



## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 336.14:352

### ПЕЛЕНГОВАНИЕ И РАСПОЗНАВАНИЕ СЛОЖНЫХ ДИСКРЕТНО-КОДИРОВАННЫХ (ШУМОПОДОБНЫХ) СИГНАЛОВ МАЛОЗАМЕТНЫХ РЛС НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Г. А. ТРАВИН<sup>1</sup>, В. В. ГОРЮНОВ<sup>2</sup>  
В. И. СУРОВЦЕВ<sup>2</sup>, И. Н. ПЕРЕПЕЛКИН<sup>1</sup>**

*<sup>1)</sup> Белгородский государственный  
национальный исследовательский  
университет*

*e-mail: travin@bsu.edu.ru  
e-mail: igorperepelkin@yandex.ru*

*<sup>2)</sup> ЗАО Научно-производственное  
предприятие «Спец-Радио»*

*e-mail: gorjunov@spetzradio.ru  
e-mail: reception@spetzradio.ru*

Обсуждается проблема обнаружения и пеленгования сигналов малозаметных РЛС современными средствами радиотехнической разведки. Приведены результаты разработки моноимпульсного пеленгатора таких сигналов на основе корреляционного обнаружителя. Даны рекомендации по решению задачи отождествления результатов измерений в многопозиционных системах пассивной радиолокации применительно к сигналам малозаметных РЛС.

Ключевые слова: шумоподобные сигналы, корреляционный обнаружитель, пеленгование, фазированная антенная решетка, отождествление результатов измерений.

#### **Введение.**

В активных РЛС при оптимальной обработке сигналов опорный сигнал известен, поэтому можно осуществить операцию «сжатия» сигналов. В этом случае качественные показатели обнаружения и измерения угловых координат зависят не от пиковой мощности, а от энергии сигнала. Иначе обстоит дело в пассивной радиолокации, поскольку обработка информации проводится при априорной неопределенности частотно-временной структуры сигналов. В этом случае качественные показатели обнаружения и измерения угловых координат (пеленгации) зависят не от энергии сигнала, а от его пиковой мощности. До настоящего времени средства радиотехнической разведки (РТР) успешно справлялись с решением указанных задач. Это объясняется тем, что принимаемые сигналы, например, излучаемые бортовыми РЛС, имеют достаточно большую пиковую мощность.

В конце прошлого столетия созданы малозаметные РЛС (МРЛС). В отличие от традиционных радиолокационных станций их сигналы имеют большую длительность и малую пиковую мощность, работает МРЛС почти в непрерывном режиме. В малозаметных РЛС применяют цифровой синтезатор сложных дискретно-кодированных сигналов (СДКС), который позволяет излучать сигналы, изменяющиеся от импульса к импульсу. Внутри импульса для кодирования используют фазовую или частотную модуляцию. В итоге сигнал оказывается шумоподобным. Для того, кто излучает такой сигнал, нет проблем для обработки принятого излучения, ожидаемый сигнал известен, априорная неопределенность минимальна. Но для станций РТР и многопозиционных систем пассивной радиолокации возникают проблемы. Именно по этой причине созданные в конце прошлого столетия РЛС называют малозаметными (в зарубежной печати их называют LPI-radar). Актуальной явля-



ется задача разработки новых методов и устройств пеленгования СДКС. Целью статьи является изложение результатов решения поставленной задачи.

### **Методы устройства пеленгования СДКС.**

Решение поставленной задачи целесообразно начинать с анализа известных, хорошо апробированных и внедренных в средства РТР методов и устройств амплитудного моноимпульсного пеленгования источников радиоизлучения (ИРИ). Для реализации метода, например в азимутальной плоскости, формируют две диаграммы направленности антенн (левая, правая) пересекающихся на уровне половинной мощности и создающих равносигнальное направление (РСН).

На выходе разностного устройства математическая модель сигнала может быть представлена в следующем виде:

$$S(\Theta) = \ln \frac{F(\Theta_0 + \Theta)}{F(\Theta_0 - \Theta)}, \quad (1)$$

где  $F(\Theta)$  – функция, описывающая диаграммы направленности (ДН) антенн,  $\Theta_0$  – угол, соответствующий РСН,  $\Theta$  – угловое отклонение от РСН. В каждый канал входит корреляционный обнаружитель.

Схема разработанного амплитудного моноимпульсного пеленгатора малозаметных РЛС [1] представлена на рис.1. Желание ослабить зависимость качественных показателей пеленгования от пиковой мощности сигналов МРЛС привело к идее искусственного формирования опорного сигнала. Для этого в каждом канале вместо одной приемной антенны необходимо установить две с совмещенными диаграммами направленности, в левом канале антенны 1,2, в правом – 3,4. Выходы каждой пары антенн через приемные устройства и АЦП поступают на коррелятор. Таким образом, для приема сигналов в каждом поддиапазоне частот моноимпульсный пеленгатор, например в азимутальной плоскости, должен иметь не две, а четыре антенны.

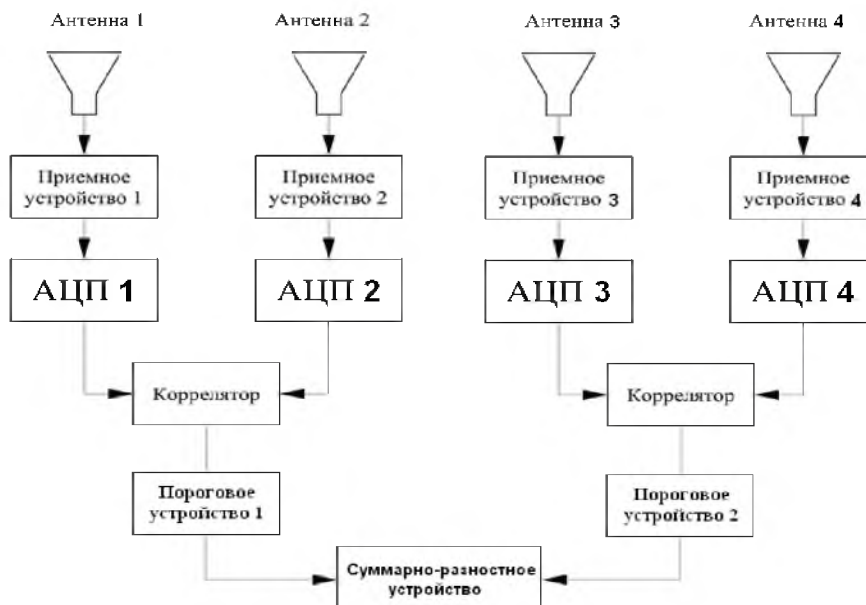


Рис. 1. Блок-схема амплитудного моноимпульсного пеленгатора малозаметных радиолокационных станций

Как видно из рис.1, пеленгатор сигналов МРЛС содержит два корреляционных обнаружителя, выходы которых подключены к суммарно-разностному устройству. Проведенные исследования показали, что математическая модель сигнала на выходе разностного устройства ничем не отличается от классического случая и описывается выражением (1). В связи с этим классические и корреляционные амплитудные методы пеленгования не имеют принципиальных различий, поскольку все определяется диаграммами направленности антенн  $F(\Theta)$  и отклонением сигналов от РСН. Это отклонение в классическом варианте определяется по результатам сравнения комплексных амплитуд сигналов на выходе антенн, при корреляционном методе – по корреляционным функциям.

Формирование дополнительных диаграмм направленности по сути дела эквивалентно формированию опорного сигнала, в результате чего потенциальные точности измерения угловых координат, как и в активных РЛС, зависят не от пиковой мощности, а в основном от энергии сигнала. В конечном итоге LPI-radar становятся заметными.

Таким образом, новый метод пеленгования принципиально мало отличается от известного. Однако существенно меняются устройства, его реализующие.

В существующих наземных средствах РТР применяют механическое вращение антенн, которое послужило основой для разработки корреляционного моноимпульсного пеленгатора. Такой пеленгатор имеет существенный недостаток – громоздкость. Кроме того, механические системы принципиально не обеспечивают требуемые точности определения пеленга.

Простейший корреляционный обнаружитель можно построить на основе измерения автокорреляционной функции принимаемого сигнала. Было проведено моделирование такого обнаружителя, структурная схема модели представлена на рис.2.

Выбранная структурная схема модели соответствует варианту определения наличия сигнала по корреляционным признакам в двухканальном пассивном локаторе. Генератор сигналов вырабатывает двоичные и бинарные амплитудно-фазоманипулированные СДКС, присущие сигналам МРЛС. Для имитации отсутствия сигнала эти последовательности временами прерываются. Частота дискретизации и число разрядов квантования для моделирования работы АЦП также изменяются в генераторе сигналов. Для получения последовательностей СДКС реализован алгоритм.

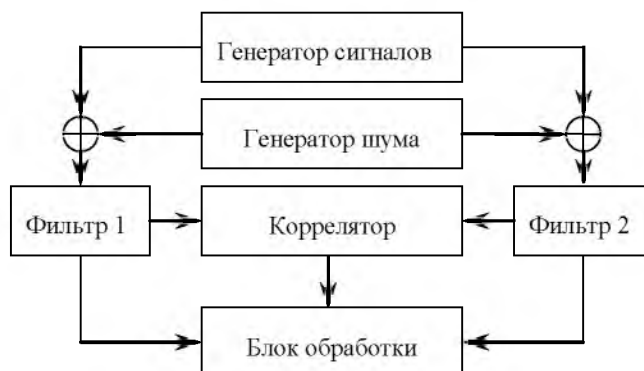


Рис. 2. Структурная схема модели

Недостатком измерителя автокорреляционной функции сигнала является влияние шумов приемного устройства на качественные показатели обнаружителя. Радикальным решением проблемы обнаружения и пеленгования сигналов МРЛС является построение моноимпульсного пеленгатора с фазированными антенными решетками (ФАР). Такие разработки ведутся в ЗАО «НПП «Спецрадио», получены обнадеживающие результаты. В таком пеленгаторе с корреляционным обнаружителем можно обеспечить гарантированный поиск сигнала по направлению и избавиться от ошибок пеленгования, присущим механическим системам.

Результаты моделирования, а именно прохождение сигнала через модель представлена на рис. 3.

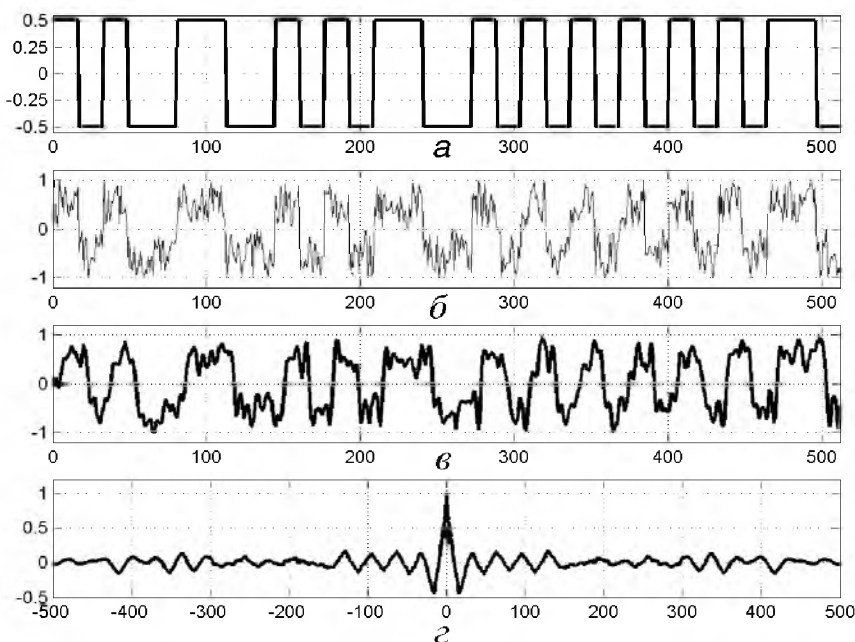


Рис. 3. Пример прохождения фрагмента бинарной последовательности через блоки модели  
а) сигнал на выходе генератора сигналов;  
б) сигнал с аддитивным нормальным шумом на выходе сумматора;



- в) сигнал с аддитивным шумом, прошедший фильтр нижних частот;  
г) корреляционная функция.

### Методика распознавания и отождествления СДКС.

В многопозиционных системах пассивной радиолокации результаты измеренных пеленгов поступают на центральный пункт управления. При объединении получаемой информации возникает проблема неоднозначности измерений. Сделан вывод о том, что для ее решения необходимо использовать признаковую информацию, например, сигнальную. К числу сигнальных признаков относятся: средняя несущая частота, длительность и период следования импульсов, закон модуляции сигнала [2]. По результатам проведенного анализа особенностей сигналов малозаметных РЛС установлено, что при оценивании их параметров указанные признаки не достаточно эффективны из-за их возможной схожести или невозможности определения. Для отождествления сигналов такого типа необходима разработка новых методов и алгоритмов обработки получаемой информации. Установлено, что применительно к СДКС перед отождествлением результатов измерений требуется решить задачу распознавания.

В качестве основного математического аппарата для решения задачи распознавания случайных, в том числе шумоподобных, сигналов предложено дискретное вейвлет-преобразование Хаара, которое является удобным и эффективным при цифровой обработке информации. Применительно к вейвлет-преобразованию Хаара [3] задача ставится следующим образом. Возьмем сигнал, например, из 8 отсчетов

$$x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8) \quad (2)$$

Все пространство  $V_0$  таких сигналов представляет собой пространство  $\mathbf{R}^2$ . Заметим, что это Евклидово пространство со скалярным произведением  $\langle \mathbf{X}, \mathbf{Y} \rangle = \mathbf{X}^T \mathbf{Y}$ . Это пространство описыва-

ется натуральным базисом  $\{\varphi_{0k}\}_{k=1}^8$ , где  $\varphi_{0k} = e_k$  —  $k$ -ый столбец матрицы  $\mathbf{E}^{(0)} = \mathbf{I}_8$ . Далее исходный сигнал разбивают на два подпространства и раскладывают в ортогональную сумму. При этом новый сигнал представлен в новом базисе. Декомпрессия сигнала и вейвлет-преобразование производится путем преобразования базиса. Умножение полученных матриц преобразования на соответствующие векторы координат дает исходный сигнал. Можно показать, что для сжатия и декомпрессии сигнала используются одни и те же матрицы преобразования.

Эффективность вейвлет-преобразования проиллюстрируем на элементарном примере. На рис. 4 представлены 3 вида простейших сигналов. Сделано их математическое описание, приведены значения выборок и вектор вейвлет-преобразования.

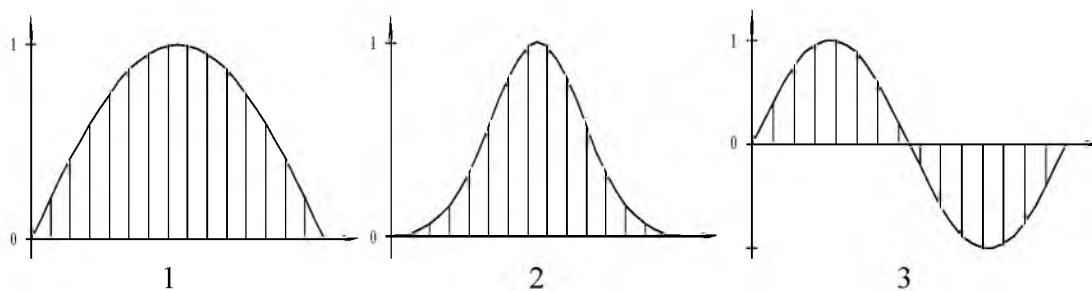


Рис. 4. Виды простейших сигналов

Обратимся сразу к самому простому признаку сходства. Сигналы 1 и 2 имеют положительное среднее значение, в то время как сигнал 3 имеет нулевое среднее. Поэтому без их восстановления можно сделать вывод о том, что сигнал 3 не похож на сигналы 1 и 2 по признаку среднего значения.

Далее необходим анализ сигналов 1 и 2. Для этого следует произвести первый шаг их восстановления. Установлено, что первый шаг восстановления не дал убедительного результата, поскольку сигналы симметричны относительно середины интервала выборок. Однако при первом шаге декомпрессии разделяются сигналы с различным средним значением относительно середины интервала выборок.

Далее необходимо продолжить восстановление сигналов 1 и 2. Для этого выделены соответствующие исходные данные для этих сигналов и представлены в числовой матричной форме. Сравнивая полученные векторы, находим, что соотношение средних составляющих проекции сигнала 1 с первой и четвертой для конкретного числового примера почти в 3,5 раза меньше, чем в проекции сигнала 2. Отсюда вновь приходим к выводу, что сигналы значительно отличаются по форме.



Чем ближе сигналы по форме, тем больше приходится проводить шагов восстановления. Таким образом, мы получаем систему распознавания сигналов с неопределенным числом признаков классов и неопределенным числом самих классов. Число признаков классов зависит лишь от величин выборки сигналов и в пределе равно ее длине. Эта особенность использования вейвлет-преобразования позволяет достаточно просто строить адаптивные системы распознавания «без учителя».

Другое немаловажное преимущество использования вейвлет-преобразования проявляется при передаче данных — если сигнал распознан по первым проекциям, передачу можно прервать в любой момент, т.е. не следует дожидаться получения полного пакета данных. Для примера, если распознаются сигналы с различным средним, а длина выборки равна 1024, то достаточно принять 1 значение выборки и освободить передатчик от передачи оставшихся 1023 значений.

**Выводы.**

Таким образом, в средствах РТР возникает проблема обнаружения и пеленгования сигналов МРЛС. На основе математического моделирования исследован корреляционный метод обнаружения сигналов МРЛС. Кроме того, установлено, что разработанная корреляционная математическая модель метода пеленгования мало отличается от известных, т.к. все определяется диаграммами направленности антенн и отклонением величины сигналов от РСН. В то же время устройства, реализующие разработанные методы, существенно отличаются.

Метод распознавания сигналов на основе вейвлет-преобразований может служить для получения обобщенных признаков характеристик стохастических сигналов. Вейвлет-преобразование является достаточно эффективным по количеству вычислительных операций, чем обеспечивает высокие качественные показатели распознавания сигналов в реальном масштабе времени, а, следовательно, и решение задачи отождествления результатов измерений.

**Список литературы**

1. Травин Г.А. Устройство пеленгации малозаметных радиолокационных станций / Травин Г.А., Перепелкин И.Н., Травин М.Г., Терешко В.М. // Патент № 2343500 от 10.08.2009.
2. A. Bultheel. Wavelets with applications in signal and image processing. Academic Press, Boston, 2002
3. Kadar I. Passiv multisensor multitarget feature-aided unconstrained tracking: a geometric perspective.- Consultant, Northrop Grumman Corporation Engineering and Technology Bethpage, New York 11714 USA.

**DIRECTION FINDING AND RECOGNITION OF COMPLEX DISCRETE-CODED (PSEUDONOISE) LPI-RADARS SIGNALS BY USING COMPUTER TECHNOLOGIES**

**G. A. TRAVIN<sup>1</sup>, V. V. GORYUNOV<sup>2</sup>  
V. I. SUROVCEV<sup>2</sup>, I. N. PEREPELKIN<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup> Belgorod National Research University*

*e-mail: travin@bsu.edu.ru  
e-mail: igorperepelkin@yandex.ru*

*<sup>2</sup> Closed Corporation Scientific production enterprise «SPETZ-RADIO»*

*e-mail: gorjunov@spetzradio.ru  
e-mail: reception@spetzradio.ru*

The problem of detection and direction finding of complex discrete-coded LPI-radars signals is discussed by modern means of radio intelligence. Results of working out of a monopulse direction finder of such signals on the basis of correlation detector are resulted. Recommendations about the decision of an measurements results identification problem in multiaxis passive radar-location systems with reference to LPI-radars signals are given.

Keywords: pseudonoise signals, correlation detector, direction finding, phased array, results of measurements identification.