно существенно снизить энергетические затраты на управление и сформировать оценки требуемых координат состояния целей, перспективно использование алгоритмов статистической теории оптимального управления (СТОУ), на основе которых можно синтезировать многоконтурные системы, наилучшие как по точности и быстродействию, так и по устойчивости и экономичности сопровождения. СТОУ используется при наличии ограничений на систему. Для оптимизации дальномерного канала воздушного объекта необходимо выбрать вариант оптимизации. Классический вариант оптимизации в постановке Летова – Калмана имеет две особенности: необходимо знать конечное время функционирования; требуется решение двухточечной краевой задачи, что требует существенно более высокой производительности вычислительной системы [2].

В связи с этим будет использован локальный вариант оптимизации, в котором оптимизация осу-

ществляется на каждый текущий момент времени и не требует решения двухточечной краевой задачи.

В общем виде структура системы управления БРЛС полагается заданной и описывается в пространстве состояний следующим линейным уравнением:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) + \xi_{\mathbf{x}}(t), \quad \mathbf{x} = [\mathbf{x}_T^T \mathbf{x}_y^T]^T, \quad (1)$$

где $\mathbf{x}(t)$ – вектор состояний; \mathbf{F} – динамическая матрица состояний; $\xi_{\mathbf{x}}$ и $\xi_{\mathbf{y}}$ – векторы случайных возмущений; \mathbf{B} – матрица эффективности управления; $\mathbf{u}(t)$ – сигнал управления.

В состав системы (1) входит заданная часть

$$\dot{\mathbf{x}}_y = \mathbf{F}_y \mathbf{x}_y(t) + \mathbf{B}_y(t)\mathbf{u}(t) + \xi_{\mathbf{y}}(t),$$

предназначенная для обработки процесса

$$\dot{\mathbf{x}}_T = \mathbf{F}_x \mathbf{x}(t) + \xi_{\mathbf{x}}(t),$$

сформировать вектор \mathbf{u} сигналов управления радиоэлектронным средством на борту БПЛА

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}^{-1}\mathbf{B}_y^T \mathbf{Q} [\hat{\mathbf{x}}_T - \hat{\mathbf{x}}_y], \quad (2)$$

где \mathbf{Q} – матрица штрафов за точность управления; \mathbf{K} – матрица штрафов за величину сигналов управления.

Выражение (2) оптимально по минимуму локального функционала качества

$$I = \mathbf{M}_y \{ [\mathbf{x}_T(t) - \mathbf{x}_y(t)]^T \mathbf{Q} [\mathbf{x}_T(t) - \mathbf{x}_y(t)] + \int_0^t \mathbf{u}^T(t) \mathbf{K}(u) dt \}. \quad (3)$$

Выбор и обоснование исходных моделей состояний и измерений для дальномера

Для сопровождения необходимо иметь оценки отслеживаемой дальности $\hat{D}_{от}$, скорости $\hat{V}_{от}$ и ускорения сближения $\hat{J}_{от}$, а также оценку проекции скорости цели $\hat{V}_{ц}$ на линию визирования с учетом \mathbf{a}_c и $\mathbf{a}_{ц}$ – собственного ускорения и ускорения объ-

екта наблюдения по линии визирования и $\xi_{ас}, \xi_{ац}$ – центрированных гауссовских шумов с известными односторонними спектральными плотностями $G_{ас}$ и $G_{ац}$. Тогда модель отслеживаемого процесса можно представить в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\dot{D}_{от} = V_{от}, \dot{D}_{от}(0) = D_{от0}; \quad (4)$$

$$\dot{V}_{от} J_{от} = a_{ц} a_{с}, V_{от}(0) = V_{от0}; \quad (5)$$

$$\dot{a}_{с} = \xi_{ас}, a_{с}(0) = a_{с0}; \quad (6)$$

$$\dot{a}_{ц} = -\alpha a_{ц0} + \xi_{ац}, a_{ц}(0) = a_{ц0}, \quad (7)$$

где α – коэффициент, характеризующий маневренные свойства цели.

Модель заданной части (управителя) дальномера должна учитывать возможность устойчивого управления исполнительными устройствами и обеспечения режима памяти при кратковременных пропаданиях радиосигналов [3]. Для дальномера исполнительными устройствами являются генератор следящих стробов и опорный генератор, формирующий сигнал заданного значения опорной дальности. С учетом этого:

$$\dot{D}_y = V_y, D_y(0) = D_{y0}; \quad (8)$$

$$\dot{V}_y = \frac{b_v}{T} V_y + b_v u_v + \xi_{yv}, V_y(0) = V_{y0}, \quad (9)$$

где T – постоянная времени дальномера; b_v – коэффициент эффективности сигнала управления u_v ; ξ_{yv} – центрированные гауссовские шумы с известной односторонней спектральной плотностью G_{yv} .

Функционал качества управления:

$$I = M_y \left\{ \left[\begin{array}{c} D_{от} - D_y \\ V_{от} - V_y \end{array} \right]^T \left[\begin{array}{cc} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} D_{от} - D_y \\ V_{от} - V_y \end{array} \right] + \int_0^t u_v^2 k_u dt \right\}, \quad (10)$$

где $q_{11}, q_{12}, q_{21}, q_{22}$ – коэффициенты штрафов за точность слежения по дальности и скорости; k_u – коэффициент штрафа за сигнал управления u_v .

В качестве оценивания использовался фильтр Калмана. При наличии наблюдений

$$z(t) = H(t)x(t) + \xi_{н}(t), \quad (11)$$

где $z(k)$ – точные измерения; $H(k)x(k)$ – точные наблюдения; $\xi_{н}$ – шум с нулевым математическим ожиданием и матрицей односторонней спектральной плотности.

Математический аппарат теории оптимальной

линейной фильтрации позволяет для

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + Bu(t) + \xi_x(t), x = [x_x^T x_y^T]^T \quad (12)$$

сформировать оптимальную по критерию минимума суммарной дисперсии ошибок $M\{(x - \hat{x})^T(x - \hat{x})\}$ оценку $\hat{x} = M\{x|z\}$, где F – матрица постоянного измерения.

Для дискретных процессов используют алгоритм:

$$\hat{x}(k) = x_3 + K_{\Phi}(k)[z(k) - H(k)x_3], \quad (13)$$

где K_{Φ} – матричный коэффициент, который определяется точностью априорных сведений о состоянии оцениваемого процесса и наблюдений; $[z(k) - H(k)x_3]$ – невязка; x_3 – экстраполированный вектор состояний:

$$x_3 = \Phi(k, k-1)\hat{x}(k-1), \hat{x}(0) = x_0; \quad (14)$$

$$K_{\Phi}(k) = D(k, k-1)H^T(k) \times [H(k)D(k, k-1)H^T(k) + D_{н}(k)]^{-1}, \quad (15)$$

где $D(k)$ и $D(k, k-1)$ – апостериорная и априорная ковариационные матрицы ошибок фильтрации:

$$D(k) = [E - K_{\Phi}(k)H(k)]D(k, k-1), D(0) = D_0; \quad (16)$$

$$D(k, k-1) = \Phi(k, k-1)D(k-1)\Phi^T(k, k-1) + D_x(k-1), \quad (17)$$

где $H(k)\hat{x}(k)$ – прогноз наблюдений; E – единичная матрица [4].

Анализ выражений (13) – (17) позволяет сделать следующие выводы:

- фильтр, выполняющий прогнозирование и коррекцию результатов прогноза, представляет собой линейную нестационарную систему, в которой число обратных связей определяется числом наблюдаемых координат состояния;

- корректирующая поправка K_{Φ} зависит от невязки $[z(k) - H(k)x_3]$, характеризующей степень несоответствия результатов прогноза наблюдения и конкретного измерения \hat{x}_x, \hat{x}_y . При этом K_{Φ} определяет точность априорных сведений о состоянии оцениваемого процесса и наблюдений.

Синтез режима сопровождения по дальности

Сопоставляя выражения (10) с (3) и (4) – (9) с (1) будем иметь:

$$x_T [D_{от} V_{от}]^T, x_y = [D_y V_y]^T, u = u_v, K = k_u,$$

$$\mathbf{V}_y = \begin{bmatrix} 0 \\ b_v \end{bmatrix}, \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{bmatrix}, \mathbf{F}_r = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{F}_y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Подставляя (18) в (2) получаем сигнал управления для дальномера:

$$u_v = \frac{b_v q_{21}}{k_u} (\hat{D}_{от} - \hat{D}_y) + \frac{b_v q_{22}}{k_u} (\hat{V}_{от} - \hat{V}_y) = K_D \Delta D + K_V \Delta V. \quad (19)$$

Анализ полученной зависимости позволяет сделать следующие заключения:

- регулятор представляет собой систему с отрицательной обратной связью по всем управляемым координатам \hat{D}_y и \hat{V}_y ;

- для функционирования регулятора необходимы оптимальные оценки $\hat{D}_{от}$, \hat{D}_y и $\hat{V}_{от}$, \hat{V}_y ;

- сигнал управления зависит как от ошибок сопровождения по дальности $\hat{D}_{от} - \hat{D}_y$, так и ошибок по скорости $\hat{V}_{от} - \hat{V}_y$;

- вес ошибок в сигнале управления определяется соотношением штрафов за точность слежения и экономичность q_{21}/k_u и q_{22}/k_u .

Исследование эффективности дальномерной системы

Стоит отметить затратность (людскую, техническую, временную, финансовую и т. д.) проведения натуральных испытаний, высокую сложность и опасность приближения к экстремальным условиям функционирования дальномерной системы. Поэтому целесообразно реальные испытания заменить на испытания с применением имитационных моделей.

Также для любых расчетов необходимо произвести прогнозирование по определенной модели, чтоб иметь представления о ее недоработках и особенностях. Модель должна учитывать различные параметры и отражать различные условия использования самого устройства [5].

Так как в работе проводилось изучение влияния различных шумов на дальномерный канал БРЛС, то в качестве основных показателей эффективности выбраны: реальные значения дисперсий D_{11} и D_{22} , значения дальностей D до цели с учетом помех, а также значения скорости сближения V с учетом помех. В качестве видов шумов выбраны: случайный шум с среднеквадратичным отклонением (СКО) 5 м по дальности и 2 м/с по скорости, белый гауссовский шум и дробовый шум. Объект наблюдения летел равномерно со сверхзвуковой скоростью, равной 600 м/с.

На первом этапе проводилось изучение влияния случайного шума с СКО 5 м по дальности и 2 м/с по скорости, на втором соответственно рассматривался белый гауссовский шум, а на третьем дробовый.

На рис. 1, а и б, представлены графики изменения дисперсии по дальности и по скорости соответственно.

Как видно из рис. 1, а, б, наибольшие значения наблюдаются в начале сопровождения, так как происходит отработка первоначальных ошибок захвата. При этом стоит отметить, что несмотря на то, что значения дисперсий на графиках могут быть сильно меньше первоначальных ошибок, они не становятся равными нулю, а лишь принимают очень малые значения. На рис. 1, в, представлен график изменения дальности D , где 1 – реальное значение дальности; 2 – значение дальности, приходящее на БРЛС; 3 – значение после фильтрации. В момент времени 0,01 секунда происходит захват объекта наблюдения, поэтому наблюдается такой скачок. На рис. 1, в, приведены только первые 0,14 секунд работы БРЛС, так как в дальнейшем значения не будут превышать 1% от начальной дальности. Как видно из рис. 1, в, фильтр эффективно устраняет случайный шум по дальности.

На рис. 1, г, представлен график изменения скорости, где 1 – реальное значение скорости; 2 – значение скорости, приходящее на фильтр Калмана, а 3 – значение после фильтрации. Захват по скорости осуществляется в то же время, что и по дальности – в 0,01 секунду. Ошибки по скорости после фильтрации не превышают 1% от значения самой скорости.

Как видно из рис. 1 фильтр Калмана эффективно устраняет случайные помехи как по дальности, так и по скорости.

На втором этапе проводилось изучение влияния белого гауссовского шума. Значение отношения сигнал/шум было выбрано равным 1.

На рис. 2, а, представлен график изменения дисперсии по дальности для белого гауссовского шума.

В отличие от графика дисперсии случайного шума (см. рис. 1, а) данный график имеет более «гладкий» гиперболический вид. Также наибольшее значение дисперсия принимает в начале сопровождения, то есть когда происходит захват объекта сопровождения. Численно максимум значения реальной дисперсии при белом гауссовом шуме меньше в 1,5 раза, чем в случайном шуме.

На рис. 2, б, представлен график изменения реальной дисперсии для скорости с белым гауссовым шумом.

Максимум значения дисперсии по скорости меньше, чем у значений с случайным шумом в 3 раза. После отработок первоначальных ошибок захвата дисперсия начинает снижаться, но равной нулю не становится.

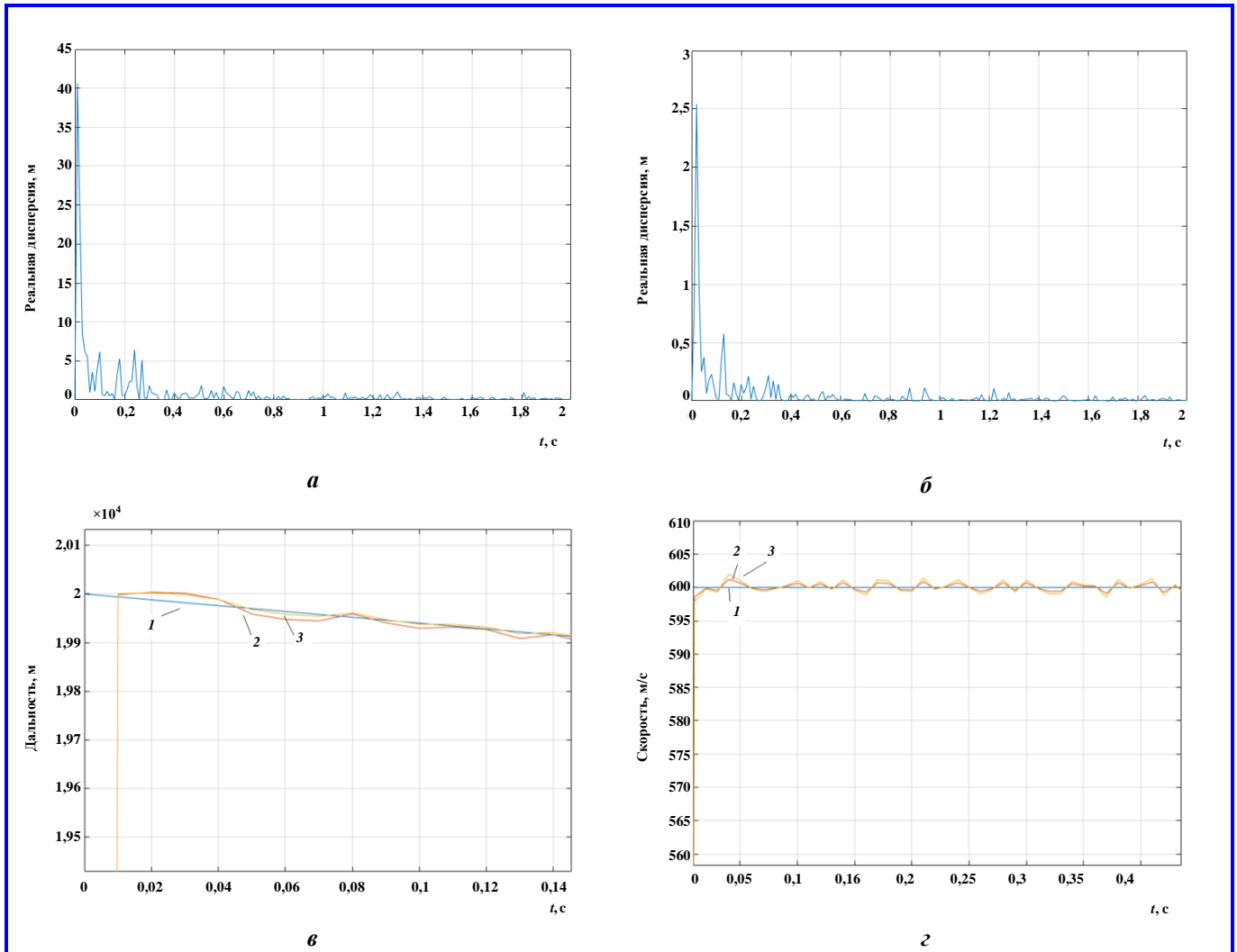


Рис. 1. Графики изменения реальной дисперсии с влиянием случайного шума: *а* – по дальности; *б* – по скорости; *в* – по дальности D , где *1* – реальное значение дальности; *2* – значение дальности, приходящее на бортовую радиолокационную станцию; *3* – значение после фильтрации; *г* – по скорости V , где *1* – реальное значение дальности; *2* – значение скорости, приходящее на фильтр Калмана; *3* – значение после фильтрации

На рис. 2, *в*, представлен график изменения дальности D , где *1* – реальное значение дальности; *2* – значение дальности, приходящее на БРЛС; *3* – значение после фильтрации. Захват по дальности осуществляется в момент времени, равный 0,01 секунды. Влияние помех на оценивание дальности существенно слабее, чем при воздействии случайного шума. Итоговое значение, по которому дальше проходят расчеты, отличается от реальной дальности менее чем на 1%.

На рис. 2, *г*, представлен график изменения скорости V , где *1* – реальное значение скорости; *2* – значение дальности, приходящее на фильтр Калмана; *3* – значение после фильтрации. Захват по скорости осуществляется в то же время, что и по дальности – в 0,01 секунду. Ошибки по скорости после фильтрации не превышают 1% от значения самой скорости.

Несмотря на различные помехи, графики

для случайного шума и белого гауссовского шума похожи, но значения на рис. 2, *в*, немного меньше, чем на рис. 1, *а*.

На третьем этапе проводилось изучение влияния дробового шума на эффективность сопровождения по дальности и скорости.

На рис. 3, *а*, представлен график изменения реальной дисперсии для дальности. Как видно из графика на первых этапах сопровождения значения дисперсии существенно больше, чем при других шумах, однако далее значение снижается и начинает стремиться к нулю.

На рис. 3, *б*, представлен график изменения реальной дисперсии для скорости. Аналогично графику дисперсии для дальности максимальное значение дисперсии намного больше значения при других шумах, но также стремится к нулю в конце сопровождения.

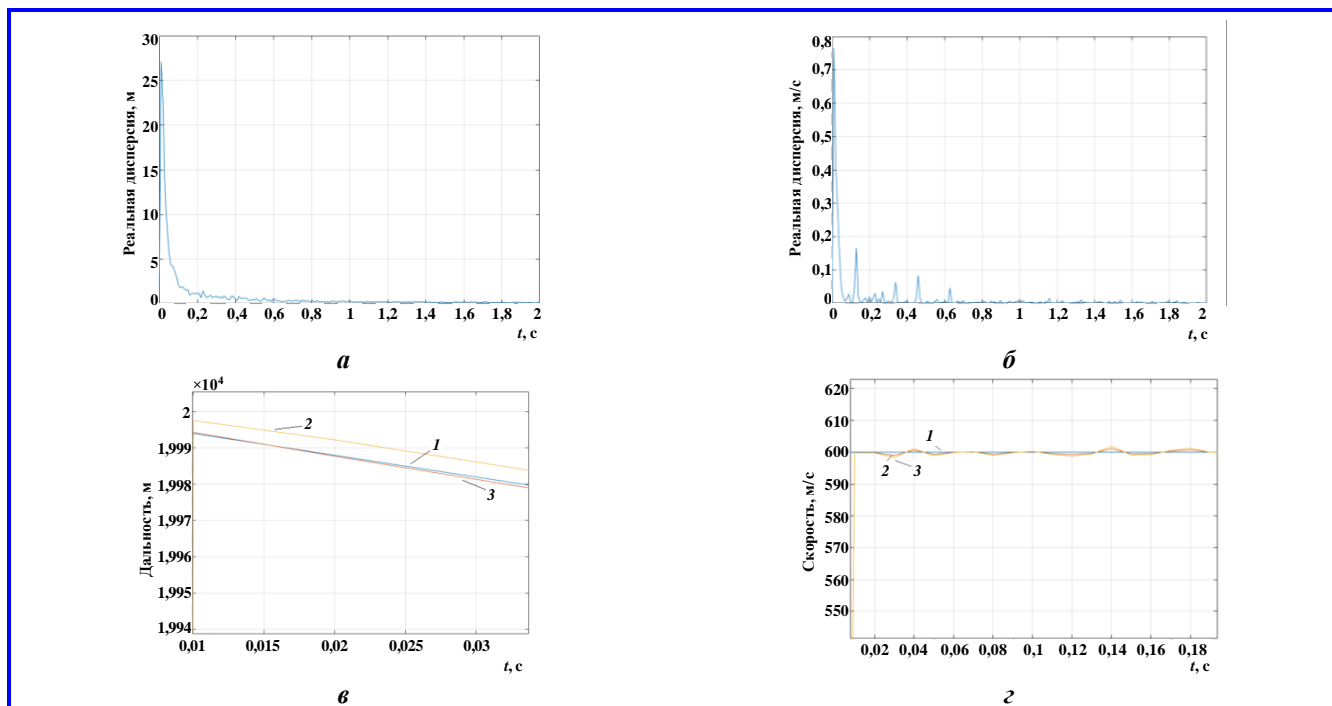


Рис. 2. Графики изменения реальной дисперсии с влиянием белого гауссовского шума: *а* – по дальности; *б* – по скорости; *в* – по дальности D , где 1 – реальное значение дальности; 2 – значение дальности, приходящее на бортовую радиолокационную станцию; 3 – значение после фильтрации; *г* – по скорости V , где 1 – реальное значение дальности; 2 – значение скорости, приходящее на фильтр Калмана; 3 – значение после фильтрации

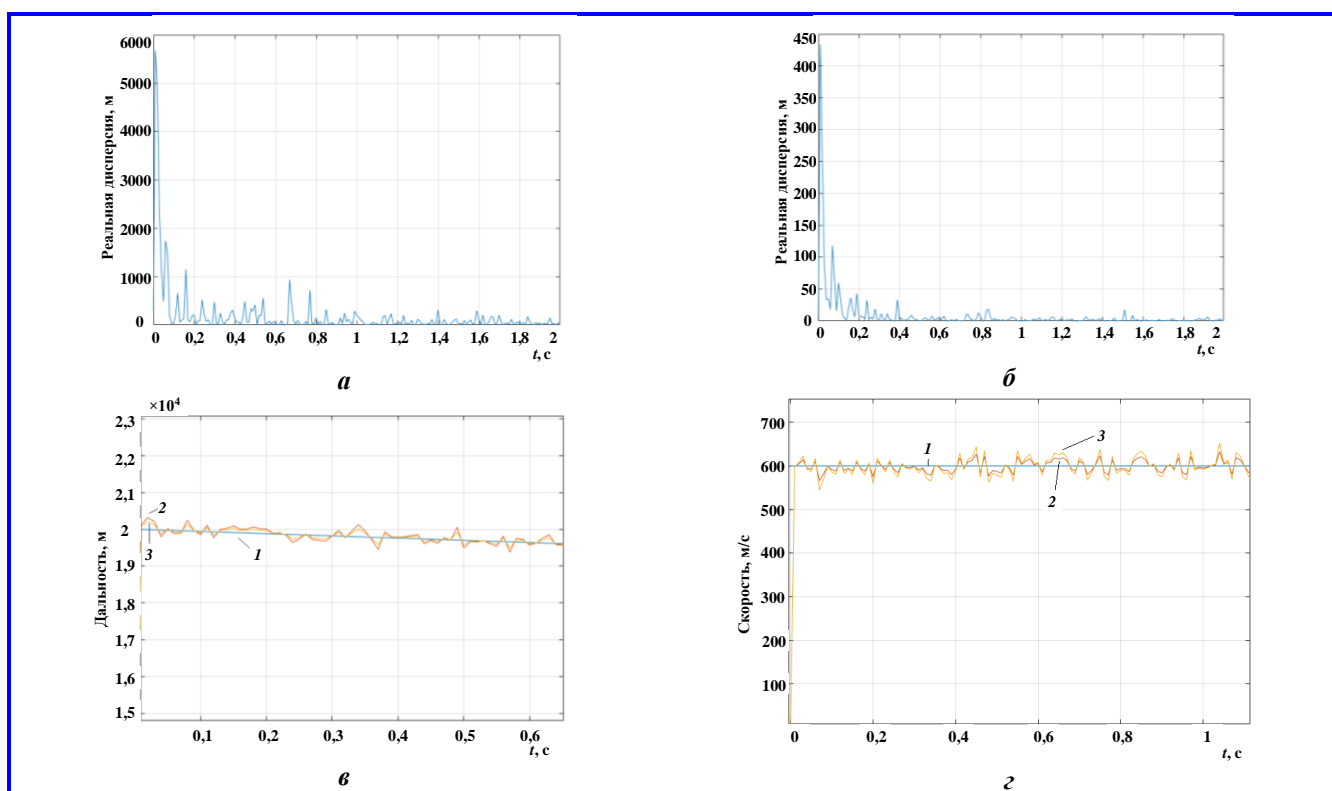


Рис. 3. Графики изменения реальной дисперсии с влиянием дробового шума: *а* – по дальности; *б* – по скорости; *в* – по дальности D , где 1 – реальное значение дальности; 2 – значение дальности, приходящее на бортовую радиолокационную станцию; 3 – значение после фильтрации; *г* – по скорости V , где 1 – реальное значение дальности; 2 – значение скорости, приходящее на фильтр Калмана; 3 – значение после фильтрации

На рис. 3, в, представлен график изменения дальности D , где 1 – реальное значение дальности; 2 – значение дальности, приходящее на БРЛС; 3 – значение после фильтрации. Захват по дальности осуществляется в момент времени, равный $0,01$ секунды. Влияние помех больше, чем при других видах шумов. В среднем фильтр снижает шумы на 5% , но так как значения достаточно большие, отслеживание изменения дальности до объекта наблюдения затруднено и не эффективно.

На рис. 3, г, представлен график изменения скорости V , где 1 – реальное значение скорости; 2 – значение дальности, приходящее на фильтр Калмана; 3 – значение после фильтрации. Как видно из рис. 3, г, дробные помехи оказывают большое влияние на эффективность отслеживания по скорости. Аналогично отслеживанию по дальности фильтр снижает уровень шума не настолько сильно, чтобы эффективно сопровождать воздушные объекты.

Заключение

В работе синтезирован дальномерный канал БРЛС на основе калмановской фильтрации и статистической теории оптимального управления. Использование белых гауссовских шумов в качестве помех упрощает задачу синтеза дальномерного канала, так как снижает помеху на выходе фильтра Калмана. Несмотря на достаточную эффективность при случайных шумах, фильтр плохо отсеивает дробовые шумы. Для синтеза с другими видами шумов необходимо иметь более сложные модели состояний, которые учитывают больше параметров. Однако такие модели могут существенно усложнить

задачу синтеза дальномерного канала и испытания его модели, а также требовать больше вычислительных ресурсов при использовании в БРЛС.

Литература

1. Меркулов, В. И. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах : монография : в 3-х ч. Ч. 1 / В. И. Меркулов, А. И. Перов, В. Н. Саблин [и др.] ; под ред. А. И. Канашенкова и В. И. Меркулова. – Москва : Радиотехника, 2004 – 309 с.
2. Меркулов, В. И. Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Сопровождение одиночных целей : монография. Т. 2. В 3-х т. / В. И. Меркулов, В. С. Верба, А. Р. Ильчук [и др.] ; под ред. В. С. Вербы. – Москва : Радиотехника, 2018 – 486 с.
3. Меркулов, В. И. Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Теоретические основы. РЛС в составе интегрированного авиационного комплекса : монография. Т. 1. В 3-х т. / В. И. Меркулов, В. С. Верба, А. Р. Ильчук ; под редакцией В. С. Вербы. – Москва : Радиотехника, 2018. – 357 с.
4. Тележкин, В. Ф. Обработка информации с использованием фильтра Калмана в Matlab Simulink / В. Ф. Тележкин, Б. Б. Саидов. – DOI : 10.17212/2782-2001-2021-4-49-62 // Системы анализа и обработки данных. – Новосибирск : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», 2021. – № 4 (84). – С. 49–62.
5. Верба, В. С. Метод наведения на воздушную цель в составе плотной группы / В. С. Верба, И. Р. Загребельный, В. И. Меркулов. – Москва : Радиотехника и электроника. – 2020. – Т. 65. – № 11. – С. 1091–1100. – DOI: 10.31857/S0033849420110182.

Поступила в редакцию 08.10.2024

*Владимир Олегович Скрипачев, кандидат технических наук, доцент,
т. 8 (499) 215-65-65, e-mail: skripatchevv@inbox.ru.*

*Андрей Николаевич Белов, аспирант, т. 8 (499) 215-65-65, e-mail: andrey2000belov@bk.ru.
(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический университет»).*

THE INFLUENCE OF INTERFERENCE ON THE RANGING CHANNEL OF THE ONBOARD RADAR STATION

V. O. Skripachev, A. N. Belov

In the synthesis of radio-electronic systems for radio control, it is often customary to use white Gaussian noise as interference. However, the development of advanced control systems may require consideration of other disturbances. This work presents estimates of range and speed in the example of the ranging channel of an onboard radar station under various types of input influences, and evaluates the effectiveness of filtering these disturbances using a Kalman filter. A series of tests was conducted in which computer simulation studied the impact of random, white Gaussian, and fractional noise on the effectiveness of tracking by the ranging channel of an aerial vehicle. The main performance indicators chosen were the distance from the observation object to the control object, the closing speed of the observation object, and the values of variances in speed and range.

Keywords: *statistical theory of radio control, unmanned aerial vehicles, onboard radar station, Kalman filter, ranging channel, control algorithm for the ranging channel.*

References

1. Merkulov, V. I. Assessing of range and rate in radar systems : monography : 3 parts. P.1 / V. I. Merkulov, A. I. Perov, V. N. Sablin [et al.]; edited by A. I. Kanashenkova and V. I. Merkulova. – Moscow : Radiotekhnika, 2004 – 309 p.

2. Merkulov, V. I. Automatic tracking of targets in radar systems of integrated aviation complexes. Tracking of single targets : monography. – Vol. 2. In 3 volumes / V. I. Merkulov, V. S. Verba, A. R. Ilchuk [et al.]; edited by V. S. Verba. – Moscow : Radiotekhnika, 2018 – 486 p.
3. Merkulov, V. I. Automatic tracking of targets in radar systems of integrated aviation complexes. Theoretic basis. Radar systems as a part of an integrated aviation complex : monography. – Vol. 1. In 3 volumes. V. I. Merkulov, V. S. Verba, A. R. Ilchuk ; edited by V. S. Verba. – Moscow : Radiotekhnika, 2018. – 357 p.
4. Telezhkin, V. F. Processing of the information using a Kalman filter in Matlab Simulink / V. F. Telezhkin, B. B. Saidov. – DOI : 10.17212/2782-2001-2021-4-49-62 // Analysis and data processing systems. – Novosibirsk : Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Novosibirsk State Technical University», 2021. – No. 4 (84). – P. 49–62.
5. Verba, V. S. The Method of aiming at an aerial target as a part of a dense group / V. S. Verba, I. R. Zagrebelniy, V. I. Merkulov. – Moscow : Journal of Communications Technology and Electronics. – 2020. – Vol. 65. – No. 11. – P. 1091–1100. – DOI : 10.31857/S0033849420110182.

*Vladimir Olegovich Skripachev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
t. 8 (499) 215-65-65, e-mail: skripachevv@inbox.ru.*
Andrei Nikolaevich Belov, graduate student, t. 8 (499) 215-65-65, e-mail: andrey2000belov@bk.ru.
(MIREA – Russian Technological University).