

УДК 621.37

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА СИГНАЛОВ МАЛОЗАМЕТНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИХ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

А.В. Коротков

Часто для анализа сигналов малоаметных радиолокационных станций применение традиционных методов, основанных только на различных модификациях преобразования Фурье, оказывается малоэффективным. Показано, что наибольший эффект при проведении частотно-временного анализа сигналов малоаметных радиолокационных станций достигается при совместном применении нескольких частотно-временных преобразований.

Ключевые слова: частотно-временной анализ, радиолокационные сигналы, вейвлет-анализ, преобразование Вигнера.

Введение

В настоящее время большое значение уделяется развитию радиолокационных станций с низкой вероятностью перехвата, которые отличаются специальными мерами снижения мощности передатчика и уровня боковых лепестков, а также существенным увеличением полосы пропускания. При этом энергия радиоизлучения распределяется достаточно равномерно во всей полосе частот с уровнем, не превышающим мощность собственных шумов радиоприемных устройств. Данные радиолокационные станции (РЛС) получили название малоаметных (МРЛС). Примеры МРЛС приведены в таблице.

Название	Назначение	Мощность, Вт	Базирование	Страна
SCOUT VARIANT PILOT	обзор, навигация обзор обзор, навигация	0,01–1 1 0,01–1	морское	Нидерланды
AN/APQ-181 AN/APS-147 AN/APN-237A	многофункциональная многофункциональная навигационная	– – –	авиационное	США
PAGE SQUIRE EL/M-2140 MRSR	ПВО обзор обзор ПВО	20 0,01–1 70	наземное	Нидерланды Нидерланды Израиль США

Таблица. Примеры МРЛС

По мнению зарубежных экспертов, использование МРЛС является одним из ключевых подходов к решению задач обнаружения и распознавания малоразмерных воздушных, а также наземных целей, замаскированных или находящихся в естественных укрытиях.

Основными видами внутриимпульсной модуляции, применяемой в МРЛС, являются частотная модуляция (ЧМ), частотная и фазовая манипуляция и их комбинации. Наиболее распространенной является ЧМ с линейно изменяющейся частотой (ЛЧМ). Для кодирования фазы зондирующего сигнала широко используются коды Баркера, многофазные коды Франка, P1, P2, P3 и P4, а также многопозиционные коды T1, T2, T3 и T4 [1]. Интенсивное использование ведущими зарубежными странами современных МРЛС приводит к необходимости совершенствования известных и разработки новых методов обработки их сигналов с целью последующего распознавания типа источника излучения.

В настоящее время в средствах радиотехнического контроля для решения этой задачи используется процедура частотно-временного анализа, в основе которого лежит реализация динамического (оконного) преобразования Фурье (ДПФ) [2]. Оно является предпочтительным при анализе как широкополосных, так и узкополосных излучений. Но из-за невозможности получения одновременно высокого разрешения по времени и частоте применения только данного преобразования не позволяет получить набор признаков, обеспечивающих достоверное распознавание типа РЛС. Для разрешения этого противоречия в современной математике разработан ряд методов анализа нестационарных сигналов (к этому классу сигналов относятся и квазинепрерывные излучения МРЛС). Широкое применение получили различные виды вейвлет-анализа [3] и преобразование Вигнера. Вместе с тем, каждое отдельно взятое преобразование имеет свои сильные и слабые стороны. Представляется целесообразным применение комплексного метода анализа сигналов МРЛС, который позволил бы компенсировать недостатки одних преобразований достоинствами других.

Предлагается в качестве базового метода использовать оконное ДПФ, а уточнение производить с помощью вейвлет-преобразования (ВП) и преобразования Вигнера (ПВ).

Комбинированный метод анализа сигналов

Предлагается для анализа сигналов МРЛС применение системного подхода, который базируется на совместном применении ряда частотно-временных преобразований – ВП, ДПФ и ПВ. Кратко рассмотрим каждое из них.

Частотно-временное представление сигнала на основе ВП. ВП выполняется при помощи банка квадратурно-зеркальных фильтров (КЗФ) [4]. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 1.

Вначале выполняется свертка входного сигнала с импульсными характеристиками высоко- и низкочастотных фильтров (h и g). Таким образом, на каждом уровне входной сигнал раскладывается на высоко- и низкочастотные составляющие. Далее следует операция прореживания в два раза. Выход каждого уровня преобразования образует матрицу. Разрешение по частоте и времени определяются формулами

$$\Delta f = \frac{f_s}{2(2^i - 1)}, \Delta t = \frac{n}{f_s(2^{L-i} - 1)},$$

где f_s – частота дискретизации; L – число уровней банка КЗФ; i – номер текущего уровня; n – количество отсчетов входного сигнала.

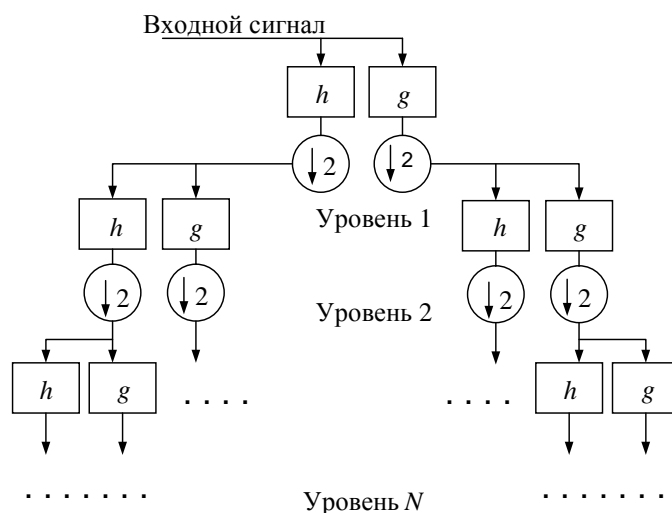


Рис. 1. Схема ВП на основе банка КЗФ

В качестве фильтра предлагается использование модифицированного sinc-фильтра. Коэффициенты фильтра рассчитываются по следующей формуле:

$$h(n) = \sqrt{\frac{S}{2}} \operatorname{sinc}\left(\frac{n+0,5}{C}\right) \omega(n),$$

где C – коэффициент сжатия; S – коэффициент масштабирования, $\omega(n)$ – окно Хемминга. Путем соответствующего сравнения выходных матриц ВП можно определить участки концентрации энергии входного сигнала и оценить их положение и протяженность с высоким разрешением как по частоте, так и по времени. Используя данный подход, можно декомпозировать сигнал и определить его параметры – ширину спектра, несущую частоту и закон модуляции. Эта информация может быть в дальнейшем использована для принятия решения о типе источника излучения.

Частотно-временное представление сигнала на основе ПВ. ПВ [5], введенное в 1932 г. Е. Вигнером в задачах квантовой термодинамики и в 1948 г. использованное Дж. Виллем при обработке сигналов, имеет вид

$$P_V[f(t)] = P_V f(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f\left(\tau + \frac{t}{2}\right) f^*\left(\tau - \frac{t}{2}\right) e^{-j\omega t} dt.$$

Оно представляет собой преобразование Фурье от произведения $f(\tau + t/2)f^*(\tau - t/2)$, где $f(t)$ – анализируемый сигнал, а символ «*» обозначает операцию комплексного сопряжения. Для дискретного сигнала $x(l)$ ПВ с прямоугольным окном длины $2N$ можно записать так:

$$W(l, \omega) = 2 \sum_{n=-N}^{N-1} x(l+n)x^*(l-n)e^{-j2\omega n}, \tag{1}$$

где $l = -N \dots (N-1)$; $\omega = \frac{\pi k}{2N}$; $k = 0, 1, 2 \dots (2N-1)$.

Используя подстановку $f_l(n) = x(l+n)x^*(l-n)$ и учитывая, что $f_l(n) = f_l^*(-n)$, формулу (1) представим в виде

$$W(l, k) = 2 \sum_{n=0}^{2N-1} f_l'(n) e^{-j \frac{\pi k n}{N}},$$

где

$$f_l'(n) = \begin{cases} f_l(n), & 0 \leq n \leq N-1; \\ 0, & n = N; \\ f_l(n-2N), & N+1 \leq n \leq 2N-1. \end{cases}$$

ПВ позволяет получить информацию о том, в какие моменты времени и на каких частотах сосредоточена энергия, содержащаяся в исследуемом сигнале, а также измерить некоторые его параметры, такие как ширина спектра, период модуляции, длину кодовой последовательности.

ПВ для любого многокомпонентного сигнала характеризуется наличием интерференционных составляющих с такой же амплитудой, как и у реального сигнала, и частотой, равной среднему значению двух истинных частот.

Применение комбинированного метода анализа сигналов

В качестве примера рассмотрим применение комбинированного метода для анализа следующих сигналов:

1. частота $f_n = 2,1$ ГГц; полоса сигнала 250 МГц; код Баркера (рис. 2).
2. полоса сигнала 1 ГГц; код Франка $N=4$ (рис. 3).
3. сигнал представляет собой четыре ЛЧМ участка с периодом 0,1 мкс, девиация частоты 1 ГГц (рис. 4).

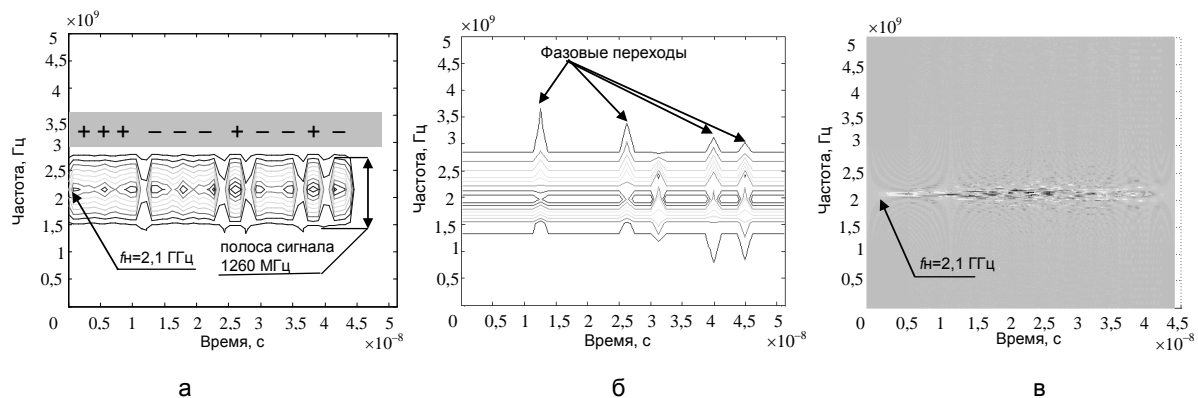


Рис. 2. Код Баркера – ВП уровень 3 (а); ДПФ на 11 точек (б); ПВ (в)

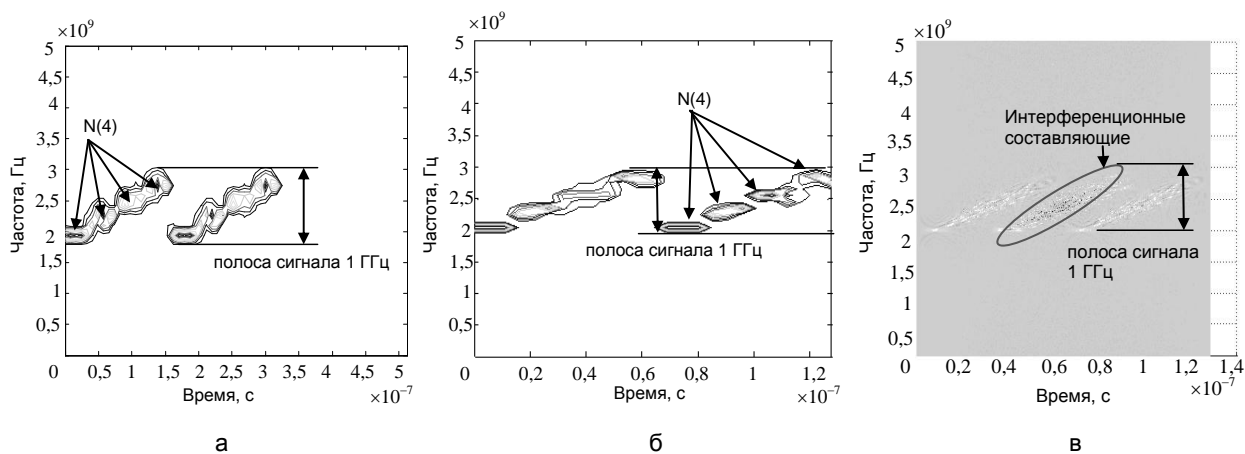


Рис. 3. Код Франка – ВП уровень 5 (а); ДПФ на 50 точек (б); ПВ (в)

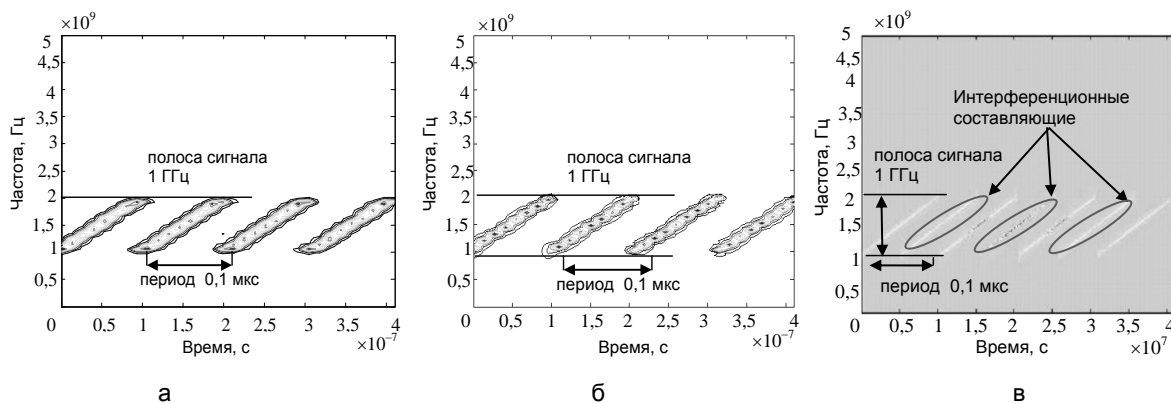


Рис. 4. ЛЧМ сигнал – ВП уровень 7 (а); ДПФ на 128 точек (б); ПВ (в)

Частота дискретизации всех сигналов 10 ГГц.

Проведенный анализ позволил сделать следующие выводы.

1. В условиях априорной неопределенности, применение ВП требует просмотра нескольких уровней декомпозиции и выбора наиболее информативного. Частотная манипуляция может быть лучше определена на высших уровнях разложения ВП, а фазовая – на низших. В ряде случаев ВП обеспечивает лучшее частотно-временное разрешение, чем преобразование Фурье (рис. 2, а, б).
2. Преобразование Вигнера для любого многокомпонентного сигнала характеризуется наличием интерференционных членов с такой же амплитудой, как и у реального сигнала, и частотой, равной среднему значению двух истинных частот (рис. 3, в; рис. 4, в).
3. Все рассмотренные выше преобразования позволяют определить основные параметры ЛЧМ сигналов (рис. 4).
4. Применение ВП предпочтительно для анализа фазоманипулированных сигналов, в то время как использование ПВ для таких сигналов представляется малоэффективным (рис. 2, в).

Заключение

Предложен комплексный метод анализа сигналов малоаметных радиолокационных станций, основанный на совместном применении нескольких частотно-временных преобразований. Продемонстрировано, что этот метод позволяет компенсировать недостатки одних преобразований достоинствами других. Отмечено, что только одновременное использование различных частотно-временных преобразований дает возможность выявить все локальные особенности исследуемого сигнала. Таким образом, применение данного метода позволит расширить класс анализируемых средствами радиотехнического контроля сигналов и получить первичные признаки для их последующего распознавания.

Литература

1. Pace Phillip E. Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar. – Artech House, 2009. – 857 p.
2. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 448 с.
3. Казначеева А.О., Власюк А.В., Кудряшов А.В. Возможности вейвлет-преобразований в повышении точности измерений параметров диффузии в МРТ // научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 5. – С. 86–91.
4. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
5. Mecklenbrauker W., Hlawatsch F. The Wigner Distribution: Theory and Applications in Signal Processing. – Amsterdam: Elsevier, 1997. – 480 p.

Коротков Андрей Владимирович

– ОАО «НИИ Вектор», инженер, Andrey.k0206516@mail.ru