

Обнаружение, оценка параметров и пеленгование периодических импульсных сигналов

В. Б. Манелис¹, И. С. Фаустов^{1,2✉}, В. А. Козьмин¹

¹АО "ИРКОС", Воронеж, Россия

²ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет",
Воронеж, Россия

✉ faustov.97@bk.ru

Аннотация

Введение. Периодические импульсные сигналы (ПИС) находят широкое применение в различных областях, включая радиолокацию. Параметры ПИС, такие, как период, длительность и форма импульсов, радиочастотное наполнение, могут значительно варьироваться и, как правило, априори неизвестны. В условиях априорной неопределенности и при низких отношениях сигнал/шум актуальная задача обнаружения ПИС, оценки его параметров и пеленгования источника является нетривиальной.

Цель работы. Разработка алгоритмов обнаружения, оценки параметров и пеленгования периодических импульсных сигналов в условиях низких значений отношения сигнал/шум и отсутствия априорной информации о параметрах ПИС.

Материалы и методы. При решении поставленной задачи использовались методы статистической радиотехники, математической статистики, оценивания параметров сигналов на фоне помех, имитационного компьютерного моделирования.

Результаты. Разработаны простые в реализации алгоритмы обнаружения периодических импульсных сигналов, оценки их параметров и пеленгования источника. Методом компьютерного моделирования получены характеристики помехоустойчивости алгоритмов. Выполнено их успешное тестирование посредством приема реальных сигналов. Показано, что помехоустойчивость алгоритмов растет с уменьшением скважности ПИС. Разработанные алгоритмы позволяют отличать ПИС от сигналов беспроводных систем связи, таких, как GSM, UMTS, LTE, Wi-Fi, 5G, имеющих периодическую компоненту, но не являющихся импульсными.

Заключение. Полученные алгоритмы успешно функционируют при отсутствии априорной информации о параметрах периодического импульсного сигнала и при низких отношениях сигнал/шум (до -15 дБ). Показан существенный выигрыш в помехоустойчивости пеленгования по сравнению со стандартным фазоразностным алгоритмом. Оценка параметров периодического импульсного сигнала может быть использована для идентификации источника.

Ключевые слова: периодический импульсный сигнал, антенная решетка, обнаружение сигналов, оценка параметров, пеленгование

Для цитирования: Манелис В. Б., Фаустов И. С., Козьмин В. А. Обнаружение, оценка параметров и пеленгование периодических импульсных сигналов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 3. С. 73–84.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-3-73-84

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 22.10.2024; принята к публикации после рецензирования 21.01.2025; опубликована онлайн 30.06.2025



Detection, Parameter Estimation and Direction Finding of Periodic Pulse Signals

Vladimir B. Manelis¹, Ivan S. Faustov^{1,2}✉, Vladimir A. Kozmin¹

¹JSC "IRCOS", Voronezh, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

✉ faustov.97@bk.ru

Abstract

Introduction. Periodic pulse signals are used in various fields, including radar systems. The parameters of periodic pulse signals, such as period, pulse duration and shape, and radio frequency content, can vary significantly and, as a rule, are unknown a priori. Under the conditions of a priori uncertainty and low signal-to-noise ratios, the detection of periodic pulse signals, estimation of their parameters, and direction finding of the source is a non-trivial task.

Aim. To develop algorithms for detecting, estimating parameters, and direction finding of periodic pulse signals in the presence of low signal-to-noise ratios and the absence of a priori information about the parameters of a periodic pulse signal.

Materials and methods. The methods of statistical radio engineering, mathematical statistics, estimation of signal parameters against interference, and computer simulation were used.

Results. Simple-to-implement algorithms for detecting periodic pulse signals, evaluating their parameters, and direction finding of the source have been developed. The noise immunity characteristics of the algorithms obtained by computer simulation were successfully tested when receiving actual signals. The noise immunity of the algorithms was shown to increase with a decrease in the duty ratio of the signal. The developed algorithms allow periodic pulse signals to be distinguished from signals of wireless communication systems, such as GSM, UMTS, LTE, Wi-Fi, 5G. The latter signals, although having a periodic component, are not pulsed signals.

Conclusion. The developed algorithms function successfully in the absence of a priori information about the parameters of a periodic pulse signal and at low signal-to-noise ratios (up to -15 dB). A significant gain in the noise immunity of direction finding was achieved in comparison with the standard phase difference algorithm. The parameters of a periodic pulse signal evaluated using the developed algorithms can be used for source identification.

Keywords: periodic pulse signal, antenna array, signal detection, parameter estimation, direction finding

For citation: Manelis V. B., Faustov I. S., Kozmin V. A. Detection, Parameter Estimation and Direction Finding of Periodic Pulse Signals. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 3, pp. 73–84. doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-3-73-84

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

Submitted 22.10.2024; accepted 21.01.2025; published online 30.06.2025

Введение. Периодические импульсные сигналы (ПИС) получили широкое распространение в различных приложениях, в частности, в радиолокации. Обнаружение и оценка параметров ПИС, локализация их источника – актуальная задача радиомониторинга и радиотехнической разведки. Параметры ПИС (период, длительность, форма импульсов, радиочастотное наполнение) могут варьироваться в широких пределах в зависимости от источника и, как правило, априори неизвестны. В условиях априорной неопределенности и значительной удаленности источника, когда уровень сигнала становится существенно меньше уровня шумов и помех в полосе

анализа, задача обнаружения ПИС и оценки его параметров является нетривиальной.

В подавляющем большинстве систем ПИС имеют высокую скважность, а их общая энергия может быть существенно ниже энергии шумов и помех в анализируемом частотном диапазоне. В этом случае стандартные фазоразностные методы (ФРМ) пеленгования, использующие для расчета пеленга непрерывную выборку сигнала, приводят к грубым ошибкам пеленгования. Действительно, в этом случае пеленговаться будут не источники ПИС, а источники мощных помех. Для преодоления этой проблемы в описываемой работе определяются

интервалы выборки, в которых присутствуют импульсы сигнала, и при расчете пеленга сигнал анализируется только в этих интервалах.

Известны публикации, посвященные анализу ПИС и оценке их периода. В [1] рассмотрена классификация импульсных сигналов при одновременной работе нескольких источников радиоизлучения. В основе решения этой задачи лежит статистическая обработка гистограмм разностей средних амплитуд сигнала на коротких интервалах. Подобный подход рассмотрен также в [2–5] при определении периода следования сигналов РЛС.

Задача обнаружения ПИС, наблюдаемого на фоне аддитивных шумов, и оценка его периода рассмотрена в [6, 7]. Обнаружение основано на формировании усредненного спектра мощности входного сигнала. Оценка периода ПИС определяют по частоте гармоники сформированного спектра мощности с наибольшей амплитудой. Эта частота соответствует частоте следования импульсов. В [8, 9] применена более сложная процедура анализа усредненного спектра, которая позволяет выделять ПИС разных источников.

В соответствии с характеристиками помехоустойчивости [1–9] перечисленные методы работают лишь при отношениях сигнал/шум не менее 2...4 дБ. При очень низких отношениях сигнал/шум ПИС визуально не наблюдаются ни во временной, ни в частотной областях. Поэтому в неблагоприятных помехо-шумовых условиях эти методы неработоспособны.

В [10] для оценки периода следования ПИС предложено формировать функцию автокорреляции входного сигнала с последующей ее обработкой.

Сигналы многих систем (GSM, UMTS, LTE, 5G, Wi-Fi и др.) в своей структуре имеют некоторую периодическую компоненту. Алгоритмы из [1–10] не позволяют отличить такие сигналы от ПИС.

Работы [11–15] посвящены обнаружению ПИС и возможности их идентификации и отличия от сигналов LTE, Wi-Fi с использованием нейронных сетей. Однако в указанных работах исходными данными служат комплексные отсчеты сигнала в частотной области, что определяет низкую помехоустойчивость этих методов.

Общим недостатком большинства известных подходов является отсутствие оценки дли-

тельности и формы импульсов ПИС. Кроме того, не рассматриваются особенности пеленгования источников таких сигналов.

Цель описываемой работы – создание алгоритмов обнаружения, оценка параметров и пеленгования ПИС в условиях низких отношений сигнал/шум и отсутствия априорной информации о параметрах ПИС.

Предложенный подход основан на том, что функция автокорреляции ПИС имеет локальные максимумы, интервал между которыми равен периоду сигнала. Знание периода позволяет выполнить поперiodное усреднение для подавления шумов. В рамках данного подхода представлены эвристические процедуры обнаружения и оценки параметров ПИС, зависящие от ряда параметров, значения которых оптимизировались посредством анализа большого количества смоделированных и реальных ПИС с различными значениями отношения сигнал/шум, периода, скважности, радиочастотного наполнения.

Общая процедура обработки. Решение поставленной задачи реализуется на базе двухканальной приемной аппаратуры, использующей многоэлементную антенную решетку (АР) [16]. Один канал приема (некоммутируемый) постоянно подключен к нулевому элементу АР, другой (коммутируемый) – последовательно подключается к элементам АР с номерами $m = 0, M - 1$, где M – количество элементов АР.

По сигналу некоммутируемого канала производится обнаружение и идентификация ПИС, оценка его параметров, а вместе с коммутируемым каналом – пеленгование источника.

На рис. 1 представлена общая схема обработки. По входному комплексному видеосигналу некоммутируемого канала формируется автокорреляционная функция (АКФ). При наличии периодических локальных максимумов в сформированной функции принимается решение о присутствии периодической компоненты во входном сигнале. Интервал между соседними локальными максимумами соответствует значению периода. Полученная оценка периода используется далее при поперiodном накоплении сигнала во временной области. Результат поперiodного накопления позволяет идентифицировать импульсный характер сигнала и оценить длину и форму импульсов. По

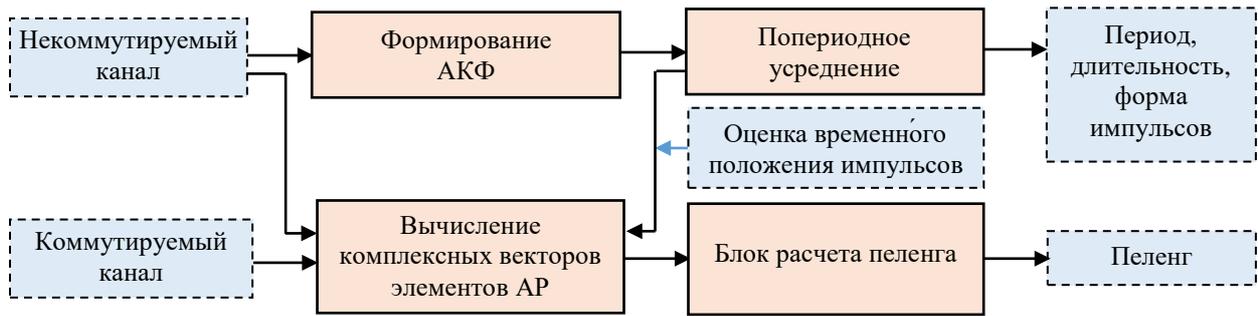


Рис. 1. Общая схема анализа и пеленгования ПИС

Fig. 1. General scheme of analysis and direction finding of periodic pulse signals

полученным оценкам периода и длины импульсов рассчитываются временные области наличия импульсов на всем анализируемом интервале. Именно эти временные интервалы используются при вычислении комплексных векторов (включающих разность фаз) элементов АР и расчете пеленга источника ПИС.

Рассмотрим описанные процедуры подробно.

Обнаружение периодической компоненты сигнала и оценка ее периода. Формируется функция автокорреляции

$$K(n) = \frac{1}{N-n} \left| \sum_{i=1}^{N-n} x_i x_{i+n}^* \right|, \quad n = \overline{0, L_a - 1},$$

где x_i ($i = \overline{1, N}$) – комплексные отсчеты входного сигнала некоммутируемого канала; $N = \lfloor Tf \rfloor$ – количество отсчетов входной реализации (T – ее длительность; f – частота дискретизации, $\lfloor \cdot \rfloor$ – оператор округления до значения, не превосходящего значения аргумента); $L_a = \lfloor T_a f \rfloor$ – количество отсчетов формируемой АКФ.

Отдельно взятый локальный максимум может быть обусловлен шумами и помехами и не может надежно свидетельствовать о наличии периодической компоненты. Для повышения надежности ее обнаружения предусмотрено обнаружение трех максимумов и сравнение интервалов времени между ними. Близость этих интервалов считается условием наличия периодической компоненты АКФ. В связи с указанным условием значение T_a выбиралось равным утроенному значению максимально возможного периода импульсного сигнала.

На рис. 2, а–в представлены примеры амплитуд реализаций эфирного ПИС, наблюдае-

мого на фоне шумов и помех существенного уровня. Рис. 2, а представляет случай, когда импульсы ПИС существенно превосходят шумовые выбросы, на рис. 2, б помеховые выбросы превосходят импульсы ПИС, а на рис. 2, в помеха полностью поглощает ПИС.

АКФ указанных сигналов представлены на рис. 2, г–е в зависимости от временных позиций $t_n = n/f$. Очевидно, что АКФ имеет абсолютный максимум при $n = 0$. Поиск локальных максимумов выполняется следующим образом.

Первый локальный максимум ищется на интервале $[N_1, N_2]$, $N_1 = \lfloor T_1 f \rfloor$, $N_2 = \lfloor T_2 f \rfloor$. Значения t_1 и t_2 являются минимально и максимально возможными значениями периода анализируемых импульсных сигналов и определяются классами подлежащих обнаружению источников ПИС. Тем самым диапазон возможных значений периода априори известен.

Положение первого локального максимума определяется наименьшим значением отсчета n_1 , удовлетворяющим условиям

$$K(n_1) > h;$$

$$n_1 = \arg \max K(n); \quad n \in [n_1 - \Delta n/2, n_1 + \Delta n/2],$$

где h – порог; Δn – длина области локального максимума, определяемая частотой дискретизации и максимальной длительностью импульса.

Порог h находится как полусумма среднего и максимального значений АКФ на интервале $[N_1, N]$:

$$h = (K_{\max} + \bar{K})/2,$$

где

$$K_{\max} = \max K(n), \quad n = \overline{N_1, N};$$

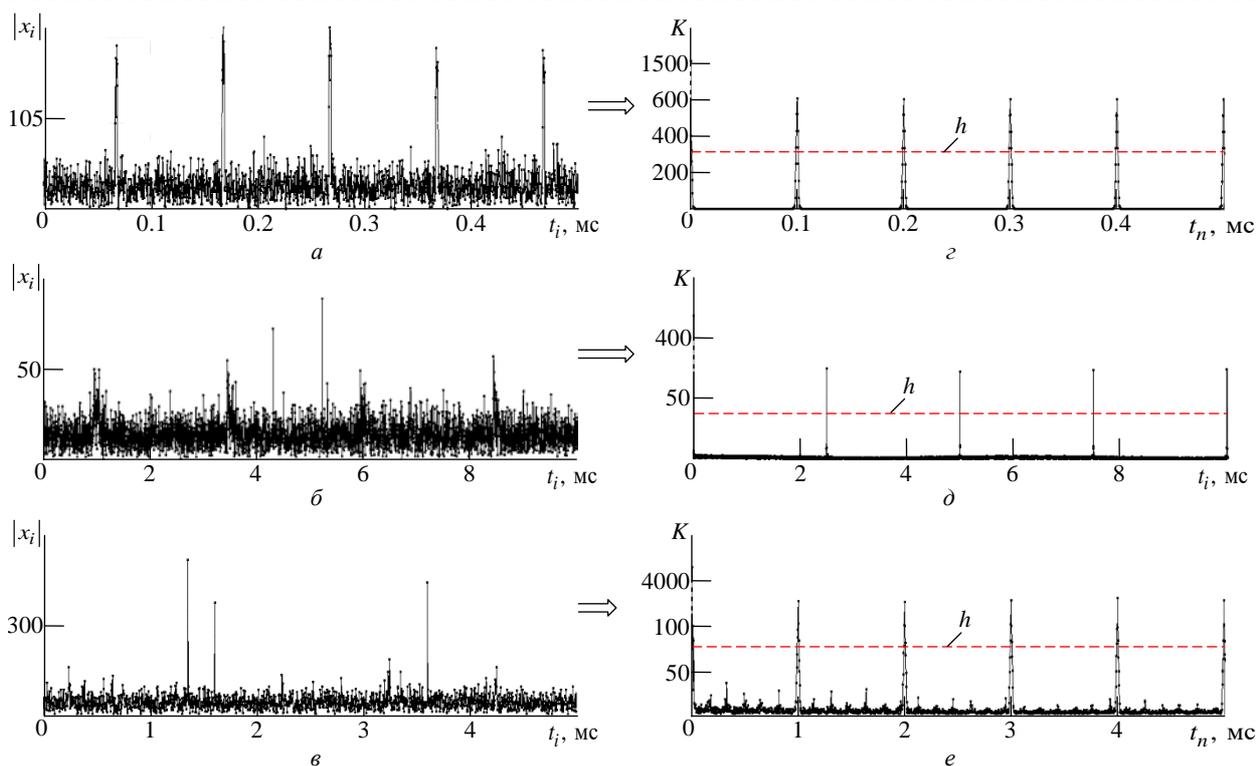


Рис. 2. Примеры ПИС (а–в) и их АКФ (z–e)

Fig. 2. Examples of a periodic pulse signal (a–в) and its autocorrelation functions (z–e)

$$\bar{K} = \frac{1}{N - N_1} \sum_{n=n_1+1}^N K(n).$$

Значение n_1 считается предварительной оценкой периода сигнала. Положение второго локального максимума определяется наименьшим значением n_2 , удовлетворяющим условиям

$$K(n_2) > h; \quad (1)$$

$$n_2 = \arg \max K(n); n \in [n_1 + N_1, n_2 + n_1/4].$$

В случае $|n_2 - 2n_1| \geq \delta$ принимается решение об отсутствии периодической компоненты в анализируемом сигнале и его обработка прекращается.

Из-за дискретного представления АКФ при низком отношении сигнал/шум возможно незначительное отличие периода ПИС от расстояния между локальными максимумами. Значение параметра δ представляет допустимую ошибку и подобрано эмпирически.

Если $|n_2 - 2n_1| < \delta$, т. е. в случае приблизительно одинаковых расстояний между нулевым и первым, первым и вторым максимумами, можно вынести решение о наличии периодической ком-

поненты в наблюдаемой реализации. Для повышения достоверности обнаружения ПИС ищется третий локальный максимум. Его положение определяется по аналогии с (1) наименьшим значением n_3 , удовлетворяющим условиям

$$K(n_3) > h;$$

$$n_3 = \arg \max K(n); n \in [n_2 + N_1, n_3 + n_1/4].$$

В случае $|n_3 - n_2 - n_1| \geq \delta$ принимается решение об отсутствии периодической компоненты в анализируемом сигнале и его обработка прекращается. Если $|n_3 - n_2 - n_1| < \delta$, считаем, что периодическая компонента в анализируемом сигнале присутствует.

Далее, если $n_2 - 2n_1 = n_3 - n_2 - n_1 = 0$, принимаем окончательное решение, что период равен $\tilde{n} = n_1$, и переходим к поперiodному усреднению. В противном случае сначала получаем оценку периода \tilde{n} как положение максимума функции

$$\tilde{n} = \arg \max_n \sum_{k=1}^{\lfloor L_a/n \rfloor} K(kn); n \in (n_1 - \delta, n_1 + \delta),$$

после чего переходим к поперечному усреднению.

Оценка формы и длительности импульса. Попериодное усреднение заключается в формировании функции

$$\Omega_i = \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q |x_{i+k\tilde{n}}|; \quad i = \overline{0, \tilde{n}-1}, \quad (2)$$

где $Q = \lfloor N/\tilde{n} \rfloor$ – количество периодов на интервале анализа.

При суммировании импульсный сигнал будет складываться в фазе, в то время как шумовые и помеховые компоненты будут складываться случайным образом. Это приведет к увеличению отношения сигнал/шум в результирующей сумме. На рис. 3 временные зависимости $|x_i|$ представляют амплитуды реализаций входных сигналов, приведенных на рис. 2, линиями $\Omega_i(t_i)$ показаны

результаты их усреднения. На рис. 3, а и в хорошо видны импульс $\Omega_{pi}(t)$ и его форма, а на рис. 3, б – двухимпульсный периодический кластер, характерный для некоторых источников.

Как указано ранее, наличие периодической компоненты во входном сигнале не эквивалентно наличию периодического импульсного сигнала. Сигналы многих систем (например, GSM, UMTS, LTE, 5G, Wi-Fi) в соответствии со своей временной структурой также содержат периодическую компоненту. Необходимо отделить такие сигналы от импульсных сигналов. Для решения данной задачи формируется порог H как взвешенная сумма максимального Ω_{\max} и среднего $\bar{\Omega}$ значений усредненной функции (2) (рис. 3).

Решение о наличии ПИС в наблюдаемом сигнале принимается, если число пересечений этого порога функцией (2) не превышает за-

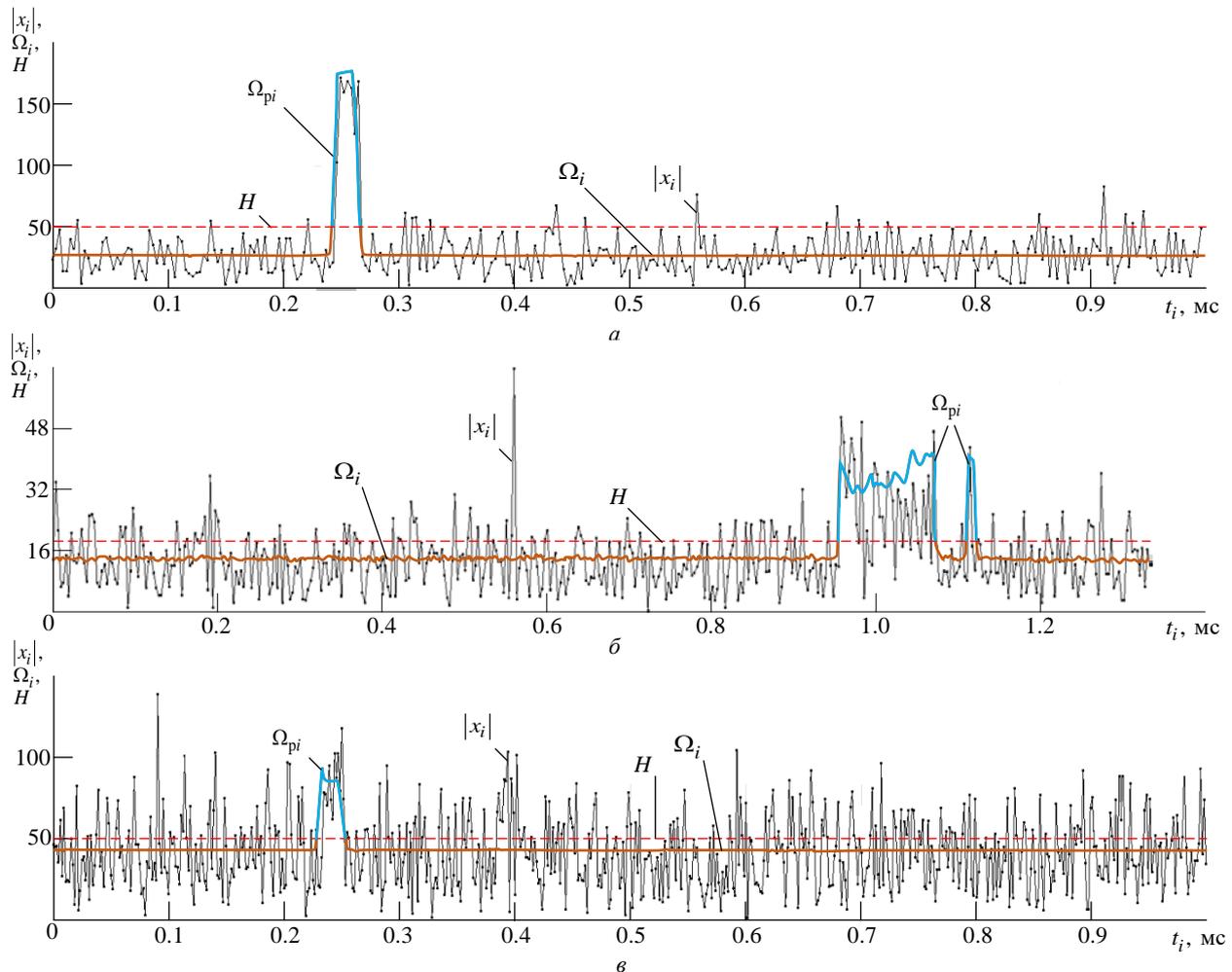


Рис. 3. Примеры поперечного усреднения различных ПИС

Fig. 3. Examples of period-by-period averaging of various periodic pulse signals

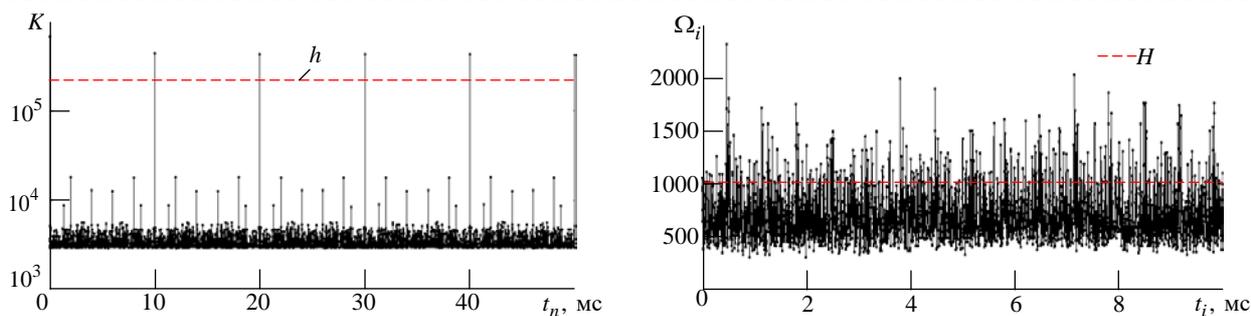


Рис. 4. Пример АКФ и результат поперiodного усреднения для сигнала UMTS

Fig. 4. An example of ACF and the result of period-by-period averaging for the UMTS signal

данного значения $L = 50$. В противном случае считаем, что ПИС отсутствует, и прекращаем обработку анализируемого сигнала. Значение параметра L выбрано на основании анализа большого количества сигналов ПИС и других систем с периодической компонентой. Указанное значение позволяет достаточно достоверно отличить ПИС от других сигналов, в том числе при низких отношениях сигнал/шум.

На рис. 4 показан пример АКФ и усредненного периода для сигнала UMTS. Видно, что несмотря на четкие пики АКФ, наблюдается большое число пересечений порога (существенно больше значения L).

Оценка длительности импульса или кластера импульсов выполняется с использованием порога H . На интервале периода \tilde{n} определяются области, где функция (2) превышает этот порог. Обозначим J – число выделенных областей, $\Omega_{\max}^{(k)}$ – максимальное значение в k -й области, $k = 1, J$.

При малых значениях отношения сигнал/шум даже после поперiodного усреднения фиксируется множество шумовых выбросов. Эвристическое правило их отбраковки состоит в выполнении условия

$$\Omega_{\max}^{(k)} - H < \beta(\Omega_{\max} - H); \beta = 0.2.$$

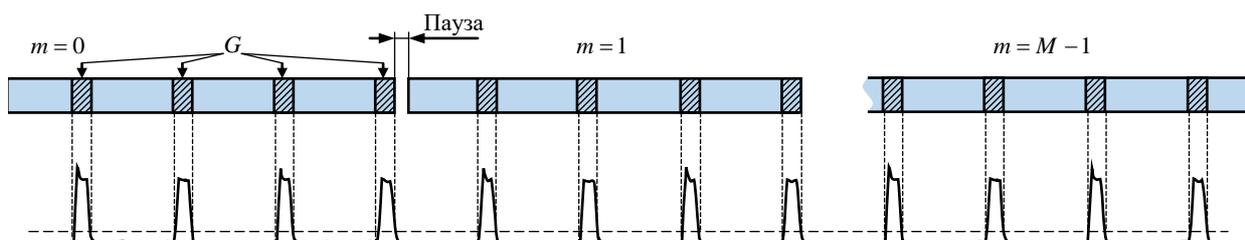


Рис. 5. Цикл пеленгования ПИС

Fig. 5. Direction finding cycle of periodic pulse signals

Значение параметра β установлено на основе анализа большого количества реализаций ПИС.

Оставшиеся после отбраковки области считаются интервалами расположения импульсов Ω_{pi} , а длина этих интервалов – оценкой их длительности. Форма импульсов определяется результатом поперiodного усреднения (2) в этих интервалах.

Пеленгование ПИС. Интервал записи включает множество циклов пеленгования, в каждом из которых выносятся оценка направления прихода ПИС. Для расчета пеленга формируются величины

$$U_m = \sum_{i \in G} x_{li}^{(m)} x_{0i}^*; \quad m = \overline{0, M-1} \quad (3)$$

по области G временных интервалов импульсов ПИС, как показано на рис. 5. Величины (3) характеризуют разности фаз между отсчетами сигналов, принимаемыми коммутируемым каналом на m -м элементе АР $x_{li}^{(m)}$ и некоммутируемым каналом нулевого элемента АР x_{0i} . Пауза обусловлена коммутацией элементов АР. В нижней части рис. 5 показаны импульсы сигнала.

Оценить направление прихода сигнала можно различными методами с учетом требований к разрешающей способности, вычислительным ресурсам и конфигурации элементов

АР [17]. В качестве примера рассмотрим круговую АР и корреляционно-интерферометрический метод, в соответствии с которым по значениям U_m ($m = \overline{0, M-1}$) формируется решающая функция

$$\Omega(\theta) = D(\theta) \left| \sum_{m=0}^{M-1} U_m a_m^* \right|; \theta = \overline{0, 359}, \quad (4)$$

где $D(\theta)$ – диаграмма направленности одного элемента АР; $a_m = \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}d_m(\theta)\right]$ – предполагаемая разность фаз между сигналами m -го и нулевого элементов АР в случае угла прихода θ ; $d_m = [(x_m - x_0)\sin\theta + (y_m - y_0)\cos\theta]$ – разность хода между m -м и нулевым элементами АР (x_m, y_m – координаты m -го элемента АР); λ – длина волны сигнала.

Положение максимума решающей функции (4) определяет оценку направления прихода сигнала данного цикла пеленгования:

$$\tilde{\theta} = \arg \max_{\theta} \Omega(\theta).$$

Выбор дискрета решающей функции (4) обусловлен компромиссом между вычислительной сложностью и точностью оценки пеленга. Приведенные далее результаты получены с дискретом в 1° .

По полученным оценкам формируется гистограмма пеленгов, анализ которой позволяет вынести окончательное решение о направлении прихода сигнала.

Результаты моделирования. Анализ разработанных алгоритмов выполнялся методом статического компьютерного моделирования.

ПИС представлял собой последовательность прямоугольных импульсов с периодом следования $T_{\text{и}} = 200$ мкс, длительность импульсов $\tau_{\text{и}} = 5, 2.5$ и 1.25 мкс со скважностью $q = 40, 80, 160$ соответственно. Частота дискретизации входного сигнала $f = 6.4$ МГц. ПИС наблюдался на фоне белого гауссовского шума, отношение сигнал/шум ρ рассчитывалось на интервале импульсов. Длительность записи входного сигнала T варьировалась от 0.1 до 1 с, число элементов АР $M = 9$. Время работы одно-

го элемента коммутируемого канала $\tau = 480$ мкс. Значение этого параметра аппаратной части установлено исходя из необходимости не менее нескольких десятков циклов пеленгования в пределах интервала записи (4320 мкс) для получения качественной гистограммы. При расчете время коммутации не учитывалось.

Другие параметры обработки составляют $t_1 = 500$ мкс, $t_2 = 50$ мс, $T_a = 3t_2$.

На рис. 6–10 приведены результаты моделирования разработанных алгоритмов для различных значений скважности ПИС q . На рис. 6 показаны зависимости вероятности правильного обнаружения $P_{\text{обн}}$ от отношения сигнал/шум ρ при длительности записи $T = 1$ с. Видно, что разработанный алгоритм эффективно функционирует в области существенно отрицательных ρ , причем его помехоустойчивость растет с уменьшением скважности q . Вероятность $P_{\text{обн}}$ достигает 1 при $\rho = -13$ дБ для $q = 40$, $\rho = -11$ дБ для $q = 80$ и $\rho = -8$ дБ для $q = 160$.

Моделирование показало высокую точность оценки периода, обусловленную используемым

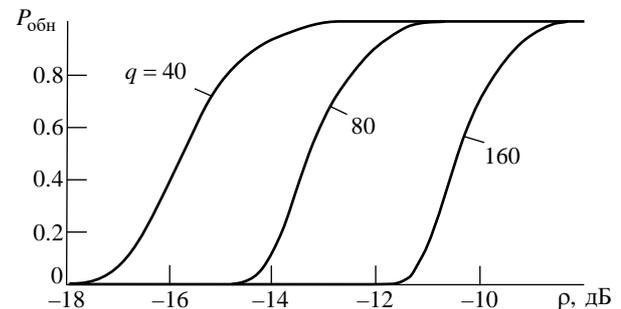


Рис. 6. Зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум

Fig. 6. Dependence of the probability of correct detection vs the signal-to-noise ratio

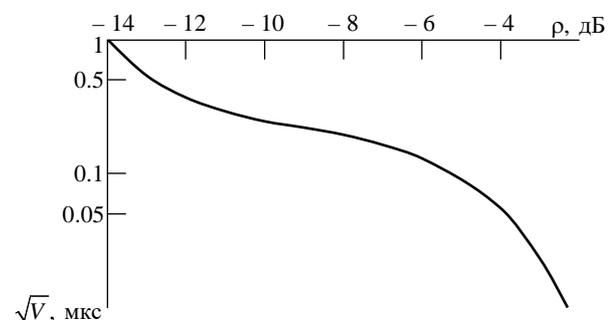


Рис. 7. Зависимость корня рассеяния \sqrt{V} от отношения сигнал/шум ρ

Fig. 7. Dependence of the square root of the scattering \sqrt{V} vs the signal-to-noise ratio ρ

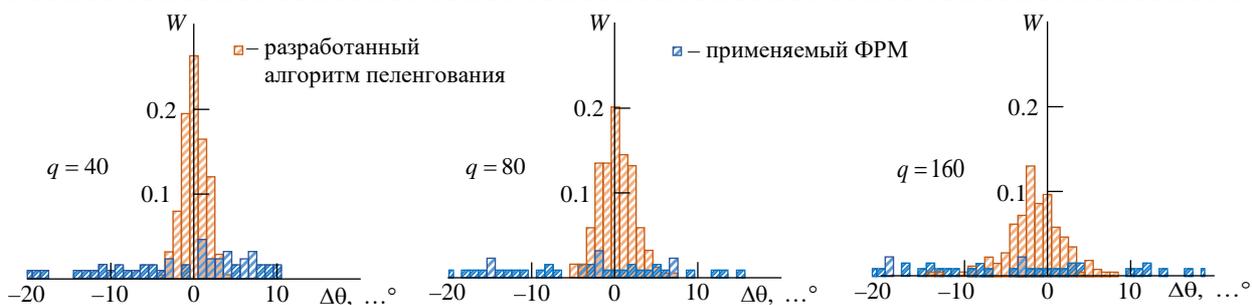


Рис. 8. Примеры гистограмм оценки пеленга при $\rho = -6$ дБ

Fig. 8. Examples of histograms of the bearing estimation at $\rho = -6$ dB

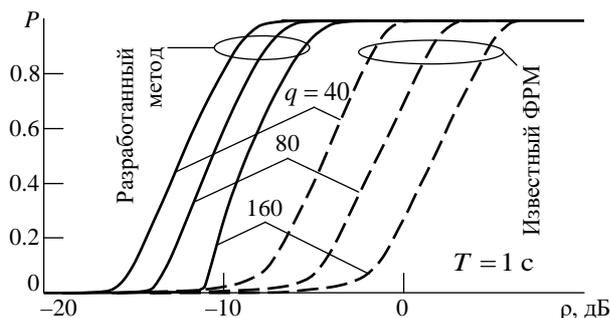


Рис. 9. Зависимость вероятности правильного обнаружения сигнала при ошибке пеленгования не более 1.5° от отношения сигнал/шум для разработанного алгоритма и стандартного ФРМ

Fig. 9. Determination of the probability of correct signal detection with a direction finding error of no more than 1.5° on the signal-to-noise ratio for the developed algorithm and the standard phase difference algorithm

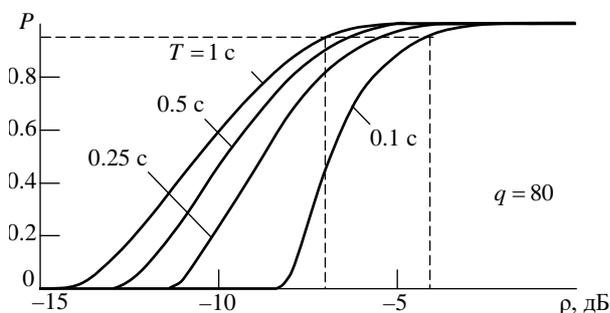


Рис. 10. Зависимость вероятности обнаружения сигнала при ошибке пеленгования не более 1.5° от отношения сигнал/шум

Fig 10. Determination of the probability of signal detection with a direction finding error of no more than 1.5° on the signal-to-noise ratio

методом обнаружения ПИС по АКФ. Ошибка оценки периода приводит к пропуску сигнала, т. е. оценка периода сильно коррелирует с решением о наличии сигнала. В связи с этим приведенные на рис. 6 кривые вероятности правильного обнаружения можно также рассматривать как вероятности высокоточной оценки периода ПИС.

Рис. 7 иллюстрирует помехоустойчивость оценки длительности импульсов. На нем пред-

ставлена зависимость корня квадратного из рассеяния оценки [18]

$$\sqrt{V} = \sqrt{\left\langle \left(\tilde{\tau}_и - \tau_и^{(0)} \right)^2 \right\rangle}$$

от отношения сигнал/шум ρ , где V – рассеяние оценки длительности импульса; $\tilde{\tau}_и$ – оценка длины импульса; $\tau_и^{(0)} = 5$ мкс – ее истинное значение; $\langle \cdot \rangle$ – символ усреднения.

Квадратный корень взят для получения одинаковой размерности с оцениваемой величиной.

На интервале записи формируется множество пеленгов, на основе которых строится гистограмма. На рис. 8 представлены примеры гистограмм стандартного ФРМ и разработанного алгоритма пеленгования, построенных по 230 пеленгам в результате обработки одной реализации длительностью 1 с при отношении сигнал/шум $\rho = -6$ дБ. По оси абсцисс на рис. 8 отложены значения $\Delta\theta = \theta - \theta_0$, где θ – полученные значения пеленга; θ_0 – истинное направление на источник. Гистограммы показывают относительное количество пеленгов, попавших в различные интервалы углового положения. Эти интервалы задавались равномерно в диапазоне $[-180, 180)$ с шагом 1° . Результатом анализа каждой гистограммы является пеленг данной реализации $\tilde{\theta}$, представляющий собой середину интервала с максимальным количеством пеленгов. Сравнение гистограмм показывает более высокую точность пеленгования разработанного алгоритма по сравнению со стандартным.

Интегральное качество обнаружения ПИС и пеленгования его источника охарактеризовано вероятностью P правильного обнаружения при ошибке пеленга $|\tilde{\theta} - \theta_0| \leq 1.5$.

На рис. 9 приведены зависимости вероятности P от отношения сигнал/шум при длительности записи $T = 1$ с. Видно, что разработанный алгоритм по сравнению со стандартным ФРМ обладает существенным выигрышем в помехоустойчивости, который растет с увеличением скважности ПИС.

На рис. 10 представлены зависимости вероятности P от отношения сигнал/шум при различных значениях длительности записи T . Видна степень деградации характеристик по мере уменьшения T . На основе приведенных кривых можно выбрать длительность записи. Например, при заданной вероятности $P = 0.95$ при отношении сигнал/шум больше -4 дБ достаточно выбрать длину записи 0.1 с. Если от-

ношение сигнал/шум может достигать -7 дБ, необходимо увеличить длину записи до 1 с.

Заключение. Разработаны помехоустойчивые эвристические алгоритмы обнаружения периодических импульсных сигналов, оценки параметров ПИС (период, длительность и форма импульса) и пеленгования источника ПИС в сложной помеховой обстановке в условиях априорной неопределенности. Выполненный анализ позволяет обоснованно выбрать длительность записи в зависимости от условий приема. Выигрыш в помехоустойчивости пеленгования по сравнению со стандартным фазоразностным алгоритмом в зависимости от скважности ПИС составляет $8 \dots 11$ дБ. Оценку параметров ПИС можно использовать для идентификации источника.

Список литературы

1. Коротков В. Ф., Зырянов Р. С. Разделение импульсных последовательностей в смешанном потоке сигналов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 3. С. 5–10.
2. Mardia H. K. New Techniques for The Deinterleaving of Repetitive Sequences // IEE Proc. F-Radar and Signal Processing. 1989. Vol. 136, № 4. P. 149–154. doi: 10.1049/ip-f-2.1989.0025
3. Milojevic D. J., Popovic B. M. Improved Algorithm for the Deinterleaving of Radar Pulses // IEE Proc. F-Radar and Signal Processing. 1992. Vol. 139, № 1. P. 98–104. doi: 10.1049/ip-f-2.1992.0012
4. Improved Algorithm of Radar Pulse Repetition Interval Deinterleaving based on Pulse Correlation / Z. Ge, X. Sun, W. Ren, W. Chen, G. Xu // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 30126–30134. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2901013
5. Liu Y., Chen Y., Sun S. A Radar Signal Sorting Algorithm based on PRI // 19th Intern. Symp. on Communications and Information Technologies (ISCIT), Ho Chi Minh City, Vietnam, 25–27 Sept. 2019. IEEE, 2019. P. 144–149. doi: 10.1109/ISCIT.2019.8905239
6. Железняк В. К., Барков А. В. Обнаружение периодических импульсных последовательностей и оценка их периода // Вестн. Полоцкого государственного ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. Информатика. 2012. № 4. С. 16–20.
7. Барков А. В., Железняк В. К. Способ подавления зашумленных импульсных последовательностей путем компенсации // Электроника инфо. 2013. № 6(96). С. 212–216.
8. Orsi R. J., Moore J. B., Mahony R. E. Spectrum Estimation of Interleaved Pulse Trains // IEEE Trans. on Signal Processing. 1999. Vol. 47, iss. 6. P. 1646–1653. doi: 10.1109/78.765135
9. Ng S. A Technique for Spectral Component Location within a FFT Resolution Cell // IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 84), San Diego, USA, 19–21 March 1984. IEEE, 1984. P. 147–149. doi: 10.1109/icassp.1984.1172774
10. Nelson D. Special Purpose Correlation Functions for Improved Signal Detection and Parameter Estimation // IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 93), Minneapolis, USA, 27–30 Apr. 1993. IEEE, 1993. P. 73–76. doi: 10.1109/ICASSP.1993.319597
11. Spectrum Monitoring for Radar Bands Using Deep Convolutional Neural Networks / A. Selim, F. Paisana, J. A. Arokkiyam, Y. Zhang, L. Doyle, L. A. DaSilva // IEEE Global Communications Conf. (GLOBECOM 2017), Singapore, 4–8 Dec. 2017. IEEE, 2017. 6 p. doi: 10.1109/GLOCOM.2017.8254105
12. A Radar Signal Deinterleaving Method Based on Semantic Segmentation with Neural Network / C. Wang, L. Sun, Z. Liu, Z. Huang // IEEE Trans. on Signal Processing. 2022. Vol. 70. P. 5806–5821. doi: 10.1109/TSP.2022.3229630
13. Zhu M., Wang S., Li Y. Model-Based Representation and Deinterleaving of Mixed Radar Pulse Sequences With Neural Machine Translation Network // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. 2022. Vol. 58, № 3. P. 1733–1752. doi: 10.1109/TAES.2021.3122411
14. Han J. W., Park C. H. A Unified Method for Deinterleaving and PRI Modulation Recognition of Radar Pulses Based on Deep Neural Networks // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 89360–89375. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3091309
15. A Deinterleaving Method for Mechanical-Scanning Radar Signals Based on Deep Learning / C. Wang, Y. Wang, X. Li, D. Ke // 7th Intern. Conf. on Intelligent

Computing and Signal Processing (ICSP), Xi'an, China, 15–17 Apr. 2022. IEEE, 2022. P. 138–143.
doi: 10.1109/ICSP54964.2022.9778808

16. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Автоматизированные системы радиоконтроля и их компоненты / под ред. А. М. Рембовского. М.: Горячая линия-Телеком, 2017. 424 с.

17. Liberti J. C., Rappaport T. S. Smart Antennas for Wireless Communication: IS-95 and Third Generation CDMA Applications in IS-95. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 376 p.

18. Куликов Е. И., Трифонов А. П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. М.: Сов. радио, 1978. 296 с.

Информация об авторах

Манелис Владимир Борисович – доктор технических наук (2010), ведущий научный сотрудник АО "ИРКОС". Автор более 130 научных работ. Сфера научных интересов: системы связи; радиомониторинг; алгоритмы приема и обработки сигналов.

Адрес: АО "ИРКОС", 1016, Рабочий пр., Воронеж, 394024, Россия

E-mail: vldman@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-7077-3611>

Фаустов Иван Сергеевич – инженер по специальности "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2021, Воронежский государственный технический университет), аспирант кафедры радиотехники Воронежского государственного технического университета, научный сотрудник АО "ИРКОС". Автор 11 научных работ. Сфера научных интересов: радиомониторинг; алгоритмы приема и обработки сигналов; цифровая обработка сигналов.

Адрес: АО "ИРКОС", 1016, Рабочий пр., Воронеж, 394024, Россия

E-mail: faustov.97@bk.ru

<https://orcid.org/0009-0005-3054-5540>

Козьмин Владимир Алексеевич – кандидат технических наук (1989), доцент (1989), директор по научной работе АО "ИРКОС". Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов: радиомониторинг; алгоритмы приема и обработки сигналов; цифровая обработка сигналов.

Адрес: АО "ИРКОС", 1016, Рабочий пр., Воронеж, 394024, Россия

E-mail: kozminva@ircoc.vrn.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5268-1114>

References

1. Korotkov V. F., Zyryanov R. S. Pulse Sequence Division in Mixed Signal Flow. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2017, no. 3, pp. 5–10. (In Russ.)

2. Mardia H. K. New Techniques for The Deinterleaving of Repetitive Sequences. IEE Proc. F-Radar and Signal Processing. 1989, vol. 136, no. 4, pp. 149–154.
doi: 10.1049/ip-f-2.1989.0025

3. Milojevic D. J., Popovic B. M. Improved Algorithm for the Deinterleaving of Radar Pulses. IEE Proc. F-Radar and Signal Processing. 1992, vol. 139, no. 1, pp. 98–104.
doi: 10.1049/ip-f-2.1992.0012

4. Ge Z., Sun X., Ren W., Chen W., Xu G. Improved Algorithm of Radar Pulse Repetition Interval Deinterleaving based on Pulse Correlation. IEEE Access. 2019, vol. 7, pp. 30126–30134.
doi: 10.1109/ACCESS.2019.2901013

5. Liu Y., Chen Y., Sun S. A Radar Signal Sorting Algorithm based on PRI. 19th Intern. Symp. on Communications and Information Technologies (ISCIT). Ho Chi Minh City, Vietnam, 25–27 Sept. 2019. IEEE, 2019, pp. 144–149.
doi: 10.1109/ISCIT.2019.8905239

6. Zheleznyak V., Barkov A. Detection of Periodic Pulse Sequences and Their Estimation Period. Bull. of the Polotsk State University. Fundamental Sciences. 2012, no. 4, pp. 16–20. (In Russ.)

7. Barkov A., Zheleznyak V. A Method for Suppressing Noisy Pulse Sequences by Compensating. Electronics info. 2013, no. 96, pp. 212–216. (In Russ.)

8. Orsi R. J., Moore J. B., Mahony R. E. Spectrum Estimation of Interleaved Pulse Trains. IEEE Trans. on Signal Processing. 1999, vol. 47, iss. 6, pp. 1646–1653.
doi: 10.1109/78.765135

9. Ng S. A Technique for Spectral Component Location Within a FFT Resolution Cell. IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 84), San Diego, USA, 19–21 March 1984. IEEE, 1984, pp. 147–149.
doi: 10.1109/icassp.1984.1172774

10. Nelson D. Special Purpose Correlation Functions for Improved Signal Detection and Parameter Estimation. IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 93), Minneapolis, USA, 27–30 Apr. 1993. IEEE, 1993, pp. 73–76.
doi: 10.1109/ICASSP.1993.319597

11. Selim A., Paisana F., Arokkiar J. A., Zhang Y., Doyle L., DaSilva L. A. Spectrum Monitoring for Radar Bands Using Deep Convolutional Neural Networks. IEEE Global Communications Conf. (GLOBECOM 2017), Singapore, 4–8 Dec. 2017. IEEE, 2017, 6 p.
doi: 10.1109/GLOCOM.2017.8254105

12. Wang C., Sun L., Liu Z., Huang Z. A Radar Signal Deinterleaving Method Based on Semantic Segmentation with Neural Network. IEEE Trans. on Signal Processing. 2022, vol. 70, pp. 5806–5821.
doi: 10.1109/TSP.2022.3229630

13. Zhu M., Wang S., Li Y. Model-Based Representation and Deinterleaving of Mixed Radar Pulse Se-

quences With Neural Machine Translation Network. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. 2022, vol. 58, no. 3, pp. 1733–1752.

doi: 10.1109/TAES.2021.3122411

14. Han J. W., Park C. H. A Unified Method for Deinterleaving and PRI Modulation Recognition of Radar Pulses Based on Deep Neural Networks. IEEE Access. 2021, vol. 9, pp. 89360–89375.

doi: 10.1109/ACCESS.2021.3091309

15. Wang C., Wang Y., Li X., Ke D. A Deinterleaving Method for Mechanical-Scanning Radar Signals Based on Deep Learning. 7th Intern. Conf. on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP), Xi'an, China, 15–17 Apr. 2022. IEEE, 2022, pp. 138–143.

doi: 10.1109/ICSP54964.2022.9778808

16. Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin V. A. *Avtomatizirovannyye sistemy radiokontrolya i ikh komponenty* [Automated Radio Monitoring Systems and Their Components]. Moscow, Hotline-Telecom, 2017, 424 p. (In Russ.)

17. Liberti J. C., Rappaport T. S. *Smart Antennas for Wireless Communication: IS-95 and Third Generation CDMA Applications in IS-95*. New Jersey, Prentice Hall, 1999, 376 p.

18. Kulikov E. I., Trifonov A. P. *Otsenka parametrov signalov na fone pomekh* [Estimation of Signal Parameters in the Presence of Interference]. Moscow, Sov. Radio, 1978, 296 p. (In Russ.)

Information about the authors

Vladimir B. Manelis, Dr Sci. (Eng.) (2010), leading researcher of JSC "IRCOS". The author of more than 70 scientific publications. Area of expertise: communication systems; radiomonitoring; algorithms for receiving and processing signals.

Address: JSC "IRCOS", 101b, Rabochiy Ave., Voronezh 394024, Russia

E-mail: vldman@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-7077-3611>

Ivan S. Faustov, engineer in Radio-electronic devices and systems (2021, Voronezh State Technical University), Postgraduate student of the Department of Radio Engineering of Voronezh State Technical University, researcher of JSC "IRCOS". The author of 11 scientific publications. Area of expertise: radiomonitoring; algorithms for receiving and processing signals; digital signal processing.

Address: JSC "IRCOS", 101b, Rabochiy Ave., Voronezh 394024, Russia

E-mail: faustov.97@bk.ru

<https://orcid.org/0009-0005-3054-5540>

Vladimir A. Kozmin, Cand. Sci. (Eng) (1989), Associate Professor (1989), Director for scientific work of JSC "IRCOS". The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: radiomonitoring; algorithms for receiving and processing signals; digital signal processing.

Address: JSC "IRCOS", 101b, Rabochiy Ave., Voronezh 394024, Russia

E-mail: kozminva@ircoc.vrn.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5268-1114>
