



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-61-68>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396.96

АНАЛИЗ МЕТОДОВ СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАДИОЛОКАТОРУ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СКРЫТЫХ ОБЪЕКТОВ

А. В. ГРИНКЕВИЧ, В. В. ИВАНЕЦ, М. С. ОРАБЕЙ, А. А. ДЕНИС

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 13.10.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Показано применение адаптивных методов обработки принимаемого сигнала для формирования радиолокационного изображения подповерхностных слоев зондируемого участка поверхности. Описана структурная схема радиолокатора подповерхностного зондирования, используемого для неразрушающего контроля. Представлены результаты моделирования и экспериментальных исследований. Их использование позволяет разработать радиолокатор подповерхностного зондирования, обладающий возможностью эффективно выявлять скрытые объекты в бетонных стенах, а также обнаруживать трещины, пустоты и дефекты в стенах зданий и сооружений, снежные завалы и лавины, подземные коммуникации и органические тела в грунте.

Ключевые слова: радиолокатор подповерхностного зондирования, обнаружение скрытых объектов, радиолокационное изображение, адаптивные методы обработки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Анализ методов сверхразрешения применительно к радиолокатору подповерхностного зондирования для обнаружения скрытых объектов / А. В. Гринкевич [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 3. С. 61–68. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-61-68>.

ANALYSIS OF SUPERRESOLUTION METHODS IN THE APPLICATION TO THE SUBSURFACE SOUNDING RADAR FOR DETECTING HIDDEN OBJECTS

ANTON V. GRINKEVICH, VALERY V. IVANETS, MAKSIM S. ORABEL,
ANASTASIA A. DENIS

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

Submitted 13.10.2023

Abstract. Adaptive methods have been developed for generating a radar image of a probed surface area. A block diagram of a subsurface sounding radar is described. The results of modeling and experimental studies are presented. Their use makes it possible to develop a subsurface sensing radar capable of effectively identifying hidden objects in concrete walls, as well as detecting cracks, voids and defects in the walls of buildings and structures, snow debris and avalanches, underground communications and organic bodies in the ground.

Keywords: subsurface sounding radar, detection of hidden objects, radar image, adaptive processing methods.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

For citation. Grinkevich A. V., Ivanets V. V., Orabei M. S., Denis A. A. (2024) Analysis of Superresolution Methods in the Application to the Subsurface Sounding Radar for Detecting Hidden Objects. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 61–68. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-61-68> (in Russian).

Введение

Сегодня как в мире, так и в Республике Беларусь, актуальной задачей является необходимость обнаружения объектов в грунте и в стенах зданий (сооружений). В настоящее время не существует единого универсального подхода, позволяющего с высокой эффективностью обнаруживать и классифицировать скрытые объекты. Вместе с тем проведенные ранее исследования показывают эффективность применения радиолокационных методов зондирования [1–5]. Поэтому в статье рассматривается радиолокатор подповерхностного зондирования с непрерывным зондирующим сигналом, реализующий частотный метод измерения расстояния, поскольку непрерывный зондирующий сигнал (с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) или с дискретной перестройкой частоты (ДПЧ)) применяется для формирования одномерного радиолокационного изображения.

Принцип формирования одномерного радиолокационного изображения зондируемого участка поверхности

Работа радиолокатора подповерхностного зондирования основана на принципе отражения электромагнитного излучения от границ слоев с различными значениями диэлектрической проницаемости. Амплитуда и фаза отраженного сигнала зависят от коэффициента отражения R_i , который определяется следующим выражением [2]:

$$R_i = \frac{\sqrt{\varepsilon_{i-1}} - \sqrt{\varepsilon_i}}{\sqrt{\varepsilon_{i-1}} + \sqrt{\varepsilon_i}}, \quad (1)$$

где ε_i – диэлектрическая проницаемость i -го слоя (отражающей поверхности); ε_{i-1} – диэлектрическая проницаемость $(i - 1)$ -го слоя.

Разрешающая способность по дальности (глубине) определяется шириной спектра зондирующего сигнала

$$\Delta r = \frac{c_i}{2\Delta f}, \quad (2)$$

где Δf – ширина спектра зондирующего сигнала; c_i – скорость распространения электромагнитной волны в i -м слое, зависящая от ее диэлектрической проницаемости:

$$c_i = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_i}}, \quad (3)$$

c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме.

Для обнаружения и разрешения малоразмерных скрытых объектов необходимо применять широкополосные сигналы, позволяющие получить высокое разрешение по глубине. Один из таких сигналов – ДПЧ-сигнал, который состоит из совокупности примыкающих друг к другу импульсов с разной несущей частотой. Законом модуляции ДПЧ-сигнала является следующее выражение

$$X(t) = \sum_{n=0}^N \vartheta(t - nT) e^{j2\pi\delta f n(t - nT)}, \quad (4)$$

где $\vartheta = \begin{cases} 1, & |t| \leq T/2 \\ 0, & |t| > T/2 \end{cases}$; N – количество дискретов ДПЧ-сигнала; n – порядковый номер дискрета;

T – длительность дискрета; $\delta f = f_n - f_{n-1}$ – шаг по частоте.

Принятый сигнал будет иметь вид

$$y(t) = \sum_{l=1}^L a_l \sum_{n=-N}^N \vartheta(t - nT - \delta_l) e^{j2\pi\delta f n(t - nT - \delta_l)} e^{j2\pi f_0(t - nT - \delta_l)} + N(t) + N_0(t), \quad (5)$$

где a_l – амплитуда отраженного сигнала от l -й отражающей поверхности с учетом коэффициентов отражения и ослабления сигнала при распространении в прямом и обратном направлениях; $\delta_l = 2r_l / c_c$ – время запаздывания сигнала от l -й отражающей поверхности; r_l – расстояние от фазового центра антенны до l -й отражающей поверхности; f_0 – несущая частота ВЧ-колеба-

ния; $N(t)$ – помеха, обусловленная «просачиванием» зондирующего сигнала в приемный тракт; $N_0(t)$ – внутренние шумы каналов приема.

Получение одномерного радиолокационного изображения основано на оценке времени задержки отраженного сигнала δ_l , которое определяет глубину (дальность) до l -й отражающей поверхности.

Классический метод формирования одномерного радиолокационного изображения

Классический метод предполагает перемножение принятого и опорного сигналов с последующим выполнением преобразования Фурье. Результатом такого преобразования является одномерное радиолокационное изображение подповерхностных слоев облучаемого участка поверхности

$$P(f) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-j2\pi ft} dt \right|, \quad (6)$$

где $u(t)$ – результат перемножения принятого и опорного сигналов, который определяется как $u(t) = y(t)x_r(t)$; $x_r(t) = \sum_{n=0}^N \mathfrak{g}(t - nT) e^{-j2\pi[f_0 + \delta f n](t - nT)}$ – опорный сигнал.

Положение максимума на оси частот f полученного одномерного радиолокационного изображения характеризует разностную частоту \tilde{f} , которая прямо пропорциональна времени запаздывания отраженного сигнала и определяется выражением [4, 5]

$$\tilde{f} = \frac{\delta f N \delta_l}{T_0}, \quad (7)$$

где δ_l – время запаздывания сигнала, отраженного от l -й отражающей поверхности; T_0 – длительность зондирующего сигнала.

В матричном виде классический алгоритм формирования одномерного радиолокационного изображения записывается следующим образом [4, 5]:

$$\hat{P}(f) = \mathbf{S}^H(f) \hat{\Phi} \mathbf{S}(f), \quad (8)$$

где $\mathbf{S}(f) = \begin{pmatrix} 1 \\ \exp(j2\pi\delta f T) \\ \vdots \\ \exp(j2\pi\delta f NT) \end{pmatrix}$ – вектор обзора по частоте, определяющий n -ю частоту наблюдения;

H – операция эрмитова сопряжения; $\hat{\Phi} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{U}_k \mathbf{U}_k^H$ – оценка корреляционной матрицы на выходе смесителя; K – количество временных выборок; \mathbf{U} – вектор-столбец сигнала $u(t)$ [4, 5].

Пересчет в координату глубины r осуществляется при помощи выражения

$$r = \frac{\tilde{f} c T_0}{2\delta f N}. \quad (9)$$

С учетом (9) формула (8) в координатах глубины примет вид

$$\hat{P}(r) = \mathbf{S}^H(r) \hat{\Phi} \mathbf{S}(r). \quad (10)$$

Выражение (10) описывает классический метод формирования радиолокационного изображения.

Формирование одномерного радиолокационного изображения

Формирование одномерного радиолокационного изображения может осуществляться методами максимального правдоподобия и теплового шума, а также комбинированным методом.

Метод максимального правдоподобия

Метод максимального правдоподобия (ММП) обеспечивает «сверхразрешение» коррелированных сигналов, отраженных от различных поверхностей, причем результат оценки определяется путем нахождения вектора опорной частоты $\mathbf{A}(f)$, при котором результат обработки $\mathbf{A}^H(f)\Phi\mathbf{A}(f)$ имеет максимальную мощность при соблюдении следующего ограничения [4, 5]:

$$\mathbf{A}^H(f)\mathbf{S}(f) = 1. \quad (11)$$

Смысл этого ограничения заключается в том, чтобы сигнал, соответствующий частоте наблюдения, проходил на выход устройства обработки неискаженным, а спектральные составляющие, удаленные от частоты наблюдения, режектировались. Выбор весового вектора опорной частоты $\mathbf{A}(f)$ имеет вид

$$\mathbf{A}(f) = \frac{\hat{\Phi}^{-1}\mathbf{S}(f)}{\mathbf{S}^H(f)\hat{\Phi}^{-1}\mathbf{S}(f)}. \quad (12)$$

Условие (11) обеспечивает получение алгоритма формирования одномерного радиолокационного изображения зондируемого участка поверхности ММП [4, 5]

$$\hat{P}_A(f) = [\mathbf{S}^H(f)\hat{\Phi}^{-1}\mathbf{S}(f)]^{-1}. \quad (13)$$

С учетом (9) формула (13) в координатах глубины примет вид

$$\hat{P}_A(r) = [\mathbf{S}^H(r)\hat{\Phi}^{-1}\mathbf{S}(r)]^{-1}. \quad (14)$$

Выражение (14) описывает способ формирования одномерного радиолокационного изображения ММП.

Метод теплового шума

Данный метод основан на анализе свойств собственного шума на выходе системы и определяется выражением [6]

$$\hat{P}_B(f) = [\mathbf{S}^H(f)\hat{\Phi}^{-2}\mathbf{S}(f)]^{-1}. \quad (15)$$

Отличие метода теплового шума от ММП состоит в том, что здесь используется обратная оценка корреляционной матрицы сигнала, возведенная в квадрат. Оценка радиолокационного изображения по методу теплового шума имеет более высокую разрешающую способность, чем оценка по методу максимального правдоподобия [6].

С учетом (9) формула (15) в координатах глубины примет вид

$$\hat{P}_B(r) = [\mathbf{S}^H(r)\hat{\Phi}^{-2}\mathbf{S}(r)]^{-1}. \quad (16)$$

Выражение (16) описывает способ формирования одномерного радиолокационного изображения методом теплового шума.

Комбинированный метод

Данный метод предполагает перемножение результатов, полученных ММП и методом теплового шума, и описывается следующим выражением:

$$\hat{P}_C(f) = [\mathbf{S}^H(f)\hat{\Phi}^{-1}\mathbf{S}(f)\hat{\mathbf{R}}^H(f)\hat{\mathbf{R}}(f)]^{-1}, \quad (17)$$

где $\hat{\mathbf{R}}(f) = \hat{\Phi}^{-1}\mathbf{S}(f)$.

С учетом (9) формула (17) в координатах глубины примет вид

$$\hat{P}_C(r) = [\mathbf{S}^H(r)\hat{\Phi}^{-1}\mathbf{S}(r)\hat{\mathbf{R}}^H(r)\hat{\mathbf{R}}(r)]^{-1}. \quad (18)$$

Выражение (18) описывает комбинированный метод формирования одномерного радиолокационного изображения.

Принцип работы радиолокатора подповерхностного зондирования

Принцип работы заключается в следующем. Сформированный генератором и усиленный по мощности зондирующий сигнал подается на передающую антенну и излучается в пространство. Принятый сигнал, являющийся совокупностью сигналов, отраженных от различных поверхностей, и шума, поступает на вход приемной антенны. Смеситель (перемножитель) перемножает опорный и принятый сигналы и выдает сигнал с разностной частотой \tilde{f} . В блоке обработки формирование одномерного радиолокационного изображения осуществляется классическим методом на основе преобразований Фурье, с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) процессора или одним из адаптивных методов, реализуемых устройством адаптивной обработки. Устройство адаптивной обработки, реализующее метод максимального правдоподобия, метод теплового шума, метод непосредственного оценивания весового вектора и (или) комбинированный метод, изображено на рис. 1 серым цветом.

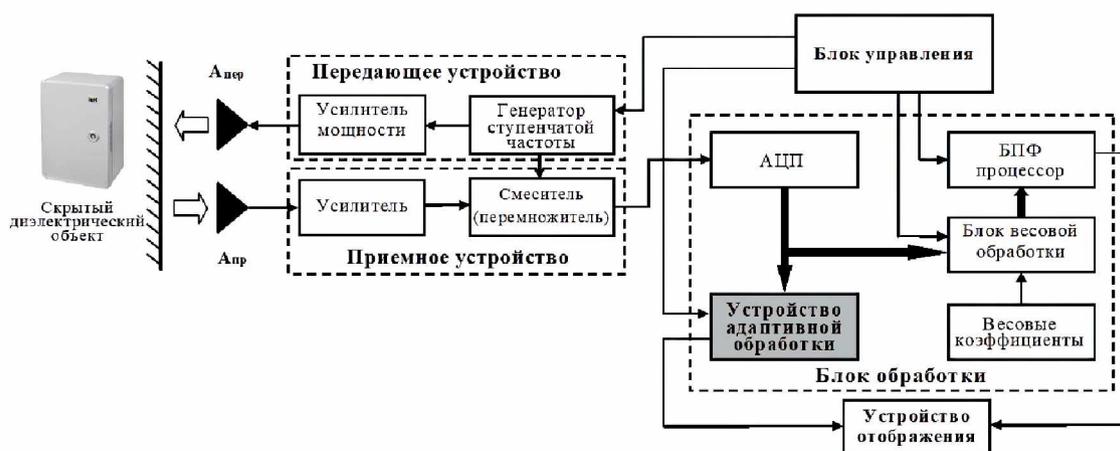


Рис. 1. Структурная схема радиолокатора подповерхностного зондирования с дискретной перестройкой частоты

Fig. 1. Structural diagram of a subsurface sounding radar with discrete frequency tuning

Одномерное радиолокационное изображение с выхода блока обработки поступает на устройство отображения для визуального наблюдения оператором. Синхронизация работы всех устройств радиолокатора подповерхностного зондирования осуществляется блоком управления.

Анализ методов формирования одномерного радиолокационного изображения

Для сравнительного анализа рассмотренных методов, описываемых выражениями (10), (14), (16) и (18), проведено моделирование ситуации формирования одномерного радиолокационного изображения скрытого диэлектрического объекта толщиной 15 см, установленного на глубину 25 см в бетонную стену, при расположении антенны радиолокатора на расстоянии 10 см от стены для $\Delta f = 4$ ГГц, $T_0 = 2$ мс, $N = 256$ (рис. 2). В процессе моделирования были приняты следующие ограничения:

- диаграммы направленности передающей и приемной антенн согласованы, электромагнитные волны являются плоскими и распространяются перпендикулярно рассматриваемой поверхности;

- паразитный сигнал «просачивания» из передающей в приемную антенну отсутствует [7];

- отсутствуют краевые волны (отражения от боковых поверхностей скрытого объекта);

- диэлектрическая проницаемость среды и скрытых объектов постоянна во всей полосе частот.

Результаты моделирования показывают, что рассмотренные адаптивные методы формирования одномерного радиолокационного изображения позволяют разрешать глубину и толщину скрытого объекта с лучшим качеством, чем классический метод. Также достоинством адаптивных методов является то, что уровень боковых лепестков значительно ниже по сравнению с классическим методом. Однако определить наличие нескольких слоев по глубине невозможно, поскольку их более слабые сигналы на выходе системы обработки маскируются боковыми лепестками сильного сигнала от самой поверхности.

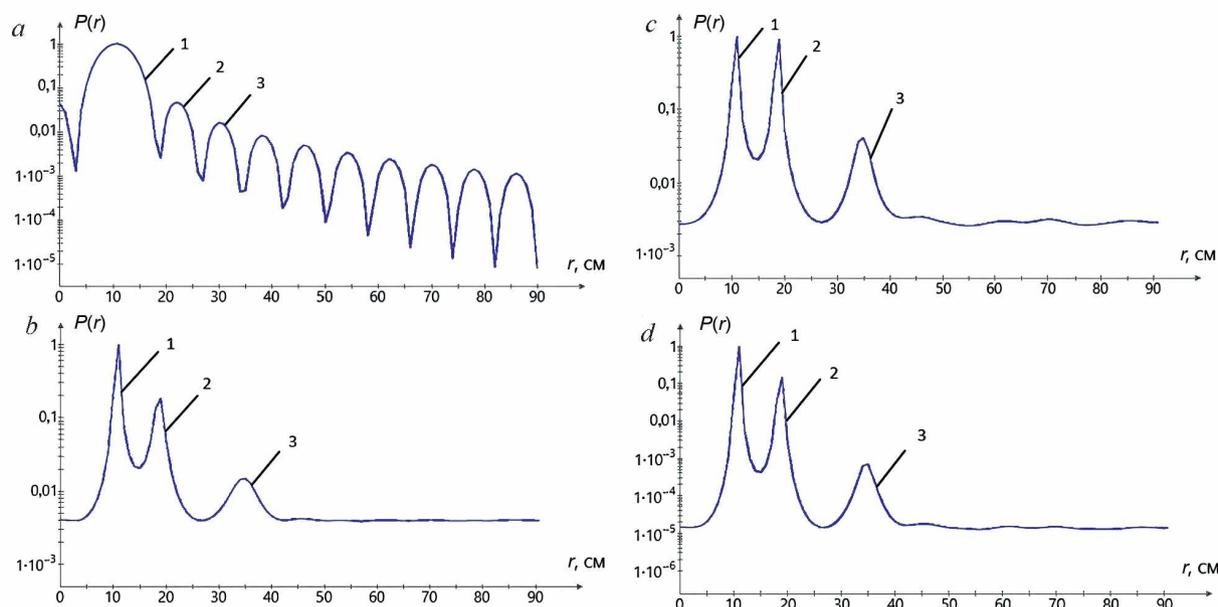


Рис. 2. Нормированные одномерные радиолокационные изображения, полученные для скрытого диэлектрического объекта в бетонной стене методами: *a* – классическим; *b* – максимального правдоподобия; *c* – теплового шума; *d* – комбинированным; 1, 2, 3 – отражение от исследуемой, фронтальной и тыльной поверхностей скрытого диэлектрического объекта соответственно

Fig. 2. Normalized one-dimensional radar images, obtained for a hidden dielectric object in a concrete wall using the following methods: *a* – classical; *b* – maximum likelihood; *c* – thermal noise; *d* – combined; 1, 2, 3 – reflection from the test, front and back surfaces hidden dielectric object, respectively

Результаты экспериментальных исследований

Для подтверждения основных положений, выдвинутых при разработке адаптивных методов формирования одномерного радиолокационного изображения, провели экспериментальные исследования. В качестве скрытого объекта использовали пластиковый короб с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3,1$. Объект был установлен в бетонной стене с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4,5$.

Основой для проведения экспериментов послужил макет радиолокатора подповерхностного зондирования, включающий антенную систему, векторный анализатор спектра E5071B и персональную электронно-вычислительную машину (ПЭВМ) с моделями методов формирования радиолокационного изображения (рис. 3). Зондирующий сигнал, представляющий ДПЧ-сигнал с диапазоном перестройки частоты в пределах 1–5 ГГц, формировался в блоке E5071B и передавался на передающую антенну, откуда излучался на исследуемую поверхность. Передающая и приемная антенны размещались на расстоянии 10 см от исследуемой поверхности. Сигнал, принятый приемной антенной, поступал на векторный анализатор спектра E5071B, который умножал принятый и опорный сигналы. Полученный сигнал поступал на ПЭВМ, где обрабатывался при помощи разработанных моделей.

На рис. 4 показаны подповерхностные профили участка исследуемой поверхности при проходе по полосе с установленным на глубину 25 см скрытым диэлектрическим объектом толщиной 15 см при расположении антенны радиолокатора на расстоянии 10 см от исследуемой поверхности для $\Delta f = 4$ ГГц, $T_0 = 2$ мс, $N = 256$ – число точек БПФ.

В подповерхностном профиле, полученном классическим способом, трудно обнаружить лицевую сторону скрытого объекта, поскольку она маскируется мощным сигналом, отраженным от поверхности земли. А в подповерхностном профиле, полученном при помощи адаптивного алгоритма, можно точно определить глубину залегания и габариты скрытого объекта.

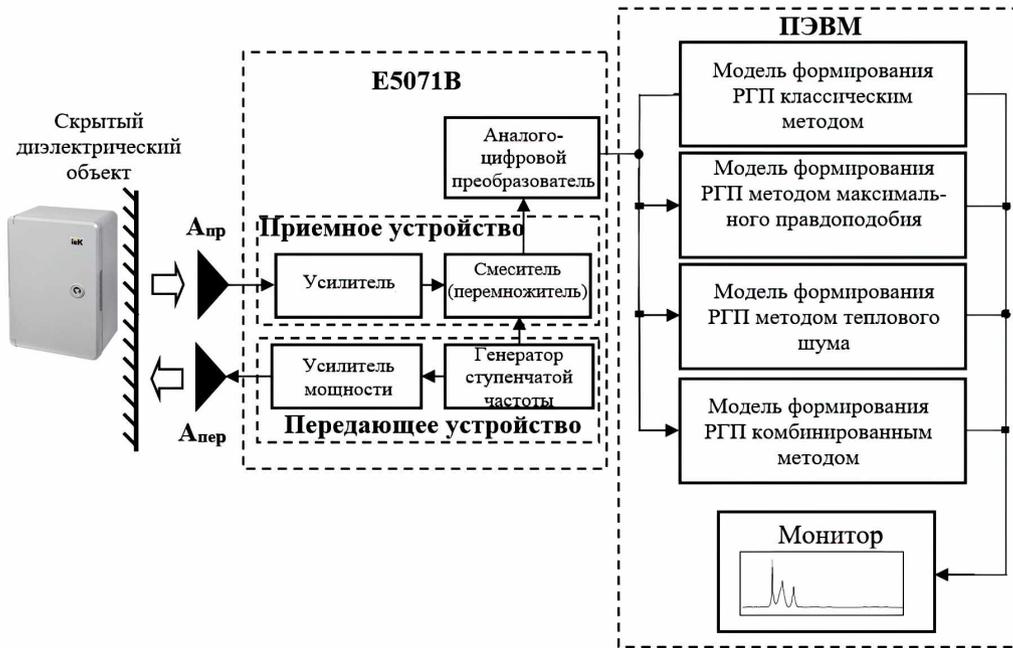


Рис. 3. Макет подповерхностного радиолокатора: РГП – радиолокационный глубинный портрет
Fig. 3. Layout of a subsurface radar: RGP – radar depth portrait

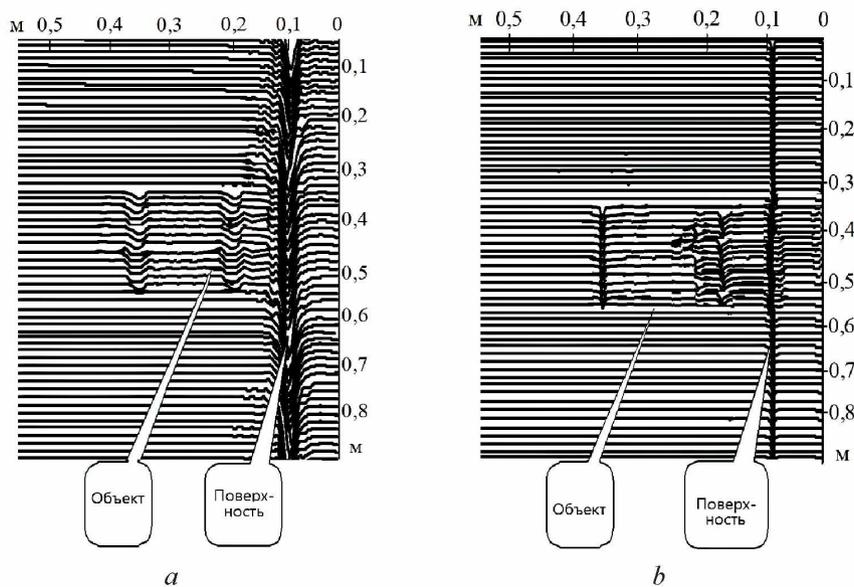


Рис. 4. Подповерхностный профиль (в виде скан-линий) при проходе по полосе с установленным на глубине 25 см скрытым диэлектрическим объектом толщиной 15 см, полученный методами: *a* – классическим; *b* – непосредственного оценивания весового вектора
Fig. 4. Subsurface profile (in the form of scan lines) when passing through a strip with a hidden dielectric object 15 cm thick installed at a depth of 25 cm, obtained by the following methods: *a* – classical; *b* – direct estimation of the weight vector

Заключение

1. По результатам моделирования и экспериментальных исследований установлено, что можно существенно повысить разрешающую способность подповерхностного радиолокатора добавлением в него устройства адаптивной обработки, реализующего один из описанных адаптивных методов. Это снижает требования к ширине спектра зондирующего сигнала, антенно-фидерному тракту, приемному и передающему устройствам.

2. Результаты математического моделирования подтвердили, что при использовании адаптивных алгоритмов, в отличие от классической обработки, можно с высокой точностью определить глубину установки и габариты скрытого объекта.

Список литературы

1. Гринев, А. Ю. Вопросы подповерхностной радиолокации / А. Ю. Гринев. М.: Радиотехника, 2005.
2. Подповерхностная радиолокация / М. И. Финкельштейн [и др.]. М.: Радио и связь, 1994.
3. Брякин, И. В. Методы подповерхностного зондирования и разработка устройства для локализации скрытых объектов / И. В. Брякин, И. В. Бочкарев // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. 2021. № 6.
4. Какора, В. А. Комбинированный метод спектрального оценивания при получении сверхразрешения по частоте / В. А. Какора, А. В. Гринкевич // Доклады БГУИР. 2018. № 8. С. 63–70.
5. Какора, В. А. Сравнительный анализ разрешающей способности алгоритмов спектрального оценивания / В. А. Какора, А. В. Гринкевич // Доклады БГУИР. 2017. № 3. С. 20–24.
6. Ермолаев, В. Т. Методы оценивания параметров источников сигналов и помех, принимаемых антенной решеткой / В. Т. Ермолаев, А. Г. Флакман. Н. Новгород, 2007.
7. Марпл-мл., С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл мл. М.: Мир, 1990.

References

1. Grinev A. Yu. (2005) *Issues of Subsurface Radar*. Moscow, Radio Engineering Publ. (in Russian).
2. Finkelshtein M. I., Karpukhin V. I., Kuteev V. A., Metelkin V. N. (1994) *Subsurface Radar*. Moscow, Radio i Svyaz Publ. (in Russian).
3. Bryakin I. V., Bochkarev I. V. (2021) Methods of Subsurface Sounding and Development of a Device for Localization of Hidden Objects. *Instrumentation and Automation: Maintenance and Repair*. (6) (in Russian).
4. Kakora V. A., Grinkevich A. V. (2018) Combined Method of Spectral Estimation when Receiving of Superpermissions on Frequency. *Doklady BGUIR*. (8), 63–70 (in Russian).
5. Kakora V. A., Grinkevich A. V. (2017) Mathematical Analysis of Spectral Estimation Algorithms Resolution. *Doklady BGUIR*. (3), 20–24 (in Russian).
6. Ermolaev V. T., Flaksman A. G. (2007) *Methods for Estimating the Parameters of Signal Sources and Noise Received by an Antenna Array*. Nizhny Novgorod (in Russian).
7. Marple-Jr. S. L. (1990) *Digital Spectral Analysis and its Applications*. Moscow, Mir Publ. (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Гринкевич А. В., канд. техн. наук, доц., доц. каф. информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Иванец В. В., магистрант, БГУИР

Орабей М. С., магистрант, БГУИР

Денис А. А., асп., БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-20-86
E-mail: grinkevich@bsuir.by
Гринкевич Антон Витальевич

Information about the authors

Grinkevich A. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Information Radiotechnologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Ivanets V. V., Master's Student, BSUIR

Orabei M. S., Master's Student, BSUIR

Denis A. A., Postgraduate, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-20-86
E-mail: grinkevich@bsuir.by
Grinkevich Anton Vitalievich