

Фазоразностный способ определения ускорения сближения истребителя с воздушной целью

Рязанцев Л.Б.*, Лихачев В.П., Шатовкин Р.Р.*****

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

**e-mail: kernel386@mail.ru*

***e-mail: lyp_home@mail.ru*

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

Аннотация

Предложен фазоразностный способ определения ускорения сближения истребителя с воздушной целью. Суть способа заключается в том, что после каждого радиолокационного контакта диаграммы направленности антенны бортовой радиолокационной станции с воздушной целью измеряется крутизна линейно-частотной модуляции принятой пачки эхо-сигналов, которая пропорциональна ускорению сближения. Оценка крутизны линейно-частотной модуляции осуществляется корреляционным способом и заключается в том, что принятый эхо-сигнал разделяется на две равные по времени части, которые комплексно сопряженно перемножаются. При этом положение в частотной области максимума полученной корреляционной функции пропорционально ускорению сближения.

Ключевые слова: бортовая радиолокационная станция, линейно-частотная модуляция, фазоразностный способ автофокусировки, эхо-сигнал, ускорение сближения.

1. Введение

Поведение воздушной цели (ВЦ) при ведении воздушного боя характеризуется выполнением сложных маневров с большими перегрузками. Маневрирование цели оказывает сильное влияние на качество сопровождения. Несвоевременное обнаружение начала маневра цели достаточно часто приводит к срыву автосопровождения в силу появления больших ошибок следящих измерителей из-за несоответствия моделей, заложенных в них, реальному поведению ВЦ. Повторный захват требует дополнительного времени, а это – причина срыва первой атаки, которая в условиях высокоманевренного боя имеет большое значение.

Для исключения срыва автосопровождения в состав бортовых систем сопровождения включают устройства обнаружения начала маневра цели, обеспечивающие коррекцию параметров или структуры следящих измерителей. Традиционным способом определения начала маневра является вычисление статистических характеристик отклонений реальных и предполагаемых параметров движения цели. Это требует получения измерений в течение нескольких периодов обзора пространства бортовой радиолокационной станцией (БРЛС). Другим способом определения начала маневра цели является использование информации об ускорении сближения ВЦ и истребителя [2], однако известные способы для этого используют дополнительные датчики, например, оптико-локационную систему сопровождения.

Существенно сократить время, затрачиваемое на определение начала маневра до одного контакта диаграммы направленности антенны (ДНА) БРЛС с ВЦ и исключить использование дополнительных датчиков, возможно анализируя изменение характеристик отраженного эхо-сигнала, вызванных ее маневрированием.

Цель работы – разработка способа определения ускорения сближения истребителя с ВЦ в течение одного контакта диаграммы направленности БРЛС на основе фазоразностной обработки отраженного эхо-сигнала и определение его точностных характеристик.

2. Постановка и решение задачи

На основе известного фазоразностного способа автофокусировки радиолокационного изображения [1] получим выражения для определения ускорения сближения истребителя с ВЦ путем измерения крутизны линейно-частотной модуляции отраженного от цели эхо-сигнала. Для этого рассмотрим структуру зондирующего и отраженного от ВЦ эхо-сигнала.

Для однозначного измерения дальности в режиме высокой частоты повторения (ВЧП) используется введение дополнительной линейно частотной модуляции (ЛЧМ) в когерентно-импульсный сигнал. Тогда зондирующий сигнал, излучаемый передатчиком БРЛС, описывается выражением:

$$S_3(t) = S_0 \exp\{j2\pi f_0 t\} \exp\left\{j2\pi b \frac{t^2}{2}\right\}, \quad (1)$$

где t – время; S_0 – амплитуда сигнала; j – мнимая единица; b – крутизна (скорость) изменения частоты; f_0 – несущая частота; $\exp\{j2\pi f_0 t\}$ – описывает высокочастотное заполнение сигнала; $\exp\left\{j2\pi b \frac{t^2}{2}\right\}$ – ЛЧМ зондирующего сигнала.

Сигнал, отраженный от ВЦ, на входе приемника БРЛС определяется как:

$$S_{\text{прм}}(t) = A(t, P_{\text{и}}, G(t), \lambda, \sigma_{\text{ц}}(t)), S_3(t) \exp\{j4\pi f_0 V_{\text{ц}} t\} \exp\{j4f_0 a_{\text{ц}} t^2\} + \xi(t), \quad (2)$$

ИЛИ

$$S_{\text{прм}}(t) = U(t) \underbrace{\exp\{j2\pi f_0 t\}}_{\text{несущая}} \underbrace{\exp\{j\pi b t^2\}}_{\text{ЛЧМ}} \underbrace{\exp\left\{j4\pi \frac{f_0}{c} V_c t\right\}}_{\substack{\text{эффект Доплера} \\ \text{зондирующего сигнала}}} \underbrace{\exp\left\{j2\pi \frac{f_0}{c} a_c t^2\right\}}_{\substack{\text{вторичный} \\ \text{эффект Доплера}}} + \xi(t), \quad (3)$$

где $U(t) = S_0 A(t, P_{\text{и}}, G(t), \lambda, \sigma_{\text{ц}}(t)); \quad (4)$

A – амплитуда сигнала; $P_{\text{и}}, \lambda$ – импульсная мощность и длина волны зондирующего сигнала; G – коэффициент усиления антенны БРЛС; $\sigma_{\text{ц}}$ – эффективная площадь отражения (ЭПО) ВЦ; V_c, a_c – скорость и ускорение сближения истребителя с целью в момент времени t ; c – скорость света; $\xi(t)$ – белый гауссовский шум в приемном канале с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_{ξ}^2 .

Выражение (2) показывает, что наличие скорости сближения V_c приводит к линейному набегу фазы отраженного сигнала (эффект Доплера), а наличие ускорения сближения a_c – к квадратичному набегу фазы (вторичный эффект Доплера) и появлению ЛЧМ сигнала.

Как известно [3], при цифровой обработке спектр узкополосных сигналов, каковым является радиосигнал на входе приемника (2), целесообразно переносить в область видеочастот. Это позволяет уменьшить максимальную частоту обрабатываемого сигнала, и, следовательно, снизить требования по быстродействию к системе обработки. Сдвиг радиосигнала в область видеочастот осуществляется в квадратурном приемнике путем умножения сигнала $S_{\text{прм}}(t)$ на сигнал гетеродина

$$S_r(t) = \exp\{-j2\pi f_0 t\}. \quad (5)$$

При этом также осуществляется разделение на квадратурные составляющие $S_{\cos}(t)$ и $S_{\sin}(t)$ для представления действительного входного сигнала в комплексном виде.

Для устранения влияния на определение a_c дополнительной ЛЧМ, вводимой в режиме ВЧП, ее необходимо скомпенсировать путем умножения сигнала $S_{\text{прм}}(t)$ на сигнал $S_{\text{лчм}}(t)$ с генератора линейной частоты, модулирующей зондирующий сигнал передатчика, который имеет вид:

$$S_{\text{лчм}}(t) = \exp\{-j\pi b(t + \Delta t)^2\}, \quad (6)$$

где b – значение крутизны ЛЧМ зондирующего сигнала в текущем такте зондирования; Δt – задержка радиосигнала, обусловленная расстоянием между истребителем и ВЦ.

Тогда сигнал $S_{\text{фр}}(t)$, полученный после сдвига сигнала $S_{\text{прм}}(t)$ в область видеочастот и компенсации дополнительной ЛЧМ зондирующего сигнала будет определяться выражением

$$\begin{aligned} S_{\text{фр}}(t) &= S_{\text{прм}}(t)S_{\text{г}}(t)S_{\text{лчм}}(t) = \\ &= U(t) \underbrace{\exp\{j\pi b\Delta t^2\}}_{\text{начальная фаза}} \underbrace{\exp\{-j2\pi b t \Delta t\} \exp\left\{j4\pi \frac{f_0}{c} V_c t\right\}}_{\text{ВЧ заполнение}} \exp\left\{j2\pi \frac{f_0}{c} a_c t^2\right\} + \xi(t) \end{aligned} \quad (7)$$

или

$$S_{\text{фр}}(t) = U(t) \exp\{j\varphi_{\text{вч}}\} \exp\{j2\pi f_{\text{вч}} t\} \exp\left\{j2\pi \frac{f_0}{c} a_c t^2\right\} + \xi(t), \quad (8)$$

где $\varphi_{\text{вч}} = \pi b \Delta t^2$; $f_{\text{вч}} = 2 \frac{f_0}{c} V_c - b \Delta t$.

Ускорение сближения a_c , входящее в выражения (7) и (8), можно оценить аналогично тому, как это делается в [4]. Суть способа заключается в следующем. Сигнал $S_{\text{фр}}(t)$ длительностью T_k , определяемой временем контакта ДНА БРЛС с ВЦ, разделяется по времени на два сигнала $S_1(t)$ и $S_2(t)$ длительностью $T_k/2$. Сигнал $S_2(t)$ комплексно сопрягается, и затем оба сигнала перемножаются друг на друга:

$$S_{\Delta}(t) = S_2(t)S_1^*(t); \quad (9)$$

$$S_1(t) = S_{\text{фр}}(t - T_k/4); \quad (10)$$

$$S_2(t) = S_{\text{фр}}(t + T_k/4); \quad (11)$$

$$-T_k/4 \leq t \leq T_k/4, \quad (12)$$

где знаком $*$ – обозначена операция комплексного сопряжения.

Тогда, приняв $\xi(t) = 0$ и $U(t) = 1$ в выражении (8), получим:

$$S_{\Delta}(t) = \exp\{-j\pi f_{\text{вч}} T_k\} \exp\left\{-j2\pi a_c \frac{f_0}{c} T_k t\right\}, \quad (13)$$

где первый множитель определяет некоторую начальную фазу, а второй множитель описывает гармоническое колебание с частотой $\Delta f = a_c \frac{f_0}{c}$. Таким образом оценить ускорение a_c можно, оценив положение пика сигнала $S_{\Delta}(t)$ в частотной области. Для этого необходимо найти преобразование Фурье сигнала $S_{\Delta}(t)$:

$$S_{\Delta}(f) = \int_{-T_k/4}^{T_k/4} S_{\Delta}(t) \exp\{-j2\pi f t\} dt. \quad (14)$$

При $a_c = 0$ (отсутствии ЛЧМ) пик $S_\Delta(f)$ находится на нулевой частоте. При $a_c \neq 0$ (наличии ЛЧМ) положение пика смещается на величину Δf , пропорциональную ускорению сближения a_c . Определив величину Δf в соответствии с выражением

$$\Delta f = \arg \max_f S_\Delta(f) \quad (15)$$

оценка ускорения сближения $\hat{a}_c$ может быть вычислена по формуле

$$\hat{a}_c = \frac{c\Delta f}{f_0 T_k}, \quad (16)$$

а ее потенциальная точность при больших отношениях сигнал/шум q в приемном канале определяется как [5]

$$\sigma_{ac} = \frac{c}{f_0 T_k} \frac{1}{q\tau_3}, \quad (17)$$

где $\tau_3 = \frac{\pi T_k}{2\sqrt{3}}$ – эффективная длительность сигнала.

При малых значениях q точность определения $\hat{a}_c$ обуславливается возникновением аномальных ошибок, вероятности которых исследованы в работе [7].

Время радиолокационного контакта $T_k = \Theta_A / \omega_A$ [6] определяется шириной диаграммы направленности Θ_A и угловой скоростью движения антенны ω_A . Скорость движения антенны БРЛС в свою очередь такова, что просмотр любой угловой позиции должен занимать не менее семи тактов обзора (пять тактов на перебор частот и два такта на измерения).

В современных БРЛС обработка сигналов на видеочастоте производится в цифровом виде. При этом, как показано в [8], частота дискретизации выбирается равной частоте зондирования F_3 в соответствии с импульсным режимом работы БРЛС. В этом случае выражение (14) может быть вычислено в дискретном виде с помощью операции быстрого преобразования Фурье (БПФ). Тогда, учитывая ограниченное количество отсчетов сигнала за время контакта ДНА с ВЦ величина $\hat{a}_c$ сможет принимать значения с дискретностью

$$\delta \hat{a}_c = \frac{2c}{f_0 T_k^2 N}, \quad (18)$$

где N – коэффициент частотной интерполяции при вычислении БПФ.

Упрощенная структурная схема системы цифровой обработки (СЦО) информации, реализующая фазоразностный способ определения ускорения сближения изображена на рисунке 1.

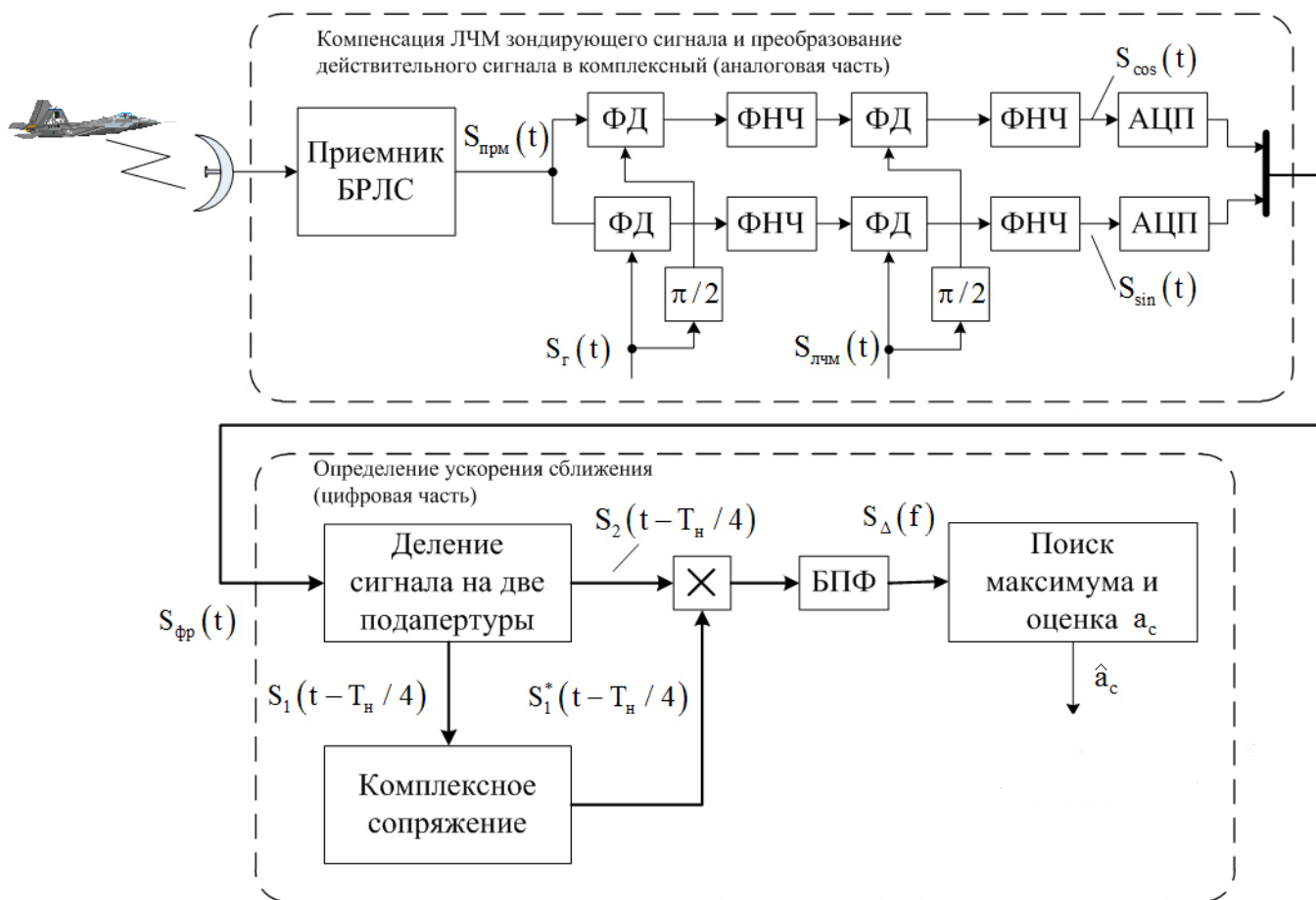


Рисунок 1 – Структурная схема СЦО, реализующая фазоразностный способ определения величины ускорения сближения

По вычисленному значению $\hat{a}_c$ адаптация системы сопровождения под реальный маневр осуществляется путем изменения параметров модели или структуры следящих измерителей в соответствии со следующим правилом

$$\begin{cases} \text{если } |\hat{a}_c| < a_n - \text{маневр отсутствует;} \\ \text{если } |\hat{a}_c| \geq a_n - \text{цель маневрирует,} \end{cases} \quad (19)$$

где a_n – заданное пороговое значение ускорения сближения цели с истребителем, которое определяется структурой и моделью следящего измерителя.

Проведенные исследования показали, что предложенный фазоразностный способ определения ускорения сближения истребителя с ВЦ может быть реализован

на базе системы обработки информации БРЛС современного истребителя в реальном масштабе времени.

3. Численный пример

Исследуем разработанный фазоразностный способ определения ускорения сближения истребителя с ВЦ на примере выполнения ей маневра «боевой разворот», представленного на рисунке 2, при различных значениях времени контакта T_k луча диаграммы направленности антенны БРЛС с ВЦ.

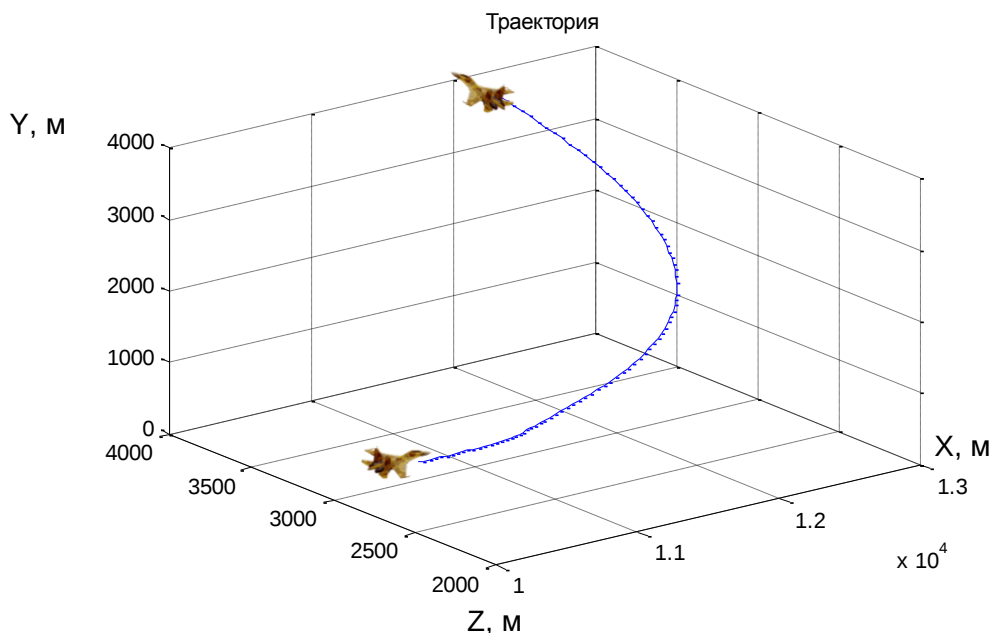
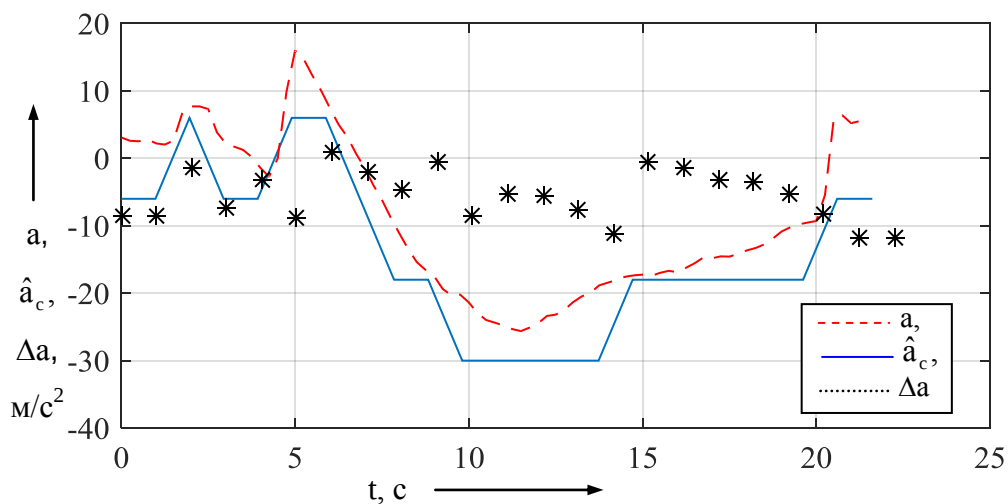


Рисунок 2 – Анализируемая тактическая ситуация



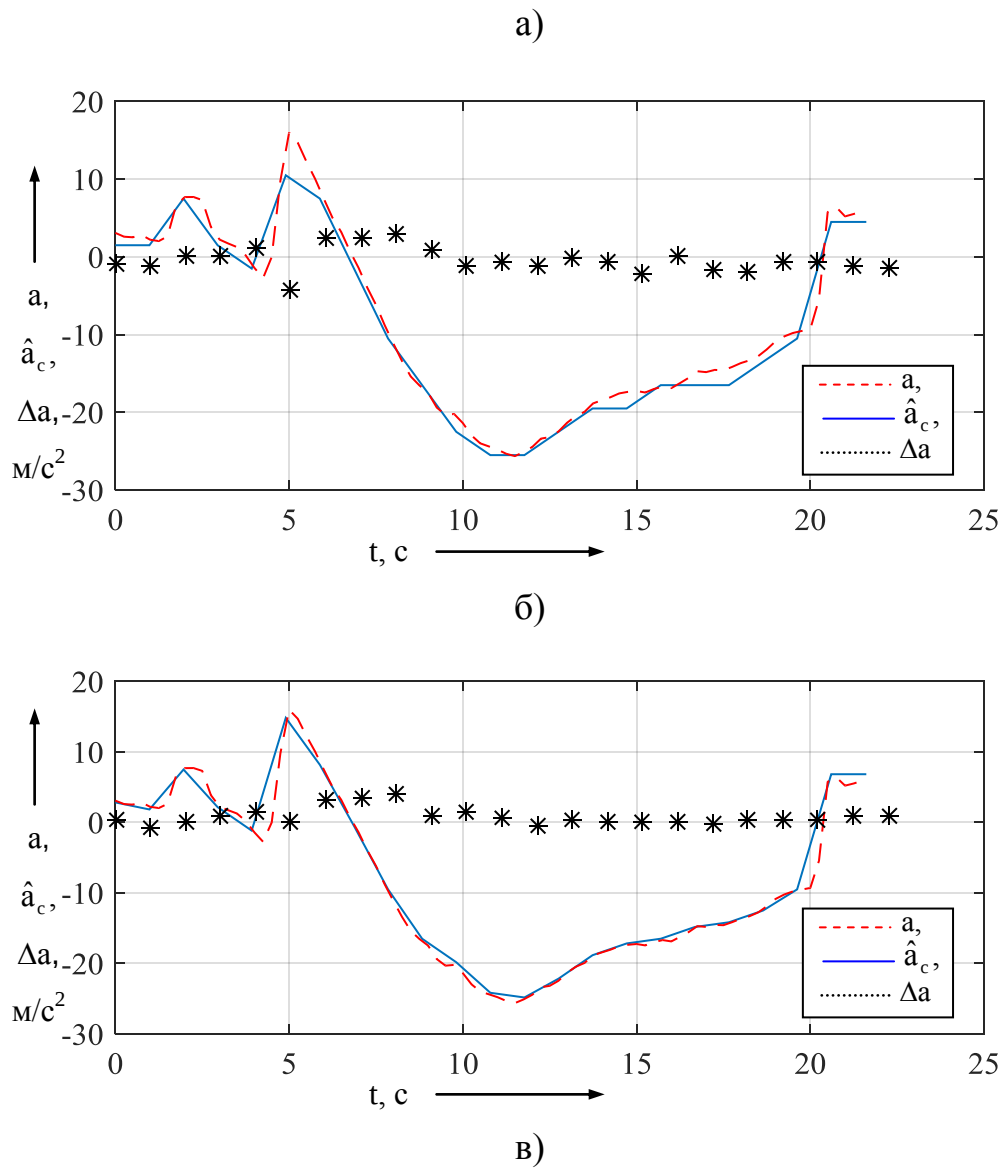


Рисунок 3 – Истинное значение ускорения сближения a , его оценка $\hat{a}_c$ и ошибка оценивания Δa при а) $T_k = 0,05$ с; б) $T_k = 0,1$ с; в) $T_k = 0,3$ с

Считается, что на борту современного истребителя установлена типовая БРЛС. Частота повторения зондирующих импульсов $F_3 = 3$ КГц, отношение сигнал/шум в приемном канале q больше 5, $T_{\text{обз}} = 1$ с, $N=2$, длина волны зондирующего сигнала $c/f_0 = 3$ см.

Истинное значение ускорения сближения a , его оценка $\hat{a}_c$ и величина ошибки оценивания Δa при различных значениях времени контакта T_k луча диаграммы на-

правленности антенны БРЛС с ВЦ представлены на рисунке 3. В таблице 1 представлены величины σ_{ac} , $\delta\hat{a}_c$, а также среднеквадратическое отклонение (СКО) Δa для аналогичных значений T_k .

Таблица 1

T_k , с	σ_{ac} , м/с	$\delta\hat{a}_c$	СКО Δa , м/с
0,05	2,6	12	3,8
0,1	0,6	3	1,6
0,3	0,07	0,3	1,2

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что предложенный способ позволяет уже на этапе первичной обработки информации определить ускорение сближения истребителя с ВЦ. При этом точность определения ускорения квадратично повышается при увеличении времени контакта T_k луча диаграммы направленности антенны БРЛС с ВЦ.

Заключение

Итак, разработанный фазоразностный способ определения ускорения сближения истребителя с ВЦ позволяет уже на этапе первичной обработки информации определить значение ускорения с высокой точностью для последующей коррекции параметров или структуры следящих измерителей в целях исключения срыва автосопровождения маневренных ВЦ. Это подтверждается результатами проведенного

имитационного моделирования. Представленные выражения позволяют вычислить точность определения ускорения сближения истребителя с ВЦ при заданных режимах обзора пространства

Библиографический список

1. Кондратенков Г.С. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. - М.: Радиотехника, 2005. - 368 с.
2. Способ адаптации системы сопровождения маневренной воздушной цели по дальности на основе информации от измерителей различной физической природы. Патент РФ № 2303797 / МПК G01S 13/87 / Шатовкин Р.Р. Заявка № 2005119534/09 от 23.06.2005. Бюл.№ 21, 27.07.2007.
3. Антипов В.Н. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны - М.: Радио и связь, 1988. - 304 с.
4. Способ определения количества целей в группе. Патент РФ № 2540951, МПК G01S13/52 / Лихачев Л.Б., Матюшенко А.Н., Рязанцев Л.Б., Филоненко В.В.; заявл. 08.07.2013; опубл. 10.02.2015.
5. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации. - М.: Советское радио, 1970. - 560 с.
6. Дудник П.И. Авиационные радиолокационные комплексы и системы. - М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006. -1112 с.
7. Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Вероятностные характеристики индикатора маневра воздушной цели на основе фазоразностной оценки ускорения сближения // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. №11. С. 10-14.
8. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радио-

локационной информации. - М.: Радио и связь, 1986. - 352 с.