

Влияние длительности зондирующего импульса на работу помехозащищенного дискриминатора дальности

С. И. Зиятдинов[✉], О. И. Красильникова

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

[✉] ziat.53@mail.ru

Аннотация

Введение. Рассмотрена работа радиолокационной системы автоматического сопровождения цели по дальности (АСД), оснащенной с целью повышения точности оценки дальности системой селекции движущихся целей (СДЦ), в условиях интенсивных пассивных помех в виде отражений от земной поверхности, уровень которых может значительно превосходить полезные сигналы. Сопровождение по дальности системой АСД осуществляется парой следящих полустрелов, в которые при движении цели при каждом зондировании пространства попадают слабо коррелированные сигналы от различных участков земной поверхности, что снижает эффективность работы системы СДЦ и увеличивает ошибки измерения дальности.

Цель работы. Исследование корреляционных свойств пассивных помех при работе системы АСД в зависимости от длительности зондирующего импульса и скорости движения цели. Определение эффективности работы системы СДЦ в составе системы АСД при воздействии коррелированных помех. Оценка влияния длительности зондирующих импульсов РЛС и скорости движения цели на коэффициент подавления пассивных помех и работу дискриминатора дальности при работе системы АСД.

Материалы и методы. В основу работы положен метод корреляционного анализа статистических свойств сигналов и устройств их обработки.

Результаты. Получено выражение для корреляционной функции флуктуаций сигналов, отраженных однородной земной поверхностью, учитывающее длительность зондирующего импульса и скорость движения цели применительно к импульсным РЛС с СДЦ. Представлены результаты расчетов коэффициента подавления пассивной помехи средствами СДЦ в составе помехозащищенного дискриминатора дальности для различных значений длительности зондирующего импульса и скорости движения цели. Показано, что с уменьшением длительности зондирующего импульса, а также с ростом скорости движения цели коэффициент подавления пассивной помехи значительно уменьшается, а дисперсия помехового сигнала на выходе дискриминатора дальности системы АСД существенно возрастает. Так, при интервале времени $\tau = 0.02$ с, скорости движения цели $v_p = 500$ км/ч и изменении длительности зондирующего импульса с 1 до 0.1 мкс коэффициент корреляции межпериодных флуктуаций пассивной помехи $r_m(nT)$ уменьшается с 0.83 до 0.67, что приводит к уменьшению коэффициента подавления пассивной помехи системой СДЦ.

Заключение. Полученные в статье результаты могут быть полезны при проектировании импульсных радиолокационных станций с СДЦ, использующих помехозащищенные системы измерения параметров движущихся целей.

Ключевые слова: пассивная помеха, зондирующий импульс, радиальная скорость, измерение дальности, система селекции движущихся целей, коэффициент подавления пассивной помехи

Для цитирования: Зиятдинов С. И., Красильникова О. И. Влияние длительности зондирующего импульса на работу помехозащищенного дискриминатора дальности // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 4. С. 47–56.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-4-47-56

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 26.01.2025; принята к публикации после рецензирования 21.04.2025; опубликована онлайн 29.09.2025



Influence of Probing Pulse Duration on the Operation of Interference-Proof Range Discriminator

Sergei I. Ziatdinov✉, Olga I. Krasilnikova

State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

✉ ziat.53@mail.ru

Abstract

Introduction. The operation of a radar system of automatic range tracking (ATR), equipped with a moving target selector (MTS) for the purpose of increasing assessment accuracy, under conditions of intensive passive interference in the form of reflections from the Earth's surface is considered. The level of such passive interference can significantly exceed useful signals. Range tracking by the ATR system is carried out by a pair of tracking half-strobes, which receive weakly correlated signals from different parts of the Earth's surface during each probing of the space. This reduces the efficiency of the MTS system and increases the error of range measurement.

Aim. To study the correlation properties of passive interference in the modes of search and automatic tracking of moving targets by the ATR system depending on probing pulse duration and target velocity. To determine the efficiency of the MTS system as part of the ATR system when exposed to correlated interference. To evaluate the effect of probing pulse duration and target velocity on the passive interference suppression coefficient and range discriminator operation when the ATR system operates in the search and automatic tracking modes.

Materials and methods. The method of correlation analysis of statistical properties of signals and devices for their processing was used.

Results. We derived an expression for the correlation function of signal fluctuations reflected by a homogeneous Earth's surface, taking into account probing pulse duration and target velocity as applied to pulse Doppler radars. The results of calculating the passive interference suppression coefficient by means of the MTS as part of an interference-proof range discriminator for various values of probing pulse duration and target velocity are presented. It is shown that a decrease in probing pulse duration, as well as an increase in target velocity, leads to a significant decrease in the passive interference suppression coefficient and an increase in the dispersion of the interference signal at the output of the range discriminator of the ATR system. Thus, when the target velocity interval is $\tau = 0.2$ s, the target velocity is $v_p = 500$ km/h, and the probing pulse duration varies from 1 to 0.1 μ s, the correlation coefficient of the inter-period fluctuations of the passive interference $r_m(nT)$ decreases from 0.83 to 0.67, resulting in a decrease in the suppression coefficient of the passive interference by the MTS system.

Conclusion. The results obtained can be used when designing pulse Doppler radars using interference-proof systems for measuring the parameters of moving targets.

Keywords: passive interference, probing pulse, radial velocity, range measurement, moving target selection system, passive interference suppression coefficient

For citation: Ziatdinov S. I., Krasilnikova O. I. Influence of Probing Pulse Duration on the Operation of Interference-Proof Range Discriminator. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 4, pp. 47–56.
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-4-47-56

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 26.01.2025; accepted 21.04.2025; published online 29.09.2025

Введение. К числу задач, решаемых различными радиолокационными системами, относится обнаружение целей и измерение их текущих параметров – дальности, координат пространственного положения, скорости, ускорения и т. д. С целью повышения точности оценки дальности, углового положения и скорости цели применяют различные системы ав-

томатического сопровождения по дальности (АСД), угловым координатам и скорости.

В реальных условиях работа радиолокационной станции (РЛС) существенно усложняется наличием помех различного рода. Кроме внутренних шумов приемника РЛС это могут быть специально организованные мешающие сигналы и пассивные помехи в виде отражений

от земной, водной поверхностей и метеорообразований [1–5]. При этом уровень пассивных помех может на 20...40 дБ и более превышать полезные сигналы, отраженные движущимися целями. На практике для обнаружения движущихся целей на фоне мощных пассивных помех используются системы селекции движущихся целей (СДЦ). Работа систем СДЦ основана на применении доплеровских фильтров в виде устройств череспериодного вычитания различной кратности либо полосовых фильтров [3–9].

Вопросы построения и анализа различных радиолокационных систем в условиях воздействия пассивных помех достаточно полно рассмотрены как в отечественной, так и в иностранной литературе [3–15], где отражены объемные исследования спектрально-корреляционных свойств различного рода помех и их влияние на тактические свойства систем со средствами СДЦ. При этом исследована работа бортовых и наземных РЛС с СДЦ с внутренней и внешней когерентностью, работающих как в непрерывном или в квазинепрерывном режиме, так и в импульсном режиме большой скважности. Кроме того, уделено внимание построению РЛС с адаптивными системами СДЦ, свойства которых изменяются при изменении параметров полезных сигналов, отраженных движущимися целями, и пассивных помех.

В настоящей статье показано, что в наземных РЛС с СДЦ, оснащенных системами АСД, в режиме поиска и автосопровождения движущихся целей по дальности в условиях наличия

пассивной помехи происходит частичная декорреляция пассивной помехи в пределах следящих полустробиов, зависящая от длительности зондирующего импульса и скорости движения цели, что снижает коэффициент подавления пассивной помехи. Настоящая статья посвящена исследованию влияния длительности зондирующего импульса на характеристики дискриминатора дальности помехозащищенной системы АСД с использованием устройства СДЦ.

Метод. В основу исследований положен корреляционный метод анализа статистических свойств обрабатываемых сигналов. Получено выражение для корреляционной функции пассивной помехи, учитывающее длительность зондирующего импульса и скорость движения цели применительно к наиболее широко используемым РЛС с СДЦ при большой скважности излучаемых сигналов.

В качестве примера рассмотрим устройство обработки сигналов (рис. 1), представляющее собой часть системы АСД и включающее в себя фазовый детектор (ФД), генератор опорного напряжения (ГОН), дискриминатор дальности и генератор двух следящих полустробиов (ГПС) [1, 3, 4]. Дискриминатор дальности оснащен средствами СДЦ в виде двух схем однократного череспериодного вычитания, содержащих входные строб-каскады СК1 и СК2, линии задержки (ЛЗ) на период зондирования T и два вычитающих устройства, и выходным вычитающим устройством. Представленное устройство обработки решает задачу формирования сигнала рассогла-

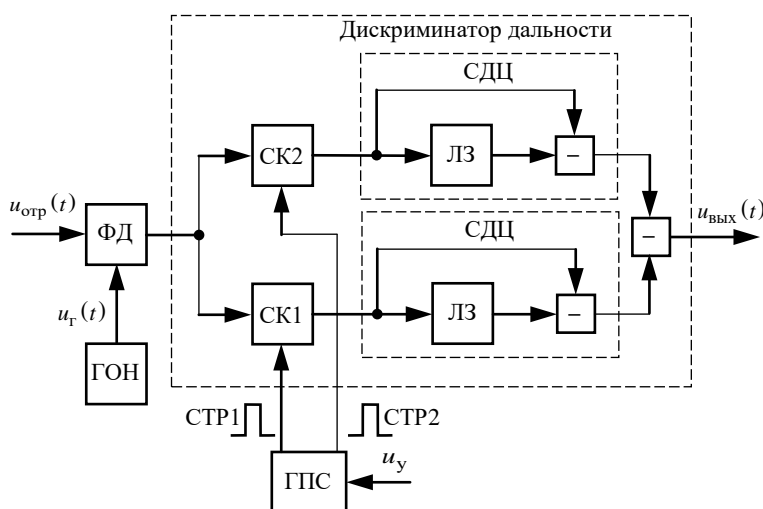


Рис. 1. Устройство обработки сигналов

Fig. 1. Signal processing device

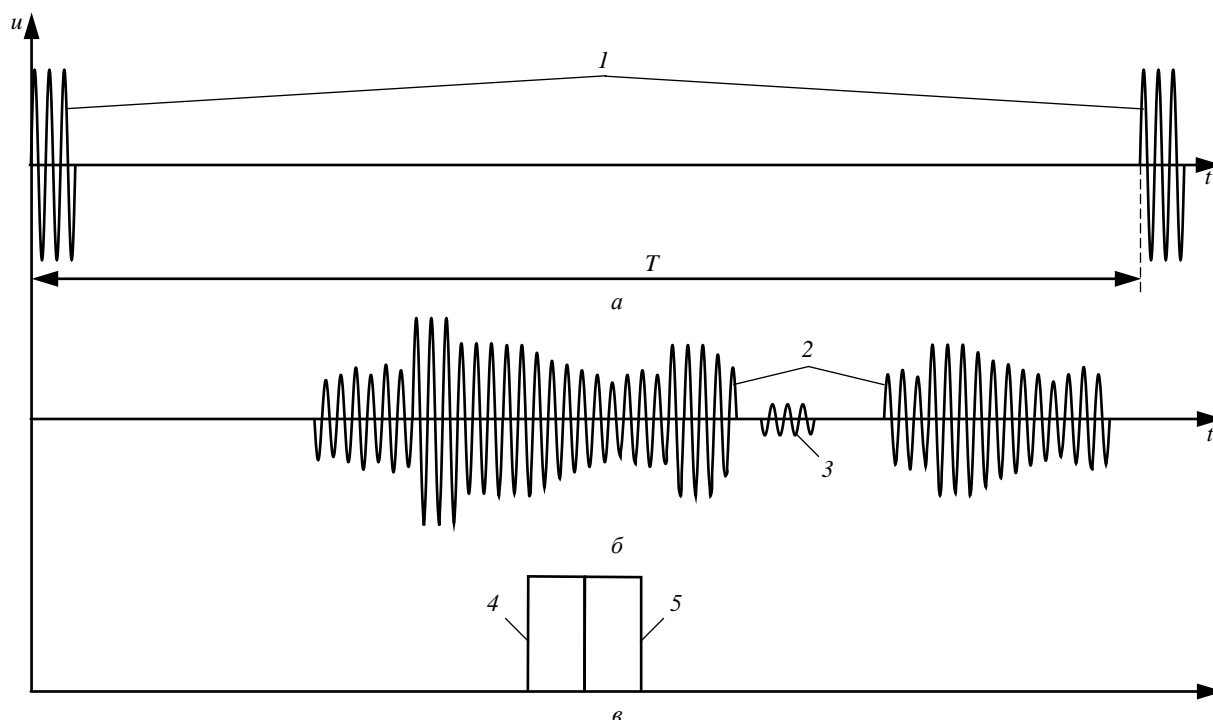


Рис. 2. Сигналы в контрольных точках: *a* – зондирующие импульсы 1; *б* – пассивная помеха 2 и полезный сигнал 3; *в* – полустробы СДЦ 4 и 5

Fig. 2. Signals at control points: *a* – probing pulses 1; *б* – passive interference 2 and useful signal 3; *в* – half-strobes of the moving target selector 4 and 5

сования (сигнала ошибки) центра тяжести отраженного объектом импульса и оси симметрии следящих полустробов.

На рис. 2 представлены временные реализации сигналов, поясняющие работу устройства обработки сигналов.

На рис. 2, *a* показаны зондирующие импульсы РЛС. Возможные временные реализации отраженного полезного сигнала и пассивной помехи в одном радиолокационном такте изображены на рис. 2, *б*. На рис. 2, *в* показаны следящие полустробы системы АСД. Взаимное положение помехи и полезного сигнала, а также следящих полустробов в процессе поиска и слежения может изменяться.

Принцип работы рассматриваемого устройства в составе системы АСД подробно изложен в [2–4]. Система АСД работает в двух режимах – поиска и автоматического сопровождения цели по дальности. В процессе работы системы АСД синхронизатор РЛС вырабатывает периодическую последовательность коротких видеоимпульсов с периодом T . Каждым синхронизирующим импульсом запускается временной модулятор, формирующий короткий видеоимпульс, время задержки которого относительно

синхронизирующего импульса определяется выходным напряжением сглаживающих цепей следящей системы АСД. Выходным импульсом временного модулятора запускается генератор полустробов ГПС, на выходе которого формируются два следующих друг за другом следящих полустроба (рис. 2, *в*), поступающих на входы строб-каскадов СК1 и СК2.

На рис. 2, *б* полезный сигнал представлен коротким радиоимпульсом 3 с частотой ω_c , а пассивная помеха (отражения от земной поверхности) – протяженным в пределах радиолокационного такта радиосигналом 2 с частотой ω_{Π} .

Аддитивная смесь отраженных от цели радиоимпульсов полезного сигнала 3 и пассивной помехи 2 (рис. 2, *б*) с выхода приемного устройства РЛС на высокой частоте поступает на вход ФД, на другой вход которого подается непрерывное гармоническое опорное напряжение с ГОН. В ФД входной сигнал переносится с радиочастоты на видеочастоту. Видеоимпульсы цели и пассивной помехи с выхода ФД подаются на входы строб-каскадов СК1 и СК2 дискриминатора дальности, на вторые входы которых, как отмечено ранее, одновременно с выхода ГПС поступают следящие полустробы

(рис. 2, в). В результате на выходах СК1 и СК2 вырабатываются видеоимпульсы, длительность которых соответствует времени перекрытия импульса цели и конкретного полустроба.

При наличии во входном сигнале пассивной помехи последняя подавляется схемой череспериодного вычитания, и далее импульсы полезного сигнала подаются на выходное вычитающее устройство, на выходе которого выделяется напряжение, пропорциональное времени рассогласования центра тяжести импульса полезного сигнала и оси симметрии следящих полустробов. Это сигнал ошибки, который при дальнейшем использовании для коррекции временного положения полустробов устремляет рассогласование полезного сигнала и полустробов к нулю.

В режиме поиска цели длительность выходных импульсов временного модулятора и, соответственно, задержка следящих полустробов линейно изменяются. Поиск цели ведется от минимальной дальности до максимальной, поэтому при наличии цели импульс полезного сигнала в первую очередь совпадает со вторым полустробом. При достижении этого совпадения система АСД переходит в режим автоматического сопровождения цели по дальности.

В импульсных РЛС, работающих в режиме большой скважности (длительность излучаемых импульсов много меньше периода их следования), совокупность сигналов на выходе усилителя промежуточной частоты приемника РЛС – отраженных движущейся целью, земной поверхностью, – и внутреннего шума приемника описывается следующим образом:

$$u_{\text{отр}}(t) = U_c(t) \cos[\omega_c t + \varphi_c(t)] + U_{\Pi}(t) \cos[\omega_{\Pi} t + \varphi_{\Pi}(t)] + u_{\text{ш}}(t); \quad (1)$$

$$t = nT + \tau, \tau = \overline{0, \tau_{\text{и}}},$$

где U_c , ω_c , φ_c – флюктуирующая амплитуда, средняя частота и флюктуирующая начальная фаза полезного сигнала соответственно; U_{Π} , ω_{Π} , φ_{Π} – аналогичные характеристики пассивной помехи; $u_{\text{ш}}$ – внутренний шум приемника; $n = 0, 1, 2, \dots$; T – период следования отраженных импульсов; $\tau_{\text{и}} \ll T$ – длительность импульса.

Аддитивная смесь отраженных полезного

сигнала и пассивной помехи (1) поступает на сигнальный вход ФД, на другой вход которого подается непрерывное гармоническое опорное напряжение с ГОН вида

$$u_{\Gamma}(t) = U_{\Gamma} \cos(\omega_{\Gamma} t + \varphi_{\Gamma}),$$

где U_{Γ} , ω_{Γ} , φ_{Γ} – амплитуда, частота и начальная фаза опорного напряжения.

Для наземной РЛС частота отражений от земной поверхности равняется частоте опорного напряжения ГОН, т. е. $\omega_{\Pi} = \omega_{\Gamma}$.

В этом случае выходной сигнал ФД отраженных сигналов (1) без учета внутренних шумов приемника записывается следующим образом:

$$u_{\text{отр}}(t) = U_c(t) \cos[\omega_d t + \varphi_c(t)] + U_{\Pi}(t) \cos[\varphi_{\Pi}(t)],$$

где $\omega_d = \omega_{\Pi} - \omega_{\Gamma}$ – доплеровское смещение частоты полезного сигнала.

Найдем статистические характеристики пассивной помехи. Земную поверхность будем рассматривать однородной, состоящей из большого числа элементарных отражателей со своей отражающей поверхностью [1, 2, 8]. При этом каждый элементарный отражатель переизлучает зондирующие радиоимпульсы. В итоге результирующий отраженный земной поверхностью сигнал, переизлучаемый всеми элементарными отражателями в пределах разрешаемого участка дальности земной поверхности, можно записать в виде

$$u_{\text{отр}}(t) = \sum_{i=1}^N u_i(t) = \sum_{i=1}^N U_i(t) \cos[\omega_{\Pi} t + \varphi_i(t)]; \quad t = \overline{0, \tau_{\text{и}}}, \quad (2)$$

где u_i – элементарный отраженный сигнал с амплитудой U_i и начальной фазой φ_i ; N – число элементарных отражателей, одновременно облучаемых зондирующим импульсом.

Тогда корреляционная функция одновременно принимаемых элементарных сигналов в пределах разрешаемого участка дальности (корреляционная функция внутрипериодных флюктуаций пассивной помехи) будет определяться выражением [9–11]

$$B_{\text{вн}}(\tau) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \overline{u_i(t) u_j(t+\tau)}, \quad (3)$$

где черта сверху означает статистическое усреднение. Для прямоугольного зондирующего радиоимпульса с учетом соотношения (2) выражение (3) принимает вид

$$B_{\text{вн}}(\tau) = \sigma^2 (1 - \tau/\tau_{\text{и}}) \cos(\omega_{\text{п}}\tau), \quad (4)$$

где σ^2 – дисперсия пассивной помехи. Из (4) следует, что интервал корреляции внутрипериодных флюктуаций сигнала, отраженного однородной протяженной земной поверхностью, не превышает длительности зондирующего импульса.

На практике пассивная помеха является медленно флюктуирующим от периода к периоду зондирования случайным процессом с шириной энергетического спектра межпериодных флюктуаций для неподвижных РЛС, не превышающим десятков герц [3, 10]. Следовательно, интервал корреляции межпериодных флюктуаций пассивной помехи существенно превышает интервал корреляции внутрипериодных флюктуаций. Тогда результирующую корреляционную функцию пассивной помехи можно записать следующим образом:

$$B(nT + \tau) = \sigma^2 r_{\text{м}}(nT) r_{\text{вн}}(\tau), \quad (5)$$

где $r_{\text{м}}$ и $r_{\text{вн}}$ – коэффициенты корреляции межпериодных и внутрипериодных флюктуаций пассивной помехи соответственно. С учетом

(4) коэффициент корреляции внутрипериодных флюктуаций пассивной помехи примет вид

$$r_{\text{вн}}(\tau) = (1 - \tau/\tau_{\text{и}}) \cos(\omega_{\text{п}}\tau). \quad (6)$$

Из (6) следует, что в пределах длительности зондирующего импульса $\tau_{\text{и}}$ коэффициент корреляции внутрипериодных флюктуаций пассивной помехи изменяется от 1 до 0.

В режимах поиска и сопровождения движущейся цели время задержки отраженного сигнала и, следовательно, временное положение следящих полустробиов изменяется. За период зондирования T это изменение составляет

$$\Delta T = 2v_{\text{р}}T/c, \quad (7)$$

где $v_{\text{р}}$ – радиальная скорость движения цели; c – скорость распространения электромагнитных волн. Для примера положим $T = 1$ мс, тогда при $v_{\text{р}} = 50$ км/ч получим $\Delta T = 0.93 \cdot 10^{-4}$ мкс, при $v_{\text{р}} = 250$ км/ч $\Delta T = 4.63 \cdot 10^{-4}$ мкс, при $v_{\text{р}} = 1250$ км/ч; $\Delta T = 23.15 \cdot 10^{-4}$ мкс.

В результате при каждом периоде зондирования следящие полустробиы проецируются на новый участок пассивной помехи, что иллюстрирует рис. 3, б, где показаны соответствующие временные реализации сигналов.

На рис. 3, а видно, что за время одного периода зондирования T следящие полустробиы смещаются из позиции t_1 в позицию t_1^* на величину ΔT , что приводит к частичной декорреляции пассивной помехи.

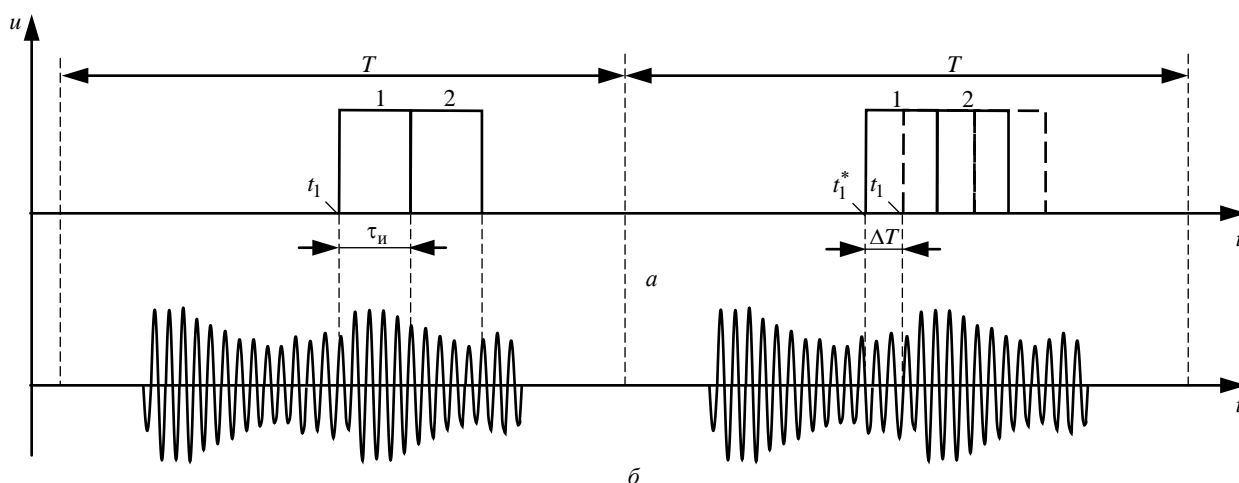


Рис. 3. Временные реализации сигналов: а – следящие полустробиы; б – пассивная помеха

Fig. 3. Time realizations of signals: а – tracking half-strobes; б – passive interference

С учетом данного обстоятельства коэффициент внутрипериодной корреляции пассивной помехи может быть записан в виде

$$r_{\text{вн}}(\tau) = \left[1 - (\tau + \Delta T) / \tau_{\text{и}} \right] \cos(\omega_{\text{п}} \tau).$$

Тогда выражение (5) для корреляционной функции пассивной помехи при движении цели запишется следующим образом:

$$B(nT + \tau) = \sigma^2 r_{\text{м}}(nT) \times \left[1 - (\tau + n\Delta T) / \tau_{\text{и}} \right] \cos(\omega_{\text{п}} \tau). \quad (8)$$

Из соотношения (8) при $\tau = 0$ найдем корреляционную функцию межпериодных флуктуаций пассивной помехи при движении цели

$$B(nT) = \sigma^2 r_{\text{м}}(nT) (1 - n\Delta T / \tau_{\text{и}})$$

или с учетом формулы (7)

$$B(nT) = \sigma^2 r_{\text{м}}(nT) \left[1 - 2nv_{\text{р}}T / (c\tau_{\text{и}}) \right]. \quad (9)$$

Выражение (9) показывает, что корреляционная функция межпериодных флуктуаций пассивной помехи при движении цели зависит как от скорости движения цели, так и от длительности зондирующего импульса. С уменьшением длительности зондирующего импульса или с ростом скорости движения цели декорреляция пассивной помехи возрастает, что, несомненно, отражается на работе системы СДЦ.

Из соотношения (9) получим выражение для коэффициента корреляции пассивной помехи с учетом движения цели

$$r(nT) = r_{\text{м}}(nT) \left[1 - 2nv_{\text{р}}T / (c\tau_{\text{и}}) \right]. \quad (10)$$

Для конкретизации полученных результатов примем гауссовскую аппроксимацию коэффициента корреляции межпериодных флуктуаций пассивной помехи без учета движения цели [2, 3, 5]:

$$r_{\text{м}}(nT) = \exp \left[-(\Delta\omega_{\text{п}} nT)^2 / 2 \right],$$

где $\Delta\omega_{\text{п}} = 2\pi\Delta f_{\text{п}}$, причем $\Delta f_{\text{п}}$ – ширина энергетического спектра межпериодных флуктуаций пассивной помехи.

На рис. 4 представлены результаты расчетов коэффициента корреляции межпериодных флуктуаций пассивной помехи (10) при дви-

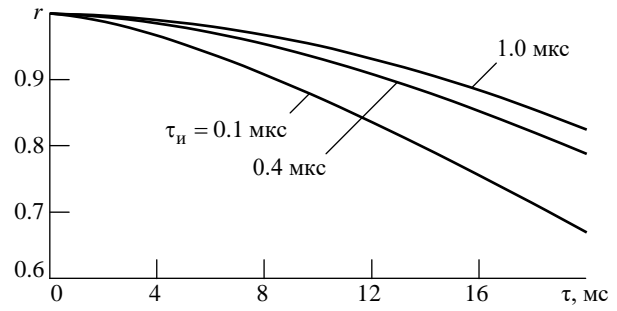


Рис. 4. Коэффициент межпериодной корреляции флуктуаций пассивной помехи с учетом движения цели

Fig. 4. Inter-period correlation coefficient of passive interference fluctuations taking into account target movement

жении цели для трех значений длительности зондирующего импульса $\tau_{\text{и}} = 1, 0.4$ и 0.1 мкс при ширине энергетического спектра пассивной помехи $\Delta f_{\text{п}} = 5$ Гц, скорости движения цели $v_{\text{р}} = 500$ км/ч и периоде следования зондирующих импульсов $T = 1$ мс и $\tau = nT$.

Полученные расчетные данные свидетельствуют о существенном влиянии длительности зондирующего импульса на коэффициент межпериодных флуктуаций пассивной помехи. Для подавления пассивных помех и выделения на их фоне полезного сигнала в настоящей статье рассмотрено использование устройства СДЦ в виде схемы однократного череспериодного вычитания, выходной сигнал которой записывается как [3, 8]:

$$u_{\text{вых}}(t) = u_{\text{вх}}(t) - u_{\text{вх}}(t - T),$$

где $u_{\text{вх}}$ – входной сигнал.

При этом дисперсия выходного сигнала системы СДЦ определяется выражением [10–16]

$$\sigma_{\text{вых}}^2 = 2\sigma_{\text{вх}}^2 [1 - r(T)], \quad (11)$$

где $\sigma_{\text{вх}}^2$ – дисперсия входного сигнала.

После подстановки (10) в (11) при $n = 1$ получим

$$\sigma_{\text{вых}}^2 = 2\sigma_{\text{вх}}^2 \left\{ 1 - r_{\text{м}}(T) \left[1 - 2v_{\text{р}}T / (c\tau_{\text{и}}) \right] \right\}.$$

С учетом слабой взаимной статистической зависимости сигналов пассивной помехи в пределах следящих полустробиов дисперсия выходного сигнала дискриминатора дальности принимает вид $\sigma_{\text{д.д}}^2 = 2\sigma_{\text{вых}}^2$.

Коэффициент подавления пассивной помехи системой СДЦ можно определить выражением

$$K = 2\sigma_{\text{вх}}^2 / \sigma_{\text{вых}}^2 = 1 / \left\{ 1 - r_M(T) \left[1 - 2v_p T / (c\tau_{\text{и}}) \right] \right\}.$$

На рис. 5 представлены результаты расчетов зависимости коэффициента подавления пассивной помехи от длительности зондирующего импульса для четырех значений скорости движения цели (полустрелов):

$$v_p = 50 \text{ км/ч} \quad (\Delta T = 0.93 \cdot 10^{-4} \text{ мкс});$$

$$v_p = 350 \text{ км/ч} \quad (\Delta T = 6.51 \cdot 10^{-4} \text{ мкс});$$

$$v_p = 850 \text{ км/ч} \quad (\Delta T = 15.81 \cdot 10^{-4} \text{ мкс});$$

$$v_p = 5000 \text{ км/ч} \quad (\Delta T = 93 \cdot 10^{-4} \text{ мкс})$$

при следующих исходных данных: период следования зондирующих импульсов $T = 1 \text{ мс}$, ширина энергетического спектра пассивной помехи $\Delta f = 10 \text{ Гц}$.

Представленные на рис. 5 зависимости свидетельствуют о существенном влиянии длительности зондирующего импульса и скорости движения цели на коэффициент подавления пассивной помехи и, следовательно, на уровень помехового сигнала на выходе дискриминатора дальности системы АСД с устройством СДЦ.

Обсуждение результатов. Представленные в настоящей статье расчетные данные показывают, что в системе АСД, работающей как в режиме поиска, так и в режиме автосопровождения, с уменьшением длительности зондирующего импульса и с ростом скорости движения цели (следающих полустрелов в пределах радиолокационного периода) происходит существенное уменьшение коэффициента корреляции межпериодных флюктуаций пассивной помехи. Так, при значении интервала времени $\tau = 0.02 \text{ с}$, скорости движения цели $v_p = 500 \text{ км/ч}$ и изменении длительности зондирующего импульса с

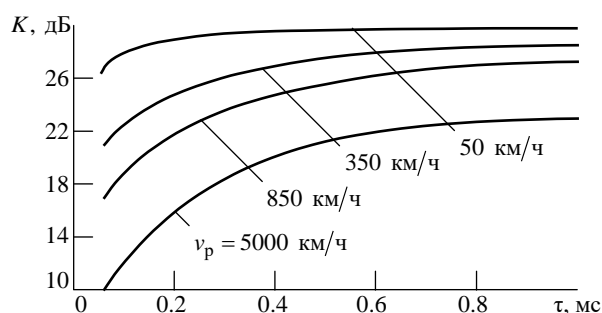


Рис. 5. Коэффициент подавления пассивной помехи

Fig. 5. Passive interference suppression ratio

1 до 0.1 мкс коэффициент корреляции межпериодных флюктуаций пассивной помехи $r_M(nT)$ уменьшается с 0.83 до 0.67, что приводит к уменьшению коэффициента подавления пассивной помехи системой СДЦ в составе дискриминатора дальности. Например, при длительности зондирующего импульса $\tau_{\text{и}} = 0.45 \text{ мкс}$ рост скорости движения цели с 50 до 5000 км/ч обуславливает уменьшение коэффициента подавления пассивной помехи с 30 до 20 дБ.

Заключение. При поиске и автосопровождении движущейся цели помехозащищенной системой АСД наблюдается декорреляция пассивной помехи (отражений от земной поверхности) в следающих полустрелов, степень которой зависит не только от скорости движения цели, но и от длительности используемых зондирующих импульсов. Декорреляция пассивной помехи снижает коэффициент ее подавления системой СДЦ в составе дискриминатора дальности и ухудшает характеристики системы АСД. При создании помехозащищенных систем АСД импульсных РЛС с СДЦ, работающих в режиме большой скважности, необходимо учитывать влияние длительности зондирующих импульсов на работу системы СДЦ и в целом на систему АСД. Полученные в статье результаты будут полезны разработчикам различных средств измерения параметров движущихся целей в условиях воздействия интенсивных коррелированных помех.

Список литературы

1. Ботов М. И., Вяхирев В. А., Девотчак В. В. Введение в теорию радиолокационных систем. Красноярск: Изд-во Сиб. федер. ун-та, 2012. 394 с.
2. Филиппов Б. И. Радиотехнические системы. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. 386 с.

3. Бакулев П. А., Стенин В. М. Методы и устройства селекции движущихся целей. М.: Радио и связь, 1986. 286 с.
4. Радиотехнические системы / Ю. М. Казаринов, Ю. А. Коломенский, В. М. Кутузов, В. В. Леонтьев. М.: Академия, 2008. 592 с.

5. Справочник по радиолокации: в 2 кн. / под ред. М. И. Скольника. М.: Техносфера, 2015. Кн. 1. 680 с.
6. Попов Д. И. Автокомпенсация доплеровской фазы пассивных помех // Цифровая обработка сигналов. 2009. № 2. С. 30–33.
7. Попов Д. И. Адаптивное подавление пассивных помех // Цифровая обработка сигналов. 2014. № 4. С. 32–37.
8. Котоусов А. С., Морозов А. К. Оптимальная фильтрация и компенсация помех. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. 166 с.
9. Попов Д. И. Адаптация нерекурсивных режекторных фильтров // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2009. Т. 52, № 4. С. 46–55.
10. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. М.: Радиотехника, 2004. 319 с.
11. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория: справ. / под ред. Я. Д. Ширмана. 2-е изд. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
12. Зиятдинов С. И. Влияние рассогласования параметров квадратурных каналов на работу адаптивной системы селекции движущихся целей // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 3. С. 25–31. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-3-25-31
13. Зиятдинов С. И., Осипов Л. А. Подавление коррелированных помех адаптивными режекторными фильтрами при модуляции периода повторения импульсов // Информационно-управляющие системы. 2021. № 3. С. 53–60. doi: 10.31799/1684-8853-2021-3-53-60
14. Richard M. A., Scheer J. A., Holm W. A. Principles of Modern Radar: Basic Principles. New York: SciTech Publishing, IET, Edison, 2010. 924 p.
15. Melvin W. L., Scheer J. A. Principles of Modern Radar: Advanced Techniques. New York: SciTech Publishing, IET, Edison, 2013. 846 p.
16. Левин Б. Р. Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио, 1969. 701 с.

Информация об авторах

Зиятдинов Сергей Ильич – доктор технических наук (2005), профессор (2008) кафедры информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов: обработка сигналов в радиосистемах.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Большая Морская, д. 67 А, Санкт-Петербург, 190000, Россия

E-mail: ziat.53@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8109-5456>

Красильникова Ольга Ивановна – кандидат технических наук (2000), доцент (2002) кафедры информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор 72 научных работ. Сфера научных интересов: цифровая обработка изображений.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Большая Морская, д. 67 А, Санкт-Петербург, 190000, Россия

E-mail: oikrasilnikova@yandex.ru

References

1. Botov M. I., Vyakhirev V. A., Devotchak V. V. *Vvedenie v teoriyu radiolokatsionny system* [Introduction to the Theory of Radar Systems]. Krasnoyarsk, Sib. Federal University, 2012, 394 p. (In Russ.)
2. Filippov B. I. *Radiotekhnicheskie sistemy* [Radio Engineering Systems]. Novosibirsk, Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2015, 386 p. (In Russ.)
3. Bakulev P. A., Stenin V. M. *Metody i ustroystvaselektii dvizhushchikhsy at selei* [Methods and Devices for Selecting Moving Targets]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1986, 286 p. (In Russ.)
4. Kazarinov Yu. M., Kolominskii Yu. A., Kutuzov V. M., Leont'ev V. V. *Radiotekhnicheskie sistemy* [Radio Engineering Systems]. Moscow, *Akademiya*, 2008, 592 p. (In Russ.)
5. *Spravochnik po radiolokatsii. V 2 kn. Kn.1. Pod red. M. I. Skolnika.* [Handbook of Radar: in 2 Books. Book 1 / edited by M. I. Skolnik]. Moscow, *Tekhnosfera*, 2015, 680 p. (In Russ.)
6. Popov D. I. Automatic Compensation of Doppler Phase of Passive Interference]. *Digital Signal Processing*. 2009, no. 2, pp. 30–33. (In Russ.)
7. Popov D. I. Adaptive Suppression of Passive Interference. *Digital Signal Processing*. 2014, no. 4, pp. 32–37. (In Russ.)
8. Kotousov A. S., Morozov A. K. *Optimal'naya fil'tratsiya i kompensatsiya pomekh* [Optimal Filtering and Compensation of Interference]. Moscow, *Goryachaya Liniya-Telecom*, 2008, 166 p. (In Russ.)
9. Popov D. I. An Adaptation of Nonrecursive Rejectors. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2009, vol. 52, no. 4, pp. 46–55. (In Russ.)
10. Bakulev P. A. *Radiolokatsionnye sistemy* [Radar Systems]. Moscow, *Radiotekhnika*, 2004, 319 p. (In Russ.)
11. *Radioelektronnye sistemy. Osnovy postroeniya i teoriya: sprav. 2-e izd. Pod red. Ya. D. Shirmana* [Radioelectronic Systems. Basics of Construction and Theory: Reference. 2nd ed. Ed. by Ya. D. Shirman]. Moscow, *Radiotekhnika*, 2007, 512 p. (In Russ.)
12. Ziatdinov S. I. Influence of Mismatch of Parameters of Quadrature Channels on the Work of the Adaptive Selection System for Moving Targets. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2020, vol. 23, no. 3, pp. 25–31. (In Russ.) doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-3-25-31

13. Ziatdinov S. I., Osipov L. A. Suppression of Correlated Interference by Adaptive Notch Filters Under Pulse Repetition Period Modulation. *Information and Control Systems*. 2021, no. 3, pp. 53–60. (In Russ.) doi: 10.31799/1684-8853-2021-3-53-60

14. Richard M. A., Scheer J. A., Holm W. A. Principles of Modern Radar: Basic Principles. New York, SciTech Publishing. IET. Edison, 2010, 924 p.

15. Melvin W. L., Scheer J. A. Principles of Modern Radar: Advanced Techniques. New York, SciTech Publishing. IET. Edison, 2013, 846 p.

16. Levin B. R. *Statisticheskaya radiotekhnika* [Statistical Radio Engineering]. Moscow, Sovetskoe radio, 1969, 701 p. (In Russ.)

Information about the authors

Sergei I. Ziatdinov, Dr Sci. (2005), Professor (2008), Professor of the Department of Information Systems and Technologies of Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: signal processing in radio systems.

Address: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67 A, Bolshaya Morskaya St., St Petersburg 190000, Russia

E-mail: ziat.53@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8109-5456>

Olga I. Krasilnikova, Cand. Sci. (2001), Associate Professor (2002) of the Department of Information Systems and Technologies of Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. The author of 72 scientific publications. Area of expertise: digital image processing.

Address: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67 A, Bolshaya Morskaya St., St Petersburg 190000, Russia

E-mail: oikrasilnikova@yandex.ru
