

## **Экстраполяция координат и параметров движения маневренной воздушной цели с использованием модели Сонга**

**Испулов А.А.\*, Зледенный Н.П.\*\*, Иванов С.Л.\*\*\***

*Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского и  
Ю.А.Гагарина, ул. Старых Большевиков, 54а, Воронеж, 394064, Россия*

*\*e-mail: [ispulovy@yandex.ru](mailto:ispulovy@yandex.ru)*

*\*\*e-mail: [nik-avia@mail.ru](mailto:nik-avia@mail.ru)*

*\*\*\*e-mail: [st.iv.84@mail.ru](mailto:st.iv.84@mail.ru)*

### **Аннотация**

Проведено моделирование тактических маневров ближнего маневренного воздушного боя, на основе которого с помощью корреляционно-спектральной обработки определены параметры модели Сонга. Оценен прирост точности экстраполяции координат воздушной цели по сравнению с существующими моделями движения воздушной цели.

**Ключевые слова:** воздушная цель, модель Сонга, коэффициент маневренности, корреляционно-спектральная обработка

Важным направлением повышения эффективности истребителей является увеличение числа одновременно поражаемых воздушных целей (ВЦ), в том числе в условиях ведения ближнего маневренного воздушного боя (БМБ) [1]. В интересах достижения указанного результата требуется,

чтобы бортовые прицельные системы истребителей, функционируя в режиме обзора пространства, обеспечивали оценку координат и параметров движения наблюдаемых ВЦ с точностью достаточной для эффективного применения средств поражения.

Реализованные в настоящее время в бортовых радио- и оптико-локационных станциях истребителей алгоритмы оценки координат и параметров движения ВЦ на основе  $\alpha, \beta$ -фильтрации при функционировании станций в режиме обзора пространства, с темпом обновления информации более 500 мс, оказываются недостаточно эффективными и не обеспечивают прицельную стрельбу из стрелково-пушечного вооружения (СПВ) по ВЦ [2]. Одним из возможных путей преодоления указанного недостатка является повышение точности экстраполяции координат и параметров движения ВЦ за счет использования более сложных моделей пространственного перемещения целей, что является оправданным по мере увеличения производительности бортовых вычислителей. Примером таких моделей является стохастическая модель четвертого порядка Сонга, описывающая изменение во времени координаты наблюдаемого объекта и первых трех ее производных [3].

Цель работы – уточнение параметров модели Сонга в интересах повышения точности экстраполяции координат и параметров движения ВЦ в условиях БМБ с малым темпом обновления информации о цели.

Решим задачу уточнения параметров модели Сонга при следующих допущениях. Примем, что основными пространственными маневрами ВЦ в

БМБ являются маневры типа «Боевой разворот» и «Косая петля», основными маневрами в вертикальной плоскости – маневры типа «Переворот» и «Петля Нестерова», а типовым маневром в горизонтальной плоскости является «Виразж».

Рассмотрим радиолокационный канал сопровождения ВЦ по дальности, как один из основных источников информации, используемой в алгоритмах стрельбы СПВ. В этом случае правило формирования экстраполированной оценки дальности до ВЦ имеет вид [3]

$$\tilde{D}[k+1] = \hat{D}[k] + \hat{V}[k] \cdot \Delta T + \frac{\hat{a}[k] \cdot \Delta T^2}{2} - \frac{\hat{\rho}[k]}{\mu^3} \cdot \left( e^{-\mu \cdot \Delta T} - \frac{\mu^2 \cdot \Delta T^2}{2} + \mu \cdot \Delta T - 1 \right), \quad (1)$$

где  $\hat{D}[k]$ ,  $\hat{V}[k]$ ,  $\hat{a}[k]$ ,  $\hat{\rho}[k]$  - оценки дальности до ВЦ, скорости и ускорения сближения с ней, а также рывка (третьей производной дальности) сближения с ВЦ соответственно, полученные в момент времени  $t_k$ ;  $\Delta T = t_{k+1} - t_k$  - темп обновления информации;  $\mu$  - коэффициент маневренности ВЦ, соответствующий ширине спектральной плотности случайного процесса  $\rho(t)$ .

Будем считать, что траектория перемещения истребителя в БМБ определяется необходимостью наблюдения ВЦ в заднюю полусферу для ее эффективной атаки из СПВ.

Таким образом, в интересах уточнения параметров модели Сонга требуется определить значения коэффициента маневренности  $\mu$  при взаимном маневрировании истребителя и ВЦ в БМБ.

Для решения поставленной задачи было проведено полунатурное моделирование БМБ с использованием пилотажного стенда учебной базы Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского Ю.А. Гагарина», обеспечивающего моделирование групповых действий самолетов Су-27, МиГ-29 и Як-130 [4]. Указанный пилотажный стенд характеризуется сходимость получаемых модельных данных с данными летных экспериментов не хуже 95 %. В ходе моделирования в результате многократного воспроизведения БМБ определялись траектории взаимного перемещения истребителя и ВЦ при различных исходных данных: типе маневра ВЦ, значениях дистанции, скоростей и ракурсов входа в бой. В дальнейшем определялся ансамбль реализаций случайного процесса  $\rho_{m,i}(t)$  для каждого типа маневра ВЦ, что позволило рассчитать нормированные экспериментальные корреляционные функции рывка сближения истребителя с ВЦ по формуле

$$R_{m,i}(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} [\rho_{m,i}(t) - M_m(t)][\rho_{m,i}(t-\tau) - M_m(t-\tau)] dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} [\rho_{m,i}(t) - M_m(t)]^2 dt}, \quad (2)$$

где  $m = \overline{1,5}$  - номер типа маневра ВЦ, причем  $m=1$  соответствует маневру «Переворот»,  $m=2$  - маневру «Косая петля»,  $m=3$  - маневру «Петля Нестерова»,  $m=4$  - маневру «Боевой разворот»,  $m=5$  - маневру «Виразж»;  $i = \overline{1, I_m}$  - номер реализации случайного процесса  $\rho(t)$  при выполнении ВЦ  $m$ -го типа маневра;  $I_m$  - число БМБ, в которых ВЦ выполняла  $m$ -ый тип маневра;  $M_m(t)$  - математическое ожидание рывка сближения истребителя с ВЦ при выполнении целью  $m$ -го типа маневра, которое оценивалось с использованием выражения

$$M_m(t) = \frac{\sum_{i=1}^{I_m} \rho_{m,i}(t)}{I_m}. \quad (3)$$

Экспериментальные корреляционные функции (2), усредненные по совокупности значений  $I_m$ , представлены на рисунке 1.

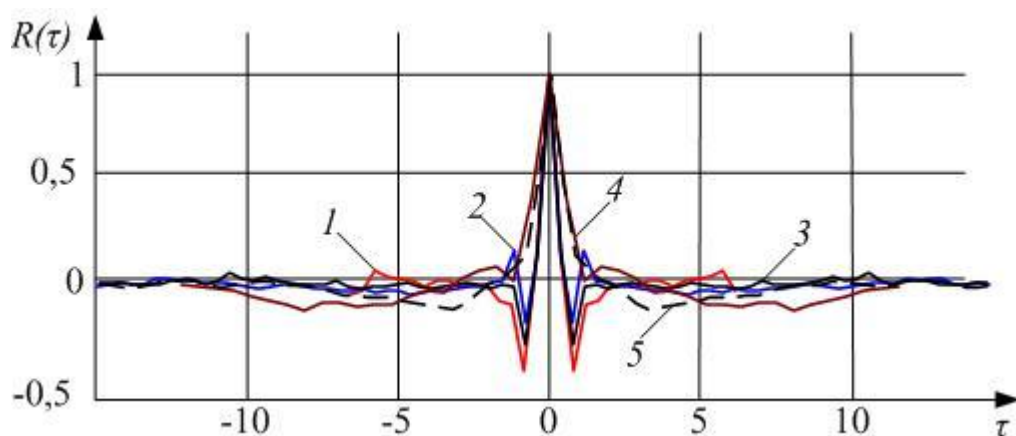


Рисунок 1 – Экспериментальная корреляционная функция рывка сближения

Анализ представленных кривых позволил сделать вывод о наличии зависимости параметров корреляционной функции случайного процесса  $\rho(t)$  от типа выполняемого ВЦ маневра, что потребовало определения коэффициента маневренности  $\mu$  для каждого из рассмотренных маневров.

Для этого в результате прямого преобразования Фурье экспериментальных корреляционных функций  $R_m(\tau)$  рассчитывались спектральные плотности рывка сближения истребителя с ВЦ  $S_m(f)$ , с использованием которых определялись значения коэффициента маневренности по формуле [5]

$$\mu_m = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} S_m(f) df}{0,707}. \quad (4)$$

Рассчитанные в соответствии с выражением (4) значения коэффициента

маневренности приведены в таблице 1. Кроме того, в таблице указаны параметры модели Зингера [6], найденные аналогичным образом в результате, обработки экспериментальных реализаций  $a_{m,i}(t)$  ускорения сближения истребителя с ВЦ, а также модели движения ВЦ по окружности, описанной в [2].

Таблица 1

Значения параметров моделей движения ВЦ

№ п/п	Вид маневра	Коэффициент маневренности, с <sup>-1</sup>		
		Модель Сонга	Модель Зингера	Модель движения ВЦ второго порядка
1	Переворот	1,3	1,77	0,09
2	Косая петля	1,54	0,43	
3	Петля Нестерова	1,56	0,94	
4	Боевой разворот	0,95	0,28	
5	Виращ	0,76	0,33	

В интересах обоснования целесообразности использования полученных результатов был проведен сравнительный анализ точности экстраполяции дальности до ВЦ с использованием уточненной модели Сонга, а также моделей Зингера, модели равномерного прямолинейного движения ВЦ и модели движения ВЦ второго порядка в зависимости от темпа обновления информации о цели. В качестве показателя точности экстраполяции было принято абсолютное значение погрешности экстраполированной оценки, определяемой из выражения

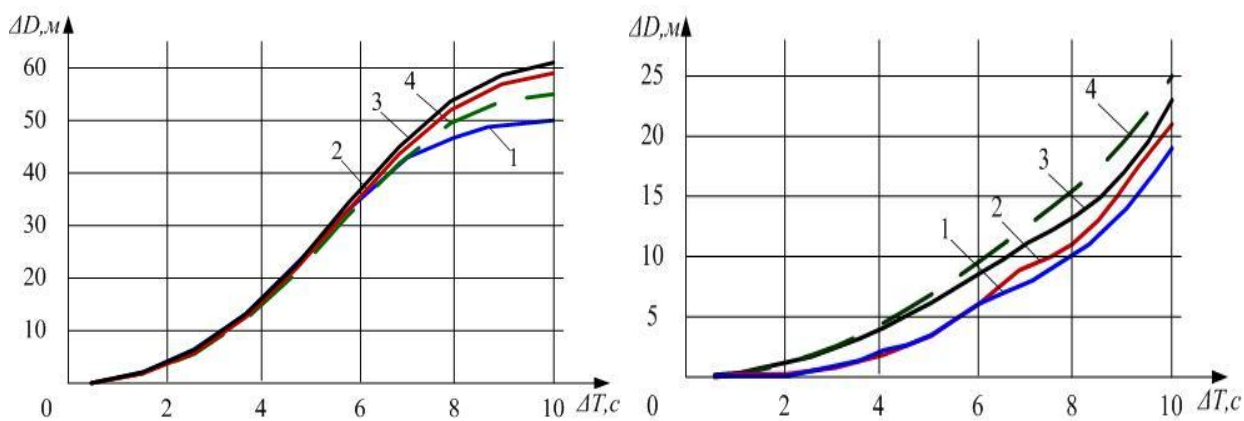
$$\Delta D_{m,i}^j(\Delta T, t_0) = \left| \tilde{D}_m^j[t_0 / \Delta T + 1] - D_{m,i}(t_0 + \Delta T) \right|,$$

где  $j = \overline{1,4}$  - номер рассматриваемой модели движения ВЦ, причем  $j = 1$  соответствует модели Сонга,  $j = 2$  - модели Зингера,  $j = 3$  - модели равномерного прямолинейного движения,  $j = 4$  - модели движения ВЦ второго порядка;  $t_0$  - время начала экстраполяции;  $D_{m,i}(t_0 + \Delta T)$  - истинное значение дальности ВЦ при выполнении  $m$ -го маневра в  $i$ -й реализации в момент времени  $(t_0 + \Delta T)$ . При расчёте значений  $\tilde{D}_m^j[t_0 / \Delta T + 1]$  для  $j = 1$  использовалось выражение (1), для  $j = 2$  - выражения, приведенные в [6], а для  $j = 3$  и  $j = 4$  - выражения, приведенные в [2]. При этом принималось, что оценки дальности и ее производных в момент времени  $t_0$  равны их истинным значениям. Усредненные по совокупности значений  $I_m$  зависимости  $\Delta D_m^j(\Delta T)$  изображены на рисунке 2.

Анализ представленных зависимостей позволяет сделать вывод о наличии выигрыша в точности экстраполяции дальности до ВЦ от использования уточненной модели Сонга по сравнению с другими рассмотренными моделями движения ВЦ. Выигрыш тем больше, чем ниже темп обновления информации о ВЦ, и чем интенсивнее маневр ВЦ.

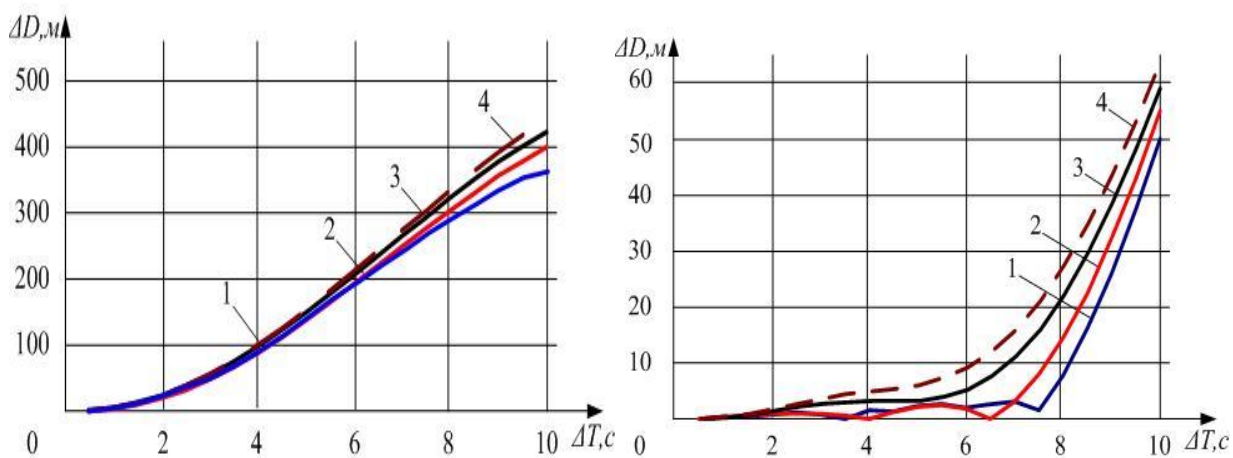
Значения, прироста показателя точности экстраполяции дальности до ВЦ от использования уточненной модели Сонга по сравнению с рассматриваемыми моделями при  $\Delta T = 10$  с приведены в таблице 2.





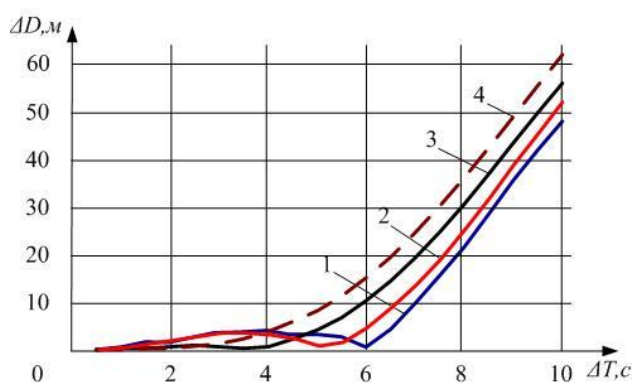
Переворот

Косая петля



Петля Нестерова

Боевой разворот



Вираж

Рисунок 2 – Результаты оценки точности экстраполяции дальности до ВЦ

Анализ данных таблицы 2 показывает, что прирост в точности экстраполяции дальности до ВЦ по сравнению с моделью равномерного

прямолинейного движения может достигать 15%, с моделью движения ВЦ второго порядка – 18% и с моделью Зингера, которая наиболее приспособлена к возмущению движения ВЦ, может достигать 11%.

Таблица 2

Прирост в точности экстраполяции дальности до ВЦ

№ п/п	Вид маневра	Модель равномерного движения, %	Модель движения ВЦ второго порядка, %	Модель Зингера, %
1	Переворот	18	9	15
2	Косая петля	17	24	9
3	Петля Нестерова	11	15	7
4	Боевой разворот	15	20	8
5	Виращ	17	25	7

В заключении важно отметить, что при решении задачи экстраполяции координат и параметров движения ВЦ в БМБ с использованием уточненной модели Сонга на борту истребителя существует априорная неопределенность относительно типа выполняемого ВЦ маневра. В этих условиях потребуются использование единого усреднённого для всех возможных типов маневров значения коэффициента маневренности  $\mu$ , что приведет к некоторому снижению точности экстраполяции, либо реализация дополнительных мер уменьшения априорной неопределенности, например, в результате использования алгоритмов параметрической идентификации Мейна [7].

Таким образом, в работе на основе корреляционно-спектральной обработки результатов полунатурного эксперимента определены значения параметра модели Сонга, описывающей пространственное взаимное перемещение истребителя и ВЦ в БМБ при выполнении целью типовых

маневров. Проведенный сравнительный анализ эффективности показал наличие выигрыша в точности экстраполяции координат ВЦ от использования уточненной модели Сонга. Использование данной модели наряду с алгоритмами устранения априорной неопределенности относительно типа маневра ВЦ в бортовых прицельных системах истребителя обеспечит повышение точности оценки координат и параметров движения ВЦ и, как следствие, увеличение точности применения средств поражения.

#### **Библиографический список**

1. Канащенков А.И. 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. - Воронеж: Изд-во ВАИУ, 2010. – 328 с.
3. Song, T.L. Suboptimal filter design with pseudomeasurements for target tracking/ T.L. Song, J.Y. Ahn, C. Park // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1988. no 3. PP.294-304.
4. Костин П. С., Верещагин Ю. О., Волошин В. А. Программно-моделирующий комплекс для полунатурного моделирования динамики маневренного самолета // Электронный журнал «Труды МАИ», 2015, выпуск

№81: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=57735> (дата публикации 15.05. 2015)

5. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
6. Зингер Р. А. Оценка характеристик оптимального фильтра для слежения за пилотируемой целью // Зарубежная радиоэлектроника. 1971. №8. С. 40-57.
7. Авиационные системы радиоуправления. Т.2. Радиоэлектронные системы самонаведения / Под ред. А.И. Канащенкова, В. И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. – 389 с.