



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-55-62>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 528.8.04

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ДИСТАНЦИОННОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Г. И. ЛИНЕЦ, А. В. БАЖЕНОВ, Н. В. ГРИВЕННАЯ, В. Д. ГОНЧАРОВ

Северо-Кавказский федеральный университет (г. Ставрополь, Российская Федерация)

Поступила в редакцию 26.03.2024

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

Аннотация. Дистанционная оценка диэлектрических характеристик земной поверхности востребована для решения различных промышленных задач. В статье рассмотрены теоретические и практические аспекты измерения диэлектрической проницаемости земной поверхности при ее облучении радиосигналом в двухпозиционной системе из беспилотных летательных аппаратов. Требуемая глубина проникновения зондирующего радиосигнала под поверхность достигается использованием UHF-диапазона и наклонным облучением в условиях полного (псевдополного) преломления электромагнитной волны на границе «воздух-поверхность». Новизна предлагаемого подхода заключается в наклонном облучении земной поверхности горизонтально и вертикально поляризованным радиолокационным сигналом с последующей регистрацией амплитуд и фазовых сдвигов осцилляций интерференционных волн и в нахождении угла Брюстера по параметрам интерференционной волны. Практическим применением такого подхода являются измерение влажности сельскохозяйственных почв и определение прочностных характеристик морского льда.

Ключевые слова: дистанционное зондирование земной поверхности, диэлектрическая проницаемость, угол Брюстера, интерференционная волна.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Коллектив авторов благодарит Агрохолдинг «Степь» (Российская Федерация) за предоставленные для исследования опытные поля.

Для цитирования. Теория и практика дистанционного радиолокационного зондирования земной поверхности / Г. И. Линец [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 4. С. 55–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-55-62>.

THEORY AND PRACTICE OF REMOTE RADAR PROBING THE EARTH'S SURFACE

GENNADY I. LINETS, ANATOLIY V. BAZHENOV, NATALIA V. GRIVENNAYA,
VLADISLAV D. GONCHAROV

North Caucasus Federal University (Stavropol, Russian Federation)

Submitted 26.03.2024

Abstract. Remote assessment of the dielectric characteristics of the earth's surface is in demand for solving various industrial tasks. The article discusses the theoretical and practical aspects of measuring the dielectric constant of the Earth's surface when it is irradiated with a radio signal in a two-position system from unmanned aerial vehicles. The required depth of penetration of the probing radio signal under the surface is achieved using the UHF band and oblique irradiation under conditions of complete (pseudo-complete) refraction of the electromagnetic wave at the air-surface boundary. The novelty of the proposed approach lies in the oblique irradiation of the Earth's surface with a horizontally and vertically polarized radar signal, followed by registration of amplitudes and phase

shifts of interference wave oscillations, and finding the Brewster angle by the parameters of the interference wave. The practical application of this approach is to measure the moisture content of agricultural soils and determine the strength characteristics of sea ice.

Keywords: remote sensing of the earth's surface, dielectric permittivity, Brewster's angle, interferential wave.

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

Gratitude. The team of authors thanks Agroholding "Steppe" (Russian Federation) for the experimental fields provided for the study.

For citation. Linets G. I., Bazhenov A. V., Grivennaya N. V., Goncharov V. D. (2024) Theory and Practice of Remote Radar Probing the Earth's Surface. *Doklady BGUIR*. 22 (4), 55–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-55-62> (in Russian).

Введение

Дистанционная оценка диэлектрических характеристик земной поверхности востребована для решения различных индустриальных задач. Примерами таких задач, рассмотренных в статье, являются измерение влажности сельскохозяйственных почв и определение прочностных характеристик морского льда. При кажущемся отсутствии общности решаемых задач они могут быть сведены к единой теоретической модели дифракции электромагнитных волн на плоскостойких диэлектриках с потерями. Радиолокационное зондирование верхних слоев почвы используется для организации агротехнических работ, определения состава и структурных характеристик геологических разломов, выявления загрязнения почвы солями тяжелых металлов и т. д. [1–6] и основано на извлечении из отраженного сигнала информации, заключенной в изменении амплитуды и фазы, связанном со структурой и диэлектрическими свойствами обследуемой поверхности. Использование бистатической (на двух беспилотных летательных аппаратах (БПЛА)) радарной системы, содержащей передатчик и приемник, которые разделены расстоянием, сравнимым с расстоянием до исследуемой поверхности, обеспечивает требуемую глубину зондирования и увеличение площади обследуемой территории. При этом решается задача оперативного определения комплексной диэлектрической проницаемости (и, следовательно, влажности) почвы не только на поверхности и близком к поверхности слое, но и на глубину расположения корневой системы растений. Высота полета и расстояние между БПЛА определяются необходимостью создания условий для эффекта полного (псевдополного) преломления, или эффекта Брюстера. В этом случае при вертикальной поляризации зондирующего сигнала отражение от границы «воздух-поверхность» будет минимальным, а принятый радиолокационный сигнал будет в большей степени зависеть от диэлектрической проницаемости внутренних (подповерхностных) структур почвы [7].

Материалы и методы исследований

При радиолокационном зондировании диэлектрика, имеющего многослойную структуру, отраженный сигнал представляется в виде суммы нескольких составляющих: попадающей на приемную антенну напрямую, сформированной при отражении от границы раздела «воздух-поверхность», и отражающейся от внутренних слоев диэлектрика. На рис. 1 показано формирование интерференционных волн в плоскостойких средах, представленных областью идеального диэлектрика (воздух, удельная проводимость $\sigma_1 = 0$), областью диэлектрика с электрическими потерями (почва с разной степенью влажности или морской лед, $\sigma_2 \neq 0$) и областью, по своим свойствам близкой к проводящей (область грунтовых вод или морская вода, находящаяся ниже уровня морского льда, удельная проводимость $\sigma_3 \gg \sigma_2$).

На каждой из двух границ происходит отражение и преломление электромагнитных волн, при этом коэффициенты отражения и преломления определяются формулами Френеля [8] в зависимости от углов падения и характеристических сопротивлений граничащих сред

$$\dot{Z}_{ci} = \sqrt{\frac{\mu_{ri}\mu_0}{\epsilon_0\epsilon_{ri} - j(\sigma_i/2\pi f)}}, \quad (1)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; ϵ_{ri} – относительная диэлектрическая проницаемость i -й среды; μ_{ri} – относительная магнитная проницаемость i -й среды; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; σ_i – удельная проводимость i -й среды; f – частота радиосигнала.

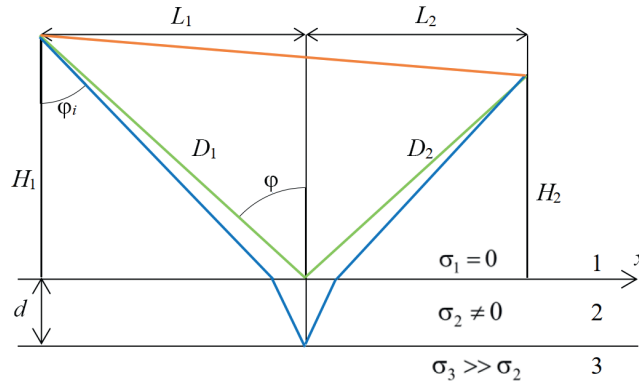


Рис. 1. Формирование интерференционной волны при наклонном облучении земной поверхности
Fig. 1. Generation of interference wave at inclined irradiation of ground surface

На рис. 2 показаны зависимости модуля коэффициентов отражения для вертикально (R_v) и горизонтально (R_h) поляризованных электромагнитных волн для различных свойств граничащих сред.

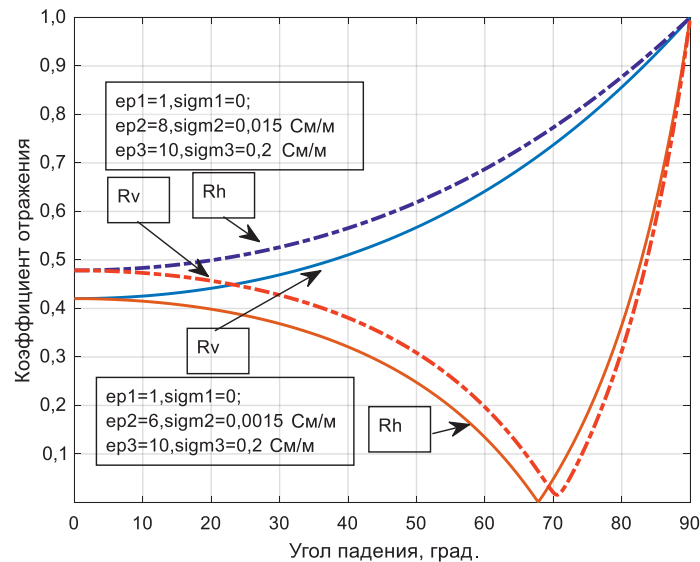


Рис. 2. Зависимости модуля коэффициентов отражения для вертикально (R_v) и горизонтально (R_h) поляризованных электромагнитных волн для различных свойств граничащих сред
Fig. 2. Dependences of the modulus of reflection coefficients for vertically (R_v) and horizontally (R_h) polarized electromagnetic waves for various properties of the adjacent media

Как показано на рис. 2, при вертикальной поляризации зондирующего сигнала существует некоторое значение угла падения (угол Брюстера φ_B), при котором коэффициент отражения равен или близок к нулю. Поскольку значение угла Брюстера определяется диэлектрическими свойствами среды, его измерение позволяет произвести оценку диэлектрической проницаемости второй среды (ϵ_{r2}), например, по формуле [9]:

$$\epsilon_{r2} = (\operatorname{tg}\varphi_B)^2. \quad (2)$$

Новизна предлагаемого подхода заключается в наклонном облучении земной поверхности и в нахождении угла Брюстера по параметрам интерференционной волны, для чего передающее и приемное оборудование радиолокатора размещается на двух различных БПЛА. При этом принимаемая интерференционная волна образуется за счет сложения прямой волны, распространяющейся между передатчиком и приемником в воздухе, волны, отраженной от границы «воздух-поверхность», и суммы парциальных волн, прошедших через границу «воздух-поверхность» и отразившихся от грунтовых вод или морской воды. На рис. 3 показаны графики амплитуд интерференционных волн с вертикальной и горизонтальной поляризацией в зависимости от угла

падения электромагнитной волны, полученные методом математического моделирования и экспериментально.

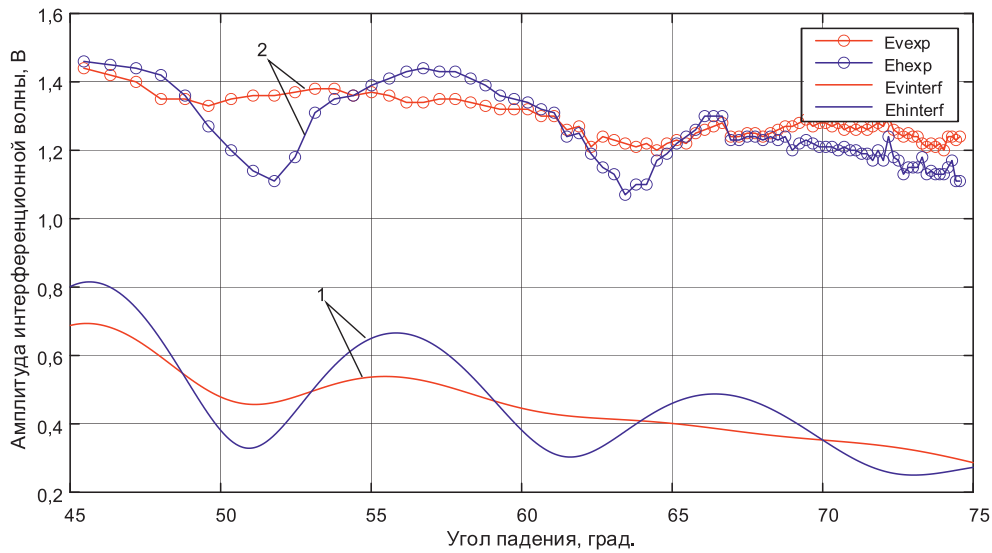


Рис. 3. Теоретические (1) и экспериментальные (2) зависимости амплитуд интерференционных волн с вертикальной и горизонтальной поляризацией от угла падения электромагнитной волны
Fig. 3. Theoretical (1) and experimental (2) dependences of the amplitudes of interference waves with vertical and horizontal polarization on the angle of incidence of the electromagnetic wave

Теоретические графики на рис. 3 получены с помощью математического моделирования процесса формирования интерференционных волн при условии, что верхний слой почвы является диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{r2} = 3,5$ и удельной проводимостью $\sigma_i = 0,015$ См/м (влажная сулинистая почва). При таких условиях угол, при котором вся энергия падающей электромагнитной волны переходит из воздуха в почву (угол Брюстера), составляет $62,2^\circ$. Согласно рис. 3, эффекту полного преломления соответствует уменьшение амплитуды интерференционной волны с вертикальной поляризацией (красная линия), в то же время точное определение угла по графику затруднительно.

На рис. 4 показаны результаты вычисления разности фаз интерференционных волн. Значению фазового сдвига $1,57$ рад. ($\pi/2$), характеризующего эффект Брюстера, соответствует угол $62,9^\circ$, при этом абсолютная ошибка измерения составляет $0,7^\circ$.

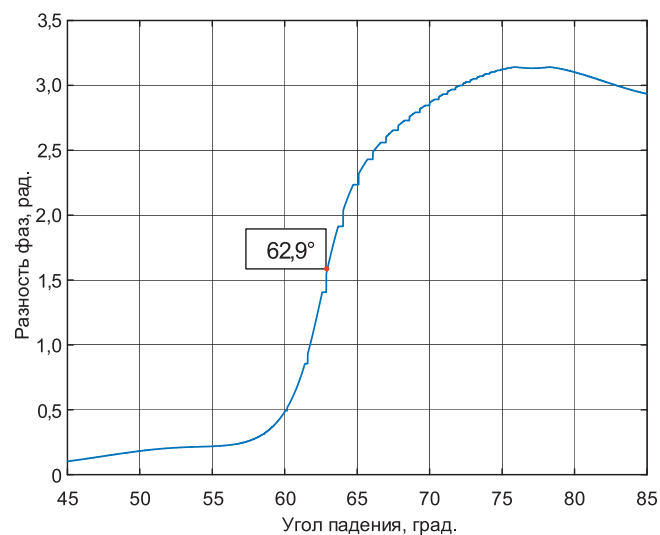


Рис. 4. Разность фаз интерференционных волн с вертикальной и горизонтальной поляризацией
Fig. 4. Phase difference of interference waves with vertical and horizontal polarization

Результаты исследований и их обсуждение

Практическое применение фазового метода определения диэлектрических характеристик земной поверхности реализовано для осуществления зонирования сельскохозяйственного поля по электропроводности. Зонирование (картирование) выполнено с применением двух сельскохозяйственных БПЛА DJI Agras T16. На рис. 5 показано размещение передатчика бистатической системы на БПЛА, частота зондирующего сигнала 469 МГц. Антенны передатчика и приемника аналогичны, выполнены методом печатного монтажа и позволяют одновременно излучать (принимать) электромагнитные волны вертикальной и горизонтальной поляризации.



Рис. 5. Размещение передатчика вместе с антенной на корпусе беспилотного летательного аппарата
Fig. 5. Placing the transmitter along with the antenna on the body of an unmanned aerial vehicle

На рис. 6 показан полет двух БПЛА во время выполнения измерений. Полет осуществлялся в автоматическом режиме со скоростью 7 м/с на высоте полета обоих БПЛА 3 м с обиганием рельефа на расстоянии 10 м между ними. Измерения проводились один раз в 2 с.



Рис. 6. Полет беспилотного летательного аппарата во время проведения дистанционного зондирования поверхности почвы
Fig. 6. Flight of an unmanned aerial vehicle during remote sensing of the soil surface

Экспериментальные исследования проводились на опытно-производственном поле Агрохолдинга «Степь», расположенном на территории Грачевского района Ставропольского края Российской Федерации, в соответствии с договором о сотрудничестве от 01.08.2023 № Д2023-83/С. Выбор поля обусловлен широким диапазоном свойств неоднородности рельефа, почвенного покрова, засоленности и гранулометрического состава. Поле использовалось в сельскохозяйственном сезоне 2022–2023 гг. для выращивания озимой пшеницы. Общие размеры поля – 74 га, координаты юго-западного участка поля – 45.0448273 (45°2'41,38") СШ; 42.293533 (42°18'17,10") ВД.

Число измерений за один пролет по длине поля равнялось 121. Для сравнения результатов зонирования бистатической системой использовались данные, полученные с помощью аппаратуры электромагнитного профилирования АЭМП-14. При этом осуществлялось усреднение

измеренных значений по трем точкам с учетом координат, полученных с использованием GPS. Общее время выполнения зонирования поля составило 3 ч с учетом замены аккумуляторных батарей БПЛА через каждые 40 мин полета.

На рис. 7 представлены результаты оценки электропроводности почвы фазовым методом (по величине фазового сдвига между интерференционными волнами с вертикальной и горизонтальной поляризацией) по одному из линейных участков на поле, а на рис. 8 – результаты оценки электропроводности почвы аппаратурой электромагнитного профилирования АЭМП-14, выполненной на этом же участке поля с использованием 14 рабочих частот.



Рис. 7. Результаты оценки электропроводности почвы фазовым методом
Fig. 7. Results of evaluation of soil electrical conductivity by phase method

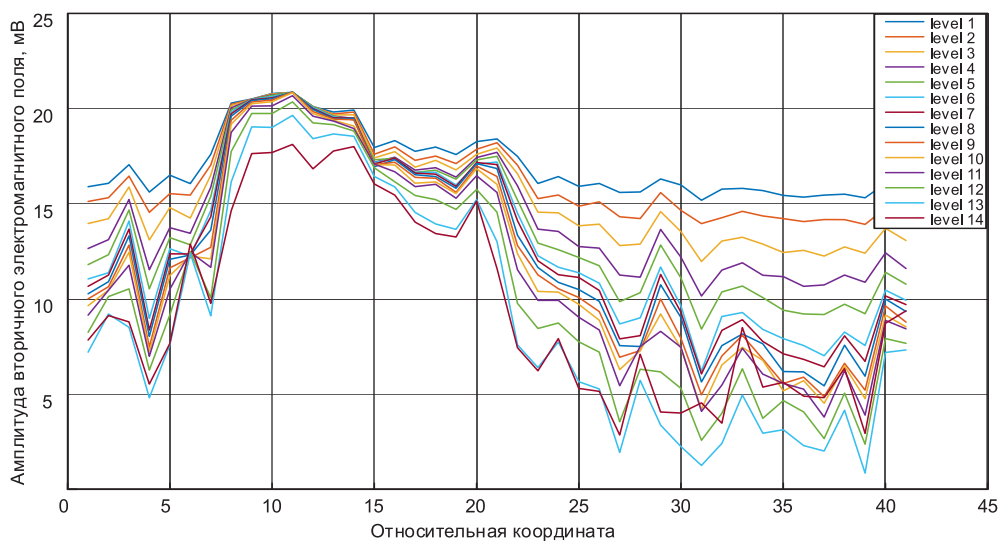


Рис. 8. Результаты оценки электропроводности почвы аппаратурой электромагнитного профилирования АЭМП-14
Fig. 8. Results of soil electrical conductivity assessment using AEMP-14 electromagnetic profiling equipment

На рис. 9 показан график изменения коэффициента корреляции результатов зонирования почвы бистатистической системой для каждой из рабочих частот АЭМП-14.

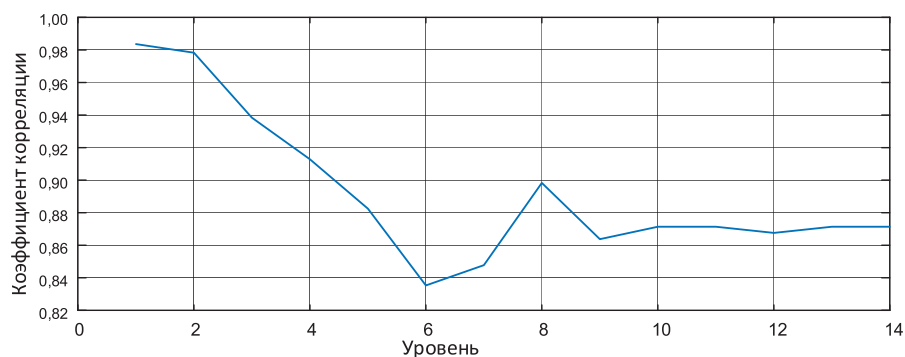


Рис. 9. Коэффициенты корреляции результатов измерений
Fig. 9. Correlation coefficients of measurement results

Заключение

1. Предложенная технология дистанционного зондирования, основанная на использовании наклонного облучения земной поверхности под углом, близким к углу Брюстера, достаточно чувствительна как к поверхностным изменениям удельной проводимости, так и к изменениям, происходящим на глубине до 2 м.

2. Новизна разработанной технологии заключается в использовании фазового сдвига интерференционных волн с вертикальной и горизонтальной поляризацией для измерения угла Брюстера.

3. Коэффициент корреляции результатов зондирования поля с помощью бистатической радиолокационной системы и с помощью АЭМП-14 максимален у поверхности почвы и превышает значение 0,82 до глубины 2,00 м.

4. Дальнейшие исследования предполагается направить на оценку с помощью предложенного подхода толщины и солености морского льда для оптимизации прокладки маршрутов по северному морскому пути.

Список литературы

1. How-Wei, C. Finite-Difference Time-Domain Simulation of GPR Data / C. How-Wei, H. Tai-Min // *Journal of Applied Geophysics*. 1998. Vol. 40, No 13. P. 139–163. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(98\)00019-6](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(98)00019-6).
2. Dielectric Constant Determination Using Ground-Penetrating Radar Reflection Coefficients / P. M. Reppert, F. D. Morgan, M. N. Toksöz // *Journal of Applied Geophysics*. 2000. Vol. 43, No 2–4. P. 189–197. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00058-0](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00058-0).
3. Liu, Y. Review of Electromagnetic Waves-Based Distance Measurement Technologies for Remote Monitoring of Civil Engineering Structures / Y. Liu, Y. Bao // *Measurement*. 2021. Vol. 176. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109193>.
4. Khmelinin, A. P. Simulation of Electromagnetic High-Frequency Wave Propagation Processes in Multilayer Geo-Structures / A. P. Khmelinin, A. I. Konurin, E. V. Denisova // *Geohazard Mechanics*. 2023. Vol. 1, No 13. P. 203–207. <https://doi.org/10.1016/j.ghm.2023.04.001>.
5. Electromagnetic Energy Focusing Technology with GPR Array Transmitting Antenna for High Resolution Detection / W. Jia [et al.] // *Measurement*. 2022. Vol. 203. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112000>.
6. Probabilistic Estimation of Level Ice Resistance on Ships Based on Sea Ice Properties Measured Along Summer Arctic Cruise Paths / Q. Wang [et al.] // *Cold Regions Science and Technology*. 2021. Vol. 189. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103336>.
7. Радиолокационное измерение комплексной относительной диэлектрической проницаемости и объемной влажности почвы / Г. И. Линец [и др.] // Радиолокационные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий: матер. Всерос. конф., посвящ. Дню радио, 2023. С. 79–83.
8. Баскаков, С. И. Электродинамика и распространение радиоволн / С. И. Баскаков. М.: Ленанд, 2023.
9. Bistatic System for Radar Sensing of Soil Moisture / A. Bazhenov [et al.] // *Materials of 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*. 2021. Vol. 20. P. 919–925. <http://doi.org/10.22616/22616/ERDev/2021/20/TF207.10>.

References

1. How-Wei C., Tai-Min H. (1998) Finite-Difference Time-Domain Simulation of GPR Data. *Journal of Applied Geophysics*. 40 (13), 139–163. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(98\)00019-6](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(98)00019-6).
2. Reppert P. M., Morgan F. D., Toksöz M. N. (2000) Dielectric Constant Determination Using Ground-Penetrating Radar Reflection Coefficients. *Journal of Applied Geophysics*. 43 (2–4), 189–197. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00058-0](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00058-0).
3. Liu Y., Bao Y. (2021) Review of Electromagnetic Waves-Based Distance Measurement Technologies for Remote Monitoring of Civil Engineering Structures. *Measurement*. 176. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109193>.
4. Khmelinin A. P., Konurin A. I., Denisova E. V. (2023) Simulation of Electromagnetic High-Frequency Wave Propagation Processes in Multilayer Geo-Structures. *Geohazard Mechanics*. 1 (13), 203–207. <https://doi.org/10.1016/j.ghm.2023.04.001>.
5. Jia W., Wang S., Min S., Zhang Y. (2022) Electromagnetic Energy Focusing Technology with GPR Array Transmitting Antenna for High Resolution Detection. *Measurement*. 203. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112000>.

6. Wang Q., Zong Z., Lu P., Zhang G., Li Z. (2021) Probabilistic Estimation of Level Ice Resistance on Ships Based on Sea Ice Properties Measured Along Summer Arctic Cruise Paths. *Cold Regions Science and Technology*. 189. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103336>.
7. Linets G. I., Bazhenov A. V., Grivennaya N. V., Goncharov V. D. (2023) Radar Measurement of Complex Relative Permittivity and Volumetric Soil Moisture. *Radioelectronic Devices and Systems for Infocommunication Technologies, Materials of All-Russian Conference Dedicated to Radio Day*. 79–83 (in Russian).
8. Baskakov S. I. (2023) *Electrodynamics and Radio Wave Propagation*. Moscow, Lenand Publ. (in Russian).
9. Bazhenov A., Sagdeev K., Goncharov D., Grivennaya N. (2021) Bistatic System for Radar Sensing of Soil Moisture. *Materials of 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*. 20, 1919–1925. <http://doi.org/10.22616/22616/ERDev/2021/20/TF207.10>.

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Линец Г. И., д-р техн. наук, проф., зав. каф. инфокоммуникаций Института цифрового развития Северо-Кавказского федерального университета (ИЦР СКФУ)

Баженов А. В., канд. техн. наук, проф., проф. каф. инфокоммуникаций, ИЦР СКФУ

Гривенная Н. В., канд. техн. наук, доц., доц. каф. инфокоммуникаций, ИЦР СКФУ

Гончаров В. Д., мл. науч. сотр. каф. инфокоммуникаций, ИЦР СКФУ

Адрес для корреспонденции

355017, Российская Федерация,
г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1
Северо-Кавказский федеральный университет
Тел.: +7 8652 95-69-97
E-mail: ngrivennaia@ncfu.ru
Гривенная Наталья Владимировна

Information about the authors

Linets G. I., Dr of Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Infocommunications of the Institute of Digital Development of the North Caucasus Federal University (IDD NCFU)

Bazhenov A. V., Cand. of Sci., Professor, Professor at the Department of Infocommunications, IDD NCFU

Grivennaya N. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Infocommunications, IDD NCFU

Goncharov V. D., Junior Researcher at the Department of Infocommunications, IDD NCFU

Address for correspondence

355017, Russian Federation,
Stavropol, Pushkin St., 1
North Caucasus Federal University
Tel.: +7 8652 95-69-97
E-mail: ngrivennaia@ncfu.ru
Grivennaya Natalia Vladimirovna