

Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов

УДК 621.396:681.323

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-3-25-31>

Влияние рассогласования параметров квадратурных каналов на работу адаптивной системы селекции движущихся целей

С. И. Зиатдинов✉

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

✉ kaf53@guar.ru

Аннотация

Введение. Рассмотрена работа адаптивной системы селекции движущихся целей, представленной однократным череспериодным вычитающим устройством. Система селекции движущихся целей выполнена в виде двух квадратурных каналов, в которых высокочастотные входные радиосигналы преобразуются на видеочастоту.

Цель работы. Исследование работы системы селекции движущихся целей в условиях амплитудных и фазовых рассогласований квадратурных каналов.

Материалы и методы. Использован метод комплексной переменной, при котором входной и выходной сигналы адаптивной системы селекции движущихся целей представляются в виде пары комплексносопряженных составляющих.

Результаты. Получено выражение для частотной передаточной функции адаптивной системы подавления пассивных помех с перестраиваемой зоной режекции относительно средней частоты спектра помеховых сигналов. Исследовано влияние практически неизбежных амплитудных и фазовых рассогласований характеристик квадратурных каналов. Получены выражения для дисперсии выходных помеховых сигналов рассмотренной системы селекции движущихся целей при амплитудном и фазовом рассогласовании квадратурных каналов. Представлены аналитические соотношения для коэффициентов подавления пассивных помех. Рассчитаны и построены зависимости коэффициентов подавления помеховых сигналов в зависимости от величины отклонения коэффициентов передачи квадратурных каналов и фазового рассогласования опорных напряжений для различных значений средней частоты спектра пассивных помех.

Заключение. Показана существенная зависимость коэффициента подавления помеховых сигналов от их средней частоты, а также амплитудных и фазовых рассогласований квадратурных каналов. Предложенная методика исследований позволяет оценить влияние рассогласования квадратурных каналов на работу системы селекции движущихся целей, использующей режекторные фильтры высоких порядков.

Ключевые слова: адаптивная система, ошибки настройки, пассивная помеха, коэффициент подавления

Для цитирования: Зиатдинов 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

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 13.02.2020; принята к публикации после рецензирования 23.04.2020; опубликована онлайн 29.06.2020



Influence of Mismatch of Parameters of Quadrature Channels on the Work of the Adaptive Selection System for Moving Targets

Sergey I. Ziatdinov✉

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia

✉ kaf53@guap.ru

Abstract

Introduction. The paper considers the operation of an adaptive selection system for moving targets, represented by a one-time multi-period subtractor. The system of selection of moving targets is made in the form of two quadrature channels, in which high-frequency input radio signals are converted to video frequency. Goal. Investigation of the system of selection of moving targets in the conditions of amplitude and phase misalignment of quadrature channels.

Aim. The study of the operation of the moving targets selection system in the conditions of amplitude and phase mismatches of quadrature channels.

Materials and methods. The method of complex variable is used, in which the input and output signals of the adaptive selection system for moving targets are represented as a pair of complex-conjugate components.

Results. An expression is obtained for the frequency transfer function of an adaptive passive noise suppression system with a variable cut-off zone relative to the average frequency of the spectrum of interference signals. The influence of almost unavoidable amplitude and phase mismatches in the characteristics of quadrature channels is studied. Expressions are obtained for the dispersion of output noise signals of the considered system of moving targets with amplitude and phase misalignment of quadrature channels. Analytical relations for the coefficients of passive interference suppression are presented. The dependences of the jamming signal suppression coefficients were calculated and constructed depending on the deviation of the transmission coefficients of quadrature channels and the phase misalignment of the reference voltages for different values of the average frequency of the passive noise spectrum.

Conclusion. The essential dependence of the jamming signal suppression coefficient on their average frequency, as well as amplitude and phase misalignments of quadrature channels is shown. The proposed research method allows us to evaluate the effect of misalignment of quadrature channels on the operation of a moving target selection system using high-order cutting filters.

Keywords: adaptive system, tuning errors, passive interference, suppression coefficient

For citation: Ziatdinov S. I. Influence of Mismatch of Parameters of Quadrature Channels on the Work of the Adaptive Selection System for Moving Targets. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 3, pp. 25–31. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-3-25–31

Conflict of interest. Author declares no conflict of interest.

Submitted 13.02.2020; accepted 23.04.2020; published online 29.06.2020

Введение. При разработке защищенных от пассивных помех систем обнаружения и измерения параметров сигналов, систем автоматического сопровождения по дальности, угловым координатам и скорости используются системы селекции движущихся целей (СДЦ) [1]. Системы СДЦ в большинстве практических случаев строятся по когерентному принципу в виде двух квадратурных каналов со сдвинутыми по фазе на 90° опорными напряжениями [2–4]. Для подавления пассивных помех от движущихся объектов, например таких,

как сигналы от метеообразований, или, в случае установки когерентной радиолокационной станции на борту носителя, для подавления отражений от подстилающей поверхности используются адаптивные системы СДЦ. Их частотные характеристики изменяются в зависимости от частоты пассивных помех [4–7].

Постановка задачи. Существующий анализ работы когерентных адаптивных систем СДЦ базируется на использовании идентичных квадратурных каналов, в которых высокочастотные сиг-

налы переносятся на видеочастоту. На практике реализовать абсолютно одинаковые квадратурные каналы когерентной адаптивной системы СДЦ не представляется возможным. Квадратурные каналы могут иметь различные коэффициенты передачи, а используемые для переноса принимаемых высокочастотных сигналов с радиочастоты на видеочастоту опорные напряжения могут иметь фазовый сдвиг, отличный от 90° . Иными словами, в реальных системах СДЦ присутствуют амплитудные и фазовые рассогласования квадратурных каналов, что неизбежно приводит к снижению коэффициента подавления пассивных помех. Исследованию влияния рассогласования параметров квадратурных каналов когерентной адаптивной системы СДЦ на коэффициент подавления пассивных помех посвящена настоящая статья.

Частотная характеристика когерентной адаптивной системы СДЦ. На рис. 1 приведена структурная схема адаптивной когерентной системы СДЦ в виде однократного череспериодного вычитающего устройства [8–10], где $z_{\text{вх}}(t)$, $z_{\text{вых}}(t)$ – комплексные входной и выходной сигналы соответственно; ЛЗ – линия задержки на время T ; ω_0 – центральная частота зоны режекции комплексного фильтра системы СДЦ. В импульсных системах период устанавливается равным T .

В рассматриваемой системе с помощью комплексного множителя $e^{j\omega_0 T}$ осуществляется дополнительный поворот фазы задержанного комплексного входного сигнала на величину $\omega_0 T$. Частотная характеристика рассматриваемой системы СДЦ определяется соотношением

$$W(j\omega) = 1 - e^{-j(\omega - \omega_0)T} = 1 - \cos[(\omega - \omega_0)T] + j \sin[(\omega - \omega_0)T]. \quad (1)$$

Ее амплитудно-частотная характеристика имеет вид

$$W(\omega) = \sqrt{\{1 - \cos[(\omega - \omega_0)T]\}^2 + \{\sin[(\omega - \omega_0)T]\}^2}.$$

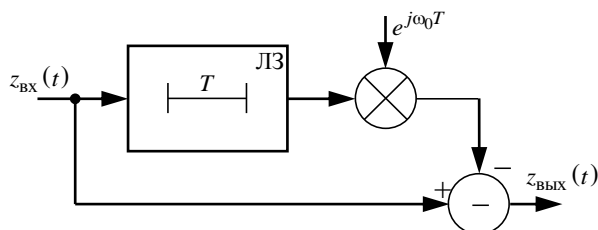


Рис. 1. Адаптивная система СДЦ

Fig. 1. Adaptive system of the selection of the moving target

В результате преобразований (1) получим:

$$W(\omega) = 2 \left| \sin \left(\frac{\omega - \omega_0}{2} T \right) \right|. \quad (2)$$

Из (2) следует, что, изменяя частоту ω_0 , можно смещать зону режекции системы СДЦ по частоте, совмещая ее со спектром пассивной помехи.

Влияние отклонения коэффициентов передачи квадратурных каналов на коэффициент подавления пассивных помех. Для рассматриваемой модели выходные комплексно-сопряженные помеховые сигналы квадратурных каналов запишем в виде [11, 12]

$$u_x(t) = U(t) \cos[\omega_{\text{п}} t + \varphi_0(t)] = U(t) \cos \varphi(t);$$

$$u_y(t) = kU(t) \sin[\omega_{\text{п}} t + \varphi_0(t)] = kU(t) \sin \varphi(t),$$

где $U(t)$, $\varphi_0(t)$ – флуктуирующие амплитуда и начальная фаза квадратурных помеховых сигналов; $\omega_{\text{п}}$ – средняя частота; $\varphi(t) = \omega_{\text{п}} t + \varphi_0(t)$; $k = 1 + \Delta k$ (Δk – амплитудное рассогласование каналов).

Найдем корреляционную функцию комплексного сигнала $z(t) = u_x(t) + ju_y(t)$ [12]:

$$B_z(\tau) = \overline{z(t) z^*(t - \tau)}. \quad (3)$$

Здесь

$$z(t) = U(t) \cos \varphi(t) + jkU(t) \sin \varphi(t);$$

$$z^*(t - \tau) = [U(t - \tau) \cos \varphi(t - \tau) - jkU(t - \tau) \sin \varphi(t - \tau)],$$

где символ "*" означает комплексную сопряженность, черта сверху – статистическое усреднение.

После подстановки в (3) величины $k = 1 + \Delta k$ и проведения громоздких преобразований получим:

$$B_z(\tau) = 2\Delta k^2 B_{\text{вещ}}(\tau) + 2(1 + \Delta k) B_{\text{ком}}(\tau), \quad (4)$$

где

$$B_{\text{вещ}}(\tau) = \overline{U(t)U(t - \tau) \cos \varphi(t) \cos \varphi(t - \tau)} = \overline{U(t)U(t - \tau) \sin \varphi(t) \sin \varphi(t - \tau)} = \sigma^2 r(\tau) \cos(\omega_{\text{п}} \tau); \quad (5)$$

$$B_{\text{ком}}(\tau) = \sigma^2 r(\tau) [\cos(\omega_{\text{п}} \tau) + j \sin(\omega_{\text{п}} \tau)] \quad (6)$$

– корреляционные функции помехового сигнала, где σ^2 , $r(\tau)$ – дисперсия и огибающая коэффициента корреляции помехового сигнала соответственно.

С учетом (1) комплексный выходной сигнал рассматриваемой системы СДЦ можно записать следующим образом:

$$z_{\text{ВЫХ}}(t) = z_{\text{ВХ}}(t) - z_{\text{ВХ}}(t-T)e^{j\omega_0 T}.$$

Тогда корреляционная функция сигнала на выходе системы СДЦ будет равна

$$B_{\text{ВЫХ}}(\tau) = \overline{z_{\text{ВЫХ}}(t)z_{\text{ВЫХ}}^*(t-\tau-T)}, \quad (7)$$

где

$$z_{\text{ВЫХ}}(t) = z_{\text{ВХ}}(t) - z_{\text{ВХ}}(t-T)e^{j\omega_0 T};$$

$$z_{\text{ВЫХ}}^*(t-\tau-T) = z_{\text{ВХ}}^*(t-\tau) - z_{\text{ВХ}}^*(t-\tau-T)e^{-j\omega_0 T}.$$

После несложных преобразований (7) принимает вид

$$B_{\text{ВЫХ}}(\tau) = 2B_z(\tau) - B_z(\tau-T)e^{j\omega_0 T} - B_z(T+\tau)e^{-j\omega_0 T}. \quad (8)$$

Положив в (8) $\tau = 0$, найдем дисперсию выходного сигнала системы СДЦ:

$$\sigma_{\text{ВЫХ}}^2 = 2B_z(0) - B_z(-T)e^{j\omega_0 T} - B_z(T)e^{-j\omega_0 T}. \quad (9)$$

Подставив (4) в (9), с учетом (5), (6) после громоздких выкладок получим:

$$\sigma_{\text{ВЫХ}}^2 = 4\sigma^2 \left(\Delta k^2 \{1 - 0.5r(T)\} \times \right. \\ \left. \times [\cos(\omega_{\text{П}} + \omega_0)T + \cos(\omega_{\text{П}} - \omega_0)T] \right) + \\ + (1 + \Delta k) [1 - r(T)\cos(\omega_{\text{П}} - \omega_0)T].$$

Из полученного выражения следует, что появление амплитудного рассогласования квадратурных каналов приводит к уменьшению подавления пассивной помехи. Коэффициент подавления пассивной помехи определим следующим образом:

$$K_{\text{ПОД}} = \frac{4\sigma^2}{\sigma_{\text{ВЫХ}}^2} = \left(\Delta k^2 \{1 - 0.5r(T)\} \times \right. \\ \left. \times [\cos(\omega_{\text{П}} + \omega_0)T + \cos(\omega_{\text{П}} - \omega_0)T] \right) + \\ + (1 + \Delta k) [1 - r(T)\cos(\omega_{\text{П}} - \omega_0)T]^{-1}.$$

Для конкретизации результатов воспользуемся гауссовой моделью корреляционной функции пассивной помехи [13–15]:

$$B_{\text{Вещ}}(\tau) = \sigma^2 e^{-0.5\Delta\omega_{\text{П}}^2 \tau^2} \cos(\omega_{\text{П}}\tau),$$

где $\Delta\omega_{\text{П}}$ – ширина спектра помехового сигнала.

На рис. 2 представлены зависимости коэффициента подавления пассивной помехи от величины амплитудного рассогласования квадратурных каналов (Δk) адаптивной системы СДЦ для различных значений средней частоты спектра пассивной помехи ($f_{\text{П}}$). При расчетах полагалось, что зона режекции системы СДЦ точно настроена на среднюю частоту спектра пассивной помехи $\omega_0 = \omega_{\text{П}}$; ширина спектра пассивной помехи $\Delta f_{\text{П}} = \Delta\omega_{\text{П}}/(2\pi) = 2$ Гц; период появления помехи $T = 1/F_{\text{П}}$, а частота ее появления $F_{\text{П}} = 1200$ Гц.

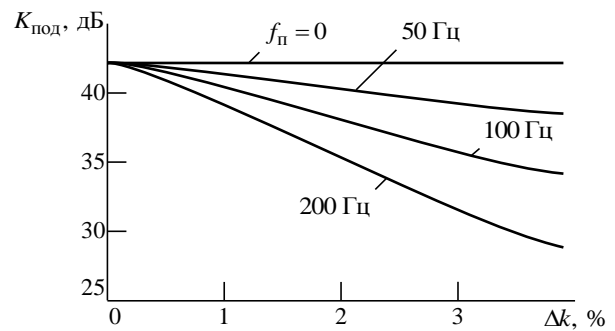


Рис. 2. Подавление пассивной помехи при амплитудном рассогласовании квадратурных каналов

Fig. 2. Suppression of passive interference with amplitude mismatch of quadrature channels

Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии амплитудного рассогласования квадратурных каналов на коэффициент подавления помехового сигнала.

Влияние фазового рассогласования опорных напряжений квадратурных каналов на коэффициент подавления пассивных помех. Аналогично ранее рассмотренному случаю запишем выражения для комплексно-сопряженных составляющих помехового сигнала на выходе квадратурных каналов при фазовом рассогласовании $\Delta\varphi$ их опорных напряжений:

$$u_x(t) = U(t)\cos[\omega_{\text{П}}t + \varphi_0(t)] = U(t)\cos\varphi(t); \quad (10)$$

$$u_y(t) = U(t)\sin[\omega_{\text{П}}t + \varphi_0(t) + \Delta\varphi] = U(t)\sin[\varphi(t) + \Delta\varphi]. \quad (11)$$

Воспользуемся тригонометрическим соотношением $\sin(\alpha + \beta) = \sin\alpha\cos\beta + \cos\alpha\sin\beta$. Тогда выражения (10), (11) приводятся к виду

$$u_x(t) = U(t)\cos\varphi(t); \quad (12)$$

$$u_y(t) = U(t)[\sin\varphi(t)\cos\Delta\varphi + \cos\varphi(t)\sin\Delta\varphi]. \quad (13)$$

На практике фазовое рассогласование не превышает единиц градусов. В этих условиях прием допущения $\cos \Delta\varphi \approx 1$; $\sin \Delta\varphi \approx \Delta\varphi$. С учетом данных соотношений выражения (12) и (13) принимают вид

$$u_x(t) = U(t) \cos \varphi(t);$$

$$u_y(t) = U(t) [\sin \varphi(t) + \Delta\varphi \cos \varphi(t)].$$

Найдем корреляционную функцию комплексного сигнала $z(t) = u_x(t) + ju_y(t)$:

$$B_z(\tau) = \overline{z(t)z^*(t-\tau)}, \quad (14)$$

где

$$z(t) = U(t) \cos \varphi(t) + jU(t) [\sin \varphi(t) + \Delta\varphi \cos \varphi(t)];$$

$$z^*(t-\tau) = U(t-\tau) \cos \varphi(t-\tau) - jU(t-\tau) [\sin \varphi(t-\tau) + \Delta\varphi \cos \varphi(t-\tau)].$$

Соотношение (14) после громоздких преобразований в сжатой форме можно записать в виде

$$B_z(\tau) = \Delta\varphi^2 B_{\text{вещ}}(\tau) + 2B_{\text{ком}}(\tau), \quad (15)$$

где, как и ранее, $B_{\text{вещ}}(\tau)$ и $B_{\text{ком}}(\tau)$ определяются (5) и (6) соответственно.

Используя (5), (6), (9), (15), после необходимых преобразований получим соотношение для дисперсии выходного помехового сигнала системы СДЦ:

$$\sigma_{\text{ВЫХ}}^2 = 2B_z(0) - B_z(-T)e^{j\omega_0 T} - B_z(T)e^{-j\omega_0 T} =$$

$$= 2\Delta\varphi^2 \sigma^2 \times$$

$$\times \{1 - 0.5r(T) [\cos(\omega_{\text{п}} + \omega_0)T + \cos(\omega_{\text{п}} - \omega_0)T]\} +$$

$$+ 4\sigma^2 [1 - r(T) \cos(\omega_{\text{п}} - \omega_0)T].$$

В итоге коэффициент подавления пассивной помехи составит

$$K_{\text{под}} = \frac{4\sigma^2}{\sigma_{\text{ВЫХ}}^2} = (0.5\Delta\varphi^2 \sigma^2 \{1 - 0.5r(T) \times$$

$$\times [\cos(\omega_{\text{п}} + \omega_0)T + \cos(\omega_{\text{п}} - \omega_0)T]\} -$$

$$- \sigma^2 [1 - r(T) \cos(\omega_{\text{п}} - \omega_0)T])^{-1}.$$

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента подавления пассивной помехи от величины фазового рассогласования квадратурных каналов ($\Delta\varphi$) рассматриваемой адаптивной системы

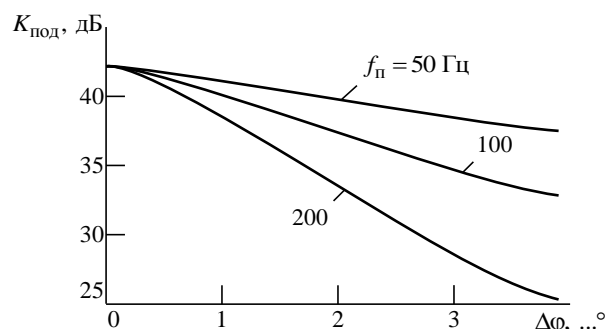


Рис. 3. Подавление пассивной помехи при фазовом рассогласовании квадратурных каналов

Fig. 3. Suppression of passive interference with phase mismatch of quadrature channels

СДЦ для различных значений средней частоты спектра пассивной помехи. Расчеты проведены при тех же условиях, которые использованы при построении рис. 2.

Обсуждение результатов. Амплитудное и фазовое рассогласования квадратурных каналов адаптивной СДЦ оказывают существенное влияние на коэффициент подавления пассивной помехи. В случае отклонения коэффициентов передачи (Δk) на 1 % и изменении средней частоты пассивной помехи в пределах 0...200 Гц коэффициент подавления пассивной помехи уменьшается с 42 до 37 дБ. При $\Delta k = 4\%$ коэффициент подавления падает с 42 до 29 дБ.

Фазовое рассогласование опорных напряжений ($\Delta\varphi$) на 1° и изменение средней частоты пассивной помехи в пределах 0...200 Гц приводят к уменьшению коэффициента подавления пассивной помехи с 42 до 37 дБ. При $\Delta\varphi = 4^\circ$ коэффициент подавления падает с 42 до 25 дБ.

Заключение. К качеству настройки квадратурных каналов адаптивной системы СДЦ предъявляются жесткие требования. Наличие амплитудных и фазовых отклонений характеристик квадратурных каналов приводит к достаточно существенному уменьшению коэффициента подавления пассивных помех. Так, при отличии коэффициентов передачи квадратурных каналов на 4 % изменение средней частоты пассивной помехи с 0 до 200 Гц приводит к уменьшению коэффициента подавления на 13 дБ. При фазовом отклонении опорных напряжений на 4° коэффициент подавления пассивной помехи уменьшается на 17 дБ.

Представленные в настоящей статье материалы могут служить рекомендациями по настройке квадратурных каналов адаптивной системы СДЦ.

Список литературы

1. Фельдман Ю. И., Гидаспов Ю. Б., Гомзин В. Н. Сопровождение движущихся целей. М.: Сов. радио, 1978. 287 с.
2. Бакулев П. А., Стенин В. М. Методы и устройства селекции движущихся целей. М.: Радио и связь, 1986. 288 с.
3. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.
4. Попов Д. И. Автокомпенсация доплеровской фазы пассивных помех // Цифровая обработка сигналов. 2009. № 2. С. 30–33.
5. Малинкин В. Б. Адаптивные фильтры в телекоммуникационных системах. Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2005. 223 с.
6. Котоусов А. С., Морозов А. К. Оптимальная фильтрация и компенсация помех. М.: Горячая линия–Телеком, 2008. 166 с.
7. Методы улучшения различимости объектов при наличии гидрометеоров / А. В. Кокошкин, В. А. Коротков, К. В. Коротков, Е. П. Новичихин // Журн. радиоэлектроники [электрон. журн.]. 2015. № 10. С. 1–14.
8. Попов Д. И. Адаптивное подавление пассивных помех // Цифровая обработка сигналов. 2014. № 4. С. 32–37.
9. Попов Д. И. Автокомпенсация доплеровской фазы пассивных помех // Цифровая обработка сигналов. 2009. № 2. С. 30–33.
10. Зиатдинов С. И., Соколова Ю. В. Синтез комплексных дискретных фильтров // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 4. С. 12–19.
11. Зиатдинов С. И., Соколова Ю. В. Синтез комплексных дискретных фильтров на основе переходных характеристик // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 7. С. 641–647. doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-7-641-646
12. Зиатдинов С. И., Осипов Л. А., Соколова Ю. В. Синтез комплексных дискретных фильтров методом инвариантных дифференциальных уравнений // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 4. С. 317–322. doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-4-317-322
13. Микропроцессорные системы автоматического управления / В. А. Бесекерский, Н. Б. Ефимов, С. И. Зиатдинов, В. В. Изранцев, А. В. Небылов, Н. Г. Соколов, Е. А. Фабрикант; под общ. ред. В. А. Бесекерского. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. 365 с.
14. Попов Д. И. Оценивание параметров пассивных помех // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2013. Т. 56, № 4. С. 39–47.
15. Попов Д. И. Оценивание корреляционных параметров пассивных помех // Радиопромышленность. 2017. Т. 27, № 1. С. 57–62. doi: 10.21778/2413-9599-2017-1-57-62

Информация об авторе

Зиатдинов Сергей Ильич – доктор технических наук (2005), профессор (2008) кафедры информационно-сетевых технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – обработка сигналов в радиотехнических системах.

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

E-mail: kaf53@guap.ru

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

References

1. Fel'dman Yu. I., Gidasov Yu. B., Gomzin V. N. *Soprovozhdenie dvizhushchikhsya tselei* [Tracking Moving Targets]. Moscow, *Sov. radio*, 1978, 287 p. (In Russ.)
2. Bakulev P. A., Stenin V. M. *Metody i ustroystva seleksii dvizhushchikhsya tselei* [Methods and Devices for Moving Targets Selection]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1986, 288 p. (In Russ.)
3. Shirman Ya. D., Manzhos V. N. *Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokatsionnoi informatsii na fone pomekh* [Theory and Technique of Processing Radar Information on the Background of Interference]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1981, 416 p. (In Russ.)
4. Popov D. I. Auto Doppler Passive Interference. Digital Signal Processing. 2009, no. 2, pp. 30–33. (In Russ.)
5. Malinkin V. B. *Adaptivnyye fil'try v telekommunikatsionnykh sistemakh* [Adaptive Filters in Telecommunication Systems]. Novosibirsk, *SibGUTI*, 2005, 223 p. (In Russ.)
6. Kotousov A. S., Morozov A. K. *Optimal'naya fil'tratsiya i kompensatsiya pomekh* [Optimal Filtering and Interference Compensation]. Moscow, *Goryachaya liniya–Telekom*, 2008, 166 p. (In Russ.)
7. Kokoshkin A. V., Korotkov V. A., Korotkov K. V., Novichikhin E. P. Methods of Improving of Objects Distinguishability in the Presence of Hydrometeors. J. of Radioelectronics. 2015, no. 10, 14 p. (In Russ.)
8. Popov D. I. Adaptive Passive Noise Reduction. Digital Signal Processing. 2014, no. 4, pp. 32–37. (In Russ.)

9. Popov D. I. Auto Doppler Passive Interference. Digital Signal Processing. 2009, no. 2, pp. 30–33. (In Russ.)
10. Ziatdinov S. I., Sokolova Yu. V. Synthesis of Complex Discrete Filters. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2017, no. 4, pp. 12–19. (In Russ.)
11. Ziatdinov S. I., Sokolova Yu. V. Analysis of Complex Filters with the Use of Transition Characteristics. Journal of Instrument Engineering. 2017, vol. 60, no. 7, pp. 641–647. doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-7-641-646 (In Russ.)
12. Ziatdinov S. I., Osipov L. A., Sokolova Yu. V. Synthesis of Complex Discrete Filters by Method of Invariant Differential Equations. Journal of Instrument Engineering. 2018, vol. 61, no. 4, pp. 317–322. doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-4-317-322 (In Russ.)
13. Besekerskii V. A., Efimov N. B., Ziatdinov S. I., Izrantsev V. V., Nebylov A. V., Sokolov N. G., Fabrikant E. A. *Mikroprotsessornye sistemy avtomaticheskogo upravleniya* [Microprocessor-Based Automatic Control Systems]. Leningrad, *Mashinostroenie. Leningr. otd-nie*, 1988, 365 p. (In Russ.)
14. Popov D. I. Passive Interference Assessment. Radioelectronics and Communications Systems. 2013, vol. 56, no. 4, pp. 39–47. (In Russ.)
15. Popov D. I. Evaluation of Clutter Correlation Parameters. Radio industry. 2017, vol. 27, no. 1, pp. 57–62. doi: 10.21778/2413-9599-2017-1-57-62 (In Russ.)

Information about the author

Sergey I. Ziatdinov, Dr. Sci. (Eng.) (2005), Professor (2008) of the Department of the Information and Net Technology of Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: signal working in the radio technical systems.

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

E-mail: kaf53@guap.ru

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