

## Анализ оценки эффективности предварительного обнаружения при адаптивной и неадаптивной обработке

*В. В. Иванец, М. С. Орабей*

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

Рассмотрены показатели качества обнаружения и разрешения скрытых объектов при реализации адаптивной обработки. Проведен их анализ и сравнительная характеристика. Показано сравнение методов адаптивной и неадаптивной обработки принимаемого сигнала для формирования радиолокационного изображения подповерхностных слоев зондируемого участка поверхности путем оценки эффективности предварительного обнаружения, а также представлены результаты моделирования.

**Ключевые слова.** Адаптивная обработка, Радиолокационное изображение, Эффективность обнаружения.

При решении конкретных задач в области подповерхностной радиолокации часто встречаются случаи, когда получение строгих аналитических выражений (с целью их детального анализа) является практически невозможным (что характерно для нашей ситуации), а проведение экспериментальных исследований и натурных испытаний в полном объеме требует весьма больших затрат времени и средств. Одной из эффективных мер по преодолению этих трудностей является реализация разработанных математических моделей на ЭВМ.

Методы формирования одномерного радиолокационного изображения отображены в таблице 1, и, по сути, являются алгоритмами обнаружения, обеспечивающими формирование квадрата модуля корреляционного интеграла на определенной частоте наблюдения  $\Omega$ , прямо пропорциональной координате глубины  $r$  и, с этой точки зрения, являющимися эквивалентными [1].

Таблица 1. Методы формирования одномерного радиолокационного изображения

Метод формирования	Описываемое выражение
Классический метод	$\hat{P}(r) = \mathbf{S}^H(r) \hat{\Phi} \mathbf{S}(r)$
Метод максимального правдоподобия	$\hat{P}_A(r) = [\mathbf{S}^H(r) \hat{\Phi}^{-1} \mathbf{S}(r)]^{-1}$
Метод теплового шума	$\hat{P}_B(r) = [\mathbf{S}^H(r) \hat{\Phi}^{-2} \mathbf{S}(r)]^{-1}$
Комбинированный метод	$\hat{P}_C(r) = [\mathbf{S}^H(r) \hat{\Phi}^{-1} \mathbf{S}(r) \hat{\mathbf{R}}^H(r) \hat{\mathbf{R}}(r)]^{-1}$ .

Сравнительный анализ показателей качества предварительного обнаружения при использовании неадаптивного алгоритма и адаптивных алгоритмов (таблица 1) позволит дать количественную оценку эффективности их применения для различных условий.

Характеристики обнаружения выходных сигналов описываются следующими выражениями [2]

$$F = \int_{Z_*}^{\infty} p_{uu}(Z) dZ = e^{-\frac{Z_*}{Z_u}} \quad (1)$$

$$D = \int_{Z_*}^{\infty} p_{c+uu}(Z) dZ = e^{-\frac{Z_*}{Z_{c+u}}} \quad (2)$$

Расчет характеристик обнаружения проводился в соответствии с выражениями (1-2). При этом условная вероятность ложной тревоги задавалась, равной  $F=10^{-3}$ , и определялся соответствующий ей пороговый уровень  $Z_*$ . Далее производился расчет вероятности правильного обнаружения  $D$  и вероятности ложного обнаружения  $D_{\text{ло}}$ , которая рассчитывалась по максимуму первого бокового лепестка корреляционной функции для тех же обнаружителей. Количество временных выборок выбиралось  $K=128$ .

На рис. 1 представлены зависимости правильного и ложного обнаружения одиночного сигнала, отраженного от поверхности скрытого объекта, для обнаружителей, реализующих алгоритмы (таблица 1).

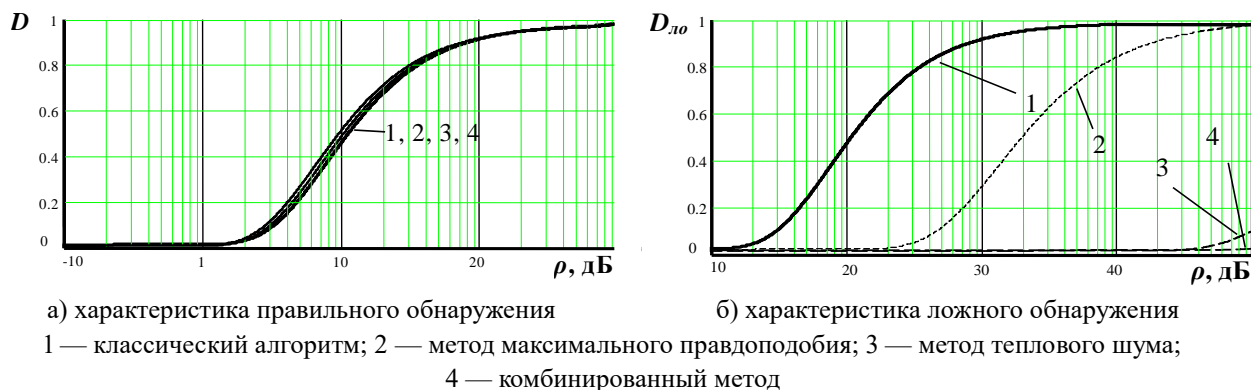


Рис. 1. Характеристики правильного  $D$  (а) и ложного  $D_{\text{ло}}$  (б) обнаружения сигнала, отраженного от поверхности скрытого объекта

Видно, что вероятность правильного обнаружения слабо зависит от вида обработки (т.к. при проведении расчетов выполнялась нормировка выходного сигнала относительно максимума выходного эффекта), а вероятность ложного обнаружения напротив зависит от вида обработки и повышается при увеличении отношения сигнал/шум, являясь максимальной для неадаптивного алгоритма – кривая 1. Это объясняется большим уровнем боковых лепестков неадаптивного алгоритма.

Рассмотрим случай обнаружения слабого сигнала на фоне сильного (сигнала, отраженного от поверхности скрытого объекта, на фоне сигнала, отраженного от поверхности земли). Расчеты проводились для заданного отношения сильный сигнал/шум путем изменения мощности слабого сигнала. Пороговый уровень  $Z_*$  устанавливался по уровню максимального бокового лепестка сильного сигнала [3].

На рис. 2 изображены кривые обнаружения слабого сигнала, отраженного от поверхности скрытого объекта на фоне сильного сигнала, отраженного от поверхности земли, при нахождении слабого сигнала в боковых лепестках сильного, при расстоянии между поверхностями  $r_l=0,05$  м (рис. 2а) и  $r_l=0,1$  м (рис. 2б).

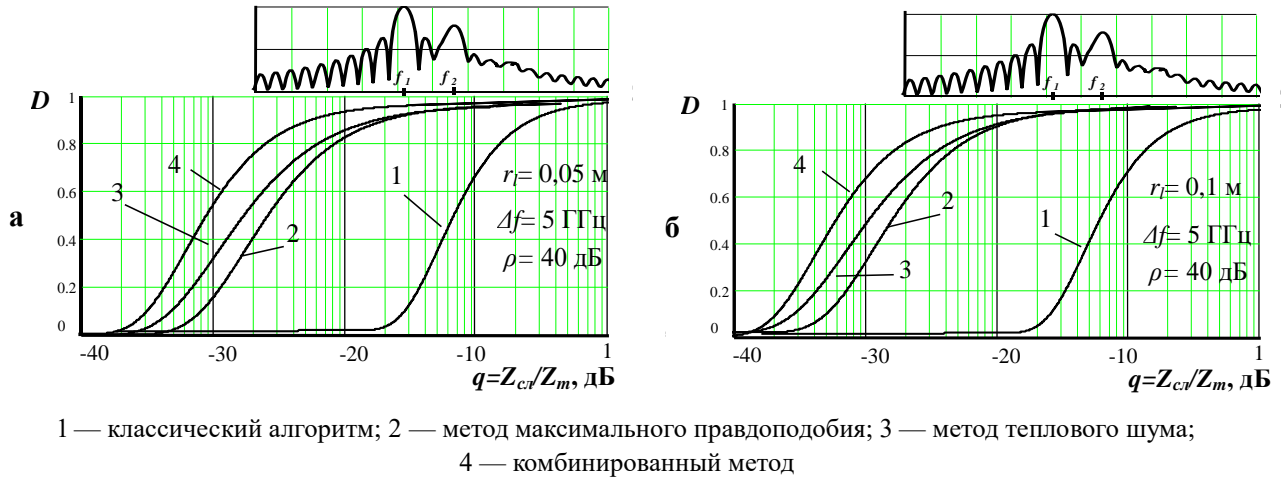


Рис. 2. Зависимость вероятности обнаружения слабого сигнала на фоне сильного, при нахождении слабого сигнала в боковых лепестках сильного, от отношения слабый сигнал / сильный сигнал

Кроме того, на рис. 3 представлены кривые обнаружения слабого сигнала на фоне сильного, при нахождении слабого сигнала в одном элементе разрешения с сильным (отсутствии релейского разрешения), при расстоянии между отражающими поверхностями  $r_l=0,05$  м (рис. 3а) и  $r_l=0,1$  м (рис. 3б).

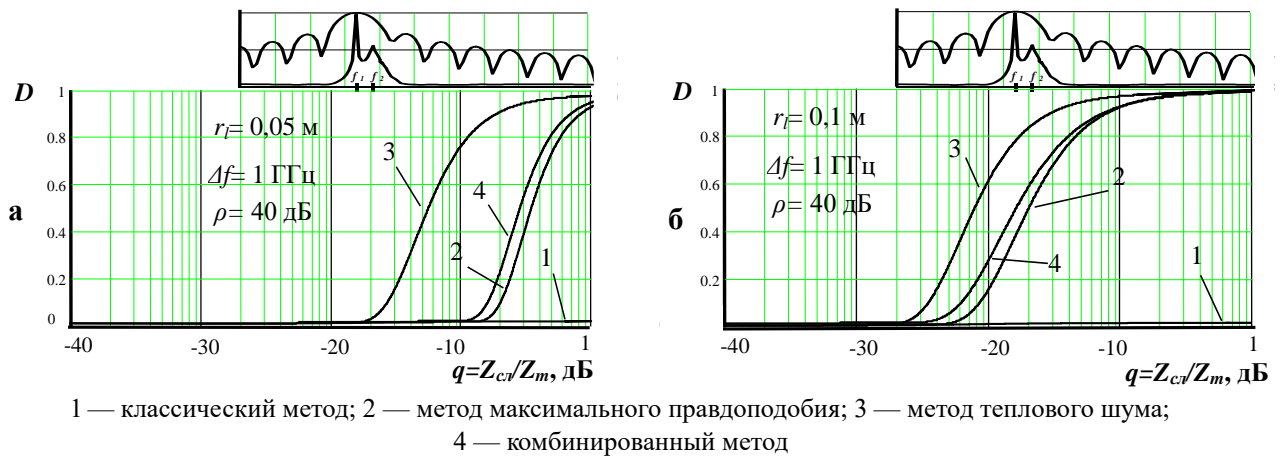


Рис. 3. Зависимость вероятности обнаружения слабого сигнала на фоне сильного сигнала, от отношения слабый сигнал / сильный сигнал, при отсутствии релейского разрешения между сигналами

Из анализа кривых (рис. 2 и 3) следует, что вероятность обнаружения слабого сигнала на фоне сильного при использовании адаптивных алгоритмов значительно лучше, чем классического алгоритма. Это объясняется более низким уровнем боковых лепестков адаптивных алгоритмов и лучшими разрешающими способностями [4]. Комбинированный метод позволяет получить максимальную вероятность обнаружения слабого сигнала для случая его маскировки боковыми лепестками сильного сигнала, так как имеет самый низкий уровень боковых лепестков (рис. 2). Для случая нахождения слабого сигнала в главном лепестке сильного (классический алгоритм не позволяет обнаружить слабый и сильный сигналы) максимальную вероятность обнаружения показал алгоритм, основанный на методе теплового шума, который обладает наилучшими способностями по разрешению.

Отметим, что классический алгоритм при нахождении слабого сигнала в основном лепестке сильного имеет вероятность обнаружения, близкую к вероятности ложной тревоги.

Адаптивный алгоритм, основанный на ММП, обладает высокой вероятностью обнаружения слабого сигнала на фоне сильного по сравнению с классическим алгоритмом для всех рассмотренных случаев.

### Заключение

По результатам моделирования следует отметить, что несмотря на низкую вероятность ложных обнаружений и высокую вероятность обнаружения слабых сигналов на фоне сильных, получаемых при реализации адаптивных алгоритмов, именно энергетические потери являются сдерживающим фактором широкого распространения рассмотренных методов и алгоритмов в радиолокационных средствах различного назначения.

Большие энергетические потери не позволяют производить эффективную обработку сигналов с малым ОСШ, поэтому в дальнейшем необходимо определить требования к ОСШ принимаемых сигналов, которое позволит в полной мере реализовать возможности разработанных алгоритмов.

### Список использованных источников

- [1] **Гринкевич, А. В.** Анализ методов сверхразрешения применительно к радиолокатору подповерхностного зондирования для обнаружения скрытых объектов / А. В. Гринкевич, В. В. Иванец, М. С. Орабей, А. А. Денис // Доклады БГУИР. — 2024. — Том 22. — № 3.
- [2] **Михнев, В. А.** Реконструктивная микроволновая структуроскопия многослойных диэлектрических сред / В. А. Михнев. — Минск: Светоч, 2002. — 192 с.
- [3] **Савенко, С. А.** Адаптивное обнаружение и измерение информативных параметров заглубленных объектов в РЛС подповерхностного зондирования / С. А. Савенко, А. Н. Гуринович, А. В. Гринкевич // Наука и военная безопасность. — 2010. — № 1. — С. 36–40.
- [4] **Гринев, А. Ю.** Вопросы подповерхностной радиолокации / А. Ю. Гринев. — М.: Радиотехника, 2005. — 416 с.

## Analysis of the evaluation of the effectiveness of preliminary detection during adaptive and non-adaptive processing

*A. V. Grinkevich, M. S. Orabei, V. V. Ivanets*

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Indicators of the quality of detection and resolution of hidden objects when implementing adaptive processing are considered. Their analysis and comparative characteristics were carried out. A comparison of the methods of adaptive and non-adaptive processing of the received signal for the formation of a radar image of the subsurface layers of the probed surface area by assessing the effectiveness of preliminary detection is shown, and the simulation results are also presented.

**Keywords.** Adaptive processing, Radar image, Detection efficiency.