

А.В. Бархатов

УМЕНЬШЕНИЕ УРОВНЯ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ В СПЕКТРЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ С ПРОПУСКАМИ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

В радиолокации довольно часто приходится иметь дело с пространственно-временными сигналами, в которых есть пропуски. Спектр таких сигналов, оцениваемый с помощью преобразования Фурье, имеет высокие боковые лепестки [1, 2, 3]. Для понижения уровня боковых лепестков можно использовать весовые функции, но их поиск для сигналов с пропусками не всегда приводит к положительному результату. Известные весовые функции, такие как окна Ханна, Хэмминга, Блэкмана и другие, рассчитаны на то, что отсчеты сигнала на интервале наблюдения следуют друг за другом с постоянным шагом, без пропусков.

Предлагаемый метод позволяет применять стандартные весовые функции к сигналам с пропусками, подавляя боковые лепестки до уровня, определяемого окном. Описание метода даётся на примере антенной решетки.

Пусть имеется антенная решетка (рис. 1), элементы которой располагаются на одной линии с шагом d . Наблюдаемый пространственный сигнал обозначим как $g(n)$, $1 \leq n \leq N$, N - число элементов антенной решетки. Угловой спектр вычисляется по формуле [1]:

$$S(m) = \sum_{n=1}^N w(n)g(n)e^{-j\frac{2\pi(m-1)}{N}(n-1)}, \quad 1 \leq m \leq N, \quad (1)$$

где $w(n)$ – весовая функция, предназначенная для уменьшения уровня боковых лепестков.

Пересчет значения m в значения угла выполняется по формуле

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d} \frac{(m-1)}{N}\right). \quad (2)$$

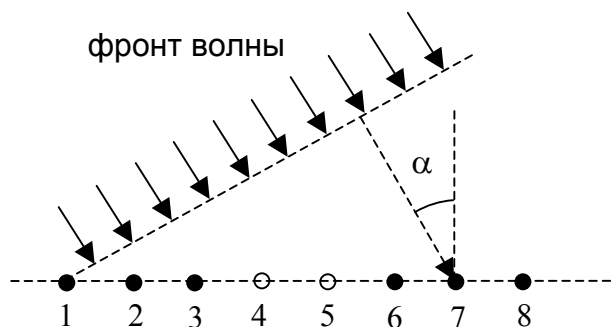


Рис. 1

Сигнал $g(n)$ имеет пропуски из-за того, что отсутствуют элементы антенной решетки. В примере на рис. 1 они показаны пустыми кружками (элементы 4 и 5).

Задача состоит в получении *наиболее точной оценки углового спектра при условии минимизации энергетических потерь*.

Самый простой подход, очевидно, заключается в подстановке в пропуски $g(n)$ нулей. Тогда при вычислении спектра по формуле (1) обеспечивается когерентное накопление всех имеющихся отсчетов наблюдаемого сигнала (потери энергии нулевые или, в случае использования окна, определяются только окном). При наличии в $g(n)$ одиночной гармонической составляющей последующее взятие модуля спектра и сравнение результата с порогом, выбранным исходя из требуемой вероятности ложной тревоги, реализуют оптимальную по критерию Неймана-Пирсона процедуру обнаружения [4]. К сожалению, такая оценка углового спектра содержит высокие боковые лепестки, и ее нельзя назвать точной. При наличии в сигнале нескольких гармонических составляющих высокие боковые лепестки мощных составляющих будут перекрывать слабые составляющие, затрудняя или делая невозможным их обнаружение.

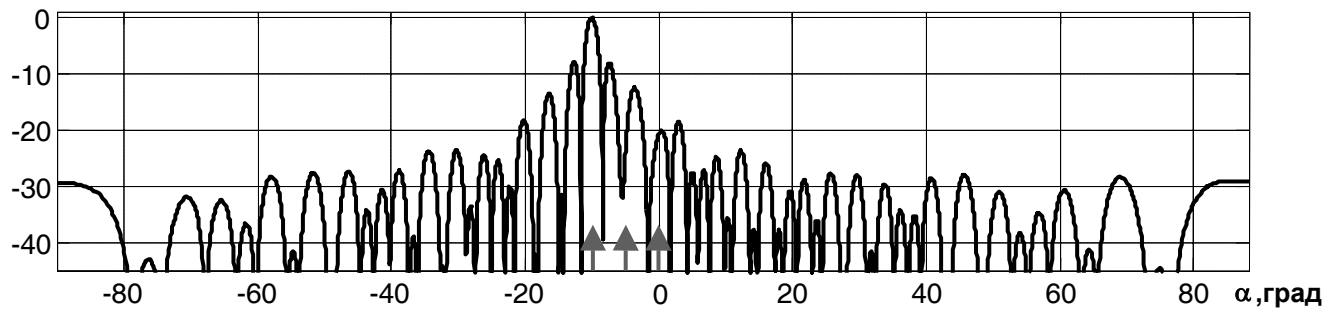
Так как подстановка нулей не позволяет решить поставленную задачу, на практике используют другой подход. Разбивают сигнал $g(n)$ на сегменты (участки) без пропусков, обрабатывают сегменты по отдельности, а затем выполняют межсегментную обработку. При этом межсегментная обработка выполняется некогерентно, что приводит к дополнительным энергетическим потерям.

В качестве примера на рис. 2 показаны нормированные оценки спектров, вычисленные при подстановке нулей в пропуск (верхний график) и при межсегментной обработке (нижний график), для одного и того же сигнала $g(n)$, состоящего из двух, разделенных пропуском сегментов длиной 28 отсчетов каждый. Сигнал $g(n)$ получен следующим образом. Как известно, монохроматическая волна длиной λ , падая на решетку под углом α , имеет форму экспоненциальной функции вида $\exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}nd \sin \alpha\right)$ [5]. Если на апертуру одновременно падают K волн, отраженных от нескольких целей, математическая модель суммарного дискретного сигнала:

$$s(n) = \sum_{i=1}^K A_i \exp\left(j\left(\frac{2\pi}{\lambda}nd \sin \alpha_i + \varphi_{0i}\right)\right), \quad 1 \leq n \leq N, \quad (3)$$

где A_i , α_i , φ_{0i} – соответственно амплитуда, угловая координата и начальная фаза i -ого сигнала.

$|S(\alpha)|$, дБ



$|S(\alpha)|_1 + |S(\alpha)|_2$, дБ

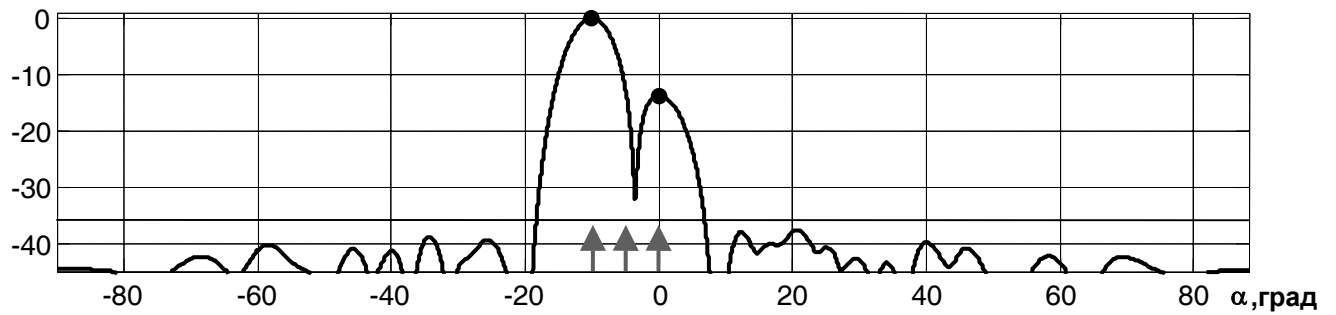


Рис. 2

Сигнал $g(n)$ смоделирован в соответствии с формулой (3) с добавлением белого гауссовского шума мощностью $P_{ш} = 1$. При этом число сигнальных составляющих $K=3$, а их параметры: амплитуда $A_1 = 50$, угол $\alpha_1 = -10^\circ$, фаза $\varphi_{01} = 0,5$ рад, $A_2 = 10$, $\alpha_2 = 0^\circ$, $\varphi_{02} = 2,33$ рад, $A_3 = 1$, $\alpha_3 = -5^\circ$, $\varphi_{03} = 1,76$ рад.

На верхнем графике рис. 2 показан модуль оценки углового спектра (1), вычисленной при подстановке в пропуск $g(n)$ нулей. Дополнительно стрелками на графике отмечено угловое положение всех трех составляющих сигнала $g(n)$. Весовая функция $w(n)$ соответствует прямоугольному окну ($w(n)=1$ для всех n), применение других известных окон расширяет основной лепесток и не приводит к снижению уровня боковых лепестков. В этой оценке спектра можно выделить только одну, самую сильную составляющую, две другие скрыты боковыми лепестками.

На нижнем графике рис. 2 показана сумма модулей оценок спектров, вычисленных по формуле (1) отдельно для первого и для второго сегментов. Для взвешивания использовалось окно Хэмминга, компромиссное с точки зрения сочетания максимального уровня боковых лепестков и ширины основного лепестка (уширение основного лепестка по сравнению с прямоугольным окном – 1,36, максимальный уровень боковых лепестков – минус 43 дБ [5]). Если зафиксировать порог обнаружения на уровне, который соответствует вероятности ложной тревоги 10^{-3} (на рисунке он показан сплошной горизонтальной линией), и выделить локальные максимумы на участках графика, превышающих пороговое значение, то будут обнаружены две сигнальные составляющие на углах $\hat{\alpha}_1 = -9,98^\circ$ и $\hat{\alpha}_2 = 0,17^\circ$ (точки на рисунке). Третья, самая слабая сигнальная составляющая не обнаружена.

Предлагаемый в статье метод обработки сигналов с пропусками обеспечивает нулевые или обусловленные только применением оконной функции энергетические потери, как и способ с подстановкой в пропуски нулей, но при этом позволяет получать оценку спектра с низкими боковыми лепестками, аналогичную оценкам, получаемым с помощью многосегментных алгоритмов. Суть метода заключается в том, что в пропуски подставляются не нули, а отсчеты модельного сигнала $s(n)$, созданного на основе наблюдаемого сигнала $g(n)$. Последнее предусматривает, что наблюдаемый сигнал должен подвергаться предварительному анализу. Модельный сигнал рассчитывается по формуле (3). Следовательно, предварительный анализ наблюдаемого сигнала должна заключаться в обнаружении сигнальных составляющих и измерении их параметров A_i , α_i , φ_{0i} .

Измерение амплитуд и фаз сигнальных составляющих в приведенном выше примере (рис. 2) дает следующий результат:

$$\hat{A}_1 = 48,49, \hat{\varphi}_{01} = 0,47,$$

$$\hat{A}_2 = 9,4, \hat{\varphi}_{02} = 2,26.$$

Абсолютные значения амплитуд оценивались по ненормированному усредненному между сегментами спектру в точках $\hat{\alpha}_1 = -9,98^\circ$ и $\hat{\alpha}_2 = 0,17^\circ$. При этом учитывалось, что применение окна Хэмминга приводит к потере 46 процентов энергии. Фаза оценивалась по усредненному фазовому спектру.

Если заполнить пропуски $g(n)$ отсчетами $s(n)$ и вычислить оценку спектра с помощью преобразования Фурье, предварительно умножив $g(n)$ на окно Хэмминга (выражение (3)), то получится результат, показанный на рис. 3.

На графике рис. 3 наблюдаются все три сигнальные составляющие, и в этом смысле данная оценка углового спектра является наиболее точной из всех представленных оценок (рис. 2 и 3). Уровень боковых лепестков самой мощной составляющей соответствует используемой оконной функции. Все отсчеты наблюдаемого сигнала $g(n)$ суммируются когерентно. Таким образом, предлагаемый метод решает поставленную задачу получения наиболее точной оценки углового спектра при условии минимизации энергетических потерь.

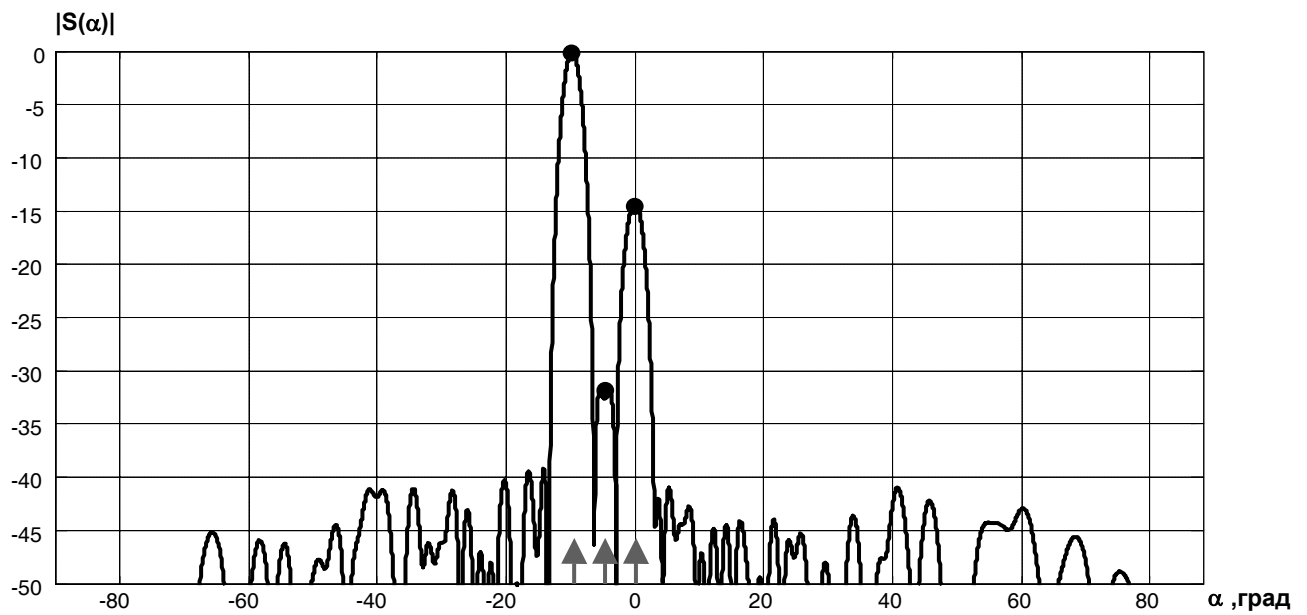


Рис. 3

В заключение хотелось бы отметить, что предварительное обнаружение более мощных сигнальных составляющих с последующим продлением сигнала за пределы реально существующей пространственной или временной апертуры может иметь полезное применение и в тех случаях, когда в сигнале нет пропусков. При этом реализуется улучшенное различение слабых сигнальных составляющих на фоне мощных.

Литература

1. Антенные решетки. Методы расчета и проектирования: Обзор зарубежных работ / Под ред. Л. С. Бененсона. М.: Советское радио, 1966. 368 с.

2. Вендик О.Г. Антенны с немеханическим движением луча (введение в теорию). М.: Советское радио, 1965. 360 с.
3. Кутузов В.М. Распределение спектра зондирующего сигнала РЛС в свободных от помех участках частотного диапазона // Сб. науч. докладов Международного симпозиума по электромагнитной совместимости "ЭМС-93". Ч. 2. СПб., 1993.
4. Kay S. Detection of a sinusoid in white noise by autoregressive spectrum analysis // Int. conf. ICASP-80. Proceed., v.1, Denver.-N.Y.: 1980.
5. Марпл-мл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 547 с.