

УДК 621.396.96

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИХ АДАПТИВНЫХ МЕТОДОВ
СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГЛУБИННОГО ПОРТРЕТА
ЗОНДИРУЕМОГО УЧАСТКА ПОВЕРХНОСТИ**

А.В. ГРИНКЕВИЧ

*Научно-исследовательский институт Вооруженных сил Республики Беларусь
Калиновского, 4, Минск, 220103, Беларусь**Поступила в редакцию 10 января 2006*

Нелинейные методы "сверхразрешения", разработанные для спектрального анализа, с успехом могут применяться и в других приложениях, в частности в подповерхностной радиолокации для получения частотного радиолокационного портрета заглубленного объекта. Основная цель статьи — сравнить и показать возможности классического корреляционного и предлагаемого адаптивного методов спектрального анализа при получении глубинного портрета. Проводится оценка их разрешающей способности для различной ширины спектра зондирующего сигнала и отношения сигнал/шум.

Ключевые слова: спектральный анализ, метод максимального правдоподобия, частотный радиолокационный глубинный портрет, подповерхностный радиолокатор, алгоритм обработки сигнала.

Введение

В настоящее время методы нелинейного спектрального анализа широко используются в области геофизики, гидроакустики и антенных решетках [1, 2]. Основная причина этого заключается в присущей таким методам возможности "сверхразрешения", которые значительно превосходят разрешающую способность периодограммы или преобразования Фурье взвешенной окном последовательности (например, окно Хэмминга, Чебышева, Наттолла). В частности, разрешение по частоте значительно повышают такие методы адаптивной спектральной оценки, как методы Юла-Уолкера, САМЭ-Берга, модифицированный ковариационный метод, а также предложенный Дж. Кейпоном метод максимального правдоподобия (ММП) [2–4]. Каждый из перечисленных методов адаптивной спектральной оценки обладает рядом достоинств и недостатков, которые подробно описаны в [2].

В статье рассматриваются классический метод оценки спектральной плотности мощности (СПМ) основанный на корреляционной обработке с последующим выполнением дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и адаптивный метод оценки с высоким разрешением, получивший название метод максимального правдоподобия (ММП). ММП выбран исходя из того, что он наиболее предпочтителен для подповерхностной радиолокации с точки зрения эффективности обработки коротких последовательностей данных и получения несмещенной оценки интенсивности спектральных пиков при малом уровне их боковых лепестков [2, 5].

Сигнал, используемый в подповерхностном радиолокаторе

В подповерхностном радиолокаторе для получения высокого разрешения по глубине 0,01–1 м необходимо использование сверхширокополосного зондирующего сигнала (ЗС) [6–8]. Таким сигналом является сигнал с дискретной перестройкой частоты (ДПЧ-сигнал), который представляет собой последовательность примыкающих друг к другу импульсов (рис. 1) с разной частотой заполнения [9].

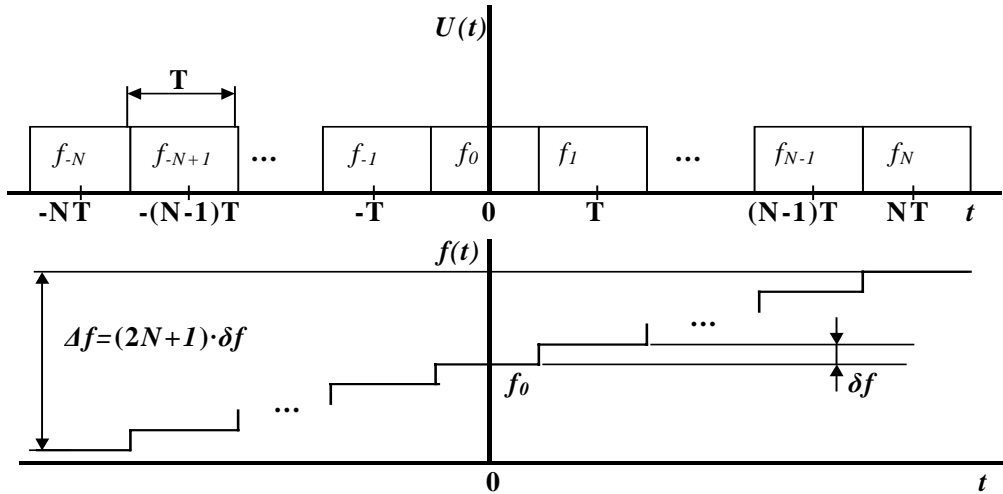


Рис. 1 Огибающая и закон частотной модуляции ДПЧ-сигнала

Комплексная огибающая такого сигнала описывается следующим выражением

$$X(t) = \sum_{n=-N}^N \mathfrak{G}(t - nT) e^{j2\pi\delta f \cdot n(t-nT)}, \quad (1)$$

$$\text{где } \mathfrak{G} = \begin{cases} 1, & |t| \leq T/2, \\ 0, & |t| > T/2; \end{cases}$$

$N_n=2N+1$ — количество дискретов ДПЧ-сигнала; $T_0=(2N+1) \cdot T$ — длительность ДПЧ-сигнала; T — длительность дискрета; $\Delta f=(2N+1) \delta f$ — диапазон перестройки (ширина спектра сигнала); $\delta f = f_n - f_{n-1}$ — шаг по частоте.

При использовании зондирующего сигнала с огибающей, определяемой из (1), отраженный сигнал может быть представлен как суперпозиция колебаний, отраженных от совокупности независимых отражающих поверхностей

$$Y(t) = \sum_{l=1}^L a_l \sum_{n=-N}^N \mathfrak{G}(t - nT - \delta_l) e^{j2\pi\delta f \cdot n(t-nT-\delta_l)} e^{j2\pi f_0(t-nT-\delta_l)} + N_n(t) + N_0(t). \quad (2)$$

При этом $a_l \cong \sigma_l$, где a_l , σ_l — амплитуда и эффективная площадь рассеивания l -й отражающей поверхности; $\delta_l=2r_l/c$ — время запаздывания сигнала от l -й отражающей поверхности до отсчетной плоскости; r_l — расстояние от фазового центра l -й отражающей поверхности до отсчетной плоскости; f_0 — несущая частота ВЧ-колебания; $N_n(t)$ — помеха, обусловленная "пролезанием" зондирующего сигнала в приемный тракт; $N_0(t)$ — внутренние шумы каналов приема.

Классический метод получения частотного РГП

Метод получения радиолокационного портрета основан на оценке времени запаздывания δ_l ОС, которое определяет глубину (дальность) l -й отражающей поверхности заглубленного

объекта. Нахождение оценки времени запаздывания возможно путем классической корреляционной обработки, т. е. произведения отраженного и опорного сигналов с последующим выполнением преобразования Фурье, в результате которого получается глубинный портрет зондируемого участка поверхности

$$S(f) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} U(t) e^{-j2\pi f \cdot t} dt \right|, \quad (3)$$

где $U(t)$ — результат перемножения опорного и отраженного сигналов определяется следующим выражением:

$$U(t) = Y(t) X_z(t), \quad (4)$$

$$X_z(t) = e^{-j2\pi [f_0 + \delta f n](t - nT)} \text{ — опорный сигнал.}$$

Положение максимума на оси f полученного глубинного портрета характеризует разностную частоту (частоту биений f_δ), которая прямо пропорциональна времени запаздывания отраженного сигнала и определяется выражением

$$f_\delta = \frac{\Delta f \delta_l}{T_0}. \quad (5)$$

Переход в координату глубины осуществляется при помощи следующего выражения:

$$r = \frac{f_\delta c T_0}{2\Delta f}. \quad (6)$$

Соотношение (3) определяет алгоритм обработки входных ДПЧ-сигналов в спектральной области при формировании РГП при условии, что внутренние шумы каналов приема отсутствуют. При дискретном представлении $\delta = m\Delta$ дискрета дальности имеет вид

$$r_m = \frac{\Omega_m c}{4b}, \quad (7)$$

где $\Omega_m = 2bm\Delta$, $b = \frac{\pi \Delta f}{T_0} = \frac{\pi \delta f}{T}$ — параметр модуляции ДПЧ-сигнала; m — порядковый номер дискрета; Δ — шаг дискретизации.

Существуют два основных классических подхода к получению оценки СПМ. Прямой, или периодограммный, метод позволяет получить оценку СПМ непосредственно по исходному набору данных. При использовании же косвенного метода сначала необходимо получить оценку корреляционной матрицы последовательности, преобразование Фурье которой и дает искоемую оценку СПМ.

Используя известное соотношение, приведенное в [3], получим оценку СПМ спектрального портрета

$$\hat{P}(\Omega) = \mathbf{A}^{*T}(\Omega) \overline{\mathbf{U}\mathbf{U}^{*T}} \mathbf{A}(\Omega) = \mathbf{A}^{*T}(\Omega) \hat{\Phi} \mathbf{A}(\Omega), \quad (8)$$

где \mathbf{U} — вектор временных отсчетов сигнала $U(t)$ размерностью $(2N+1)$; $\mathbf{A}(\Omega)$ — весовой вектор опорной частоты; $\hat{\Phi} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{U}\mathbf{U}^{*T}$ — оценка корреляционной матрицы смеси сигнала и внутреннего шума. Здесь K — количество временных выборок, а n -е значение весового вектора опорной частоты

$$A_n(\Omega) = C_n \exp(j\Omega T). \quad (9)$$

В выражении (9) значение вектора опорной частоты для n -й дискреты сигнала в случае, когда весовые коэффициенты $C_n=1$ (спектральная оценка Бартлетта) [2, 4], равно

$$S_n(\Omega) = \exp(j \Omega n T), \quad (10)$$

T — интервал временных отсчетов принимаемого сигнала.

Подставляя (10) в (8) и учитывая (7), можно записать выражение СПМ РГП в комплексном виде

$$\hat{P}(r_m) = \mathbf{S}^{*T}(r_m) \hat{\Phi} \mathbf{S}(r_m). \quad (11)$$

Выражение (11) определяет алгоритм получения частотного радиолокационного глубинного портрета классическим методом.

Получение частотного РГП методом максимального правдоподобия

Кроме достоинств, описанных выше, выбор алгоритма максимального правдоподобия (МПП) (в литературе [2] встречается другое название — алгоритм спектрального оценивания по методу минимума дисперсии или МД-оценка) обусловлен, также тем, что может обеспечить "сверхразрешение" коррелированных сигналов ($\rho_k \leq 0,97$), отраженных от поверхностей заглубленного объекта.

Соответствующая максимально достоверная оценка [2] строится путем нахождения вектора опорной частоты $\mathbf{A}(\Omega)$, при введении которого результирующий сигнал $\mathbf{A}^{*T}(\Omega) \hat{\Phi} \mathbf{A}(\Omega)$ имеет максимальную мощность при ограничении

$$\mathbf{A}^{*T}(\Omega) \mathbf{S}(\Omega) = 1, \quad (12)$$

где $\mathbf{S}(\Omega)$ — вектор, определяющий частоту наблюдения (в литературе [2] встречается другое название — вектор комплексных синусоид):

$$\mathbf{S}(\Omega) = \begin{pmatrix} 1 \\ \exp(j \Omega T) \\ \vdots \\ \exp(j \Omega n T) \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Смысл принятого ограничения состоит в том, чтобы сигнал, соответствующий частоте наблюдения, проходил на выход устройства обработки без искажений, а для режекции компонент спектра, удаленных от частоты наблюдения, необходимо просто минимизировать результирующий сигнал на выходе устройства при ограничении (12).

При этом выбор весового вектора опорной частоты $\mathbf{A}(\Omega)$, как отмечалось в [2], имеет вид

$$\mathbf{A}(\Omega) = \frac{\hat{\Phi}^{-1} \mathbf{S}(\Omega)}{\mathbf{S}^{*T}(\Omega) \hat{\Phi}^{-1} \mathbf{S}(\Omega)}. \quad (14)$$

Такому вектору соответствует алгоритм формирования спектрального портрета заглубленного объекта МПП. С учетом (7) запишем выражение для квадрата амплитуд РГП заглубленного объекта

$$\hat{P}_A(r_m) = [\mathbf{S}^{*T}(r_m) \hat{\Phi}^{-1} \mathbf{S}(r_m)]^{-1}. \quad (15)$$

Соотношения (7)–(15) в дальнейшем используются при построении частотных РГП.

Результаты математического моделирования

Для анализа качества функционирования адаптивного алгоритма проведено сравнение портретов, полученных по соотношениям (11) и (15).

При расчетах были приняты следующие допущения:

$N(t)$ – помеха, обусловленная "пролезанием" сигнала, отсутствует;

диэлектрическая проницаемость грунта и заглубленного объекта, а также коэффициент затухания электромагнитных волн постоянны для всего диапазона частот $f_0 + \delta f n$.

Путем изменения параметров ДПЧ-сигналов визуально было установлено, что при больших отношениях сигнал/шум (порядка 40 дБ) структура РГП для сигнала с $\Delta f=4$ ГГц, полученного по неадаптивному алгоритму (11), приближенно соответствует структуре РГП при $\Delta f=1$ ГГц, полученного по адаптивному алгоритму (15). Сказанное поясняется рис. 2,а и б, на которых представлены результаты моделирования частотного РГП заглубленного объекта, представляющего диэлектрический диск толщиной 0,1 м, радиусом 0,12 м, установленного на глубину 0,1 м в сухой песок, адаптивным и неадаптивным алгоритмами соответственно.

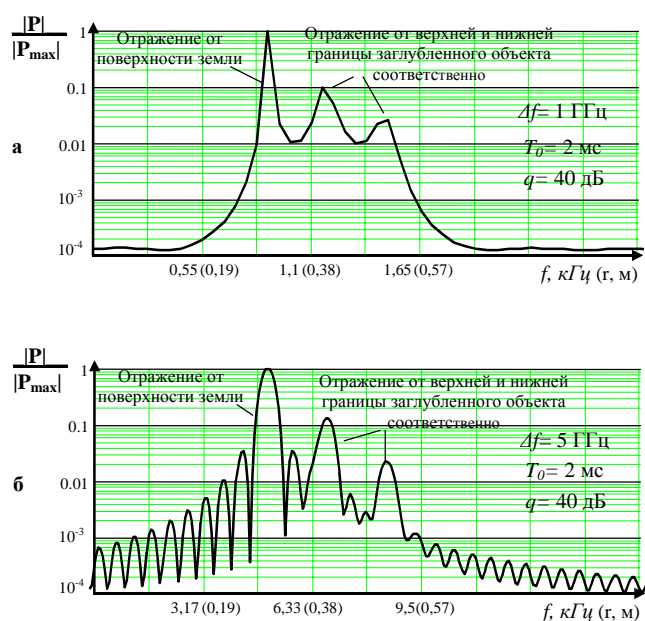
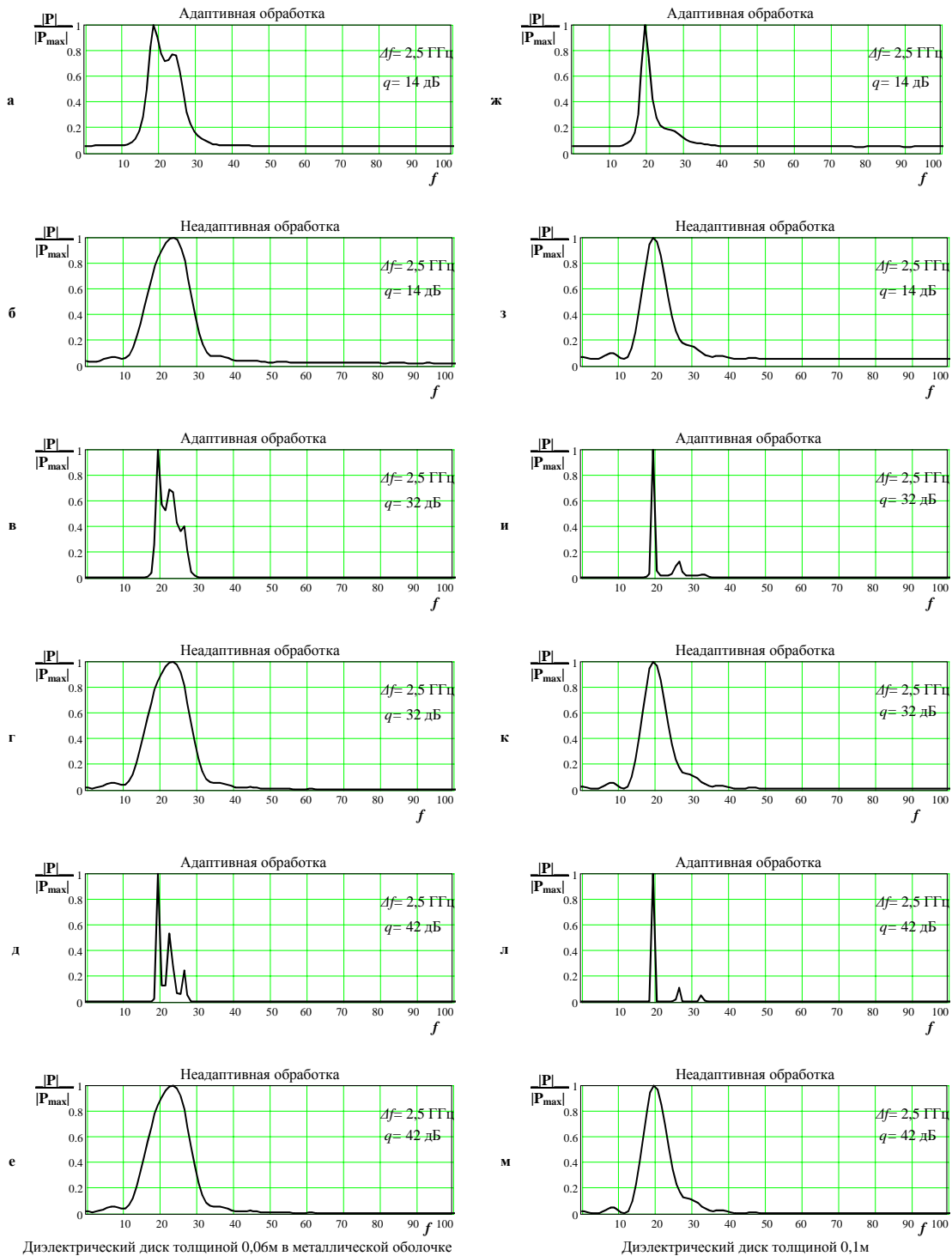


Рис. 2. Результаты моделирования адаптивного алгоритма — а, неадаптивного алгоритма — б

Рассмотрим возможность получения РГП при различных отношениях сигнал/шум. На рис. 3 представлены результаты моделирования адаптивного и неадаптивного алгоритмов для двух различных заглубленных объектов (диэлектрический диск толщиной 0,06 м, радиусом 0,12 м в металлической оболочке, установленный на глубину 0,05 м в сухой песок (рис. 3,а-е), и диэлектрический диск толщиной 0,1 м, радиусом 0,12 м установленного на глубину 0,1 м в сухой песок (рис. 3,ж-м) для $\Delta f=2,5$ ГГц.

Результаты моделирования показывают, что уменьшение отношения сигнал/шум приводит к ухудшению разрешающей способности адаптивного алгоритма. Однако в подповерхностном радиолокаторе получение требуемого отношения сигнал/шум не составляет проблемы, так как возможно увеличение мощности и коэффициента усиления антенны, а также уменьшение расстояния между приемопередающей антенной и поверхностью земли.



Диэлектрический диск толщиной 0,06м в металлической оболочке

Диэлектрический диск толщиной 0,1м

Рис. 3. Получение РГП адаптивным и неадаптивным алгоритмами для диэлектрического диска в металлической оболочке толщиной 0,06 м, радиусом 0,12 м, установленного на глубину 0,05 м в сухой песок а–е, и диэлектрического диска толщиной 0,1 м, радиусом 0,12 м, установленного на глубину 0,1 м — ж–м

Выводы

Рассмотрена последовательная методология спектрального оценивания с высокой разрешающей способностью в задачах обработки сигналов в подповерхностных радиолокаторах при получении частотных радиолокационных глубинных портретов. Проведено сравнение

классического метода, основанного на ДПФ, и метода максимального правдоподобия путем математического моделирования. Результаты моделирования показывают, что ММП дает значительно лучшее разрешение по сравнению с ДПФ в случае большого отношения сигнал/шум (при $q > 30$ дБ). Выигрыш в разрешении позволяет использовать сигналы с меньшей шириной спектра, что значительно снижает требования к конструкции антенной системы и приемопередающего тракта.

SPECTRAL ANALYSIS SUPERRESOLUTION ADAPTIVE METHODS DEPLOYMENT FOR GETTING ABBYSSAL PICTURE OF SOUNDED SURFACE PART

A.V. GRUNKEVICH

Abstract

Non-linear methods of superresolution developed for the spectral analysis may be applied successfully in different fields, in particular for a subsurface radiolocation for getting a frequency radiolocating picture of a deepen object. The main aim of the article is to compare and demonstrate the abilities of classical correlative and suggested adaptive methods of spectral analysis while getting the abyssal picture. It is carried out the estimating of resolution ability for the different spectrum width of the sounding signal and relation between the signal and noise.

Литература

1. Калинин А.В., Владов М.Л., Старовойтов А.В., Шалаева Н.В. // Разведка и охрана недр, 2002. № 1. С. 23-27.
2. Марпл мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. / Под ред. Рыжака И. С. М., 1990. 584 с.
3. Гейбриел У.Ф. // ТИИЭР. 1980. Т. 68, № 6. С. 19-31.
4. Джонсон Д.Х. // ТИИЭР. 1982. Т. 70, № 9. С. 126-139.
5. Василин Н.Я., Гринкевич А.В. // Вестник военной академии. 2005. № 4.
6. Финкельштейн М.И., Карпунин В.И., Кутеев В.А., Метелкин В.Н. Подповерхностная радиолокация. М., 1994. 216 с.
7. Индзука К., Фройндорфер А.П. // ТИИЭР. 1983. Т. 71, № 2.
8. Вопросы подповерхностной радиолокации / Под общ. ред. А.Ю. Гринева. М., 2005. 416 с.
9. Кук Ч., Берндфельд М. Радиолокационные сигналы: Пер. с англ. М., 1971. 568 с.
10. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М., 1981. 416 с.