
Распространение электромагнитных волн

Научная статья
УДК 621.3.091.22
DOI: <https://doi.org/10.18127/j5604128-202503-12>

Обнаружение слабоконтрастных объектов георадаром с управляемой диаграммой направленности антенны

Д.А. Смирнов¹, А.А. Аверин², В.В. Варенков³, Т.В. Сахтерова⁴, В.И. Сахтеров⁵

¹⁻⁵ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (Москва, Россия)

⁵ ООО «НПО Радиолокация в геофизике и радиофизике» (Москва, Россия)

² averin@izmiran.ru, ⁵ sakhterov@mail.ru

Аннотация

Постановка проблемы. В настоящее время широко используются георадары (преимущественно классические малоглубинные), в основе которых лежат технологии стробоскопического осциллографа. В специализированном сегменте геологоразведки довольно давно применяются глубинные импульсные георадары со сверхширокополосными сигналами повышенной мощности. Данные приборы имеют фиксированную диаграмму направленности антенно-фидерных устройств.

Цель. Разработать способ обнаружения слабоконтрастных сред и объектов при использовании георадара с управляемой диаграммой направленности антенны.

Результаты. Предложен способ управления диаграммой направленности антенны передатчика. Рассмотрен способ управления диаграммой направленности приемной антенны.

Практическая значимость. Использование предложенных способов в комплексе позволяет получить для обработки несколько сигналов с разными фазовыми и амплитудными характеристиками в одной точке без механического перемещения прибора. Разработка новых способов обработки сигналов повысит возможность обнаружения слабоконтрастных объектов.

Ключевые слова

Георадар, антенны, диаграмма направленности, обработка сигналов

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-12-00083-П.

Для цитирования

Смирнов Д.А., Аверин А.А., Варенков В.В., Сахтерова Т.В., Сахтеров В.И. Обнаружение слабоконтрастных объектов георадаром с управляемой диаграммой направленности антенны // Электромагнитные волны и электронные системы. 2025. Т. 30. № 3. С. 105–113. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202503-12>

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

В настоящее время в геологоразведке преимущественно используются классические стробоскопические георадары, а также импульсные глубинные георадары, где главный лепесток диаграммы направленности (ДН) каждой антенны имеет фиксированное значение [1–5]. Он направлен перпендикулярно относительно расположения дипольной антенны, меняясь в небольших пределах в зависимости от плотности соприкосновения антенн с исследуемой средой. При этом необходимо учитывать специфику работы георадаров: прием отраженного сигнала начинается одновременно с излучением сверхширокополосного импульса. По этой причине в каждый отсчет времени используются разные участки ДН.

На рис. 1 приведены нормированные изменения распределения поля на расстоянии от одной длины волны до пяти длин волн. На расстоянии более пяти длин волн формируется главный лепесток ДН, происходит его сужение, позволяющее более точно исследовать среду. Однако уменьшение площади отражения снижает уровень отраженного сигнала.

© Смирнов Д.А., Аверин А.А., Варенков В.В., Сахтерова Т.В., Сахтеров В.И., 2025

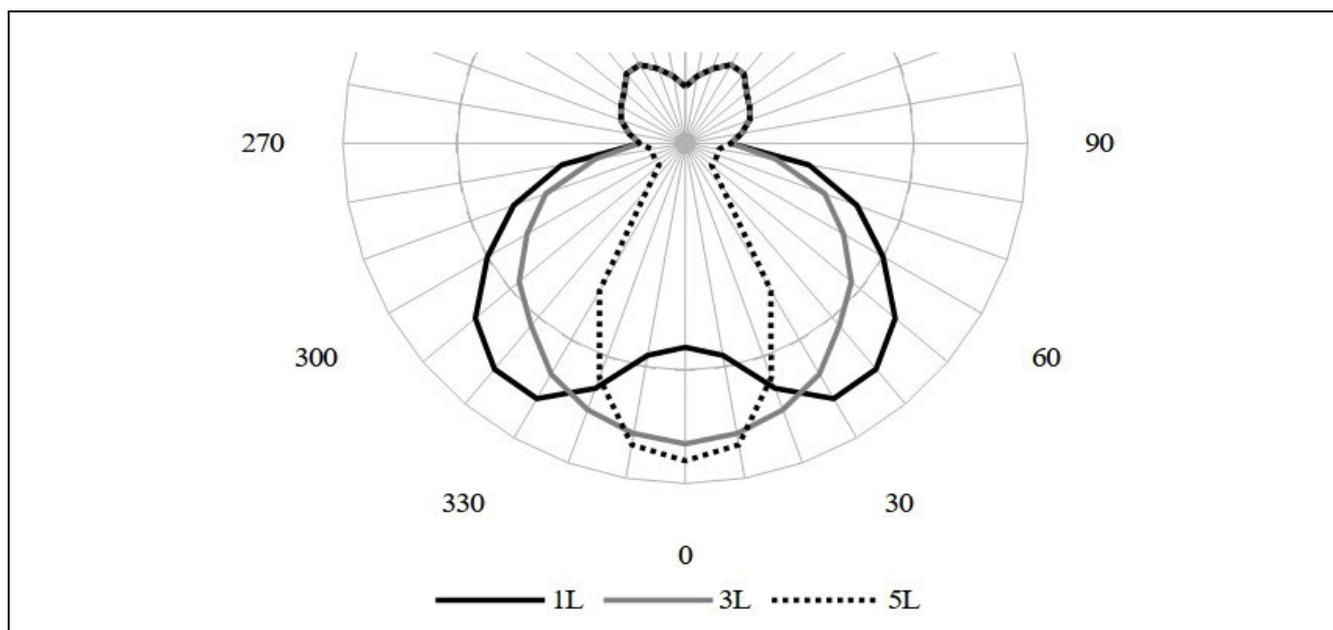


Рис. 1. Нормированные изменения распределения поля до образования ДН на расстояниях от одной до пяти длин волн

Fig. 1. Normalized changes in the field distribution before the formation of a radiation pattern at distances from one to five wavelengths

Ц е л ь р а б о т ы – разработать способ обнаружения слабоконтрастных сред и объектов при использовании георадара с управляемой ДН антенны.

Особенности обнаружения слабоконтрастных объектов георадаром

Исследования на полуцилиндрическом стенде позволили провести сравнительный анализ распределения поля в непосредственной близости к передающей антенне георадара [6]. Остальные данные построены на основе экспериментальных измерений, в основном на пресных водоемах [7]. Также опубликованы труды с результатами численного моделирования ДН антенн, применяемых для подповерхностной георадиолокации [8].

При проведении измерений георадаром наблюдаются различия в полученных данных в соответствии со взаимным расположением приемника и передатчика. При профилировании передатчик может располагаться как перед приемником, так и позади него. Такие данные георадиолокации могут отличаться незначительно, что связано с различиями ДН приемной и передающей антенн. Измеренные положения главных лепестков отличаются на $1\text{--}2^\circ$, но этого достаточно для изменения получаемых данных.

В связи с обнаружением подобного эффекта для выявления предполагаемых слабоконтрастных объектов в настоящее время геофизики проводят серию профилирований под несколькими углами. Для ускорения работ иногда применяют облучение объектов двумя передатчиками – перед приемником и после приемника. Объем информации об объекте, принимаемый таким образом, значительно увеличивается [9]. В процессе проведения измерений на стенде была разработана направленная антенна подземного излучения, применяемая для каротажа [10, 11]. В результате дальнейших исследований были предложены несколько способов электронного управления ДН антенны передатчика [12]. Кроме этого, для развития исследований также предложен способ электронного управления ДН приемной антенны [13].

На Микроволновой конференции в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН в 2024 г. был сделан доклад про комплексное использование управления ДН антенн передатчика и приемника. Однако в связи с большим объемом получаемой информации и не отработанными алгоритмами обработки результатов для необходимости получения большего количества статистических данных, требуемых для распознавания исследуемых объектов и среды, было решено на данном этапе ограничиться управлением ДН излучающей антенны. Доклады по данной тематике также были представлены на других конференциях [14, 15].

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим результаты экспериментов по управлению ДН передающей антенны. На рис. 2 представлена упрощенная схема передатчика георадара с управляемой ДН. На рис. 2,*а* приведена направленная резистивно-нагруженная дипольная антенна, а на рис. 2,*б* – положение главного лепестка ДН при изменении амплитуд передатчика. При создании антенны применялись резистивно-нагруженные вибраторы [16]. Плоские резистивно-нагруженные вибраторы (+ R ... $-R$) расположены над металлической пластиной S на расстоянии, примерно равном ширине вибратора, концы вибраторов соединены с этим металлическим экраном. Для упрощения показано по три резистора с линейно возрастающим сопротивлением, на практике количество резисторов может быть более 10 и иметь другой закон изменения сопротивления. Экран имеет толщину более 3 мм и низкое резистивное сопротивление, что не дает возникнуть паразитным автоколебаниям. Схема формирования дельтаобразного импульса повышенной амплитуды содержит симметричный выход. Общая точка генератора также соединена с экраном антенны. Изменение положения главного лепестка ДН производится изменением амплитуды этих разнополярных импульсов ($U+r$, $U-r$).

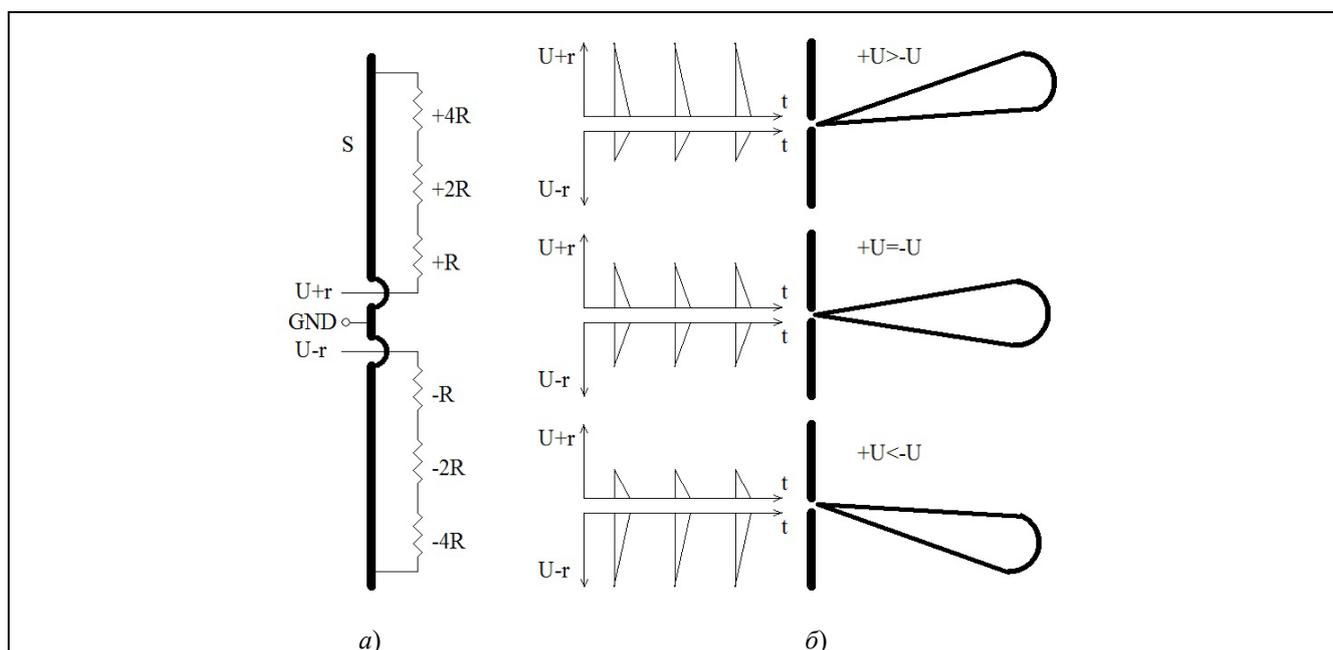


Рис. 2. Упрощенная схема передатчика георадара с управляемой ДН: *а* – направленная резистивно-нагруженная дипольная антенна; *б* – положение главного лепестка ДН при изменении амплитуд передатчика

Fig. 2. Simplified diagram of a ground-penetrating radar transmitter with a controlled radiation pattern: *a* – directional resistively loaded dipole antenna; *b* – position of the main lobe of the radiation pattern when the sensor amplitudes change

При проведении экспериментов среднее пиковое напряжение импульсов составляло $\pm 2,5$ кВ, длительность 4 нс. Для изменения ДН напряжение формируемых импульсов менялось у одного вибратора в диапазоне от 2 кВ до минус 3 кВ и на другом в противофазе – от 3 кВ до 2 кВ. Положения от минус 25 кВ до 2,5 кВ не применялись. В результате при подповерхностном профилировании подземных слоев или объектов имелась возможность облучить их электромагнитной волной под разными углами. Наблюдалось изменение амплитуды и фазы принимаемого сигнала при изменении ДН излучаемого сигнала для двух положений главного лепестка ДН.

На рис. 3 приведены результаты профилирования объекта георадаром «Сфера». Здесь представлены две радарограммы, полученные на одном профиле: 1) при отклонении главного лепестка на плюс 7° (рис. 3,*а*); 2) при отклонении главного лепестка на минус 7° (рис. 3,*б*), построенные на основе осциллограмм принятых сигналов в одной точке измерения без механического перемещения. Изменение положения лепестка ДН производилось электронным способом на стороне передающей антенно-фидерной системы. Принимаемый сигнал, на первый взгляд, имеет незначительные изменения радарограмм, можно предположить возникновение ошибки в цепях антенно-фидерных устройств. Обычно при обработке оператор вначале просто рассматривает радарограммы в различных типовых алгоритмах обработки.

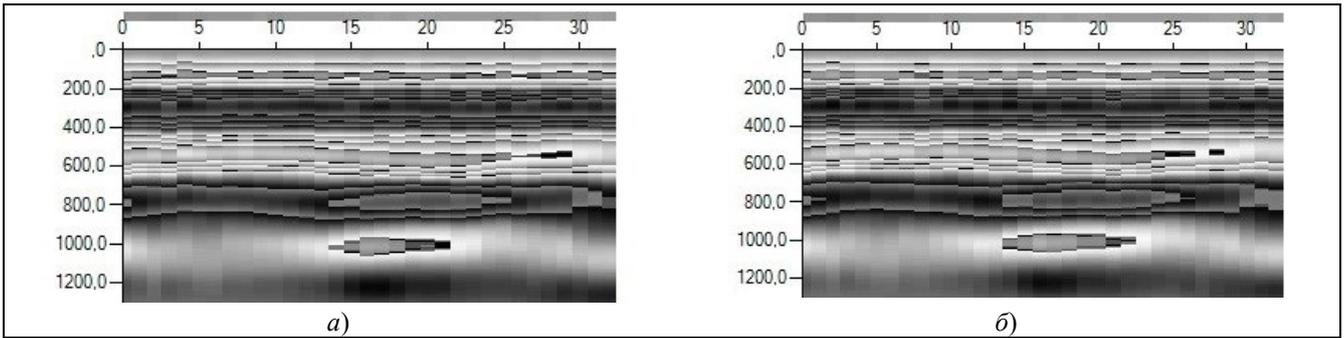


Рис. 3. Результаты профилирования радарограммы при отклонении главного лепестка на плюс 7° (a) и на минус 7° (б)

Fig. 3. GPR profiles the deviation of the main lobe by 7° (a) and by minus 7° (b)

Способы, при использовании которых выделяются различные границы сред, слои и объекты, представлены на рис. 4. На рис. 4,а просматриваются более тонкие границы между средами в верхней области, однако ниже происходит загромождение пространственного разрешения слоев. Алгоритм обработки на рис. 4,б производит более четкое распределение слоев, но при этом теряется информативность.

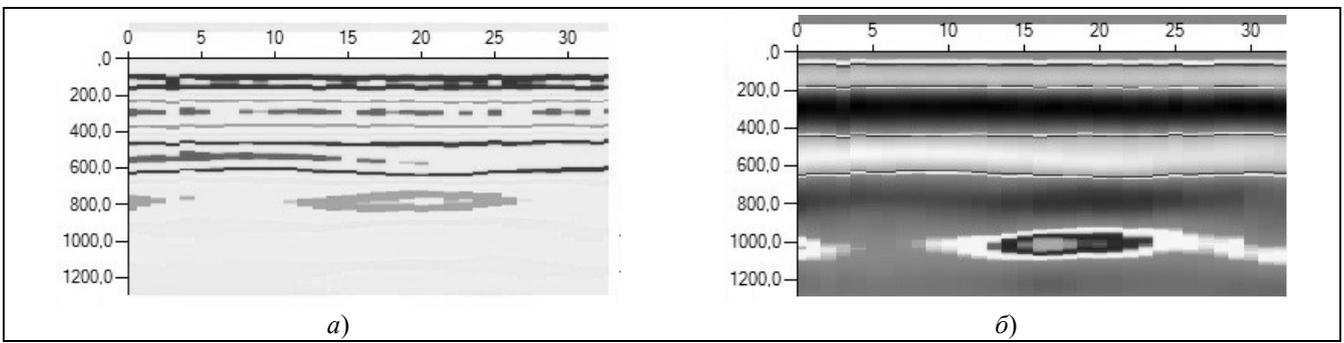


Рис. 4. Радарограммы при использовании других алгоритмов цветовой представления результатов обработки

Fig. 4. B-scans by using other algorithms for color representation of processing results

На рис. 5 приведены участки осциллограмм в волновой форме. В центральной части на ниспадающем участке всех осциллограмм видны амплитудные и фазовые изменения, вызванные характеристиками изучаемого объекта. В данном случае это пластиковая труба в сухом песке на границе между песком и суглинком. Как объект ее трудно различить, для более четкого представления профилирование проводилось весной в случае расположения полой трубы во влажном песке на границе с суглинком. Также одним из сложных объектов обнаружения являются, например, разломы кварцевой руды, в большинстве случаев наблюдаемых зрительно, но отсутствующих на радарограммах.

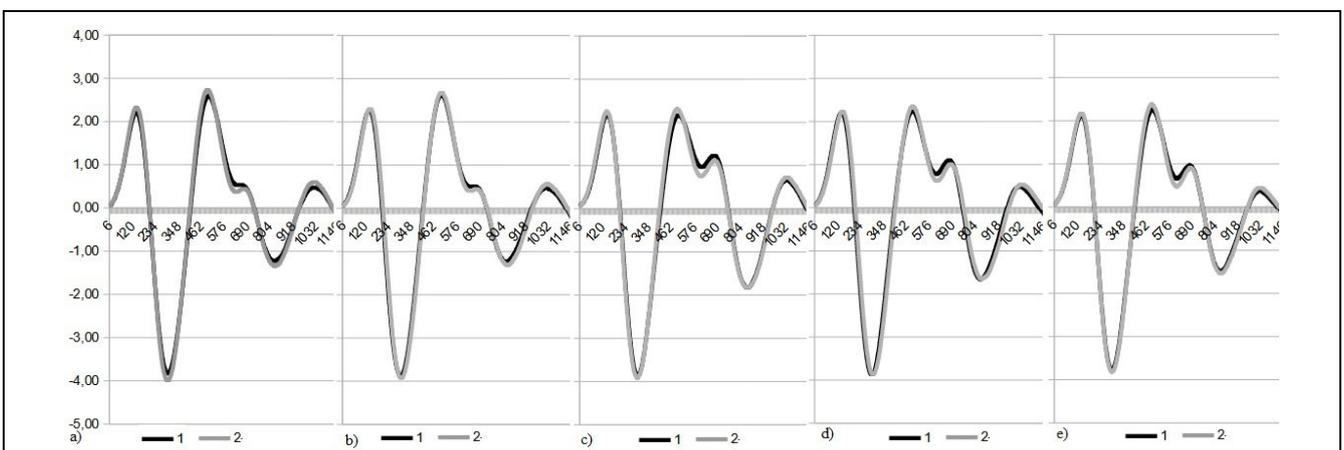


Рис. 5. Осциллограммы пяти последовательных участков профиля (сигнал в волновой форме)

Fig. 5. Parts of the A-scans of five consecutive sections of the B-scan

Сигнал в волновой форме на отдалении от исследуемого объекта показан на рис. 6, где наблюдается небольшое фазовое искажение сигнала в районе отсчета 708. Одним из способов представления изменения амплитуды и фазы данных, полученных при профилировании георадара с управляемой ДН, является введение дополнительного информационного слоя, в котором можно будет указывать границы и слои возникающих амплитудно-фазовых искажений.

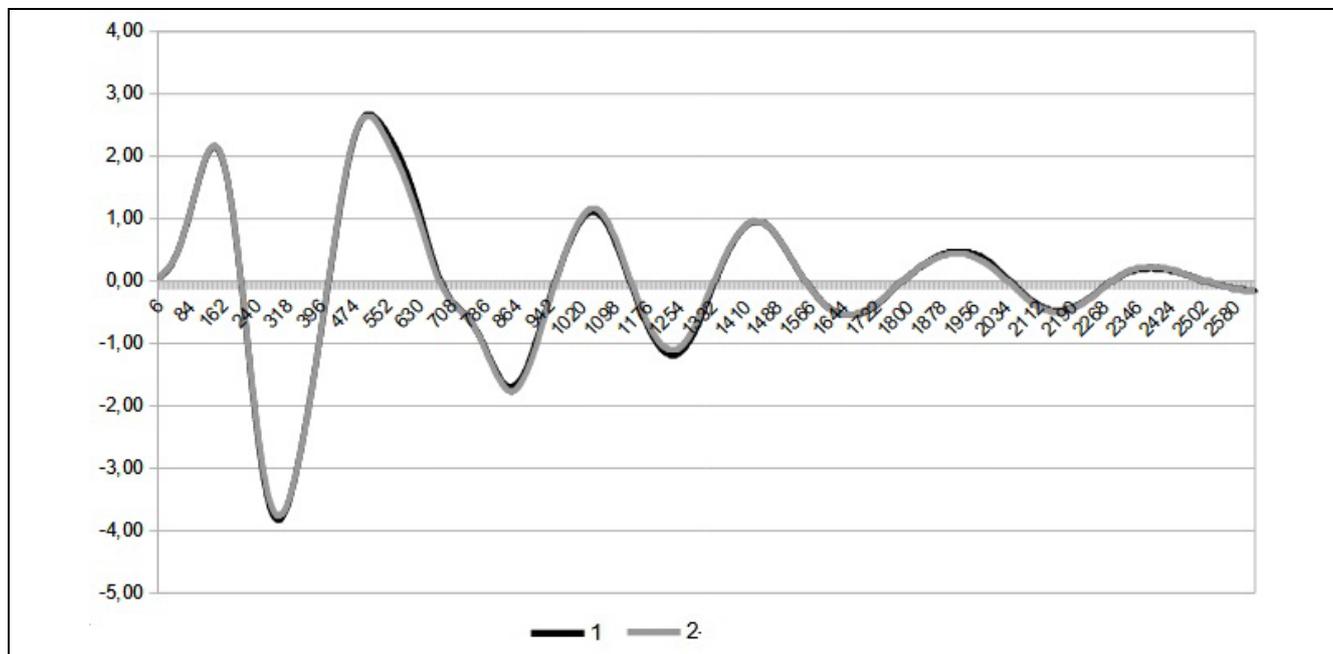


Рис. 6. Осциллограмма волновой формы сигнала на отдалении от объекта

Fig. 6. A-scan at a distance from the object

Кроме того, имеются технические особенности по приему и обработке сигналов при использовании георадара с управляемой ДН: для более четкого обнаружения и распознавания слабоконтрастных объектов и слоев необходимо использовать отдельную антенну для синхронизации по воздушной волне. Применение стандартного канала синхронизации от общей антенны снижает информативность.

По результатам исследований в направлении антенно-фидерных устройств для глубинной георадиолокации была разработана многовibratorная дипольная антенна с резистивно-нагруженными вибраторами одинаковой длины. Данная антенна состоит из нескольких вибраторов с минимальным резистивным сопротивлением, не допускающим возникновение паразитных автоколебаний. Вибраторы, подключенные параллельно, снижают общий импеданс антенны, увеличивая мощность излученного импульса [17].

Проведенные эксперименты показали увеличение усиления пяти vibratorной дипольной антенны по сравнению с одновibratorной дипольной антенной на 10 дБ. Эта антенна может использоваться для передачи и приема, имеет фиксированную ДН. Также проведены эксперименты с антенной по электронному управлению ДН. Выяснилось, что путем изменения количества подключенных вибраторов можно варьировать характеристики приемной антенны, однако при этом проведенные эксперименты показали повышенные требования по организации синхронизации: дополнительные усовершенствования существующей аппаратуры приема сигналов подповерхностного зондирования; введение дополнительного канала синхронизации с отдельным усилителем и отдельной дипольной антенной.

На рис. 7 приведена осциллограмма, полученная при эксперименте с многовibratorной приемной антенной. Использовался георадар «Сфера» с экспериментальной многовibratorной антенной [18].

В настоящее время идет набор статистического материала полученных данных и совершенствование технической части измерительной аппаратуры. Дополнительно следует отметить, что эксперименты ведутся с антеннами длиной 1 м, что создает свои ограничения по размерам обнаруживаемых объектов. Использование передатчиков с применением газонаполненных разрядников с неконтролируемым временем разряда накладывает некоторые ограничения по фазовой обработке сигналов. При использовании

твердотельных генераторов с импульсами соответствующей длительности и амплитуды вполне возможно распознавание характеристик объекта, его плотности и других свойств. Обработка радарограмм производилась в программе MATRIX, специализированной под обработку данных глубинной георадиолокации [19]. На данный момент ведутся разработки новых алгоритмов, математических решений и режимов измерений данных, получаемых при использовании георадара с управляемой ДН.

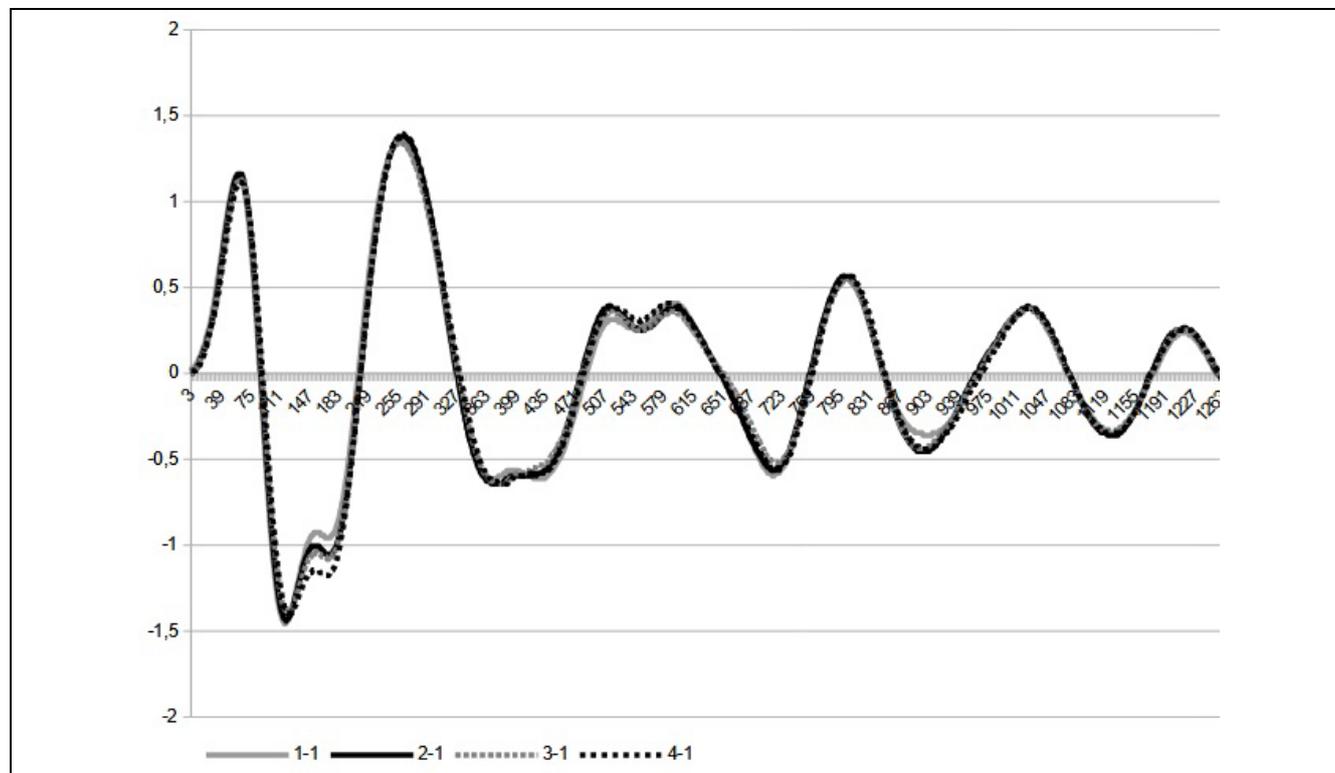


Рис. 7. Осциллограммы волновой формы сигналов с четырех вибраторов в одной точке без перемещения

Fig. 7. A-scans from 4 vibrators at one point without moving

Заключение

Проведенные исследования и эксперименты по управлению характеристиками антенн георадаров показали возможность получения множественных данных в одной точке без механического перемещения прибора. Несколько отраженных значений от одного геологического слоя или инженерного объекта при облучении его под разными углами дают возможность построения объемной модели. При разработке соответствующих алгоритмов обработки данных георадиолокации предложенный способ позволит обнаруживать слабоконтрастные геологические слои и инженерные объекты.

Список источников

1. Попов А.В., Прокопович И.В., Едемский Д.Е., Морозов П.А., Беркут А.И. Глубинный георадар: принципы и применение // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23. № 4. С. 28–36.
2. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Варенков В.В., Резников А.Е., Сахтеров В.И. Современные георадары серии «ГРОТ» для экологического мониторинга // Экологические системы и приборы. 2012. № 5. С. 3–5.
3. ГЕОТЕХ. Геофизическое оборудование. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.geotech.ru>, дата обращения 05.02.2025.
4. ЛОГИС. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.logsys.ru/>, дата обращения 05.02.2025.
5. Geoscanners АВ. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.geoscanners.com>, дата обращения 05.02.2025.
6. Сахтеров В.И. Измерение характеристик антенн георадаров // Труды XXVII Всероссийской открытой науч. конф. «Распространение радиоволн». Калининград: Балтийский федеральный университет им. И. Канта. 2021. С. 596–600.
7. Morozov P., Prokopovich I., Lazarev M., Popov A., Sakhterov V., Edemsky D. Characterization of GPR radiation pattern in the upper and lower hemisphere (theory and experiment) // Journal of Physics: Conference Series. 2024. V. 2887. № 1. P. 012051. DOI 10.1088/1742-6596/2887/1/012051.

8. Прокопович И.В. Численный расчет импульсного излучения дипольной антенны на границе двух сред // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 12. DOI 10.30898/1684-1719.2024.12.5.
9. Патент на полезную модель RUS227004 от 01.07.2024. Трехантенный георадар для обнаружения слабоконтрастных объектов / Горкин Д.С., Сахтеров В.И.
10. Патент на изобретение RUS2753250 от 12.08.2021. Направленная антенна для подземного излучения / Сахтеров В.И.
11. Сахтеров В.И., Прокопович И.В., Попов А.В. Экранированная дипольная антенна для задач радиолокационного каротажа // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 8. С. 103–112. DOI 10.18127/j00338486-202208-11.
12. Сахтеров В.И. Способ управления диаграммой направленности антенны подземного излучения // Антенны. 2024. № 3. С. 40–48. DOI 10.18127/j03209601-202403-05.
13. Сахтеров В.И. Способы управления диаграммой направленности антенн георадара // Тезисы XV науч.-технич. конф. «Радиолокационные системы малой и сверхмалой дальности». М.: ИЗМИРАН. 2024. С. 46–49.
14. Sakhterov V.I., Averin A.A., Varenkov V.V., Gorkin D.S., Smirnov D.A. Application of ground penetrating radar with controlled antenna pattern for detection of low-contrast objects // IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC). Moscow. 2024. P.21–24.
15. Смирнов Д.А., Аверин А.А., Варенков В.В., Сахтерова Т.В., Сахтеров В.И. Обнаружение слабоконтрастных объектов с помощью управления диаграммы направленности излучающей антенны // Науч.-технич. конф. «Радиолокация в геофизике и радиофизике» РГР-2025. М.: Троицкий Дом ученых. 2025.
16. Wu T., King R. The cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1965. V. 13. № 3. P. 369–373. DOI 10.1109/TAP.1965.1138429.
17. Аверин А.А., Горкин Д.С., Варенков В.В., Сахтеров В.И. Увеличение глубины зондирования импульсного георадара путем снижения импеданса антенны // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. № 3. С. 49–58. DOI 10.18127/j15604128-202403-06.
18. Варенков В.В., Горкин Д.С., Смирнов Д.А., Сахтерова Т.В., Сахтеров В.И. Результаты экспериментов с георадаром «Сфера» // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. № 5. С. 66–70. DOI 10.18127/j15604128-202405-10.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663673 от 27.06.2023. Matrix / Горкин Д.С., Варенков В.В.

Информация об авторах

Дмитрий Андреевич Смирнов – мл. науч. сотрудник, сектор научного приборостроения

SPIN-код: 5161-7063

Александр Анатольевич Аверин – науч. сотрудник, заведующий сектором научного приборостроения

SPIN-код: 1995-8814

Владимир Викторович Варенков – науч. сотрудник

SPIN-код: 6186-9270

Татьяна Викторовна Сахтерова – инженер

SPIN-код: 7261-3117

Владимир Иванович Сахтеров – к.ф.-м.н., ст. науч. сотрудник

SPIN-код: 7559-8325

Статья поступила в редакцию 25.04.2025

Одобрена после рецензирования 26.05.2025

Принята к публикации 02.06.2025

ВНИМАНИЕ!

На сайте Издательства Радиотехника и в электронной библиотеке
в открытом доступе представлены журналы:

«Нелинейный мир», 2024, т. 22, № 3;

«Нелинейный мир», 2024, т. 22, № 4 (выборочные статьи);

«Электромагнитные волны и электронные системы», 2024, т. 29, № 5;

«Нейрокомпьютеры: разработка, применение», 2024, т. 26, № 6 (выборочные статьи);

«Динамика сложных систем – XXI век», 2024, т. 18, № 4;

«Биомедицинская радиоэлектроника», 2024, т. 27, № 6 (выборочные статьи)

и другие.

Адрес Издательства:

101000, г. Москва, Подсосенский пер., д. 14, стр. 2, тел. +7(495)625-92-41

<http://www.radiotec.ru>, e-mail: info@radiotec.ru

Original article

Detection of low-contrast objects by ground-penetrating radar with controlled radiation pattern

D.A. Smirnov¹, A.A. Averin², V.V. Varenkov³, T.V. Sakhterova⁴, V.I. Sakhterov⁵

¹⁻⁵ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (Moscow, Russia)

⁵ LLC "RL Radar in geophysics and radiophysics" (Moscow, Russia)

² averin@izmiran.ru, ⁵ sakhterov@mail.ru

Abstract

Currently, ground penetrating radars are widely used, mainly shallow ones, based on stroboscopic oscilloscope technologies. In the specialized segment of geological exploration, deep pulsed ground penetrating radars with ultra-wideband signals of increased power are used. All these types of devices have a fixed directional diagram of antenna-feeder devices. A method for controlling the directional diagram of the transmitter antenna is proposed, which allows receiving several signals with different phase amplitude characteristics at one point without mechanical movement of the device. The development of new algorithms and methods for processing such signals will increase the possibility of detecting low-contrast objects.

Keywords

Ground Penetrating Radar, antennas, radiation pattern, signal processing

For citation

Smirnov D.A., Averin A.A., Varenkov V.V., Sakhterova T.V., Sakhterov V.I. Detection of low-contrast objects by ground-penetrating radar with controlled radiation pattern. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2025. V. 30. № 3. P. 105–113. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202503-12> (in Russian)

References

1. Popov A.V., Prokopovich I.V., Edemsky D.E., Morozov P.A., Berkut A.I. Deep penetration subsurface radar: principles and application. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2018. V. 23. № 4. P. 28–36. (in Russian)
2. Volkovskaya L.B., Gulevich O.A., Varenkov V.V., Reznikov A.E., Sakhterov V.I. Modern GPR "Grot" series for environmental monitoring. *Ecological systems and devices*. 2012. № 5. P. 3–5. (in Russian)
3. GEOTECH. Geophysical equipment. [Electronic resource] – Access mode: <http://www.geotech.ru>, date of reference 05.05.2025. (in Russian)
4. LOGIS. [Electronic resource] – Access mode: <http://www.logsys.ru/>, date of reference 05.05.2025. (in Russian)
5. Geoscanners AB. [Electronic resource] – Access mode: <http://www.geoscanners.com>, date of reference 05.05.2025.
6. Sakhterov V.I. Measuring characteristics of GPR antennas. *Proceedings of the XXVII All-Russian Open Scientific Conference. "Propagation of radio waves"*. Kaliningrad: I. Kant Baltic Federal University. 2021. P. 596–600. (in Russian)
7. Morozov P., Prokopovich I., Lazarev M., Popov A., Sakhterov V., Edemsky D. Characterization of GPR radiation pattern in the upper and lower hemisphere (theory and experiment). *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. V. 2887. № 1. P. 012051. DOI 10.1088/1742-6596/2887/1/012051.
8. Prokopovich I.V. Numerical calculation of dipole antenna radiation pattern at interface between two media. *Journal of Radio Electronics*. 2024. № 12. DOI 10.30898/1684-1719.2024.12.5. (in Russian)
9. Utility model patent RUS227004 dated 01.07.2024. Three-antenna georadar for detecting low-contrast objects. Gorkin D.S., Sakhterov V.I. (in Russian)
10. Patent for invention RUS2753250 dated 12.08.2021. Directional antenna for underground radiation. Sakhterov V.I. (in Russian)
11. Sakhterov V.I., Prokopovich I.V., Popov A.V. Shielded dipole antenna for borehole GPR applications. *Radiotekhnika*. 2022. V. 86. № 8. P. 103–112. DOI 10.18127/j00338486-202208-11. (In Russian)
12. Sakhterov V.I. Method for controlling the radiation pattern of an underground radiation antenna. *Antennas*. 2024. № 3. P. 40–48. DOI 10.18127/j03209601-202403-05. (in Russian)
13. Sakhterov V.I. Methods of controlling the radiation pattern of georadar antennas. *Abstracts of the XV Scientific and Technical Conference "Short-range and ultra-short-range radar systems."* Moscow: IZMIRAN. 2024. P. 46–49. (in Russian)
14. Sakhterov V.I., Averin A.A., Varenkov V.V., Gorkin D.S., Smirnov D.A. Application of ground penetrating radar with controlled antenna pattern for detection of low-contrast objects. *IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC)*. Moscow. 2024. P.21–24.
15. Smirnov D.A., Averin A.A., Varenkov V.V., Sakhterova T.V., Sakhterov V.I. Detection of low-contrast objects by controlling the radiation pattern of a radiating antenna. *Scientific and Technical Conference "Radar in geophysics and radiophysics" RGR-2025*. Moscow: Troitskiy House of Scientists. 2025. (in Russian)
16. Wu T., King R. The cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1965. V. 13. № 3. P. 369–373. DOI 10.1109/TAP.1965.1138429.
17. Averin A.A., Gorkin D.S., Varenkov V.V., Sakhterov V.I. Increasing the probing depth of pulsed GPR by reducing the antenna impedance. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2024. V. 29. № 3. P. 49–58. DOI 10.18127/j15604128-202403-06. (in Russian)
18. Varenkov V.V., Gorkin D.S., Smirnov A.D., Sahterova T.V., Sahterov V.I. The results of experiments with the GPR «Sphere». *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2024. V. 29. № 5. P. 66–70. DOI 10.18127/j15604128-202405-10. (in Russian)

19. Certificate of state registration of the computer program № 2023663673 dated 27.06.2023. Matrix. *Gorkin D.S., Varenkov V.V.* (in Russian)

Information about the authors

Dmitry A. Smirnov – Junior Research Scientist
Alexander A. Averin – Research Scientist
Vladimir V. Varenkov – Research Scientist
Tatiana V. Sakhterova – Engineer
Vladimir I. Sakhterov – Ph.D. (Phys.-Math.), Senior Research Scientist

The article was submitted 25.04.2025

Approved after reviewing 26.05.2025

Accepted for publication 02.06.2025

ЖУРНАЛ «БИМЕДИЦИНСКАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

Главный редактор: академик РАН Юрий Васильевич Гуляев

Международный научно-прикладной журнал публикует статьи по биоматериаловедению, биомедицинским технологиям и взаимодействию физических полей и излучений с биологическими объектами, а также по разработке новых радиоэлектронных приборов для применения в биологии, биомедицинских технологиях и медицине.

Включен в состав базы Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science.

Включен в Перечень ВАК для научных периодических изданий, удовлетворяющих достаточному условию включения в Перечень

Выходит с 1998 г.

Периодичность: 7 номеров в год

ISSN: 1560-4136

«Пресса России» – индекс: 83820

Научные специальности ВАК

- 1.3.21. Медицинская физика
- 1.5.1. Радиобиология
- 1.5.2. Биофизика
- 1.5.6. Биотехнология
- 2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения



Полный перечень журналов и книг, выпускаемых Издательством Радиотехника, размещен на сайте <http://www.radiotec.ru>

Адрес Издательства:

101000, г. Москва, Подсосенский пер., д. 14, стр. 2, тел. +7(495)625-92-41

<http://www.radiotec.ru>, e-mail: info@radiotec.ru