

УДК 621.391.825

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ДЕВИАЦИИ ЧАСТОТЫ СИГНАЛОПОДОБНЫХ ПОМЕХ БОРТОВЫМ РАДИОЛОКАЦИОННЫМ СТАНЦИЯМ

Р. В. Антипенский, А. А. Волков, А. А. Донцов, Е. Е. Назаров

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил “Военно-воздушная академия имени
профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина”*

Поступила в редакцию 01.02.2022 г.

Аннотация. Разработана модель выходного сигнала оптимального устройства радиолокационной станции (РЛС) при приеме сигналоподобной помехи с неточностью в установке девиации частоты. С использованием полученной модели проведена оценка влияния отклонения девиации частоты на выходной сигнал оптимального устройства. Показано, что наличие неточности в установке девиации частоты приводит к появлению признаков в выходном сигнале, по которым помеху можно обнаружить — снижению уровня, смещению, расширению и изменению формы главного лепестка, а также изменению формы его боковых лепестков. На основе результатов моделирования разработана методика оценки требований к точности воспроизведения девиации частоты сигналоподобной помехи. Показано, что предельно допустимое отклонение девиации частоты сигналоподобной помехи определяется шириной спектра полезного сигнала.

Ключевые слова: сигналоподобная помеха, линейная частотная модуляция, точность воспроизведения параметра сигнала, радиолокационная станция, девиация частоты.

METHODOLOGY FOR SUBSTANTIATING REQUIREMENTS FOR THE ACCURACY OF FREQUENCY DEVIATION REPRODUCTION OF SIGNAL-LIKE INTERFERENCE TO THE ONBOARD RADAR STATIONS

R. V. Antipensky, A. A. Volkov, A. A. Dontsov, E. E. Nazarov

Abstract. A model of the output signal of the optimal device of a radar station is developed when receiving signal-like interference with an inaccuracy in setting the frequency deviation. Using the obtained model, the influence of the deviation of the frequency deviation on the output signal of the optimal device was evaluated. It is shown that the presence of an inaccuracy in the frequency deviation setting leads to the appearance of features in the output signal, by which interference can be detected - a decrease in the level, a shift, an expansion and a change in the shape of the main lobe, as well as a change in the shape of its side lobes. Based on the simulation results, a technique for estimating the requirements for the accuracy of reproducing the frequency deviation of the signal-like interference has been developed. It is shown that the maximum permissible deviation of the frequency deviation of a signal-like interference is determined by the width of the spectrum of the useful signal.

Keywords: signal-like interference, linear frequency modulation, reproduction accuracy of the signal parameter, radar station, frequency deviation.

© Антипенский Р. В., Волков А. А., Донцов А. А., Назаров Е. Е., 2022

ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью современных вооруженных конфликтов является активное применение противоборствующими сторонами беспилотных летательных аппаратов (БЛА) различного назначения. Беспилотные авиационные системы часто используются в качестве носителей средств разведки в оптическом и радиолокационном диапазонах длин волн, что обусловлено стремлением участников конфликта получить информационное превосходство в ходе боевых действий [1]. Ведение детальной круглосуточной разведки, не зависящей от погодных условий, обеспечивают многофункциональные бортовые радиолокационные станции [2]. Разведывательные БЛА с РЛС потенциального противника в настоящее время полностью интегрированы в разведывательно-огневые системы и обеспечивают поиск целей, выдачу целеуказания средствам огневого поражения и контроль результатов нанесения ударов.

Для противодействия разведывательным БЛА потенциального противника могут быть использованы способы радиоэлектронного подавления, связанные с постановкой активных помех их бортовым РЛС. Однако традиционные маскирующие помехи малоэффективны против современных РЛС, функционирующих в режиме синтезирования апертуры антенны [3]. Алгоритм синтезирования апертуры нивелирует достоинства маскирующих помех в силу строго определенного местоположения их источников, отсутствия учета в модуляции помеховых сигналов специального закона текущего изменения расстояния до многофункциональной бортовой РЛС, а также сложной структуры и относительно низкой энергетики зондирующих сигналов.

Перспективной альтернативой маскирующих помех могут стать сигналоподобные помехи [4], позволяющие за счет формирования ложной радиолокационной информации ввести противника в заблуждение относительно реальной фоноцелевой обстановки в районе предполагаемого удара. Навязывание ложной информации может привести к снижению пропускной способности системы разведки и, в конечном итоге, существенно затян timer или сорвать процесс обнаружения и прицеливания высокоточного оружия по наземным объектам.

Формирование сигналоподобных помех необходимо производить на основе выявленных пространственно-временных и энергетических параметров сигналов РЛС БЛА. В силу ряда объективных причин указанные параметры всегда воспроизводятся с погрешностями, величины которых определяют эффективность формируемых помех. Точность воспроизведения параметров полезного сигнала должна обеспечить невозможность идентификации помехи системой обработки подавляемой РЛС или оператором. Поэтому требования к точности воспроизведения параметров сигнала должны определяться предельно допустимыми изменениями выходного сигнала линейного тракта системы обработки РЛС.

Для получения высокой разрешающей способности по дальности в радиолокации наиболее часто применяются импульсные сложные сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [5]. Одним из основных параметров таких сигналов является девиация частоты (ширина спектра). В известной литературе [6, 7] вопросы, связанные с обоснованием требований к точности воспроизведения указанного параметра при формировании сигналоподобных (имитационных) помех, освещены недостаточно. Поэтому цель статьи состоит в разработке методики обоснования требований к точности воспроизведения девиации частоты сигналоподобных помех бортовым РЛС.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕТОЧНОСТИ В УСТАНОВКЕ ДЕВИАЦИИ ЧАСТОТЫ СИГНАЛОПОДОБНОЙ ПОМЕХИ НА РЛИ

Модуль комплексного выходного сигнала линейной части системы обработки РЛС $\dot{J}_S(\tau)$ определяет РЛИ и формируется в результате согласованной фильтрации комплексной огиба-

ющей входного сигнала [8]:

$$J_S(\tau) = \left| \dot{J}_S(\tau) \right| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(t + \tau) \dot{H}(t) dt \right|, \quad (1)$$

где t — текущее время; τ — машинное время; $\dot{S}(t)$ — комплексная огибающая входного сигнала; $\dot{H}(t)$ — опорная функция.

В качестве полезного сигнала РЛС далее будет рассматриваться ЛЧМ радиоимпульс с прямоугольной огибающей:

$$s(t) = S_0(\sigma(t) - \sigma(t - T)) \cos\left(2\pi f_0 t + \pi \frac{f_\delta}{T} t^2 + \varphi_0\right) \quad (2)$$

где S_0 — амплитуда сигнала; T — длительность сигнала; $\sigma(t)$ — функция Хевисайда; f_0 — начальная частота; f_δ — девиация частоты; φ_0 — начальная фаза.

Комплексная огибающая действительного сигнала (2) формируется квадратурным детектором [8] и имеет вид:

$$\dot{S}(t) = S_0(\sigma(t) - \sigma(t - T)) e^{j\left(\pi \frac{f_\delta}{T} t^2 + \varphi_0\right)}. \quad (3)$$

Опорная функция с точностью до амплитуды и начальной фазы повторяет комплексно-сопряжённую огибающую полезного сигнала:

$$\dot{H}(t) = H_0(\sigma(t) - \sigma(t - T)) e^{-j\pi \frac{f_\delta}{T} t^2}, \quad (4)$$

где H_0 — размерный коэффициент.

Сигналоподобная помеха имеет такую же структуру, как и полезный сигнал, но с отличающейся девиацией частоты.

$$s_{\text{СПП}}(t) = S_0(\sigma(t) - \sigma(t - T)) \cos\left(2\pi f_0 t + \pi \frac{f_\delta + \Delta f_\delta}{T} t^2 + \varphi_0\right) \quad (5)$$

где Δf_δ — отклонение девиации частоты.

Комплексная огибающая помехи (5) имеет вид:

$$\dot{S}_{\text{СПП}}(t) = S_0(\sigma(t) - \sigma(t - T)) e^{j\left(\pi \frac{f_\delta + \Delta f_\delta}{T} t^2 + \varphi_0\right)}. \quad (6)$$

При приеме РЛС помехи (5) согласованный фильтр сформирует сигнал:

$$J_{S_{\text{СПП}}}(\tau) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_{\text{СПП}}(t + \tau) \dot{H}(t) dt \right|. \quad (7)$$

Подстановка (6) и (4) в (7) приводит к выражению:

$$J_{S_{\text{СПП}}}(\tau) = S_0 H_0 \left| \int_{-\infty}^{\infty} (\sigma(t + \tau) - \sigma(t - T + \tau)) (\sigma(t) - \sigma(t - T)) e^{j\left(2\pi \frac{f_\delta + \Delta f_\delta}{T} \tau t + \pi \frac{\Delta f_\delta}{T} t^2\right)} dt \right|, \quad (8)$$

где $J_{S_{\text{max}}} = S_0 H_0$.

Преобразование интеграла (8) можно провести с использованием результатов работы [9], где вычислялся подобный интеграл, но с другим экспоненциальным множителем. С учетом указанных результатов выражение (8) можно представить в виде:

$$J_{S \text{ СПП}}(\tau) = J_{S \text{ max}} \begin{cases} 0, & \tau < -T, \\ \left| \int_{-\tau}^T e^{j\left(2\pi \frac{f_\delta + \Delta f_\delta}{T} \tau t + \pi \frac{\Delta f_\delta}{T} t^2\right)} dt \right|, & -T \leq \tau < 0, \\ \left| \int_0^{T-\tau} e^{j\left(2\pi \frac{f_\delta + \Delta f_\delta}{T} \tau t + \pi \frac{\Delta f_\delta}{T} t^2\right)} dt \right|, & 0 \leq \tau < T, \\ 0, & \tau \geq T. \end{cases} \quad (9)$$

В (9) содержатся интегралы вида:

$$I(t_1, t_2, \tau) = \left| \int_{t_1}^{t_2} e^{j\left(2\pi \frac{f_\delta + \Delta f_\delta}{T} \tau t + \pi \frac{\Delta f_\delta}{T} t^2\right)} dt \right|, \quad (10)$$

которые через элементарные функции не выражаются, однако могут быть сведены к специальным функциям. Для этого необходимо использовать замену переменной типа:

$$\xi = \xi(t, \tau) = \sqrt{\frac{\pi}{T}} \left(\sqrt{|\Delta f_\delta|} t + \operatorname{sgn}(\Delta f_\delta) \frac{(f_\delta + \operatorname{sgn}(\Delta f_\delta) |\Delta f_\delta|)}{\sqrt{|\Delta f_\delta|}} \tau \right). \quad (11)$$

Переменная t и ее дифференциал при такой замене будут равны:

$$t = \sqrt{\frac{T}{\pi |\Delta f_\delta|}} \xi - \operatorname{sgn}(\Delta f_\delta) \frac{(f_\delta + \operatorname{sgn}(\Delta f_\delta) |\Delta f_\delta|)}{|\Delta f_\delta|} \tau, \quad (12)$$

$$dt = \sqrt{\frac{T}{\pi |\Delta f_\delta|}} d\xi \quad (13)$$

Подстановка (11) – (13) в (10) и применение формулы Эйлера для разложения экспоненты мнимого переменного дают:

$$I(t_1, t_2, \tau) = \sqrt{\frac{T}{2|\Delta f_\delta|}} \sqrt{(C(\xi(t_2, \tau)) - C(\xi(t_1, \tau)))^2 + (S(\xi(t_2, \tau)) - S(\xi(t_1, \tau)))^2}, \quad (14)$$

где $C(x)$, $S(x)$ – интегралы Френеля, определяемые формулами [10]:

$$C(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^x \cos t^2 dt, \quad (15)$$

$$S(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^x \sin t^2 dt. \quad (16)$$

Использование выражения (14) позволяет представить выходной сигнал согласованного фильтра в виде:

$$\frac{J_{S \text{ СПП}}(\tau)}{J_{S \text{ max}}} = \sqrt{\frac{f_\delta}{2B |\Delta f_\delta|}} \left(\left(C \left(\sqrt{\pi B \frac{|\Delta f_\delta|}{f_\delta}} \left(1 + \frac{\tau}{T} \right) + \operatorname{sgn}(\Delta f_\delta) \sqrt{\pi B \frac{f_\delta}{|\Delta f_\delta|} \frac{\tau}{T}} \right) - \right.$$

$$\begin{aligned}
 & -C \left(\operatorname{sgn}(\Delta f_\delta) \sqrt{\pi B \frac{f_\delta}{|\Delta f_\delta|} \frac{\tau}{T}} \right)^2 + \left(S \left(\sqrt{\pi B \frac{|\Delta f_\delta|}{f_\delta}} \left(1 + \frac{\tau}{T} \right) + \operatorname{sgn}(\Delta f_\delta) \sqrt{\pi B \frac{f_\delta}{|\Delta f_\delta|} \frac{\tau}{T}} \right) - \right. \\
 & \quad \left. - S \left(\operatorname{sgn}(\Delta f_\delta) \sqrt{\pi B \frac{f_\delta}{|\Delta f_\delta|} \frac{\tau}{T}} \right)^2 \right)^{1/2} \left(\sigma \left(\frac{\tau}{T} + 1 \right) - \sigma \left(\frac{\tau}{T} \right) \right) + \\
 & \quad + \left(\left(C \left(\sqrt{\pi B \frac{|\Delta f_\delta|}{f_\delta}} + \operatorname{sgn}(\Delta f_\delta) \sqrt{\pi B \frac{f_\delta}{|\Delta f_\delta|} \frac{\tau}{T}} \right) - \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - C \left(\sqrt{\pi B} \frac{\tau}{T} \left(\sqrt{\frac{|\Delta f_\delta|}{f_\delta}} + \operatorname{sgn}(\Delta f_\delta) \sqrt{\frac{f_\delta}{|\Delta f_\delta|}} \right) \right) \right)^2 + \right. \\
 & \quad \left. + \left(S \left(\sqrt{\pi B \frac{|\Delta f_\delta|}{f_\delta}} + \operatorname{sgn}(\Delta f_\delta) \sqrt{\pi B \frac{f_\delta}{|\Delta f_\delta|} \frac{\tau}{T}} \right) - \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - S \left(\sqrt{\pi B} \frac{\tau}{T} \left(\sqrt{\frac{|\Delta f_\delta|}{f_\delta}} + \operatorname{sgn}(\Delta f_\delta) \sqrt{\frac{f_\delta}{|\Delta f_\delta|}} \right) \right) \right)^2 \right)^{1/2} \left(\sigma \left(\frac{\tau}{T} \right) - \sigma \left(\frac{\tau}{T} - 1 \right) \right), \quad (17)
 \end{aligned}$$

где $B = f_\delta T$ — база ЛЧМ сигнала.

На рисунках 1 и 2 показаны графики нормированных РЛИ (17), соответственно. При небольших и значительных относительных ошибках в воспроизведении девиации частоты $\Delta f_\delta/f_\delta$ при имитации сигналов с разными базами.

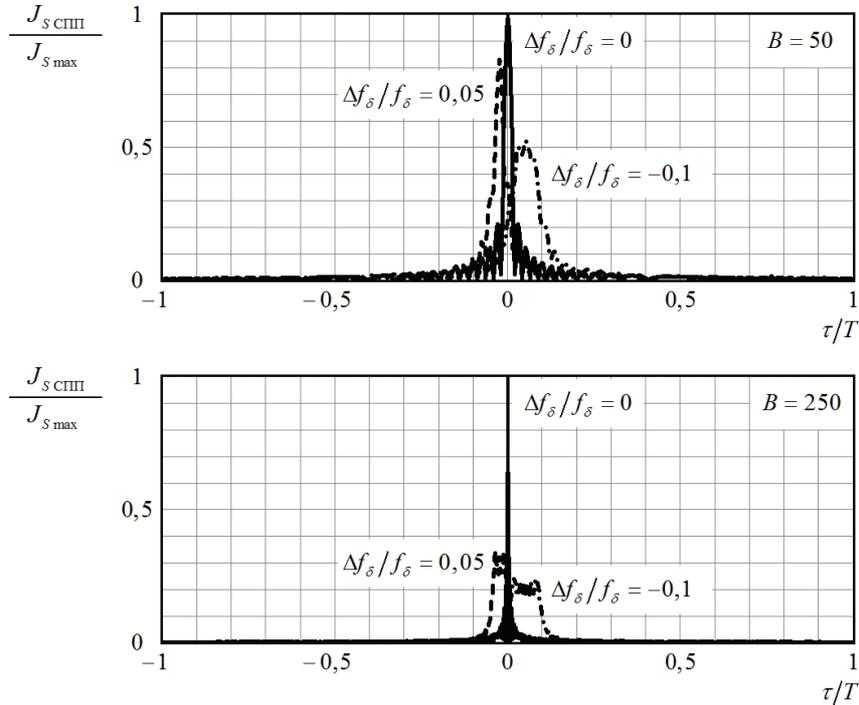


Рис. 1. Выходные сигналы согласованного фильтра при приеме сигналоподобных помех с небольшим отклонением девиации частоты.

Из представленных графиков видно, что неточность в установке девиации частоты сигналоподобной помехи приводит к снижению уровня, смещению максимума и изменению формы

главного и боковых лепестков выходного сигнала системы обработки РЛС. Уже при небольших отклонениях РЛИ претерпевает значительную деформацию, которая проявляется тем сильнее, чем больше база сигнала. При больших отклонениях девиации частоты форма выходного сигнала претерпевает существенные изменения: РЛИ содержит несколько максимумов примерно одинакового уровня. Уровни этих максимумов тем ниже, чем выше ошибка в установке девиации частоты.

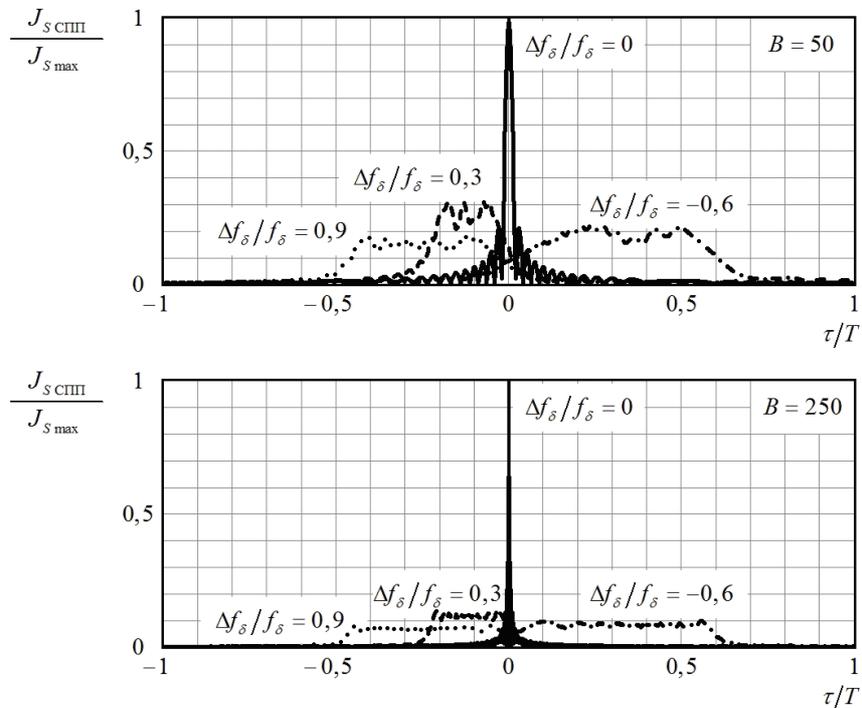


Рис. 2. Выходные сигналы согласованного фильтра при приеме сигналоподобных помех со значительным отклонением девиации частоты.

Сигналоподобная помеха, девиация частоты которой установлена с погрешностью, воспринимается трактом обработки РЛС так же, как полезный сигнал с квадратичными фазовыми искажениями. Для устранения фазовых искажений в современных РЛС используются устройства (алгоритмы) автофокусировки [11, 12]. Их наличие, однако, может способствовать ухудшению качества различения реальных и ложных РЛИ.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ДЕВИАЦИИ ЧАСТОТЫ СИГНАЛОПОДОБНОЙ ПОМЕХИ

Наиболее заметные признаки, позволяющие обнаружить и различить сигналоподобную помеху, содержатся в форме главного лепестка РЛИ. Изменения в структуре боковых лепестков, особенно дальних, в реальных условиях из-за наличия шумов определить практически не возможно. Поэтому оценка предельно допустимой ошибки определения девиации частоты сигналов РЛС должна основываться на предельно допустимых изменениях основных параметров формы главного лепестка РЛИ, к которым можно отнести его пиковое значение и величину смещения по оси машинного времени, т.е. координаты главного максимума. Относительные предельно допустимые отклонения координат главного максимума можно пред-

ставить в виде:

$$k_{\tau \max} = \frac{|\tau_{\max}|}{T}, \quad (18)$$

$$k_{J \max} = \frac{J_{S \max} - J_{S \text{ СПП } \max}}{J_{S \max}}, \quad (19)$$

где τ_{\max} , $J_{S \text{ СПП } \max}$ — предельно допустимые значения абсолютных координат главного максимума.

Величины $k_{\tau \max}$ и $k_{J \max}$ определяются возможностями оператора и системы обработки РЛИ и являются исходными данными методики оценки предельных ошибок воспроизведения параметров сигналоподобных помех. Относительные смещения координат главного максимума РЛИ по оси машинного времени k_{τ} и по сигнальной оси k_J при воздействии на РЛС помехи должны удовлетворять требованиям:

$$k_{\tau} = \frac{|\tau_m|}{T} \leq k_{\tau \max}, \quad (20)$$

$$k_J = \frac{J_{S \max} - J_{S \text{ СПП } m}}{J_{S \max}} \leq k_{J \max}, \quad (21)$$

где τ_m , $J_{S \text{ СПП } m}$ — абсолютные координаты главного максимума РЛИ по оси машинного времени и по сигнальной оси.

Из (17) следует, что k_{τ} и k_J являются функциями относительной ошибки в воспроизведении девиации частоты $\Delta f_{\delta}/f_{\delta}$. При этом из-за сложности выражения (17) общие аналитические выражения координат главного максимума РЛИ в решаемой задаче получить не удастся. Несмотря на это, в частных случаях при фиксированной базе имитируемого сигнала задача может быть решена графоаналитическим или численным методом в программе Mathcad. Анализ показал, что графические зависимости, полученные с в программе Mathcad, при ошибках в воспроизведении девиации частоты, не приводящих к существенным изменениям формы главного лепестка РЛИ (единицы процентов), могут быть аппроксимированы степенными функциями:

$$k_{\tau} = k_{\tau 0} \left(\frac{\Delta f_{\delta}}{f_{\delta}} \right)^{n_{\tau}} \quad (22)$$

$$k_J = k_{J 0} \left(\frac{\Delta f_{\delta}}{f_{\delta}} \right)^{n_J} \quad (23)$$

где $k_{\tau 0}$, n_{τ} , $k_{J 0}$, n_J — параметры аппроксимаций.

Таким образом, методика обоснования требований к точности воспроизведения девиации частоты сигналоподобной помехи состоит из следующей последовательности действий:

— задаются исходные данные: параметры имитируемого ЛЧМ сигнала (девиация частоты f_{δ} и длительность T) и предельно допустимые относительные отклонения координат главного максимума (по оси машинного времени $k_{\tau \max}$ и по сигнальной оси $k_{J \max}$);

— рассчитывается база сигнала B ;

— для полученного значения базы сигнала при помощи выражения (17) графическим методом в программе Mathcad с использованием функции трассировки определяются зависимости относительных отклонений координат главного максимума РЛИ по оси машинного времени k_{τ} и по сигнальной оси k_J от относительной ошибки в воспроизведении девиации частоты $\Delta f_{\delta}/f_{\delta}$;

— производится подбор коэффициентов $k_{\tau 0}$, n_{τ} , $k_{J 0}$, n_J для аппроксимации зависимостей $k_{\tau}(\Delta f_{\delta}/f_{\delta})$ и $k_J(\Delta f_{\delta}/f_{\delta})$ степенными функциями;

— определяются требования к точности воспроизведения девиации частоты сигналоподобной помехи по формуле:

$$|\Delta f_\delta| \leq f_\delta \min \left(\left(\frac{k_{\tau \max}}{k_{\tau 0}} \right)^{1/n_\tau}, \left(\frac{k_{J \max}}{k_{J 0}} \right)^{1/n_J} \right). \quad (24)$$

Из (24) видно, что предельно допустимое отклонение девиации частоты сигналоподобной помехи определяется шириной спектра полезного сигнала. Чем шире спектр имитируемого сигнала, тем ниже требуемая абсолютная точность воспроизведения девиации частоты сигналоподобной помехи.

С использованием разработанной методики проведено обоснование требований точности воспроизведения девиации частоты сигналоподобной помехи, имитирующей сигнал РЛС с базой $B = 50$, при допустимом снижении амплитуды выходного сигнала не более, чем на 20 % ($k_{J \max} = 0,2$), и допустимом смещении главного лепестка РЛИ не более, чем на 20 % в обе стороны ($k_{\tau \max} = 0,2$). Зависимости относительных отклонений координат главного максимума РЛИ по оси машинного времени и по сигнальной оси от ошибки в воспроизведении девиации частоты показаны на рисунке 3. Там же показаны подобранные аппроксимации указанных зависимостей степенными функциями:

$$\frac{\tau_m}{T} = -0,5 \frac{\Delta f_\delta}{f_\delta}, \quad (25)$$

$$\frac{J_{S \text{ СПИ } m}}{J_{S \text{ max}}} = \left(1 - 32 \left(\frac{|\Delta f_\delta|}{f_\delta} \right)^{1,75} \right). \quad (26)$$

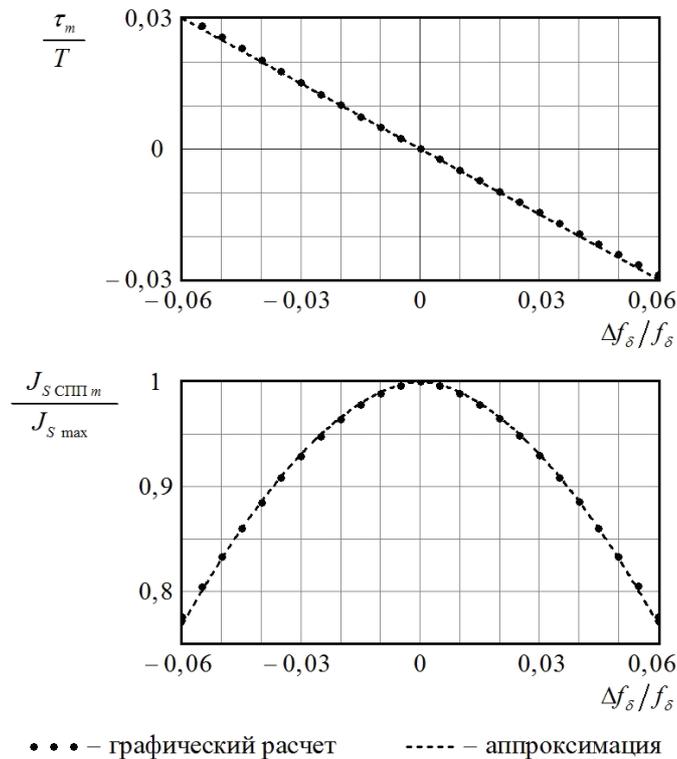


Рис. 3. Зависимости координат главного максимума РЛИ от ошибки в воспроизведении девиации частоты.

Коэффициенты аппроксимирующих функций (22), (23) в рассматриваемом случае равны: $k_{\tau 0} = 0,5$; $n_{\tau} = 1$; $k_{J0} = 32$; $n_J = 1,75$. С учетом этих данных требование к точности установки девиации частоты сигналоподобной помехи (24) будет иметь вид:

$$|\Delta f_{\delta}| \leq f_{\delta} \min \left(0,5k_{\tau \max}, 0,138k_{J \max}^{0,571} \right). \quad (27)$$

Из (27) следует, что отклонение координат главного максимума РЛИ не превысит требуемых значений при абсолютной ошибке в установке девиации частоты не более $0,055f_{\delta}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе алгоритма обработки сигналов и помех в линейном тракте РЛС получено аналитическое выражение выходного сигнала оптимального устройства при приеме сигналоподобной помехи с неточностью в установке девиации частоты. С использованием полученного выражения проведена оценка влияния отклонения девиации частоты на выходной сигнал оптимального устройства. Наличие неточности в установке девиации частоты приводит к искажениям РЛИ, которые позволяют различить сигналоподобную помеху. Эти искажения проявляются как снижение уровня, смещение, расширение и изменение формы главного лепестка. Вместе с этим изменяется форма боковых лепестков РЛИ. Уже при небольших неточностях в установке девиации частоты наблюдаются заметные изменения формы главного лепестка. При больших отклонениях девиации частоты форма выходного сигнала претерпевает существенные изменения: РЛИ содержит несколько максимумов примерно одинакового уровня. Уровни этих максимумов тем ниже, чем выше ошибка в установке девиации частоты и чем больше база имитируемого сигнала. Относительные снижение уровня, смещение и расширение главного лепестка зависят от базы сигнала. Неточность в установке девиации частоты сигналоподобной помехи проявляется так же, как квадратичные фазовые искажения в реальном сигнале РЛС. Для определения зависимостей относительных отклонений координат главного максимума РЛИ от ошибки в установке девиации частоты необходимо использовать только численные или графические методы. Для ЛЧМ сигнала с базой, равной 50, такие зависимости получены графическим методом в программе Mathcad и подобраны аппроксимирующие степенные функции. Результаты моделирования позволили разработать методику оценки предельно допустимого отклонения девиации частоты, обеспечивающего возможность формирования сигналоподобных помех. Исходными данными методики послужили относительные предельно допустимые отклонения координат главного максимума РЛИ. Согласно данной методики проведена оценка предельной ошибки в воспроизведении девиации частоты сигналоподобной помехи при требуемом снижении уровня пика РЛИ не более, чем на 20 %, и смещении по оси машинного времени не более, чем на 20 % в обе стороны по сравнению с РЛИ неискаженного полезного сигнала. В результате установлено, что для обеспечения указанных требований относительная ошибка в воспроизведении девиации частоты не должна превышать 5,5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ударные беспилотные летательные аппараты и их радиолокационные системы / О. Н. Ануфриев и др. // Успехи современной радиоэлектроники. — 2007. — № 7. — С. 51–65.
2. Основные направления развития авиационных бортовых РЛС / В. Н. Антипов, В. И. Меркулов, О. Ф. Самарин, В. С. Чернов // Успехи современной радиоэлектроники. — 2009. — № 10. — С. 7–28.
3. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / В. Д. Добыкин, А. И. Куприянов, В. Г. Пономарев, Л. Н. Шустов. — М.: Вузовская книга, 2007. — 468 с.

4. Защита радиолокационных систем от помех. Состояние и тенденции развития / под ред. А. И. Канащенкова и В. И. Меркулова. — М. : Радиотехника, 2003. — 416 с.
5. Теоретические основы радиолокации / под ред. В. Е. Дулевича. — М. : Советское радио, 1978. — 608 с.
6. Вакин, С. А. Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки / С. А. Вакин, Л. Н. Шустов. — М. : Советское радио, 1968. — 448 с.
7. Куприянов, А. И. Радиоэлектронная борьба / А. И. Куприянов. — М. : Вузовская книга, 2013. — 360 с.
8. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / под ред. В. Т. Горяинова. — М. : Радио и связь, 1988. — 304 с.
9. Методика обоснования требований к точности воспроизведения начальной частоты сигналаподобных помех бортовым радиолокационным станциям / Р. В. Антипенский, А. А. Волков, А. А. Донцов, Е. Е. Назаров // Воздушно-космические силы. Теория и практика. — 2021. — № 20. — С. 244 – 253.
10. Градштейн, И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. — М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. — 1108 с.
11. Кондратенков, Г. С. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли / Г. С. Кондратенков, А. Ю. Фролов. — М. : Радиотехника, 2005. — 368 с.
12. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов, В. Э. Турук. — М. : Радиотехника, 2010. — 676 с.

REFERENCES

1. Anufriev O.N., Gerasimov A.A., Merkulov V.I., Samarin O.F., Chernov V.S. Shock unmanned aerial vehicles and their radar systems. [Anufriyev O.N., Gerasimov A.A., Merkulov V.I., Samarin O.F., Chernov V.S. Udarnyye bespilotnyye letatel'nyye apparaty i ikh radiolokatsionnyye sistemy]. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki — Successes of modern radio electronics*, 2007, no. 7, pp. 51–65.
2. Antipov V.N., Merkulov V.I., Samarin O.F., Chernov V.S. The main directions of development of aviation airborne radars. [Antipov V.N., Merkulov V.I., Samarin O.F., Chernov V.S. Osnovnyye napravleniya razvitiya aviatsionnykh bortovykh RLS]. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki — Successes of modern radio electronics*, 2009, no. 10, pp. 7–28.
3. Dobykin V.D., Kupriyanov A.I., Ponomarev V.G. and Shustov L.N. Radio-electronic fight. Power defeat of radio-electronic systems. [Dobykin V.D., Kupriyanov A.I., Ponomarev V.G., Shustov L.N. Radioelektronnaya bor'ba. Silovoe porazhenie radioelektronnykh system]. Moscow: Vuzovskaya kniga, 2007, 468 p.
4. Protection of radar systems from interference. The state and trends of development. Ed. by A.I. Kanashchenkov and V.I. Merkulov. [Zashchita radiolokatsionnykh sistem ot pomekh. Sostoyaniye i tendentsii razvitiya. Ed. by A.I. Kanashchenkov and V.I. Merkulov]. Moscow: Radiotekhnika, 2003, 416 p.
5. Theoretical foundations of radar. Ed. by V.E. Dulevich. [Teoreticheskiye osnovy radiolokatsii. pod red. V.E. Dulevicha]. Moscow: Sovetskoye radio, 1978, 608 p.
6. Vakin S.A., Shustov L.N. Fundamentals of radio communication and radio intelligence. [Vakin S.A., Shustov L.N. Osnovy radioprotivodeystviya i radiotekhnicheskoy razvedki]. Moscow: Sovetskoye radio, 1968, 448 p.
7. Kupriyanov A.I. Electronic warfare. [Kupriyanov A.I. Radioelektronnaya bor'ba]. Moscow: Vuzovskaya kniga, 2013, 360 p.
8. Radar stations with digital synthesis of the antenna aperture. Ed. by V.T. Goryainov. [Radiolokatsionnyye stantsii s tsifrovym sintezirovaniyem apertury anteny. pod red.

V.T. Goryainova]. Moscow: Radio i svyaz', 1988, 304 p.

9. Antipenskiy R.V., Volkov A.A., Dontsov A.A., Nazarov E.E. Methodology for substantiating requirements for the accuracy of reproduction of the initial frequency of signal-like interference to airborne radar stations. [Antipenskiy R.V., Volkov A.A., Dontsov A.A., Nazarov E.E. Metodika obosnovaniya trebovaniy k tochnosti vosproizvedeniya nachal'noy chastoty signalopodobnykh pomekh bortovym radiolokatsionnym stantsiyam]. *Vozdushno-kosmicheskiye sily. Teoriya i praktika — Aerospace forces. Theory and practice*, 2021, no. 20, pp. 244–253.

10. Gradstein I.S., Ryzhik I.M. Tables of integrals, sums, series and products. [Gradshteyn I.S., Ryzhik I.M. Tablitsy integralov, summ, ryadov i proizvedeniy]. Moscow: Gosudarstvennoye izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury, 1963, 1108 p.

11. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. Radio vision. Radar systems of remote sensing of the Earth. [Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. Radiovideniye. Radiolokatsionnyye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli]. Moscow: Radiotekhnika, 2005, 368 p.

12. Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk V.E. Radar systems of space-based earth survey. [Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk V.E. Radiolokatsionnyye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya]. Moscow: Radiotekhnika, 2010, 676 p.

*Антипенский Роман Валериевич, начальник кафедры радиоэлектроники Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил “Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина”, Воронеж, кандидат технических наук, доцент, Воронеж, Россия
E-mail: antipenskiy@yandex.ru*

*Antipenskiy Roman Valerievich, Head of the Department of Radio Electronics of Military Educational-Research Centre of Air Force “Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin”, Voronezh, candidate of engineering sciences, associate professor, Voronezh, Russia
E-mail: antipenskiy@yandex.ru*

*Волков Алексей Анатольевич, преподаватель кафедры радиоэлектроники Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил “Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина”, Воронеж, кандидат технических наук, Воронеж, Россия
E-mail: volkov_aa@autorambler.ru*

*Volkov Aleksey Anatolevich, Lecturer of the Department of Radio Electronics of Military Educational-Research Centre of Air Force “Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin”, Voronezh, candidate of engineering sciences, Voronezh, Russia
E-mail: volkov_aa@autorambler.ru*

*Донцов Александр Александрович, профессор кафедры радиоэлектроники Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил “Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина”, Воронеж, доктор технических наук, профессор, Воронеж, Россия
E-mail: addoncov1@mail.ru*

*Dontsov Aleksandr Aleksandrovich, professor of the Department of Radio Electronics of Military Educational-Research Centre of Air Force “Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin”, Voronezh, doctor of engineering sciences, professor, Voronezh, Russia
E-mail: addoncov1@mail.ru*

Назаров Егор Евгеньевич, адъюнкт Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил “Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина”, Воронеж, Россия

Nazarov Egor Evgenievich, adjunct of Military Educational-Research Centre of Air Force “Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin”, Voronezh, Russia