

УДК 623.55.023

Оценка точности алгоритмов фильтрации при сопровождении маневрирующей воздушной цели по угловым координатам

Испулов А.А.*, Иванов С.Л.**

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина»,

ул. Старых Большевиков, 54А, Воронеж, 394064, Россия

**e-mail: ispulovy@yandex.ru*

***e-mail: st.iv.84@mail.ru*

Аннотация

В статье рассмотрены три модели относительного движения воздушной цели. На основе данных полунатурного моделирования и метода спектрального анализа определена эффективная ширина спектра случайных процессов углового ускорения и рывка при выполнении воздушной цели боевого разворота. Методом статистического моделирования для каждого алгоритма оценен прирост показателя точности фильтрации.

Ключевые слова: маневрирующая воздушная цель, модель Зингера, модель Сонга, коэффициент маневренности, боевой разворот, среднее квадратичное отклонение.

В условиях ведения воздушного боя (ВБ) одним из направлений повышения эффективности истребителей является увеличение количества одновременно поражаемых воздушных целей (ВЦ) [1, 2]. Удовлетворение этого требования возможно

за счет получения достаточно полной информации о параметрах движения ВЦ при работе авиационных прицельных систем (АПРС) истребителей в режиме обзора пространства.

В настоящее время алгоритмы оценки координат и параметров движения ВЦ реализованы на основе упрощенных алгоритмов фильтрации, в частности алгоритмов α, β -фильтрации и α, β, γ -фильтрации. К основным недостаткам данных алгоритмов относят: недостаточно точное и устойчивое сопровождение маневрирующих ВЦ при низком темпе обновления информации и отсутствие адаптации к быстро изменяющимся условиям ВБ [2]. Причины этих недостатков объясняются неадекватностью применяемых математических моделей состояний и измерений исследуемого процесса, а также несоответствием параметров и структуры фильтра к изменяющимся условиям функционирования, необходимой для адаптации. Для алгоритмов α, β -фильтрации и α, β, γ -фильтрации прогнозирование осуществляется на основе моделей равномерного прямолинейного движения и равноускоренного движения соответственно, а коррекция прогноза с помощью постоянных значений коэффициентов α, β, γ , что в условиях маневренного ВБ и низкого темпа обновления информации является недостаточным, чтобы обеспечить эффективное применения средств поражения. Такие условия требуют использования более сложных моделей относительного движения ВЦ с уточненными параметрами не только для дальнего канала [3], но и для угломерного канала.

Цель работы – сравнительная оценка точности фильтрации при сопровождении маневрирующей ВЦ по угловым координатам с использованием алгоритмов α, β -

фильтрации и фильтра Калмана (ФК) для моделей Зингера и Сонга с уточненными параметрами при низком темпе обновления информации о цели.

Для достижения цели работы примем следующие допущения:

-основным пространственным маневром ВЦ в ВБ является маневр типа «Боевой разворот»;

-основной источник информации радиолокационный канал сопровождения ВЦ по угловым координатам, как основной используемый в алгоритмах стрельбы (пуска) средств поражения.

В этом случае правило формирования экстраполированной оценки угловых координат ВЦ имеет вид для:

-модели равномерного прямолинейного движения [2]

$$\tilde{\phi}_{2,\delta}(k) = \hat{\phi}_{2,\delta}(k-1) + \hat{\omega}_{2,\delta}(k-1)\Delta T; \quad (1)$$

- модели Зингера [4]

$$\tilde{\phi}_{2,\delta}(k) = \hat{\phi}_{2,\delta}(k-1) + \hat{\omega}_{2,\delta}(k-1)\Delta T + \frac{\hat{j}_{2,\delta}(k-1)}{\delta^2} \left(e^{-\delta\Delta T} + \delta\Delta T - 1 \right); \quad (2)$$

- модели Сонга [3, 5]

$$\tilde{\phi}_{2,\delta}(k) = \hat{\phi}_{2,\delta}(k-1) + \hat{\omega}(k-1)\Delta T + \frac{\hat{j}_{2,\delta}(k-1)\Delta T^2}{2} - \frac{\hat{q}_{2,\delta}(k-1)}{\mu^3} \left(e^{-\mu\Delta T} - \frac{\mu^2\Delta T^2}{2} + \mu\Delta T - 1 \right), \quad (3)$$

где $\hat{\phi}_{2,\delta}(k)$, $\hat{\omega}_{2,\delta}(k)$, $\hat{j}_{2,\delta}(k)$, $\hat{q}_{2,\delta}(k)$ - оценки углового положения ВЦ, угловой скорости и ускорения, а также рывка (третьей производной углового положения) в горизонтальной и вертикальной плоскости, полученные в момент времени t_k ; $\Delta T = t_k - t_{k-1}$ - темп обновления информации; δ, μ - коэффициент маневренности ВЦ, соответствующий ширине спектральной плотности случайных процессов $j(t), q(t)$.

В интересах получения экстраполированной оценки и работы алгоритмов фильтрации требуется определить значения коэффициента маневренности при совершении ВЦ боевого разворота. Данные о относительном движении ВЦ получены путем полунатурного моделирования на пилотажном стенде [3, 6]. На основе данных моделирования определялись угловые координаты и параметры движения ВЦ в результате перерасчета ее прямоугольных координат в сферические.

Реализации случайных процессов $\phi_2(t), \phi_6(t)$ достаточно длительны по времени, что позволяет принимать эти процессы стационарными и эргодическими [7]. Количество отсчетов для боевого разворота составляет $N=2879$, при этом обновление данных проводилось через каждую сотую секунды.

С использованием методики, предложенной в работе [3] определялось значение коэффициента маневренности. Для этого вычислялись спектральные плотности случайных процессов $j_{2,6}(t), q_{2,6}(t)$ путем прямого преобразованием Фурье нормированных экспериментальных корреляционных функций $r_2(\tau)$ и $r_6(\tau)$. Коэффициенты маневренности определялись по выражениям [3]

$$\delta_{2,6} = \frac{\sqrt{2}}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{2,6}^j(f) df, \mu_{2,6} = \frac{\sqrt{2}}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{2,6}^q(f) df, \quad (4)$$

где $S_{2,6}^j(f), S_{2,6}^q(f)$ – спектральная плотность случайных процессов $j_{2,6}(t), q_{2,6}(t)$.

Рассчитанные в соответствии с выражениями (4) значения коэффициентов маневренности приведены в таблице. Полученные результаты показывают не только зависимость значения коэффициента маневренности от типа маневра, но и от выбранной плоскости наблюдения. Кроме того, значения для двух моделей

взаимного перемещения истребителя и ВЦ отличаются более чем на $0,5 \text{ с}^{-1}$.

Таблица

Экспериментальные значения коэффициента маневренности

Маневр	Плоскость наблюдения	Модели	
		Модель Зингера	Модель Сонга
Боевой разворот	Горизонтальная	$0,260 \text{ с}^{-1}$	$0,828 \text{ с}^{-1}$
	Вертикальная	$0,152 \text{ с}^{-1}$	$0,637 \text{ с}^{-1}$

В интересах достижения цели работы методом статистических испытаний проведено моделирование алгоритмов фильтрации при низком темпе обновления информации о цели. В качестве показателя точности использовалось среднее квадратическое отклонение (СКО) ошибок фильтрации σ_ϕ . Анализировались алгоритм α, β -фильтрации для модели равномерного прямолинейного движения (1) [2, 8, 9], алгоритм ФК для модели Зингера (2) [4], а также алгоритм ФК для модели Сонга (3) [3, 5]. При этом фундаментальная матрица переходов Φ и корреляционная матрица формирующих шумов Q для модели Сонга принимались равными

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T & \frac{\Delta T^2}{2} & -\frac{1}{\mu^3} \cdot \left(e^{-\mu \Delta T} - \frac{\mu^2 \cdot \Delta T^2}{2} + \mu \cdot \Delta T - 1 \right) \\ 0 & 1 & \Delta T & \frac{1}{\mu^2} (e^{-\mu \Delta T} + \mu \cdot \Delta T - 1) \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{1}{\mu} (e^{-\mu \Delta T} - 1) \\ 0 & 0 & 0 & e^{-\mu \Delta T} \end{bmatrix},$$

$$Q(k-1) = 2\mu\sigma_q^2 \begin{bmatrix} q_{11} & q_{21} & q_{31} & q_{41} \\ q_{12} & q_{22} & q_{32} & q_{42} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} & q_{43} \\ q_{14} & q_{24} & q_{34} & q_{44} \end{bmatrix},$$

здесь

$$\begin{aligned}
q_{11} &= \frac{1}{\mu^7} \left(\mu - \frac{e^{-2\Delta T \mu}}{2} - \mu e^{-\Delta T \cdot \mu} - \Delta T^2 \mu^2 - \frac{\Delta T^2 \mu^3}{2} + \frac{\Delta T^3 \mu^3}{3} + \frac{\Delta T^3 \mu^4}{3} + \frac{\Delta T^3 \mu^5}{12} + \right. \\
&\quad \left. + \Delta T \mu - \Delta T \mu^2 e^{-\Delta T \mu} - 2\Delta T \mu e^{-\Delta T \mu} + \frac{1}{2} \right); \\
q_{12} = q_{21} &= \frac{1}{\mu^6} \left(e^{-T \mu} + \frac{e^{-2\Delta T \mu}}{2} + \Delta T^2 \mu^2 - \frac{\Delta T^3 \mu^3}{6} - \frac{\Delta T^4 \mu^4}{8} - \Delta T \mu + \frac{\Delta T^2 \mu^2 e^{-\Delta T \mu}}{2} + \right. \\
&\quad \left. + 3\Delta T \mu e^{-\Delta T \mu} - \frac{3}{2} \right); \\
q_{13} = q_{31} &= \frac{1}{6\mu^5} (3e^{-2\Delta T \mu} + 3\Delta T^2 \mu^2 + \Delta T^3 \mu^3 - 6\Delta T \mu + 3\Delta T^2 \mu^2 e^{-\Delta T \mu} + \\
&\quad + 12\Delta T \mu e^{-\Delta T \mu} - 3); \\
q_{14} = q_{41} &= \frac{1}{2\mu^5} (2e^{-\Delta T \mu} + e^{-2\Delta T \mu} + \Delta T^2 \mu^2 e^{-\Delta T \mu} + 4\Delta T \mu e^{-\Delta T \mu} - 3); \\
q_{22} &= \frac{1}{6\mu^5} (3e^{-2\Delta T \mu} + 6\Delta T^2 \mu^2 - 2\Delta T^3 \mu^3 - 6\Delta T \mu + 12\Delta T \mu e^{-\Delta T \mu} - 3); \\
q_{23} = q_{32} &= \frac{1}{\mu^4} \left(\frac{e^{-2\Delta T \mu}}{2} - e^{-\Delta T \mu} + \frac{\Delta T^2 \mu^2}{2} - \Delta T \mu + \Delta T \mu e^{-\Delta T \mu} + \frac{1}{2} \right); \\
q_{24} = q_{42} &= \frac{1}{2\mu^3} (e^{-2\Delta T \mu} + 2\Delta T \mu e^{-\Delta T \mu} - 1); \\
q_{33} &= \frac{1}{\mu^3} \left(2e^{-\Delta T \mu} - \frac{e^{-2\Delta T \mu}}{2} + \Delta T \mu - \frac{3}{2} \right); \\
q_{34} = q_{43} &= \frac{1}{\mu^2} \left(\frac{e^{-2\Delta T \mu}}{2} - e^{-\Delta T \mu} + \frac{1}{2} \right); \\
q_{44} &= \frac{1}{2\mu} (e^{-2\Delta T \mu} - 1).
\end{aligned}$$

В качестве исходных данных моделирования использовались: темп обновления информации – $\Delta T = 0,5$ с; ошибка измерителя угловой координаты – $\sigma_{изм} = 1,5^\circ$; коэффициенты усиления $\alpha = 0,5$; $\beta = 0,02$; коэффициент маневренности для модели Зингера $\delta_z = 0,260$; $\delta_g = 0,152$; коэффициент маневренности для модели Сонга $\mu_z = 0,828$; $\mu_g = 0,637$; количество реализаций – 10^4 . Соответствующие алгоритмы фильтрации обозначены: I – α, β -фильтр; II – фильтр Калмана на основе модели Зингера; III – фильтр Калмана на основе модели Сонга.

Для оценки полученных результатов определим прирост показателя точности алгоритмов фильтрации по следующему выражению

$$P_{i,l} = \frac{\sigma_{\phi i} - \sigma_{\phi l}}{\sigma_{\phi l}} \cdot 100\% \quad (5)$$

где $i = \overline{II, III}$ – номер алгоритма для которого оценивалась эффективность; $l = \overline{I, II}$ – номер алгоритма относительно которого оценивалась эффективность.

Результаты представлены на рисунках 1 и 2 для горизонтальной и вертикальной плоскости соответственно. На рисунках: кривая 1 (красная, сплошная) соответствует приросту эффективности фильтрации алгоритма II относительно алгоритма I; кривая 2 (синяя, штрихпунктирная) – алгоритма III относительно алгоритма I; кривая 3 (черная, штриховая) – алгоритма III относительно алгоритма II.

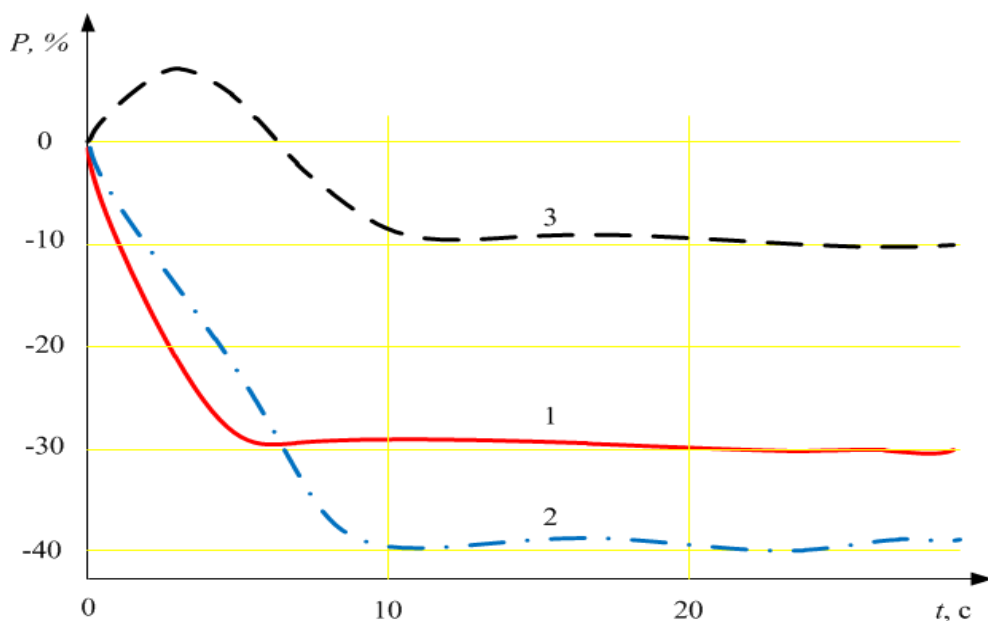


Рисунок 1 – Прирост эффективности оценивания в горизонтальной плоскости

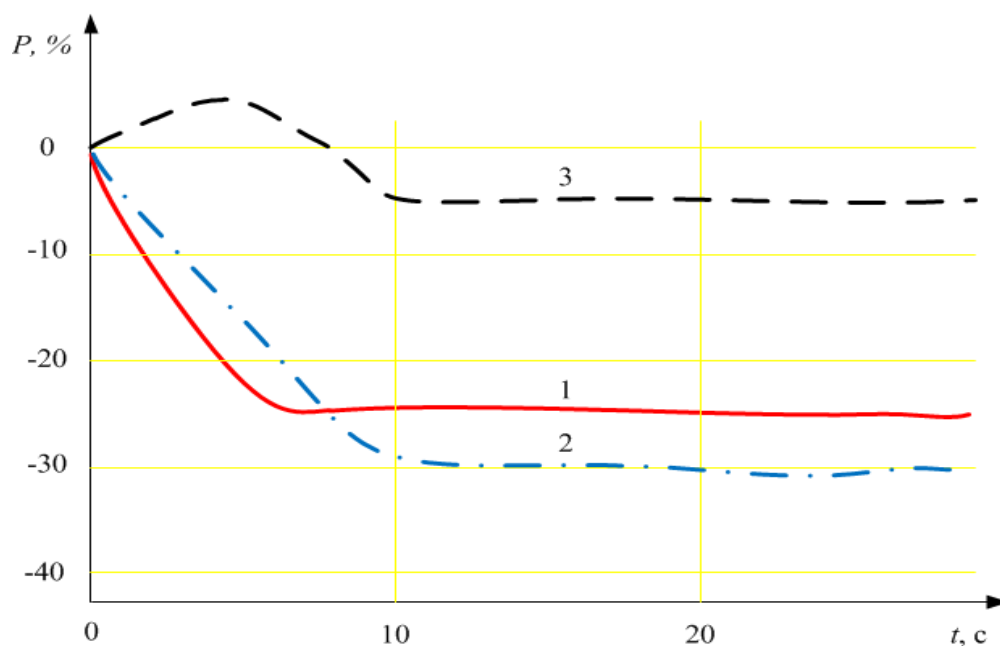


Рисунок 2 – Прирост эффективности оценивания в вертикальной плоскости

Анализ представленных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- рассмотренные в работе алгоритмы фильтрации являются работоспособными, позволяющими существенно повысить точность определения угловых координат маневрирующей ВЦ по сравнению с их измеренными значениями;

- наибольшей точностью фильтрации угловых координат ВЦ характеризуется алгоритм III, экстраполятор которого функционирует на основе модели Сонга с уточненными параметрами. Так в установившемся режиме прирост показателя точности фильтрации может достигать до 40 % по сравнению с алгоритмом α, β -фильтрации, и до 10 % по сравнению с фильтром Калмана на основе модели Зингера;

- использование в ФК более простой модели взаимного перемещения ВЦ Зингера с уточненными параметрами позволяет повысить точность фильтрации угловых координат цели по сравнению с α, β -фильтром до 30 %;

- недостатком ФК на основе модели Сонга является большая инерционность. Так время переходных процессов при фильтрации угловой координаты ВЦ в

вертикальной плоскости может достигать 10 секунд и более, в то время как переходные процессы в фильтре при использовании модели Зингера завершаются вдвое быстрее. Другим недостатком фильтра на основе модели Сонга, являются, очевидно, большие трудозатраты на его реализацию;

- следует ожидать, что использование ФК на основе моделей Зингера и Сонга с уточненными параметрами при сопровождении ВЦ, выполняющих маневры, отличные от «Боевого разворота», приведет к снижению прироста показателя точности фильтрации по сравнению с алгоритмом α, β -фильтрации. Для устранения данного недостатка целесообразно дополнительно применять специальные процедуры снижения априорной неопределенности относительно вида маневра ВЦ. Примеры таких процедур рассмотрены в [8, 9, 10].

Таким образом, для обеспечения высокой точности сопровождения маневрирующей ВЦ по угловым координатам в условиях ВБ при низком темпе обновления информации в современных АПрС целесообразно применять фильтры, использующие модели относительного движения цели высоких порядков с уточненными параметрами. Показатель прироста точности фильтрации для ФК с моделью Сонга по сравнению с α, β -фильтром достигает 40 %, а для ФК с моделью Зингера 30 %. Однако в случае изменения маневра ВЦ потребуются реализация процедур адаптации параметров фильтра к типу маневра. Кроме этого, выбор алгоритма фильтрации должен выполняться либо по критерию минимума ошибки оценивания либо по критерию минимального времени переходных процессов.

Библиографический список

1. Канащенков А.И., Меркулов В.И., Самарин О.Ф. Облик перспективных бортовых

- радиолокационных систем. Возможности и ограничения. - М.: ИПРЖР, 2002. - 176 с.
2. Шатовкин Р.Р. Моделирование функционирования систем управления вооружением истребителя в режиме радиолокационного молчания: монография. - Воронеж: Изд-во ВАИУ, 2010. - 328 с.
 3. Испулов А.А., Иванов С.Л., Зледенный Н.П. Экстраполяция координат и параметров движения маневренной воздушной цели с использованием модели Сонга // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=65615>
 4. Зингер Р. Оценка характеристик оптимального фильтра для слежения за пилотируемой целью // Зарубежная радиоэлектроника. 1971. № 8. С. 40 - 57.
 5. Song T.L., Ahn J.Y., Park C. Suboptimal filter design with pseudomeasurements for target tracking // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1988, no. 3, pp. 294 - 304.
 6. Костин П.С., Верещагин Ю.О., Волошин В.А. Программно-моделирующий комплекс для полунатурного моделирования динамики маневренного самолета // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57735>
 7. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. - М.: Радио и связь, 1982. - 624 с.
 8. Канащенков А.И., Меркулов В.И. Авиационные системы радиоуправления. Принципы построения систем радиоуправления. Основы синтеза и анализа. - М.: Радиотехника, 2003. Т.1. - 191 с.
 9. Канащенков А.И., Меркулов В.И. Авиационные системы радиоуправления. Радиоэлектронные системы самонаведения. - М.: Радиотехника, 2003. Т. 2. - 192 с.
 10. Рязанцев Л.Б., Лихачев В.П., Шатовкин Р.Р. Фазоразностный способ определения ускорения сближения истребителя с воздушной целью // Труды МАИ.

2015. № 84. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=63114>