

# КУМУЛЯНТНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Баев А.Б., Кузнецов Ю.В., Александров А.В.

Московский Государственный авиационный институт (Технический университет)  
125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4  
Тел.: (095) 158-40-47  
E-mail: mai\_k405@mtu-net.ru

**Реферат.** В работе представлен метод оценивания информационных параметров сверхширокополосных сигналов, основанный на использовании статистик высокого порядка. Показано, что применение кумулянтов четвертого порядка позволяет снизить порог работоспособности методов цифровой обработки сигналов сверхширокополосной радиолокации вплоть до отношения сигнал/шум порядка  $-5$  дБ при гауссовском шуме.

## 1. Введение

Сверхширокополосная (СШП) радиолокация включает в себя методы и системы обнаружения, измерения параметров и идентификации целей (объектов), при использовании сигналов, спектр которых имеет сверхширокую относительную полосу частот. Эти сигналы в литературе называют видео сигналами, импульсами без несущей частоты, несинусоидальными сигналами и т.п., но все они удовлетворяют условию сверхширокополосности [1]:

$$2 \frac{f_g - f_n}{f_g + f_n} \geq 0,25, \quad (1)$$

где  $f_n, f_g$  – нижняя и верхняя граничные частоты в спектре сигнала.

Согласно методу сингулярного разложения, предложенного Баумом [2], электромагнитное поле, рассеянное целью в СШП диапазоне, можно описать с использованием особых точек (нулей и полюсов), расположенных в плоскости комплексной частоты. Координаты особых точек определяются геометрической формой, размерами, материалом и ракурсом объекта относительно возбуждающей волны. Таким образом, свойства объекта в СШП диапазоне можно описать его передаточной функцией (ПФ):

$$H(p) = A \sum_{i=1}^M (p - p_{oi}) / \sum_{k=1}^K (p - p_{nk}), \quad (2)$$

где  $p_o$  – нули ПФ;  $p_{nk} = \sigma_k + i\omega_k$  – полюса ПФ;  $K$  – число собственных частот (резонансов);  $M$  – число нулей ПФ;  $A$  – константа.

Резонансная модель, основанная на методе сингулярных разложений, содержит в себе параметры двух типов [3]: зависящие от возбуждающих сигналов (поляризации, формы, направления облучения) и независящие от них (собственные комплексные резонансные частоты рассеяния). Эти частоты определяются в основном геометрическими размерами и формой объектов, практически не зависят от ракурса и могут быть использованы для распознавания целей.

Обработка СШП сигналов, рассеянных целью, заключается в определении параметров (координат) некоторого ограниченного числа комплексных резонансных частот, которые затем используются для идентификации объектов (целей).

Данная работа посвящена вопросам обработки сигналов сверхширокополосной радиолокации с использованием кумулянтов высокого порядка (вплоть до четвертого). Представлены результаты оценки параметров резонансной модели методом расщепления функции с использованием кумулянтной обработки. Показано, что использование кумулянтов четвертого порядка позволяет значительно уменьшить уровень гауссовского шума, присутствующего в данных, что приводит к улучшению качества оценки параметров резонансной модели.



Рис. 1. Взаимосвязь трех областей рассеяния радиолокационных объектов

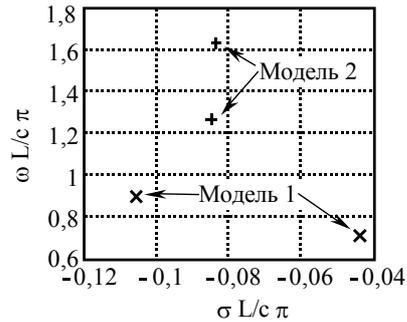


Рис. 2. Комплексные полюса на  $p$ -плоскости для моделей самолетов

## 2. Резонансная модель собственных излучений объектов

Особенности радиолокационного рассеяния объектов определяются соотношением между его геометрическими размерами и длиной волны возбуждающего электромагнитного поля. Можно условно выделить три режима радиолокационного рассеяния: Релеевский, резонансный и оптический. Их границы условно показаны на рис. 1. Если полоса частот спектра зондирующего сигнала попадает в резонансную область, то можно воспользоваться резонансной моделью собственных излучений, согласно которой сигнал на выходе приемника СШП радиолокатора можно представить в виде

$$y_n = x_n + w_n = \sum_{k=1}^K A_k e^{-\sigma_k n T_0} \cos(2\pi f_k n T_0 + \varphi_k) + w_n, \quad (3)$$

где  $n = 0, 1, \dots, N-1$  – номера отсчетов сигнала  $y_n$ ;  $N$  – число отсчетов данных;  $K$  – число гармонических составляющих сигнала;  $w_n$  – отсчеты шума;  $A_k$ ,  $\sigma_k$ ,  $f_k$  и  $\varphi_k$  – значения амплитуд, коэффициентов затухания, частот и начальных фаз компонент сигнала соответственно;  $T_0$  – период дискретизации.

Для проведения сравнительного анализа методов цифровой обработки сверхширокополосных сигналов с использованием кумулянтов высокого порядка нами были выбраны резонансные частоты [1], соответствующие резонансам масштабных моделей самолетов. На рис. 2 показаны полюса на  $p$ -плоскости для этих моделей самолетов. На рисунке показаны относительные значения полюсов  $p_k = (\sigma_k + j\omega_k)L/c\pi$ , где  $L$  – характерный размер объекта;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/сек – скорость света.

На рис. 3 показаны частотные характеристики моделей самолетов. Различие в спектре этих моделей позволяет сделать предположение о возможности проведения процесса идентификации с использованием набора из двух полюсов различных моделей. Уровень шума будем задавать величиной дисперсии. Отношение сигнал/шум при этом будем оценивать по формуле:

$$q = 10 \lg \left\{ \frac{1}{N \cdot y_v^2} \sum_{n=0}^{N-1} x_n^2 \right\}, \quad (4)$$

где  $y_v^2$  – дисперсия шума;  $N$  – число отсчетов сигнала. Реализация сигнала с шумом при отношении сигнал/шум  $q = 0$  дБ представлена на рис. 4.

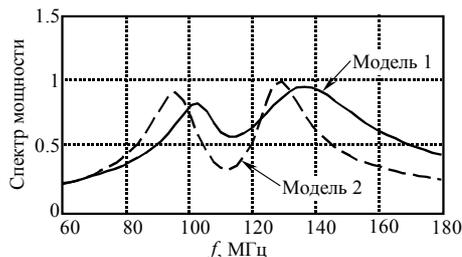


Рис. 3. Частотные характеристики для моделей самолетов

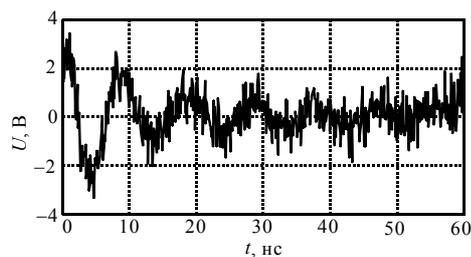


Рис. 4. Отклик первой модели при отношении сигнал/шум  $q = 0$  дБ

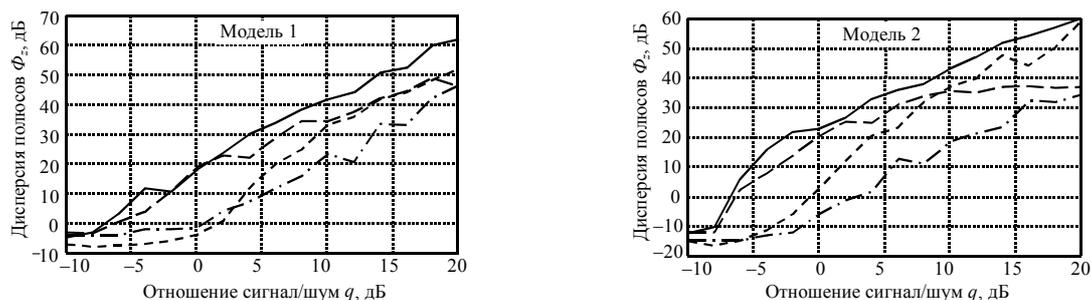


Рис. 5. Зависимость дисперсии полюсов от отношения сигнал/шум. «- - -» – исходный сигнал; «- · - ·» – АКФ; «· · ·» – кумулянты третьего порядка; «—» – кумулянты четвертого порядка

### 3. Результаты численного моделирования

С целью количественного сравнения точности оценки полюсов резонансной модели с использованием кумулянтов высокого порядка будем использовать суммарную дисперсию полюсов

$$\Phi_z = -10 \cdot \lg \sum_{i=1}^{50} \left\{ \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{|z_{k,i} - z_k|^2}{|\alpha_k|^2} \right\}, \quad (5)$$

где  $z_k$  –  $k$ -й полюс сигнала,  $z_{k,i}$  – оценка  $k$ -го полюс сигнала, определенная в результате  $i$ -го опыта,  $\alpha_k$  – коэффициент затухания  $k$ -го полюса.

По величине суммарной дисперсии полюсов можно судить о точности оценки полюсов резонансной модели. Чем больше по своему абсолютному значению величина  $\Phi_z$ , тем выше точность.

На рис. 5 представлены зависимости дисперсии полюсов резонансных моделей от отношения сигнал/шум, полученные для кумулянтов высокого порядка от сигналов сверхширокополосного радиолокатора. Из рисунков видно, что при всех отношениях сигнал/шум полюса резонансной модели лучше всего определяются с помощью одномерного сечения  $c_4^y(\tau, 0, 0)$  кумулянтов четвертого порядка от исходного сигнала.

Из графиков видно, что если за граничную точность оценки полюсов принять  $\Phi_z = 0$  дБ, то граничное значение отношения сигнал/шум, при котором еще возможна идентификация объектов составляет величину порядка  $q = -5$  дБ. При этом точность оценки полюсов с использованием статистик высокого порядка на 15-20 дБ выше по сравнению с традиционным методом расщепления функции.

### 4. Заключение

В данной статье проведен сравнительный анализ методов цифровой обработки сигналов сверхширокополосной радиолокации совместно с кумулянтами высокого порядка. При выбранных моделях полезного сигнала и шума наиболее перспективным методом, обеспечивающим наивысшую точность при одинаковых аппаратно-временных затратах, является метод, основанный на использовании одномерного сечения кумулянтов четвертого порядка.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что использование статистик четвертого порядка совместно с традиционными методами приводит к увеличению точности оценивания полюсов на 15-20 дБ по сравнению с традиционным алгоритмом расщепления функции. При этом шумовая граница работоспособности методов уменьшается до величины отношения сигнал/шум  $q = -5$  дБ.

### Библиография

1. Taylor, James D., *Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems* / editor Taylor, James D., CRC Press, 1995.
2. S. Lawrence Marple, Jr., *Digital Spectral Analysis with Applications*, Moscow: "MIR", 1990.
3. Ю.В. Кузнецов, Щекатуров В.Ю., Баев А.Б., «Сравнительная характеристика алгоритмов оценки параметров резонансной модели объектов», *Вестник МАИ*, том 4, № 2, М.: МАИ, 1998 г.