Прикладные задачи, решаемые антенной техникой

Научная статья
УДК 621.3.091.22
DOI: https://doi.org/10.18127/j03209601-202605-06

Результаты применения георадара с управляемой диаграммой направленности

В. В. Варенков[1], **Д. А. Смирнов**[2], **В. И. Сахтеров**[3]
[1–3] Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (Москва, Россия)
[1] varenkov@izmiran.ru, [2] dsmirnov@izmiran.ru, [3] sahterov@izmiran.ru

Аннотация

Постановка проблемы. В настоящее время в геологии и инженерной геофизике широко используются георадары, имеющие фиксированную диаграмму направленности антенно-фидерных устройств. При этом некоторые приборы способны осуществлять измерения с антеннами разных частотных диапазонов. Разработка георадаров с управляемой диаграммой направленности главного лепестка приемной антенны позволит производить измерения нескольких трасс в одной точке антеннами разных частотных диапазонов и с управлением диаграммы направленности.
Цель. Показать предварительные результаты подповерхностного профилирования при использовании георадара с управляемой диаграммой направленности приемной антенны.
Результаты. Представлены результаты профилирования георадаром с управляемой диаграммой направленности. Показаны радарограммы, и рассмотрены их особенности, полезные для обнаружения слабоконтрастных сред и объектов. Отмечено, что в зависимости от территориальных возможностей и технологических ограничений возможно проведение последовательного и параллельного расположения излучающих и приемных антенн.
Практическая значимость. Использование георадара с предложенным способом управления диаграммой направленности позволяет при проведении профилирования исследуемой среды получить несколько радарограмм с разными фазовыми и амплитудными характеристиками. Это помогает оператору получить дополнительную информацию для интерпретации результатов профилирования. Регулярно проводимые измерения на различных участках пополняют базу данных. Разработка новых алгоритмов обработки сигналов развивает методики интерпретации и повышает возможность обнаружения слабоконтрастных объектов.

Ключевые слова

Георадар с управляемой диаграммой, антенны, диаграмма направленности, обработка сигналов

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИЗМИРАН (тема № FFUM-2026-0010).

Для цитирования

Варенков В.В., Смирнов Д.А., Сахтеров В.И. Результаты применения георадара с управляемой диаграммой направленности // Антенны. 2026. № 5. С. 66–73. DOI: https://doi.org/10.18127/j03209601-202605-06

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

Введение

В настоящее время широко применяются малоглубинные и глубинные георадары. Малоглубинные георадары (МГР) в основном применяются в инженерной геофизике для исследований первых метров подстилающей поверхности, они обладают более высоким пространственным разрешением [1–3]. Глубинные георадары (ГГР) применяются в основном для геологических изысканий [4–6]. Данный класс георадаров имеет низкое пространственное разрешение (обычно четверть длины антенны) и большую глубину георадиолокации (до 200–250 м) [7]. Есть уникальные результаты георадиолокации с глубинами ниже 500 м [8].

© Варенков В.В., Смирнов Д.А., Сахтеров В.И., 2026

Все вышеперечисленные георадары имеют фиксированное положение главного лепестка диаграммы направленности (ДН) излучающей и приемной антенн. Лепесток направлен перпендикулярно расположению дипольной антенны, меняясь в небольших пределах в зависимости от плотности соприкосновения антенн с исследуемой средой.

Теоретические расчеты характеристик резистивно-нагруженных антенн рассматривались в [9, 10]. Проводились практические измерения ДН от известных объектов, а также по отражениям от линий электропередачи и других объектов [11–13]. Экспериментальные исследования параметров излучающих антенн выполняются на стенде, позволяющем получать сравнительные данные об уровнях сигналов, излученных в твердую среду и излученных в воздух [14]. На нем измеряется распределение поля, для георадаров принято определять результаты диаграммой направленности. Проведенные эксперименты помогли при разработке резистивно-нагруженных дипольных антенн (РНДА), в основном через сравнение амплитуд излученных сигналов.

Ранее был предложен способ управления главным лепестком ДН излучающей антенны при размещении георадара на летательных аппаратах [15, 16]. Использование управления в серийно выпускаемых георадарах оказалось затруднено вследствие высоких требований по синхронизации. Было решено провести экспериментальные измерения георадаром, специально адаптированным для возможности работы с управляемой ДН главного лепестка [17–19].

Ц е л ь р а б о т ы – показать предварительные результаты подповерхностного профилирования при использовании георадара с управляемой ДН приемной антенны.

Техника эксперимента

На ранних стадиях в экспериментах применялось разное число вибраторов (от 4 до 16). Но использование такого большего числа вибраторов повысило уровень технических проблем. Для понимания причин проблем и путей их решения было принято решение сократить число до двух РНДА, т.е. четырех вибраторов. На рис.1 приведена структурная схема приемника георадара GPR RX с двумя РНДА, состоящих из вибраторов L0, R0, L1 и R1. Они подключаются к приемнику через дополнительный антенный коммутатор, выполненный из переключателей SW-L и SW-R.

Схема коммутатора представлена в упрощенном виде. Для снижения вероятности возникновения паразитных автоколебаний неиспользуемые вибраторы коммутируются на нагрузочные резисторы. В одной точке измерения поочередно подключаются комбинации вибраторов L0-R0, L1-R1, L0-R1 и L1-R0. Вибраторы наибольшей длины имеют цифру 0, по мере уменьшения длины вибратора номинал цифры увеличивается.

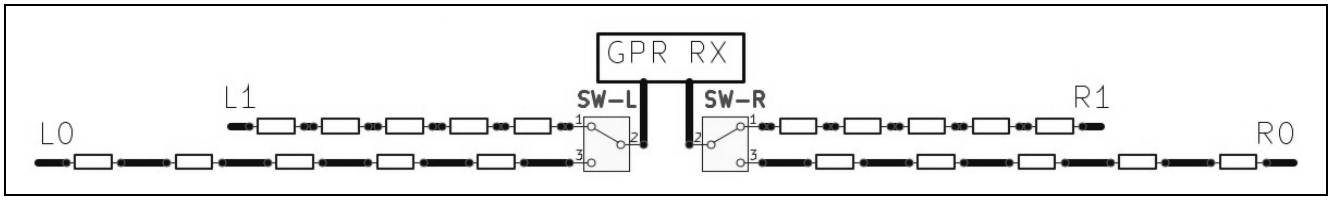


Рис. 1. Схема приемника с двумя дипольными антеннами, подключаемыми к входу через антенный коммутатор
Fig. 1. Receiver scheme with two dipole antennas connected to the input via an antenna switch

Используемые вибраторы РНДА имеют единое конструктивное исполнение, одинаковое число резисторов, номиналы сопротивлений изменяются по единому закону. Они отличаются длинами проводников, данное решение снижает возможность возникновения паразитных автоколебаний. Для расчета резисторов вибраторов использовалась специально разработанная программа для их расчета [20].

Результаты профилирования георадаром с управляемой диаграммой

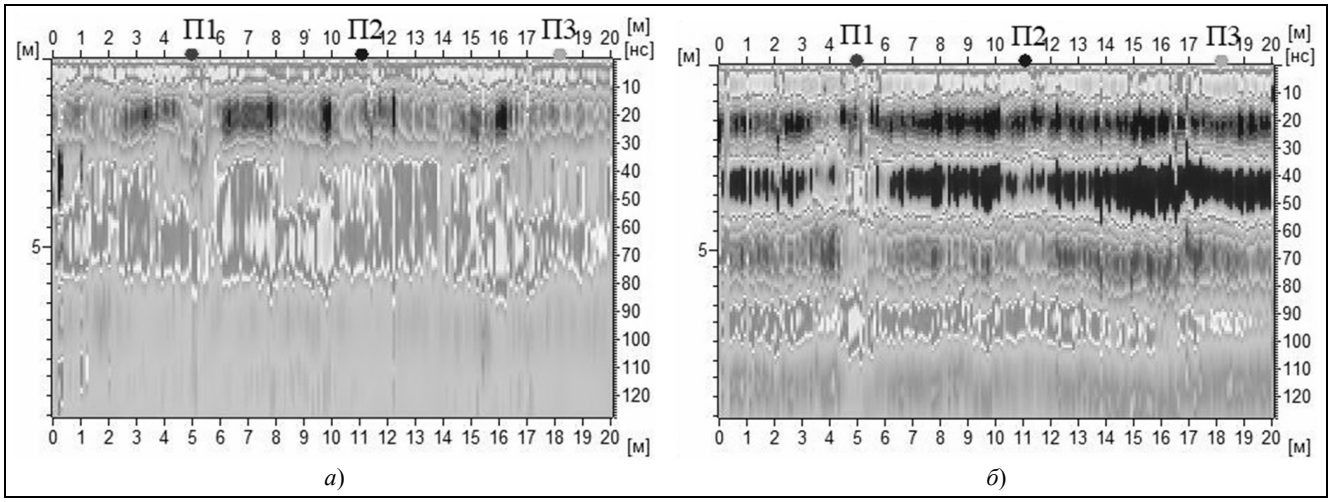
Далее представлены результаты профилирования асфальтированной дороги, при этом измерения проводились ближе к краю дороги, чтобы попробовать заметить отличия в результатах измерений в разных частях дороги.

На рис. 2 приведены результаты профилирования георадаром с управляемой диаграммой для вибраторов L1-R1 и L0-R0 (слева по вертикали – глубина в метрах, справа по вертикали – время в наносе-

кундах, по горизонтали – расстояния по профилю в метрах). На траектории профиля также есть отметки контрольных пикетов, необходимые для повышения точности привязки по местности – обычно к выделяющимся объектам вдоль траектории профиля.

В районе пикета П1 на рис. 2, *б* наблюдается нарушение в виде разрыва горизонтальной корреляции геоэлектрических границ. На рис. 2, *а* это нарушение выражено четче, так как радарограмма получена более высокочастотной антенной, имеющей более высокое пространственное разрешение. По глубине эта величина соответствует примерно четверти физической длины антенны. В данном месте антенна 0,5 м показывает нарушение геоэлектрического слоя более отчетливо.

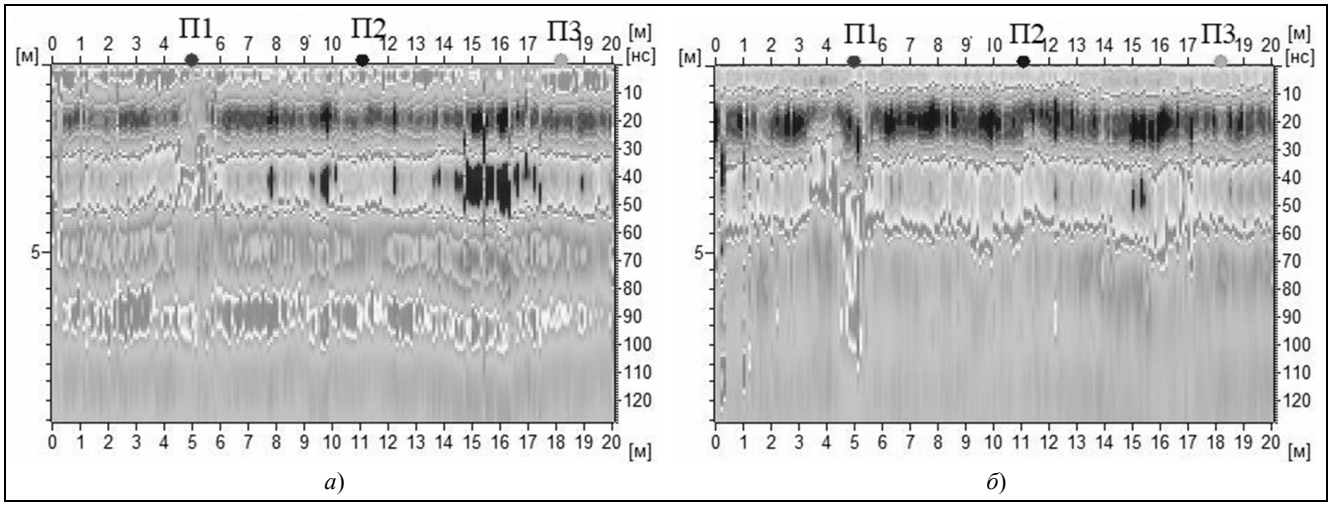
На рис. 3 приведены радарограммы того же профиля, но принятых на несимметричные антенны длиной 0,75 м. Главный лепесток ДН отклоняется в сторону антенны большей длины. Через обозначение +0,75 м и –0,75 м будем отличать направление отклонения в сторону L или R. Как видно, радарограмма на рис. 3, *а*, довольно сильно отличается от радарограммы, приведенной на рис. 3, *б*. Есть разница в толщине-геоэлектрического слоя. На глубине от 3 до 4 м на рис. 3, *б* слой более широкий, при этом остальные слои менее четко выражены.



а) *б*)

Рис. 2. Радарограммы при измерениях разными антеннами: *а* – антенна 0,5 м (300 МГц), вибраторы L1-R1; *б* – антенна 1 м (150 МГц), вибраторы L0-R0

Fig. 2. Radargrams obtained using different antennas: *a* – 0,5 m antenna (300 MHz), dipoles L1-R1; *b* – 1 m antenna (150 MHz), dipoles L0-R0



а) *б*)

Рис. 3. Радарограммы при измерениях разными антеннами: *а* – антенна +0,75 м (200 МГц), вибраторы L0-R1; *б* – антенна –0,75 м (200 МГц) вибраторы L1-R0

Fig. 3. Radargrams obtained using different antennas: *a* – antenna +0,75 m (200 MHz), dipoles L0-R1; *b* – antenna –0,75 m (200 MHz), dipoles L1-R0

На рис. 4 представлены трассы в одной точке приведенного выше профиля для разных антенн, формируемых подключением вибраторов разной длины. Рис. 4, *а* показывает трассу самой высокочастотной антенны длиной 0,5 м (300 МГц), сигналы которой имеет минимальную амплитуду, но более высокое разрешение. На рис. 4, *б* трасса получена антенной длиной 1 м (150 МГц), на ней наблюдаем более высокую амплитуду сигнала. На рис. 4, *в* и *г* показаны трассы антенн 0,75 м (200 МГц), имеющие разные положения главного лепестка ДН. Есть отличия в амплитудах и фазах сигналов. Более длинная антенна показывает отражение с большей глубины с увеличенной амплитудой. Одинаковые по длине антенны, но имеющие разные положения ДН показывают больший диапазон изменения амплитуд принимаемых сигналов. На рис. 4, *в* и *г* на глубине 5 м видно резкое уменьшение амплитуды сигнала при изменении ДН.

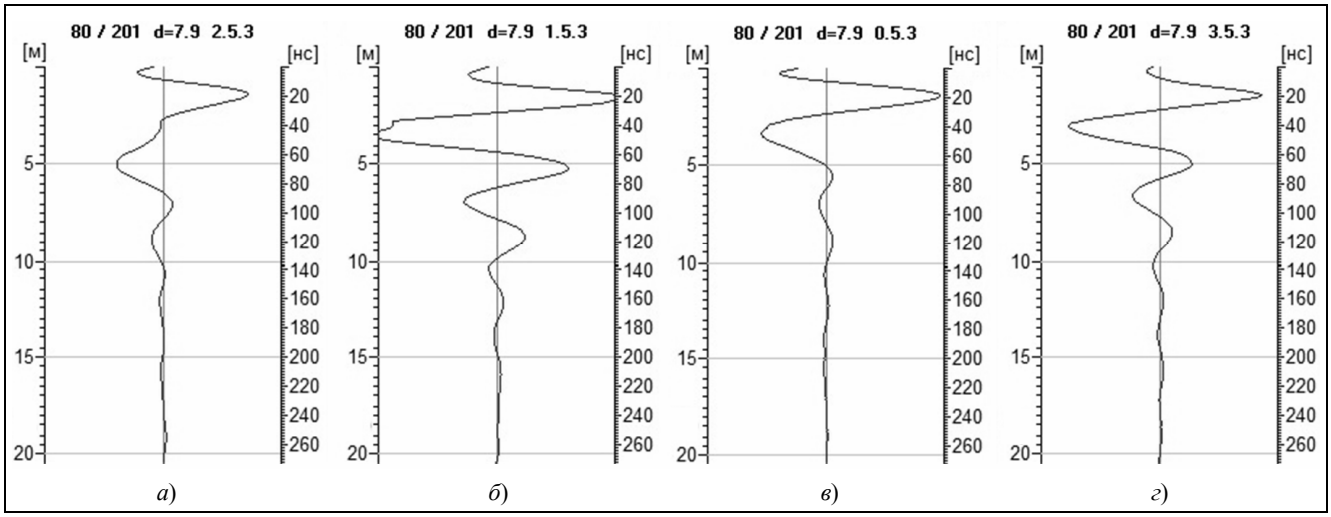


Рис. 4. Трассы в одной точке для разной комбинации вибраторов: *а* – L1-R1 (300 МГц); *б* – L0-R0 (150 МГц); *в* – L0-R1 (200 МГц); *г* – L1-R0 (200 МГц)

Fig. 4. Traces at a single point for various combinations of radiators: *a* – L1-R1 (300 MHz); *b* – L0-R0 (150 MHz); *c* – L0-R1 (200 MHz); *d* – L1-R0 (200 MHz)

Таким образом, реализованный макет георадара и представленные результаты показывают возможность использования данного способа для повышения качества георадиолокации подповерхностных сред.

Результаты профилирования при изменении усиления приемника

Приведем результаты профилирования антеннами длиной 2 м (75 МГц). Антенны зафиксированы на жесткой раме, расстояние между антеннами 2 м. Проводилось два профилирования: антенны расположены перпендикулярно траектории профиля (рис. 5), и антенны расположены параллельно траектории профиля (рис. 6).

Профилирование проводилось георадаром «Эхо Сфера», имеющим возможность в процессе измерения изменять усиление приемника в каждой точке. Результаты представлены при минимальном, среднем и максимальном усилениях. В районе пикетов П1 и П2 наблюдаются коммуникации, предположительно трубы канализации. Объекты протяженные, довольно четко отслеживаются, глубина около 3 м. При отображении в программе съемки установлена диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 5$.

Для точного определения нужно произвести измерения годографом, но такой задачи не стояло. Поэтому глубины приблизительные. Материал представляется с точки зрения демонстрации технических результатов. Профессионального геофизического объяснения геологических слоев не предполагалось. Данные по глубине условно подтверждены данными скважины, которые показали, что в исследуемой местности ниже 4 м находятся в основном пески с включениями гравия. Вследствие свойств таких почв отраженный сигнал наблюдается с глубин 15 м и ниже.

Как показали эксперименты, от расположения антенн зависит уровень сигналов, отражённых от окружающих объектов. При равномерном шаге измерений воздушные помехи отображаются диагональными линиями.

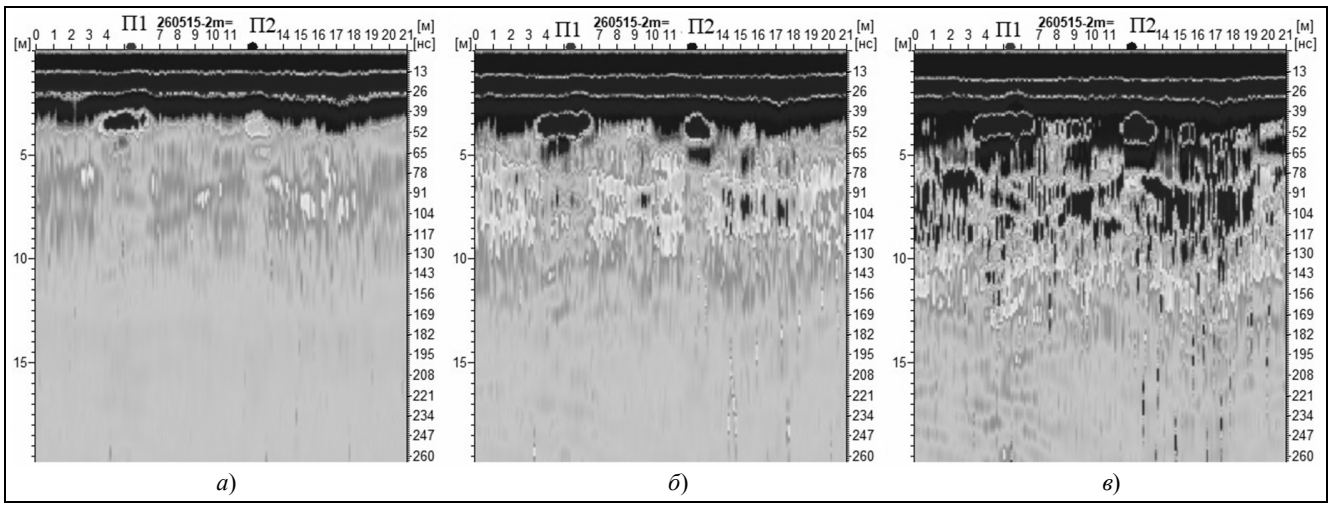


Рис. 5. Результаты профилирования антеннами, расположенными перпендикулярно профилю, для разных значений усиления приемника: *а* – минимальное; *б* – среднее; *в* – максимальное

Fig. 5. Results of profiling using antennas positioned perpendicular to the profile, for different receiver gain settings: *a* – minimum; *b* – medium; *c* – maximum

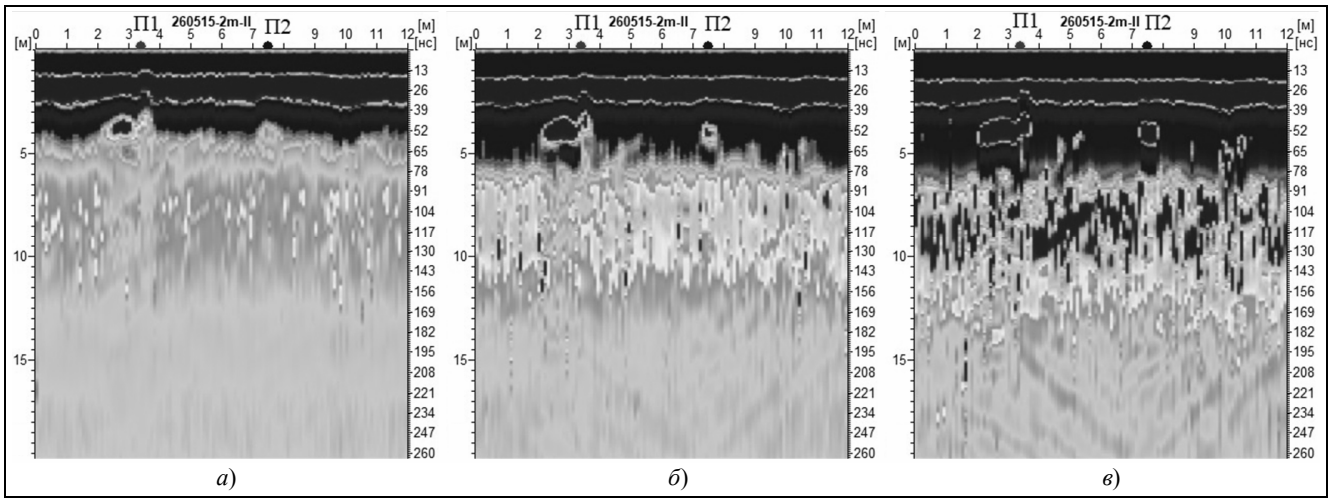


Рис. 6. Результаты профилирования антеннами, расположенными параллельно профилю, для разных значений усиления приемника: *а* – минимальное; *б* – среднее; *в* – максимальное

Fig. 6. Results of profiling using antennas positioned parallel to the profile, for different receiver gain settings: *a* – minimum; *b* – medium; *c* – maximum

Для рассмотренного профиля оказалось, что уровень воздушных помех при параллельном расположении антенн значительно выше, чем при перпендикулярном.

Так как данный георадар в каждой точке может производить измерение с управлением ДН и изменением усиления приемника, то в результате получается большой массив данных. Если для крупных геологических объектов это может быть и избыточно, то при измерениях в шахтах в ограниченных условиях данный метод получения данных даст больше информации для обнаружения мелких локальных объектов и неоднородностей. К примеру, большую опасность представляют вкрапления газогидратов при использовании взрывных работ в шахтах в районах вечной мерзлоты. Неучтенный пласт увеличивает мощность взрыва, приводя к аварийным ситуациям. Также такой метод позволит обнаружение увлажненные геологические слои и подземные водные объекты заблаговременно, не доводя до затопления строительных объектов.

Интерпретация и представление результатов профилирования сильно зависят от профессионального уровня интерпретатора, качества применяемой программы обработки данных. Но даже такой уровень представления первичных необработанных данных будет способствовать облегчению работе специалиста при оперативной интерпретации в полевых условиях.

Заключение

Проведенные исследования и эксперименты георадаром с управляемой ДН показали возможность получения нескольких измерений в одной точке без механического перемещения прибора. Несколько форм сигналов от одного геологического слоя или инженерного объекта, принятых под разными углами, дают больше информации и облегчают интерпретацию полученных данных. При разработке соответствующих алгоритмов обработки данных георадиолокации предложенный способ даст возможность построения объемной модели профиля.

Список источников

1. Официальный сайт компании «Geoscanners». Георадарные системы [Электронный ресурс] / URL: http://www.geoscanners.com (дата обращения: 19.05.2026).
2. Официальный сайт компании «Геотех». Георадары и оборудование [Электронный ресурс] / URL: http://www.geotech.ru (дата обращения: 19.05.2026).
3. Официальный сайт компании «Логисис». Георадары и программное обеспечение [Электронный ресурс] / URL: http://www.log-sys.ru/ (дата обращения: 19.05.2026).
4. *Беркут А.И., Морозов П.А., Попов А.В.* Георадар для глубинных геологических исследований, основные направления применения // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. № 5. С. 89–96. DOI: 10.18127/j5604128-202405-14.
5. *Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Варенков В.В.* и др. Современные георадары серии «ГРОТ» для экологического мониторинга // Экологические системы и приборы. 2012. № 5. С. 3–5.
6. *Варенков В.В., Горкин Д.С., Смирнов Д.А.* и др. Результаты экспериментов с георадаром «Сфера» // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. № 5. С. 66–70. DOI: 10.18127/j15604128-202405-10.
7. *Попов А.В., Прокопович И.В., Едемский Д.Е.* и др. Глубинный георадар: принципы и применение // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23. № 4. С. 28–36.
8. *Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Ляхов Г.А., Резников А.Е.* Георадиолокация больших глубин // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 4.
9. *Прокопович И.В.* Численный расчет импульсного излучения дипольной антенны на границе двух сред // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 12.
10. *Prokopovich I., Popov A.* The radiation pattern of dipole antenna lying on air-dielectric interface // IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC). Moscow. 2024. P. 382–85. DOI: 10.1109/RMC62880.2024.10846904.
11. *Капустин В.В.* Образование поверхностной неоднородной волны в зоне излучения антенн георадара // Геофизика. 2010. № 5. С. 61–65.
12. *Морозов П.А., Попов А.В., Прокопович И.В.* и др. Диаграмма направленности антенн георадара и радиообразы подземных объектов (по результатам археологической экспедиции 2024 года в Гебель Эль-Нур, средний Египет) // Сб. тезисов науч.-технич. конф. «Радиолокация в геофизике и радиофизике». 4–5 апреля 2025 г. М.: ООО «Издательство «Перо». 2025. С. 46.
13. *Морозов П.А., Морозов Ф.П., Попов А.В.* и др. Диаграмма направленности антенн георадара и радиообразы подземных объектов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2025. Т. 30. № 3. С. 114–120. DOI: 10.18127/j15604128-202503-13.
14. *Сахтеров В.И.* Измерение характеристик антенн георадаров // Сб. тезисов докладов I Российской науч. конф. «Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества». Омск, 6–8 октября 2020 г. Омск: ОНИИП. 2020. С. 51–52.
15. *Сахтеров В.И.* Способ управления диаграммой направленности антенны подземного излучения // Антенны. 2024. № 3. С. 40–48. DOI: 10.18127/j03209601-202403-05.
16. *Барков Е.В., Аверин А.А., Корсукова В.С.* и др. Эксперименты по георадиолокации с летательного аппарата // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. № 5. С. 61–65. DOI: 10.18127/ j15604128-202405-09.
17. *Смирнов Д.А., Горкин Д.С., Варенков В.В., Сахтеров В.И.* Управление диаграммой направленности приемной антенны георадара применительно к обнаружению слабоконтрастных объектов // Сб. докладов I Всероссийской молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти Д.С. Лукина «Распространение радиоволн». Йошкар-Ола, 11–14 ноября 2024 г. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет. 2024. С. 72–75.
18. *Смирнов Д.А., Аверин А.А., Варенков В.В.* и др. Обнаружение слабоконтрастных объектов георадаром с управляемой диаграммой направленности антенны // Электромагнитные волны и электронные системы. 2025. Т. 30. № 3. С. 105–113. DOI: 10.18127/j15604128-202503-12.
19. *Смирнов Д.А., Аверин А.А., Варенков В.В.* и др. Обнаружение слабоконтрастных объектов с помощью управления диаграммы направленности излучающей антенны // Сб. тезисов науч.-технич. конф. «Радиолокация в геофизике и радиофизике». Москва, Троицк, 4 апреля 2025 г. М.: ООО «НПО РГР», Издательство «Перо». 2025. С. 37.
20. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2026610763 РФ. Расчет сопротивлений резистивно-нагруженных дипольных антенн / *Д.А. Смирнов*. Опубл. 15.01.2026.

Информация об авторах

Владимир Викторович Варенков – ст. науч. сотрудник
SPIN-код: 6186-9270
Дмитрий Андреевич Смирнов – мл. науч. сотрудник
SPIN-код: 5161-7063
Владимир Иванович Сахтеров – к.ф.-м.н., ст. науч. сотрудник
SPIN-код: 7559-8325

Поступила в редакцию 08.06.2026
Одобрена после рецензирования 22.06.2026
Принята к публикации 26.08.2026

Original article

Results of using ground penetrating radar with a controlled radiation pattern

V. V. Varenkov[1], **D. A. Smirnov**[2], **V. I. Sakhterov**[3]
[1–3] Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS (Moscow, Russia)
[1] varenkov@izmiran.ru, [2] dsmirnov@izmiran.ru, [3] sahterov@izmiran.ru

Abstract

Currently, ground penetrating radars with a fixed antenna-feeder pattern are widely used in geology and engineering geophysics. However, some devices can perform measurements with antennas in different frequency ranges. The developed model of a ground penetrating radar with a controlled directional pattern of the main lobe of the receiving antenna allows for measurements of several routes at one point using antennas of different frequency ranges and with control of the directional pattern.

Preliminary results of subsurface profiling using a ground penetrating radar with a controlled receiving antenna pattern have been presented. Radargrams and their features, useful for detecting low-contrast environments and various point and linear objects, have been presented. Depending on spatial capabilities and technological limitations, sequential or parallel arrangements of transmitting and receiving antennas are possible. Using ground penetrating radar with the proposed beam control method allows for the acquisition of multiple radargrams with different phase and amplitude characteristics during profiling of the target environment. This provides the operator with additional information for interpreting the profiling results. Regular measurements at various sites contribute to the deep ground penetrating radar database.

New signal processing algorithms and interpretation methods have been developed, increasing the ability to detect low-contrast objects. Based on multi-faceted measurements (changes in the radiation pattern, changes in receiver gain) at a single point, preliminary algorithms and models have been developed for constructing a three-dimensional model of the profile being studied.

Keywords

Controlled-pattern ground penetrating radar, antennas, radiation pattern, signal processing

For citation

Varenkov V.V., Smirnov D.A., Sakhterov V.I. Results of using ground penetrating radar with a controlled radiation pattern // Antennas. 2026. № 5. P. 66–73. DOI: https://doi.org/10.18127/j03209601-202605-06

References

1. Ofitsial'nyj sajt kompanii «Geoscanners». Georadarnye sistemy [Elektronnyj resurs]. URL: http://www.geoscanners.com (data obrashcheniya: 19.05.2026).
2. Ofitsial'nyj sajt kompanii «Geotekh». Georadary i oborudovanie [Elektronnyj resurs]. URL: http://www.geotech.ru (data obrashcheniya: 19.05.2026).
3. Ofitsial'nyj sajt kompanii «Logisis». Georadary i programmnoe obespechenie [Elektronnyj resurs]. URL: http://www.logsys.ru/ (data obrashcheniya: 19.05.2026).
4. *Berkut A.I., Morozov P.A., Popov A.V.* Georadar dlya glubinnykh geologicheskikh issledovanij, osnovnye napravleniya primeneniya. Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy. 2024. T. 29. № 5. S. 89–96. DOI: 10.18127/j5604128-202405-14. (in Russian)
5. *Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A., Varenkov V.V.* i dr. Sovremennye georadary serii «GROT» dlya ekologicheskogo monitoringa. Ekologicheskie sistemy i pribory. 2012. № 5. S. 3–5. (in Russian)
6. *Varenkov V.V., Gorkin D.S., Smirnov D.A.* i dr. Rezul'taty eksperimentov s georadarom «Sfera». Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy. 2024. T. 29. № 5. S. 66–70. DOI: 10.18127/j15604128-202405-10. (in Russian)
7. *Popov A.V., Prokopovich I.V., Edemskij D.E.* i dr. Glubinnyj georadar: printsipy i primenenie. Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy. 2018. T. 23. № 4. S. 28–36. (in Russian)
8. *Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A., Lyakhov G.A., Reznikov A.E.* Georadiolokatsiya bol'shikh glubin. Zhurnal radioelektroniki. 2019. № 4. (in Russian)
9. *Prokopovich I.V.* Chislennyj raschet impul'snogo izlucheniya dipol'noj antenny na granitse dvukh sred. Zhurnal radioelektroniki. 2024. № 12. (in Russian)
10. *Prokopovich I., Popov A.* The radiation pattern of dipole antenna lying on air-dielectric interface. IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC). Moscow. 2024. P. 382–85. DOI: 10.1109/RMC62880.2024.10846904.
11. *Kapustin V.V.* Obrazovanie poverkhnostnoj neodnorodnoj volny v zone izlucheniya antenn georadara. Geofizika. 2010. № 5. S. 61–65. (in Russian)
12. *Morozov P.A., Popov A.V., Prokopovich I.V.* i dr. Diagramma napravlennosti antenn georadara i radioobrazy podzemnykh ob''ektov (po rezul'tatam arkheologicheskoj ekspeditsii 2024 goda v Gebel' El'-Nur, srednij Egipet). Sb. tezisov nauch.-tekhnich. konf. «Radiolokatsiya v geofizike i radiofizike». 4–5 aprelya 2025 g. M.: OOO «Izdatel'stvo «Pero». 2025. S. 46. (in Russian)
13. *Morozov P.A., Morozov F.P., Popov A.V.* i dr. Diagramma napravlennosti antenn georadara i radioobrazy podzemnykh ob''ektov. Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy. 2025. T. 30. № 3. S. 114–120. DOI: 10.18127/j15604128-202503-13. (in Russian)
14. *Sakhterov V.I.* Izmerenie kharakteristik antenn georadarov. Sb. tezisov dokladov I Rossijskoj nauch. konf. «Radiofizika, fotonika i issledovanie svojstv veshchestva». Omsk, 6–8 oktyabrya 2020 g. Omsk: ONIIP. 2020. S. 51–52. (in Russian)
15. *Sakhterov V.I.* Sposob upravleniya diagrammoj napravlennosti antenny podzemnogo izlucheniya. Antenny. 2024. № 3. S. 40–48. DOI: 10.18127/j03209601-202403-05. (in Russian)
16. *Barkov E.V., Averin A.A., Korsukova V.S.* i dr. Eksperimenty po georadiolokatsii s letatel'nogo apparata. Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy. 2024. T. 29. № 5. S. 61–65. DOI: 10.18127/j15604128-202405-09. (in Russian)

17. *Smirnov D.A., Gorkin D.S., Varenkov V.V., Sakhterov V.I.* Upravlenie diagrammoj napravlennosti priemnoj antenny georadara primenitel'no k obnaruzheniyu slabokontrastnykh ob''ektov. Sb. dokladov I Vserossijskoj molodezhnoj nauchnoj shkoly-konferentsii, posvyashchennoj pamyati D.S. Lukina «Rasprostranenie radiovoln». Joshkar-Ola, 11–14 noyabrya 2024 g. Joshkar-Ola: Povolzhskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet. 2024. S. 72–75. (in Russian)
18. *Smirnov D.A., Averin A.A., Varenkov V.V.* i dr. Obnaruzhenie slabokontrastnykh ob''ektov georadarom s upravlyaemoj diagrammoj napravlennosti antenny. Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy. 2025. T. 30. № 3. S. 105–113. DOI: 10.18127/j15604128-202503-12. (in Russian)
19. *Smirnov D.A., Averin A.A., Varenkov V.V.* i dr. Obnaruzhenie slabokontrastnykh ob''ektov s pomoshch'yu upravleniya diagrammy napravlennosti izluchayushchej antenny. Sb. tezisov nauch.-tekhnich. konf. «Radiolokatsiya v geofizike i radiofizike». Moskva, Troitsk, 4 aprelya 2025 g. M.: OOO «NPO RGR», Izdatel'stvo «Pero». 2025. S. 37. (in Russian)
20. Svidetel'stvo o gos. registratsii programmy dlya EVM № 2026610763 RF. Raschet soprotivlenij rezistivno-nagruzhennykh dipol'nykh antenn. *D.A. Smirnov*. Opubl. 15.01.2026. (in Russian)

Information about the authors

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

The article was submitted 08.06.2026
Approved after reviewing 22.06.2026
Accepted for publication 26.08.2026

ВНИМАНИЕ!

В Издательстве «Радиотехника» вы можете подписаться на электронную версию любого выпускаемого нами печатного журнала.

Подписка непосредственно через Издательство освободит вас от дополнительных расходов.

ООО Издательство Радиотехника

101000, г. Москва, Подсосенский переулок, д.14, стр.2
+7(495)625-92-41, +7(495)621-48-37
http://www.radiotec.ru
info@radiotec.ru