

УДК 621.396.96:004.42

ОСОБЕННОСТИ БЛИЖНЕЙ РАДИОЛОКАЦИИ В ЗАДАЧАХ ОБНАРУЖЕНИЯ СКРЫТЫХ ОБЪЕКТОВ

А.Р. ЗАКИРОВ

*Белорусский государственный университет
(г. Минск, Беларусь)*

E-mail: Andrey.zakirau@gmail.com

Аннотация. Данная работа посвящена обзору физических основ радиолокации и практической реализации радиолокационного метода поиска скрытых объектов. В ходе исследования разработана модель георадара с антенной Вивальди в CST Studio Suite. Создана программа в MATLAB для преобразования полученных данных в трёхмерные радарограммы. Сделан вывод о применимости предложенного подхода для задач обнаружения и идентификации объектов в грунте.

Abstract. This work is devoted to a review of the physical principles of radar and the practical implementation of the radar method for subsurface object detection. In the course of the study, a ground-penetrating radar model featuring a Vivaldi antenna was developed in CST Studio Suite. A MATLAB program was created to process and transform the simulated data into three-dimensional radar images (radargrams). It is concluded that the proposed approach is highly applicable for the detection and identification of objects buried in soil.

Введение

Современная радиофизика решает сложнейшую задачу — как «увидеть» скрытые объекты через толщу неоднородных сред, будь то грунт, вода или живые ткани. Главная трудность здесь кроется в решении обратных задач электродинамики, когда по отраженному сигналу нужно восстановить точную карту диэлектрической проницаемости среды. Классические подходы вроде инверсии полного волнового поля требуют огромных вычислительных мощностей. Эту проблему сейчас решают нейросети, которые обрабатывают сигналы на лету. В этой области электромагнитное зондирование имеет жесткую специфику: «as the electromagnetic waves of GPR show a faster decay than seismic waves, most of the useful signals induced by one defect are captured in several adjacent GPR traces rather than the traces far from the defect» [1]. Благодаря переходу на нейросетевые архитектуры типа «trace-to-trace» ученым удалось получить сверхчеткие цифровые профили среды: «complex permittivity maps of subsurface structures» [1]. Прикладная георадиолокация сегодня завязана на понимании процессов рассеяния волн, где ключевую роль играют частотная дисперсия, затухание сигнала и диэлектрический контраст целей [2]. Сверхширокополосные импульсные радары уходят от ручного поиска привычных гипербол отражения, внедряя алгоритмы автоматического распознавания образов и скрытых объектов [3].

Огромным вызовом для радиоволн остаются среды с высокой проводимостью (вода и обводненные грунты), где электромагнитная волна быстро затухает из-за скин-эффекта. На стыке экологии и гидрологии технологии «Waterborne Ground Penetrating Radar» применяются для сканирования дна водоемов [4]. Такие радары помогают точно находить утечки нефтепродуктов и фиксировать деградацию подземных резервуаров [5]. Чтобы пробить экранирующий слой проводящей среды, инженеры работают над увеличением глубины проникновения — «extending the reach of radio waves», используя низкочастотные сильноточные излучатели и синтезирование апертур [6].

Те же принципы локализации совершили переворот в медицине, породив метод ближнеполевой микроволновой томографии под концептуальным заголовком «Enhancing Breast Tumor Detection with Near-Field Radar» [7]. Математическое FDTD-моделирование во временной области подтвердило, что импульсные сигналы можно фокусировать даже в биологических тканях с высокими потерями: «Three-Dimensional FDTD Analysis of a Pulsed Microwave Confocal System for Breast Cancer Detection» [8]. Физический фундамент метода — колоссальная разница в диэлектрических свойствах тканей. Исследования «ultrawideband microwave dielectric properties of normal, benign and malignant breast tissues» доказали, что опухоли поглощают и отражают радиоволны иначе, чем здоровые клетки [9]. Финальная верификация этих параметров в работе «Dielectric properties of breast carcinoma and the surrounding tissues» открыла дорогу к созданию безопасных диагностических радарных комплексов гигагерцового диапазона [10].

Основная часть

Первым этапом в данной работе было построения модели антенны Вивальди в CST Studio Suite. Моделируемая структура обладает габаритными размерами 209,85 × 364,61 мм по осям Y и Z соответственно, при общей толщине подложки с двусторонней металлизацией равной 1,95 мм (ось X). Разработанная антенна функционирует в широком частотном диапазоне от 1.6 до 6 ГГц. Модель рабочей антенны представлена на рисунке 1.

Секция 1 «Радиотехника, антенны и устройства СВЧ»

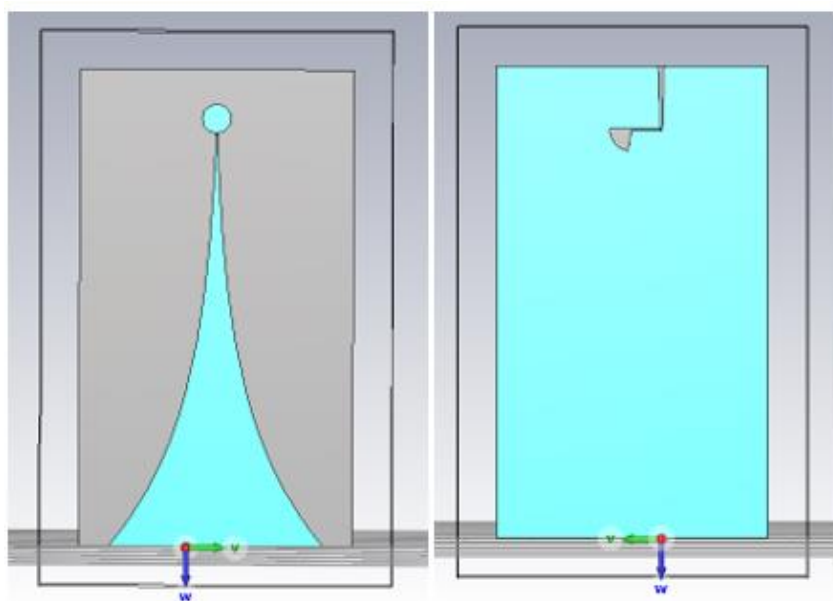


Рис. 1. Модель антенны Вивальди

На следующем этапе была разработана простая конструкция, состоящая из контейнера с вмещающей средой, имитирующей грунт, и скрытый объект с заданным диэлектрическим контрастом. В рамках численного эксперимента была проведена серия многопараметрических расчетов, моделирующих различные физические сценарии поиска: варьировались глубина заложения объекта, типы грунта, пространственная ориентация и угол наклона оси излучателя относительно поверхности, а также геометрическая форма и материал самих обнаруживаемых целей.

В качестве основной расчетной модели выбрано зондирование однородного слоя сухого песка, внутри которого на фиксированной глубине размещена модель металлической противотанковой мины, закопанной на глубине 5 см (рис. 2).

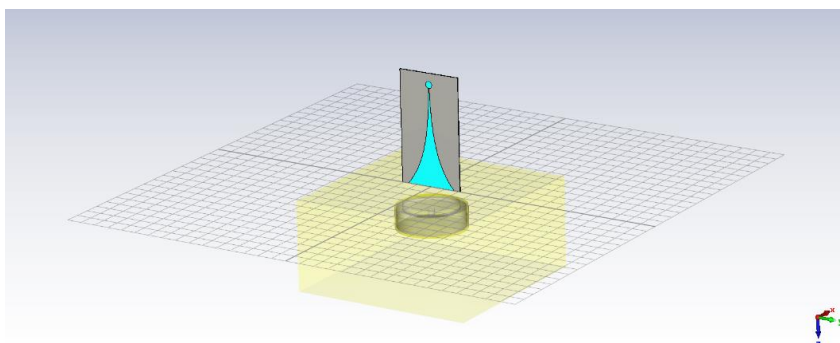


Рис. 2. Расчетная модель георадара на базе антенны Вивальди при зондировании слоя песка со скрытым объектом (миной)

На третьем этапе исследования был выполнен детальный анализ извлеченных данных электродинамического расчета. Перед запуском решателя была проведена верификация глобальных свойств сетки. Общее число расчетных ячеек составило 8,5 млн ячеек.

На рисунке 3 представлена рассчитанная частотная характеристика коэффициента отражения S_{11} спроектированной георадиолокационной системы. В низкочастотной области (до 0,7 ГГц) наблюдается полное рассогласование структуры ($S_{11} \approx 0$ дБ), обусловленное конечными геометрическими размерами раскрытия антенны. На частоте 0,804 ГГц фиксируется выраженный изолированный резонанс с уровнем отражения -35,27 дБ, соответствующий первой моде колебаний раскрытия рупора.

В целевом сверхширокополосном диапазоне от 1,6 до 4,5 ГГц частотная характеристика имеет выраженный осциллирующий характер («гребенку») с регулярными минимумами в районах -17 дБ, -21 дБ и -29 дБ. Данный спад кривой ниже критического уровня -10 дБ свидетельствует о стабильном согласовании и эффективном излучении СВЧ-энергии. Наличие периодических интерференционных колебаний в этой полосе обусловлено наложением полей обратного рассеяния от границы раздела сред «воздух-грунт» и скрытого объекта на собственное поле излучателя, что является характерным признаком ближнезонного подповерхностного сканирования. На частотах свыше 4,5 ГГц наблюдается подъем кривой, вызванный частотной дисперсией диэлектрических параметров вмещающей среды.

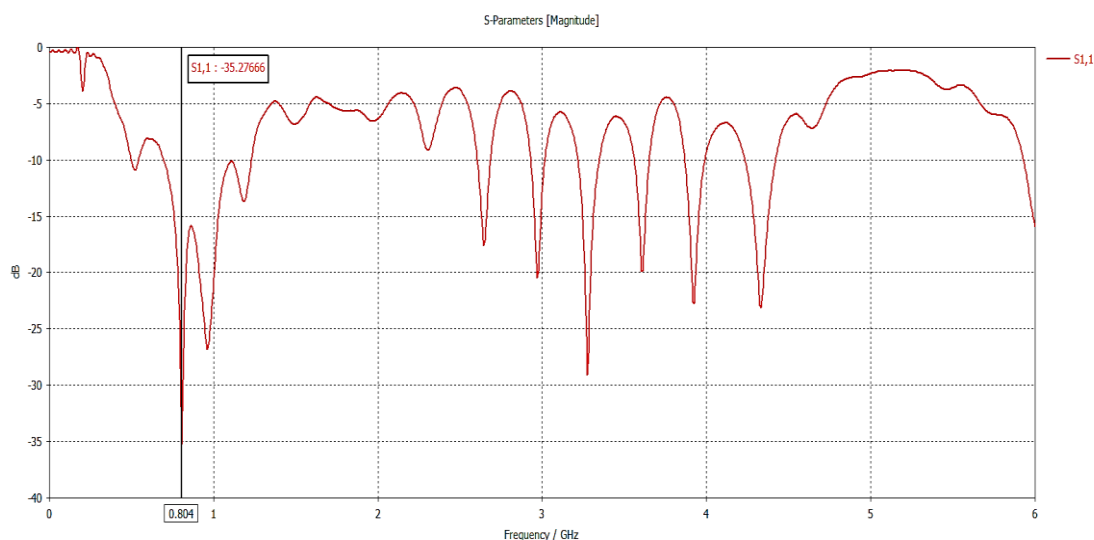


Рис. 3. Частотная характеристика коэффициента отражения S_{11} численной модели георадара.

Также было проанализировано распределение напряженности электрического поля (E-field) в плоскости сечения расчетной области (рис. 4). На полученной картине поля отчетливо прослеживается процесс формирования плоского фронта волны внутри экспоненциального раскрыва антенны Вивальди и его последующее распространение в направлении поверхности грунта.

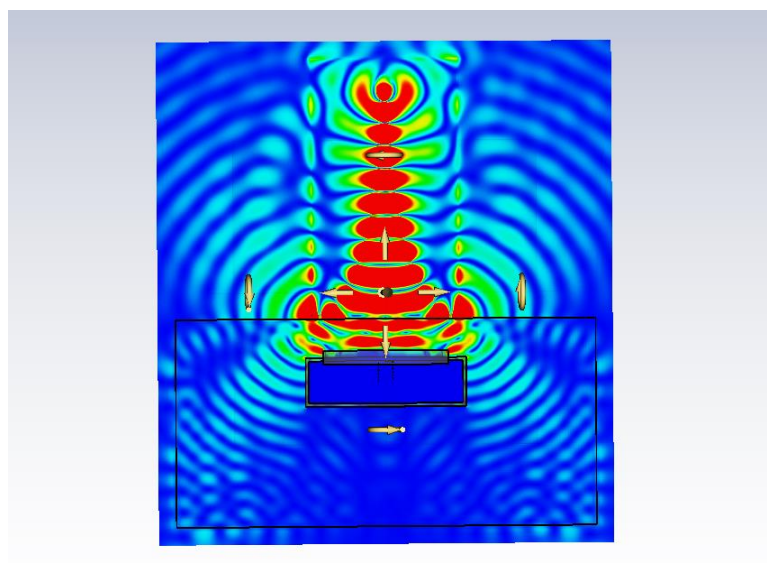


Рис. 4. Пространственное распределение напряженности электрического поля E-field в расчетной области при зондировании песчаного грунта со скрытой миной.

Финальным этапом исследования стал импорт полученного массива данных в среду MATLAB для последующей цифровой обработки и построения трехмерной радарограммы (3D-куба данных) (рис. 5). На левой панели рисунка представлена трехмерная модель эксперимента, отображающая пространственное рассеяние электромагнитной энергии по координатам X, Y и глубине Z.

Путем отсекающего фонового шума и выделения пиковых амплитуд внутри песчаного массива была выполнена пространственная локализация скрытого объекта, который визуализируется в виде плотного объемного облака точек (кластера). Правая панель демонстрирует горизонтальный срез полученного куба данных (C-scan) на целевой глубине залегания объекта, равной 0,0495 м.

Успешное совмещение трехмерной локализации с послойным картированием плоскостных срезов подтверждает высокую разрешающую способность спроектированного СШП-георадара и доказывает эффективность предложенного метода комплексной постобработки для обнаружения малококонтрастных подповерхностных целей.

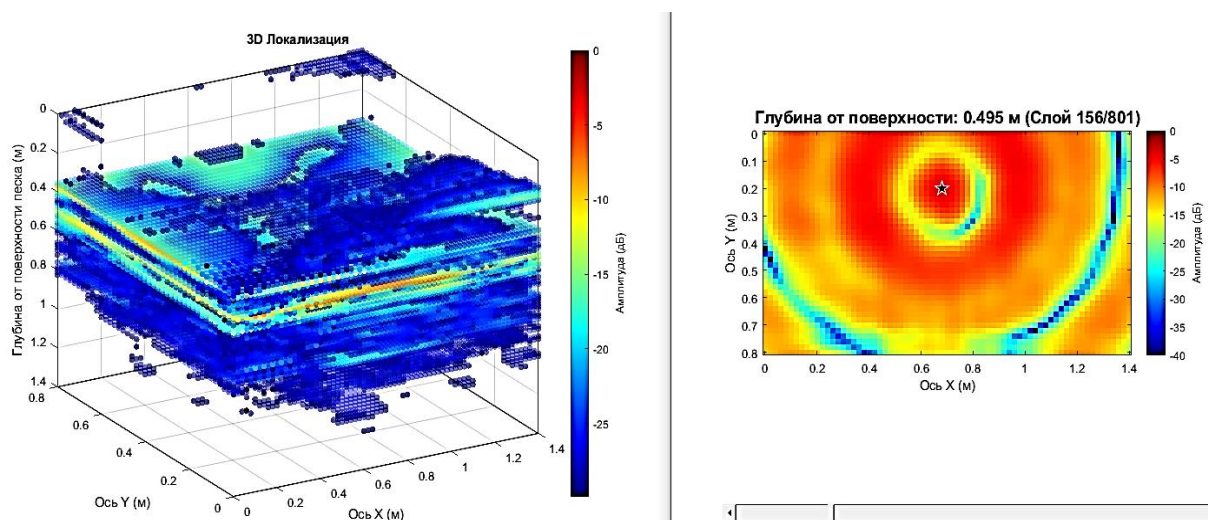


Рис. 5. Результаты комплексной визуализации данных подповерхностного сканирования песка в среде MATLAB: слева – трехмерный куб данных с локализацией объекта; справа – горизонтальный срез (C-scan) на глубине залегания мины ($Z = 0,0495$ м).

Заключение

В ходе проведенного исследования была успешно решена комплексная задача численного 3D-моделирования бесконтактного СШП-георадара на базе антенны Вивальди в среде CST Studio Suite и цифровой постобработки сигналов в MATLAB. Анализ частотных характеристик согласования (S11) и карт распределения электрического поля (E-field) подтвердил высокую электродинамическую эффективность системы в целевом диапазоне от 1,6 до 4,5 ГГц, наглядно продемонстрировав физику преломления и дифракции волн во вмещающей песчаной среде. Разработанный алгоритм пространственного анализа и фильтрации шумов позволил синтезировать информативную трехмерную радарограмму и выполнить послойное картирование (C-scan), обеспечив высокую точную пространственную локализацию скрытого подповерхностного объекта на глубине 0,0495 м с четкой визуализацией его планарных контуров. Полученные результаты полностью доказывают работоспособность предложенного подхода и его высокую перспективность для применения в современных задачах неразрушающего контроля, подповерхностной дефектоскопии и поиска малоконтрастных целей.

Список использованных источников

1. GPRinvNet: Deep Learning-Based Ground-Penetrating Radar Data Inversion for High-Resolution Underground Imaging [Electronic resource] // arXiv.org. – 2025. – arXiv:2506.18258v1. – Date of access: 01.10.2024.
2. Zhao, W. A comprehensive review of ground-penetrating radar for near-surface applications / W. Zhao, Y. Li, H. Zhang // Near Surface Geophysics. – 2023. – Vol. 21, № 5. – P. 320–345.
3. Persson, J. Underground Object Detection and Classification with Ground-Penetrating Radar [Electronic resource] / J. Persson. – 2019. – Date of access: 02.10.2024.
4. Waterborne Ground Penetrating Radar [Electronic resource] // United States Environmental Protection Agency. – 2022. – Date of access: 02.10.2024.
5. Using GPR to Detect Soil Contamination and Underground Storage Tanks (USTs) [Electronic resource] // Southeast Scanning. – 2023. – Date of access: 08.10.2024.
6. Smith, R. Extending the Reach of Radio Waves for Subsurface Water Detection / R. Smith // CSEG Recorder. – 2021. – Vol. 46, № 3. – P. 40–45.
7. Fear, E. C. Enhancing Breast Tumor Detection with Near-Field Radar / E. C. Fear, M. A. Stuchly // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2002. – Vol. 49, № 9. – P. 1052–1062.
8. Hagness, S. C. Three-Dimensional FDTD Analysis of a Pulsed Microwave Confocal System for Breast Cancer Detection / S. C. Hagness, A. Taflove, J. E. Bridges // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 1999. – Vol. 46, № 8. – P. 1020–1022.
9. Lazebnik, M. A large-scale study of the ultrawideband microwave dielectric properties of normal, benign and malignant breast tissues obtained from cancer surgeries / M. Lazebnik, D. Popovic, L. McCartney [et al.] // Physics in Medicine and Biology. – 2007. – Vol. 52, № 20. – P. 6093–6115.
10. Lazebnik, M. Dielectric properties of breast carcinoma and the surrounding tissues / M. Lazebnik, E. L. Madsen, G. R. Frank, S. C. Hagness // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2008. – Vol. 55, № 2. – P. 650–659.