

Научная статья
УДК 550.837.76; 537.86
DOI: <https://doi.org/10.18127/j5604128-202405-13>

Оценка диаграммы направленности дипольной антенны георадара в подповерхностной среде и в верхней полусфере

Л.А. Боголюбов¹, М.А. Лазарев², Ф.П. Морозов³,
П.А. Морозов⁴, А.В. Попов⁵, И.В. Прокопович⁶

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Москва, Россия)

² Московский городской педагогический университет (Москва, Россия)

^{3,4} ООО «Компания ВНИИСМИ» (Москва, Россия)

^{4,5} Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (Москва, г. Троицк, Россия)

⁶ Институт перспективных технологий и промышленного программирования РТУ МИРЭА (Москва, Россия)

¹ l.e.o.n.2002@mail.ru, ² m.a.x.i.m.2000@mail.ru, ³ fmorozov92@mail.ru,

⁴ pmoroz5@yandex.ru, ⁵ popov@izmiran.ru, ⁶ prokopovich@mirea.ru

Аннотация

Постановка проблемы. Реальное поведение диаграммы направленности приемно-передающей системы георадара зависит не только от конструкции антенн, но и от свойств окружающей среды, что должно учитываться при проведении полевых работ.

Цель. Предложить теоретические и экспериментальные методы исследования диаграммы направленности дипольных антенн георадара в нижней и в верхней полусфере.

Результаты. В ходе совместной экспедиции, организованной Институтом археологии Крыма Российской академии наук и Научно-исследовательским центром истории и археологии Крыма в июле 2022 г., на ряде археологических памятников были экспериментально проверены способы измерения реальных направленных свойств георадара.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы при выборе схемы проведения полевой съемки, оценке влияния «воздушных» шумов и возможной глубины зондирования.

Ключевые слова

Глубинный георадар, импульсное электромагнитное зондирование, диаграмма направленности, радиообраз

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 22-12-00083.

Для цитирования

Боголюбов Л.А., Лазарев М.А., Морозов Ф.П., Морозов П.А., Попов А.В., Прокопович И.В. Оценка диаграммы направленности дипольной антенны георадара в подповерхностной среде и в верхней полусфере // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. № 5. С. 82–88. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202405-13>

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

Введение

Экспериментальные исследования диаграммы направленности дипольных антенн проводились с помощью георадаров серии «Лоза» (рис. 1), которые разработаны и серийно производятся в России. При разработке глубинного георадара «Лоза» было сделано все, чтобы возможности прибора по глубине зондирования стали привлекательны для геологов и геофизиков. Эти особенности позволяют применять георадар в исследовании подповерхностных структур до глубин 100–150 м в «тяжелых» низкоомных грунтах и до 200–300 м в «легких» высокоомных породах [1, 2]. Глубинные георадары «Лоза» прошли национальную сертификацию и сертификацию на соответствие требованиям технических регламентов ЕАЭС и директивам по электромагнитной совместимости и безопасности ЕС/EU.

На результаты георадарного зондирования (его глубинность) определяющее влияние оказывают параметры среды. Диаграмма направленности линейных антенн в большой степени определяется грунтом, на котором размещены антенны. Только при размещении антенн георадара (линейных электрических диполей) на поверхности (границе раздела двух сред) формируется диаграмма направленности излучения, существенно ориентированная в сторону среды с большей диэлектрической проницаемостью. По оценкам [3–5], в нижнюю полусферу (в грунт) излучается в n^2 раз больше, чем вверх (в воздух) (n – показатель преломления).

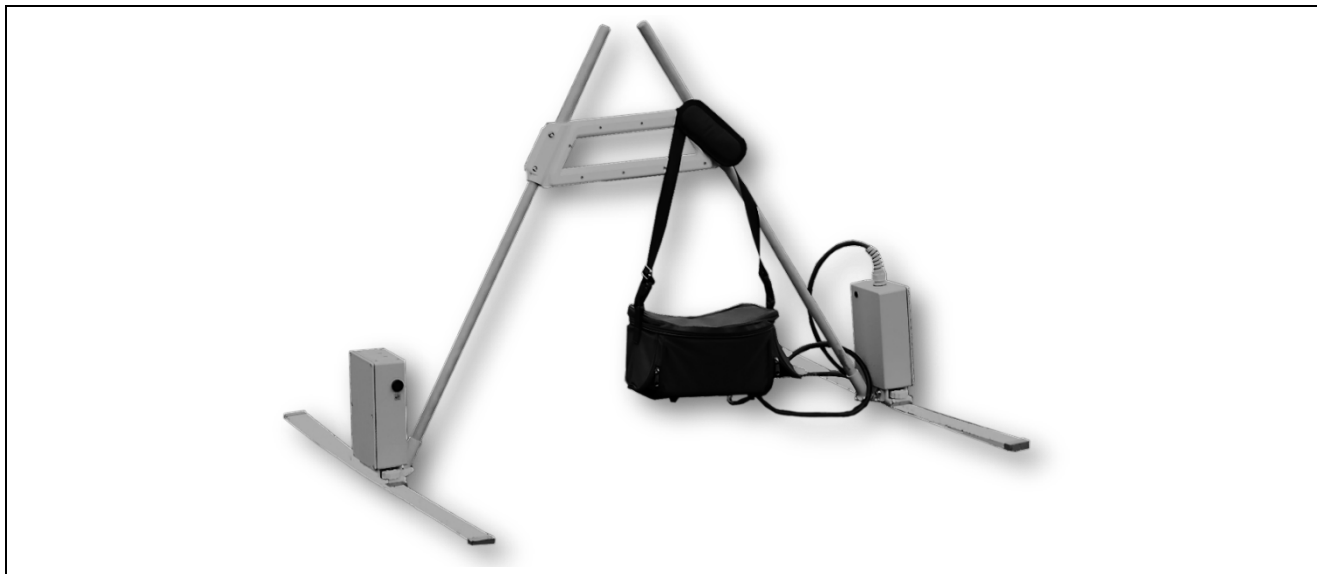


Рис. 1. Георадар «Лоза-В» (передающая и приемная антенна с блоком регистрации)

Fig. 1. GPR «Loza-V» (transmitting and receiving antenna with registration unit)

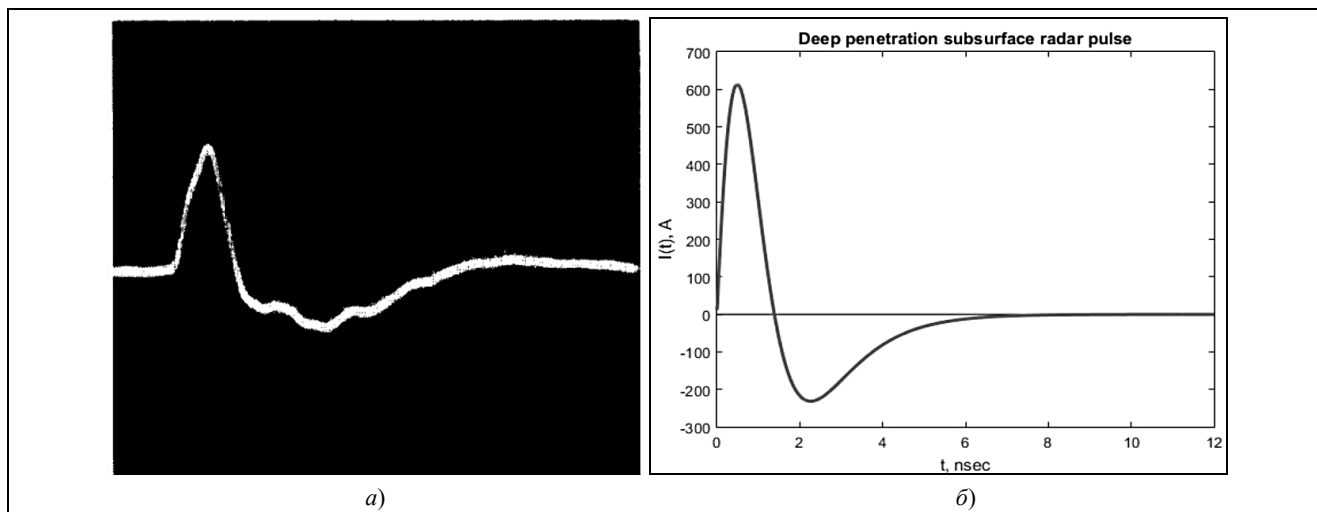


Рис. 2. Измеренный импульс (а) в резистивнонагруженной дипольной антенне [5] и модель георадарного импульса (б) [1]

Fig. 2. (a) Measured pulse in a resistively loaded dipole antenna [5] and (b) the georadar pulse model [1]

Свойства среды влияют не только на волновую форму зондирующего импульса (рис. 2), но и на угол конуса диаграммы направленности. Чем выше диэлектрическая проницаемость нижней среды, тем уже диаграмма направленности, и тем больше энергии излучается в нижнюю полусферу (в грунт). Угол диаграммы направленности в нижнюю полусферу можно оценить как

$$\Theta = \arcsin(1/n) = \arcsin(1/\sqrt{\varepsilon}),$$

где n – показателем преломления; ε – диэлектрическая проницаемость среды.

На рис. 3 представлены расчетные диаграммы направленности гармонического излучения бесконечной дипольной антенны на границе двух сред. Стиль линий на рис. 3,а соответствует различным значениям показателя преломления $n = 2$ (...); 4 (- - -); 9 (—). На рис. 3,б приведена расчетная пиковая диаграмма направленности дипольной антенны на границе двух сред [2]. Здесь стиль линий соответствует различному расстоянию между приемником и излучателем: 1 – 200 м, 2 – 12 м, 3 – 4 м, 4 – 2 м. В этом докладе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, позволяющих оценить результирующую диаграмму направленности комплекса из двух (передающей и приемной) антенн георадара, расположенных параллельно на расстоянии, порядка длины антенны.

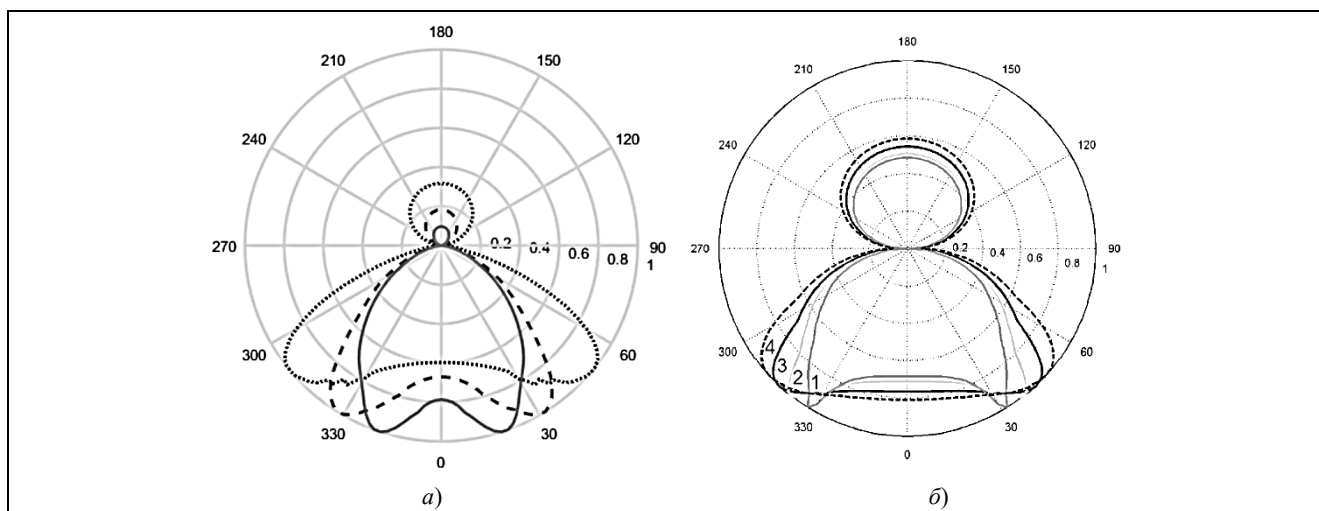


Рис. 3. Диаграммы направленности гармонического излучения бесконечной дипольной антенны на границе двух сред: *a* – в зависимости от значения показателя преломления; *б* – в зависимости от расстояния между виртуальным приемником и излучателем

Fig. 3. The radiation patterns of the harmonic radiation of an infinite dipole antenna at the boundary of two media: *a* – depending on the value of the refractive index; *б* – depending on the distance between the virtual receiver and the transmitter

Ц е л ь р а б о т ы – предложить теоретические и экспериментальные методы исследования диаграммы направленности дипольных антенн георадара в нижней и в верхней полусфере.

Оценка диаграммы направленности комплекса георадарных антенн в верхней полусфере

Обмер диаграммы направленности выполнялся по следующей методике: антенны георадара «Лоза-В» размещаются в центре круга, размеченного на сектора по 30 градусов (рис. 4,*a*). В каждом из положений производится по четыре измерения, после чего антенны радара поворачиваются на 30 градусов так, чтобы центр ручки оставался над центром круга, и делается еще четыре измерения. Объект, по которому выполняется оценка амплитуды отраженного сигнала, – провода ЛЭП 10 кВ в 15 м (95 нс). Оператор, блок регистрации и кабель располагаются по оси антенн георадара (рис. 4,*a*). Оператор перемещается по периметру круга синхронно с поворотом антенн. На рис. 4,*б* представлена развертка амплитуд отраженных сигналов по всей радарограмме в диапазоне временных задержек 85–105 нс.

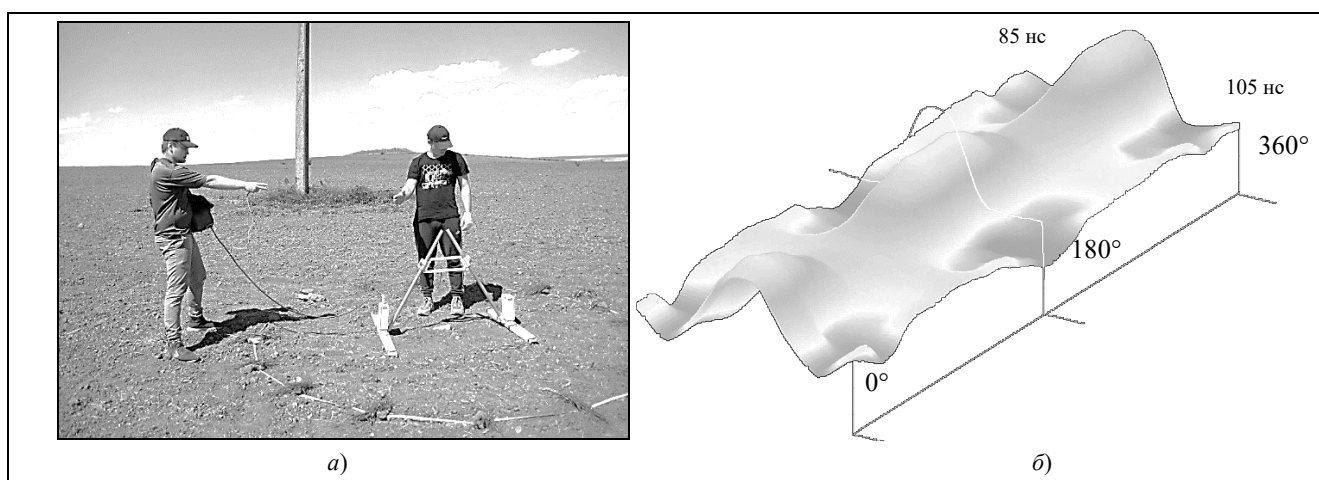


Рис. 4. Методика обмера (*a*) и развертка радарограммы полного круга измерений (0–360°) на участке задержек 85–105 нс (*б*)

Fig. 4. The measurement technique (*a*) and scan of the radar image of the full circle of measurements (0–360°) in the delay range of 85–105 ns (*б*)

Амплитуда сигнала отражена одновременно интенсивностью серого цвета и рельефом. Такой вариант представления наглядно иллюстрирует развертку диаграммы направленности в зависимости от угла поворота антенн по отношению к объекту отражений в верхней полусфере (в воздухе). В результате инструментального обмера отраженного сигнала дипольных георадарных антенн (200 МГц) от объекта в верхней полусфере (в воздухе) в реальных полевых условиях на сухом грунте ($\epsilon \sim 8-9$) построены диаграммы направленности в горизонтальной плоскости (рис. 5). Измеренные значения амплитуды нанесены на диаграмму направленности. Разница в амплитуде сигнала, отраженного от объекта в верхней полусфере, если он расположен в максимуме или минимуме диаграммы направленности, составляет более 46 дБ.

Диаграмма направленности имеет заметную асимметрию. Амплитуда сигналов, отраженных от одного и того же «воздушного» объекта больше в случае, когда антенна приемника ближе к объекту, и меньше, когда к объекту ближе антенна передатчика. Полученные оценки диаграммы направленности имеют большое практическое значение при планировании схемы профилей георадарного обследования в случае, когда необходимо работать в условиях «неустраимых» объектов воздушных отражений на площадке.

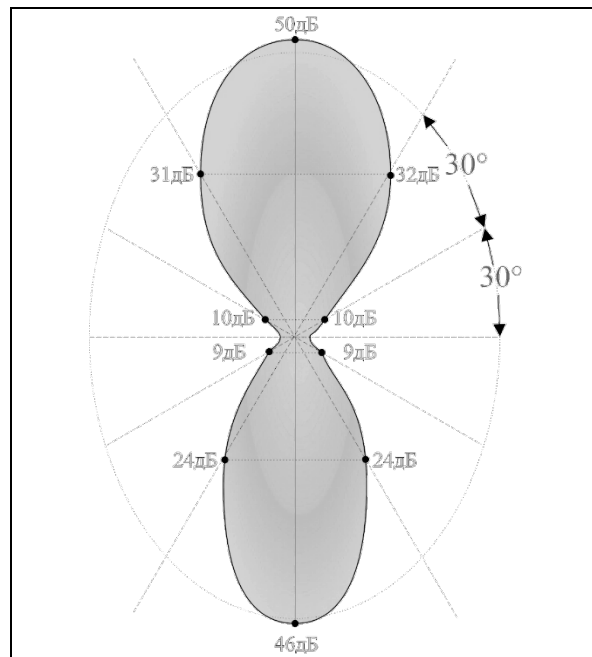


Рис. 5. Измеренная диаграмма направленности в горизонтальной плоскости

Fig. 5. The measured radiation pattern in the horizontal plane

Оценка диаграммы направленности комплекса георадарных антенн в подповерхностной среде

1. Склеп на Иудейском некрополе был обследован в период Крымской экспедиции 2022 г. по заданию археологов Института археологии Крыма. Отмеченный на рис. 6,а склеп (1), вскрытый грабителями, был использован нами как «параметрический объект», для оценки диаграммы направленности и идентификации радиообраза известного объекта. Глубина свода склепа составляет 3,5 м. Радарограмма горизонтального сканирования представлена на рис. 6,а. Рассчитанная в результате обмера диаграмма направленности подповерхностного радара показана на рис. 6,б.

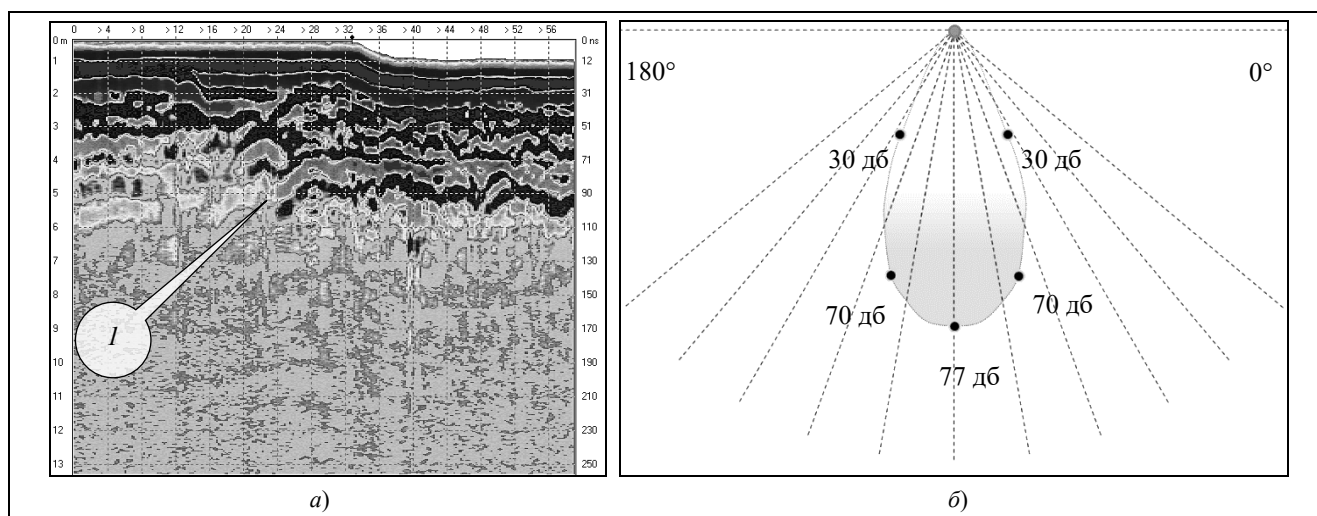


Рис. 6. Радарограмма (а) и диаграмма направленности георадара (б)

Fig. 6. Radarogram (a) and GPR radiation pattern (b)

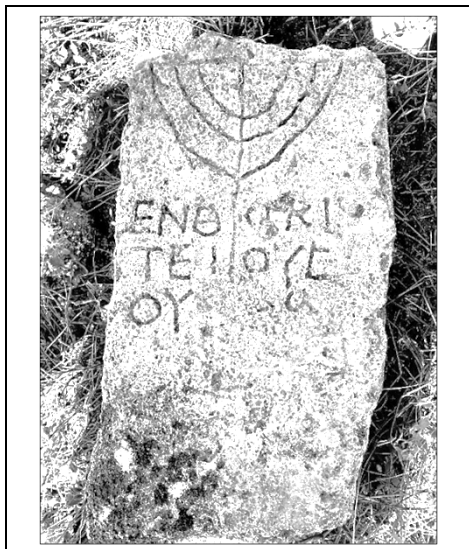


Рис. 7. Надгробие с иудейской символикой
Fig. 7. Tombstone with Jewish symbols

Результирующая диаграмма направленности георадара отражает высокий уровень отраженного сигнала и его хорошую фокусировку, обусловленную высокоомностью среды распространения, (рис. 6,б). На обследованном участке было выявлено еще пять ранее неизвестных объектов, подобных по радиообразу склепа (1). Также было обнаружено до 40 надгробий с иудейской символикой (рис. 7).

2. Подземный водопровод античного периода, был обследован в период экспедиции 2022 г. по заданию археологов Института археологии Крыма. В районе поселка Героевское, на расстоянии около 2,5 км, существует древний колодец. По предположению археологов, этот колодец и керамические трубы, вскрытые оползнями или при прокладке газопровода, имеют отношение к водоснабжению античного городища Нимфей. Задача геофизического обследования состояла в получении ненарушающим способом информации, подтверждающей существование античного подземного водопровода на участках между выявленными объектами. На всех намеченных участках была выделена структура с радиообразом интерпретированным как две керамические трубы

античного водопровода. Диаграмма направленности приемно-передающего комплекса георадара (рис. 8,а) была получена при обработке радарограммы (рис. 8,б), зафиксированной при пересечении двух параллельных труб античного водопровода (рис. 8,в).

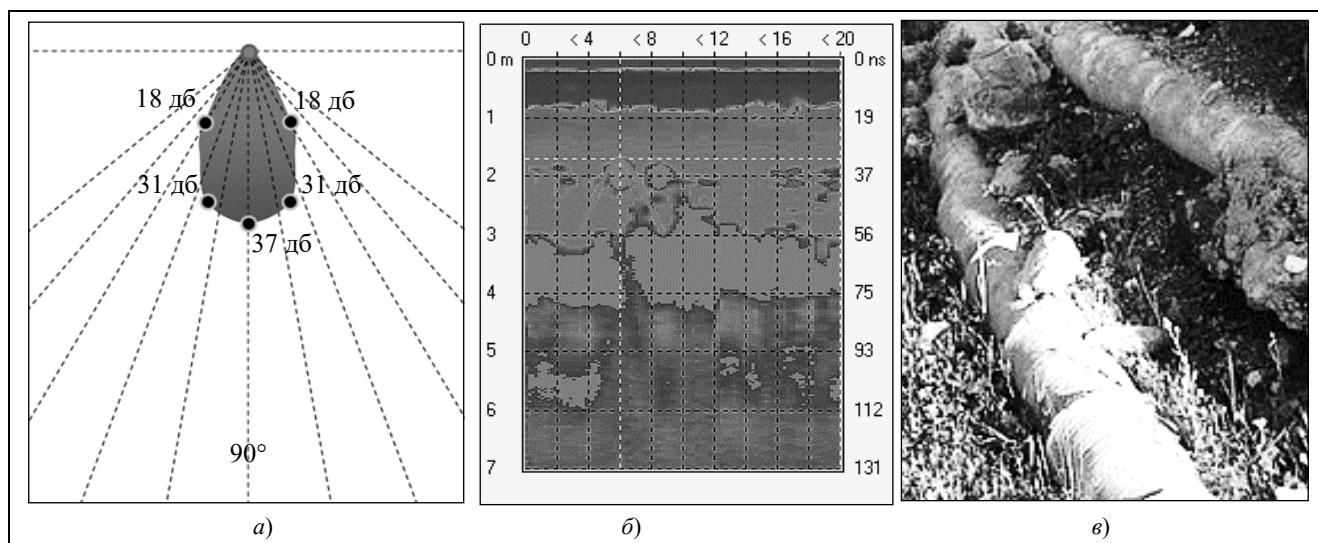


Рис. 8. Диаграмма направленности (а), радарограмма горизонтального сканирования (б) и две трубы в раскопе (в)
Fig. 8. Radiation pattern (а), GPR B-scan (б), and two revealed pipes in the excavation (в)

Заключение

Дипольные антенны георадара, расположенные на поверхности грунта, обладают ярко выраженной направленностью в подповерхностную среду. Параметры диаграммы направленности в первую очередь зависят от свойств подповерхностной среды. Изменчивость диаграммы направленности проиллюстрирована примерами георадарных исследований подземных объектов при различных условиях распространения. Экспериментальные результаты подтверждают теоретические оценки ширины диаграммы направленности.

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. Kopeikin V.V., Morozov P.A., Popov A.V., Prokopovich I.V., Berkut A.I., Krinitsky L.M. Deep Penetration Radar: Hydrogeology and Paleorelief of Underlying Medium // 17th Internat. Conf. on Ground Penetrating Radar (GPR-2018). Rapperswil, Switzerland. June 18–21. 2018. P. 394–398.
3. Engheta N., Papas C.H., Elachi C. Interface extinction and subsurface peaking of the radiation pattern of a line source // Applied Physics B. 1981. V. 26. № 4. P. 231–238.
4. Edemsky F., Popov A., Zapunidi S. A time domain model of GPR antenna radiation pattern // Internat. Journ. of Electronics and Telecommunications. 2011. V. 57. № 3. P. 407–411.
5. Arcone S. Numerical studies of the radiation patterns of resistively loaded dipoles // Journ. Applied Geophysics. 1995. V. 33. P. 39–52.

Информация об авторах

Леонид Анатольевич Боголюбов – студент

SPIN-код: не представлен

Максим Александрович Лазарев – студент

SPIN-код: не представлен

Федор Павлович Морозов – инженер

ORCID: 0009-0008-5873-4230

Павел Анатольевич Морозов – к.ф.-м.н., ст. науч. сотрудник

ORCID: 0009-0008-9379-6875

Алексей Владимирович Попов – д.ф.-м.н., гл. науч. сотрудник

ORCID: 0000-0002-0677-8257

Игорь Валерьевич Прокопович – к.ф.-м.н., ст. преподаватель

SPIN-код: 7177-0313

ORCID: 0000-0001-9634-9431

Scopus AuthorID: 57194409346

Статья поступила в редакцию 29.08.2024

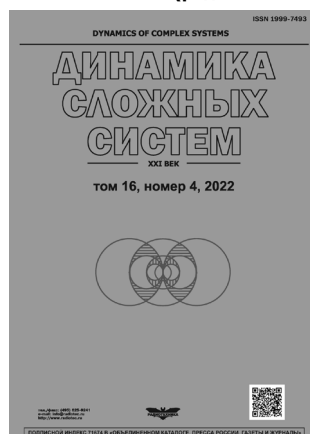
Одобрена после рецензирования 04.09.2024

Принята к публикации 20.09.2024

ЖУРНАЛ «ДИНАМИКА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ - XXI ВЕК»

Главный редактор: докт. техн. наук, докт. экон. наук, профессор **Павел Анатольевич Дроговоз**

Международный научно-технический журнал, освещающий результаты научных исследований динамики процессов в сложных технических системах (радиотехника и электроника, физические системы, информатика и вычислительная техника, системы управления)



Включен в Перечень ВАК

Издаётся с 2011 г.

ISSN 1999-7493

Периодичность – 4 выпуска в год

«Пресса России» - индекс 71674

Научные специальности ВАК

- 1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение
- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами
- 2.3.4. Управление в организационных системах
- 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей
- 2.3.8. Информатика и информационные процессы
- 5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике
- 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика

Подписаться на журналы, выпускаемые Издательством «Радиотехника» (см. 4-ю сторону обложки), можно с любого месяца и на любой срок непосредственно в Издательстве.

Адрес Издательства:

107031, г. Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6,

тел./факс: (495) 625-78-72, 621-48-37, 625-92-41

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

Original article

Evaluation of the radiation pattern of GPR dipole antennas in the subsurface environment and in the upper hemisphere

**L.A. Bogolyubov¹, M.A. Lazarev², F.P. Morozov³,
P.A. Morozov⁴, A.V. Popov⁵, I.V. Prokopovich⁶**

¹ Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

² Moscow City Pedagogical University (Moscow, Russia)

^{3,4} LLC "VNIISMI Company" (Moscow, Russia)

^{4,5} Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS (Moscow, Troitsk, Russia)

⁶ Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming RTU MIREA (Moscow, Russia)

¹ l.e.o.n.2002@mail.ru, ² m.a.x.i.m.2000@mail.ru, ³ fmorozov92@mail.ru,

⁴ pmoroz5@yandex.ru, ⁵ popov@izmiran.ru, ⁶ prokopovich@mirea.ru

Abstract

The article presents the results of theoretical and experimental studies of the directional pattern of dipole GPR antennas in the subsurface environment and in the upper hemisphere, which were obtained by the creative group of participants of the RNF grant No. 22-12-00083 "Deep GPR: theory, methods, experiment" during a joint expedition, organized by the Institute of Archaeology of the Crimea, of the Russian Academy of Sciences and the Scientific Research Center of History and the archeology of the Crimea, in July 2022. The group consisted of experienced specialists and young researchers working in the field of subsurface sensing and interested in geo-radiolocation.

Keywords

Deep GPR, pulsed electromagnetic sensing, radiation pattern, radio image

For citation

Bogolyubov L.A., Lazarev M.A., Morozov F.P., Morozov P.A., Popov A.V., Prokopovich I.V. Evaluation of the radiation pattern of GPR dipole antennas in the subsurface environment and in the upper hemisphere *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2024. V. 29. № 5. P. 82–88. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202405-13> (in Russian)

References

1. Popov A.V., Prokopovich I.V., Edemskij D.E., Morozov P.A., Berkut A.I. Glubinnij georadar: principy i primeneniye. *E'lektromagnitny'e volny i e'lektronny'e sistemy*. 2018. T. 23. № 4. S. 28–36.
2. Kopeikin V.V., Morozov P.A., Popov A.V., Prokopovich I.V., Berkut A.I., Krinitsky L.M. Deep Penetration Radar: Hydrogeology and Paleorelief of Underlying Medium / 17th Internat. Conf. on Ground Penetrating Radar (GPR-2018). Rapperswil. Switzerland. June 18–21. 2018. R. 394–398.
3. Engheta N., Papas C.H., Elachi C. Interface extinction and subsurface peaking of the radiation pattern of a line source. *Applied Physics B*. 1981. V. 26. № 4. P. 231–238.
4. Edemsky F., Popov A., Zapunidi S. A time domain model of GPR antenna radiation pattern. *Internat. Journ. of Electronics and Telecommunications*. 2011. V. 57. № 3. P. 407–411.
5. Arcone S. Numerical studies of the radiation patterns of resistively loaded dipoles. *Journ. Applied Geophysics*. 1995. V. 33. P. 39–52.

Information about the authors

Leonid A. Bogolyubov – Student

Maxim A. Lazarev – Student

Fedor P. Morozov – Engineer

Pavel A. Morozov – Ph.D. (Phys.-Math.), Senior Research Scientist

Alexei V. Popov – Dr. Sc. (Phys.-Math.), Principal Research Scientist

Igor V. Prokopovich – Ph.D. (Phys.-Math.), Senior Lecturer

The article was submitted 29.08.2024

Approved after reviewing 04.09.2024

Accepted for publication 20.09.2024