

## Расчет отражений плоской электромагнитной волны линейной поляризации от границы раздела «воздух – влажная почва» на основе гетерогенных моделей Максвелла Гарнетта и Бруггемана

Д.Н. Панин, О.В. Осипов, К.О. Безлюдников

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики  
443010, Россия, г. Самара,  
ул. Л. Толстого, 23

*Аннотация* – В работе проведен расчет модулей коэффициентов отражения плоской электромагнитной волны линейной поляризации в зависимости от влажности почвы с относительной комплексной диэлектрической проницаемостью, описываемой гетерогенными моделями Максвелла Гарнетта и Бруггемана. Проводится сравнение расчетных зависимостей модулей коэффициентов отражения волн Е- и Н-поляризации от влажности почвы по двум предложенным двухкомпонентным моделям. Показана корректность применяемых моделей в пределах влажности почвы до 10 %. В пределах изменения влажности почвы от 10 до 50 % наблюдаются незначительные расхождения результатов расчета по двум гетерогенным моделям. Уровень отражения электромагнитной волны от поверхности почвы в случае ее Н-поляризации меньше, чем в случае Е-поляризации. С увеличением влажности почвы наблюдается монотонный рост уровня отражения. Предлагаемые гетерогенные модели влажной почвы и методика расчета могут быть использованы при дистанционном радиолокационном зондировании поверхности Земли в целях определения влажности в подкоренном слое почвы.

*Ключевые слова* – метаматериал; электромагнитная волна; влажность почвы; коэффициент отражения; гетерогенная модель; дистанционное зондирование Земли.

### Введение

Оценка влагозапаса в корнеобитаемом слое почвы играет ключевую роль для сельскохозяйственного мониторинга полей, определяет подходящее время для посева, роста растений, прогнозирования урожайности [1; 2]. Влажность почвы влияет на содержание воздуха, температуру, теплоемкость, соленость и наличие токсичных веществ, регулирует структуру, пластичность и плотность почвы [3–5]. В 2010 г. Всемирная метеорологическая организация добавила влажность почвы в список 50 основных климатических параметров, рекомендуемых для систематического наблюдения [6]. Кроме того, информация о влажности почвы необходима для поддержки более широкого круга научных исследований, например прогнозирования наводнений и засухи, климатических прогнозов и моделирования углеродного цикла [7; 8].

Доступные методы определения влажности почвы основаны на предварительном отборе образцов почвы с последующим их анализом непосредственно в полевых или лабораторных условиях. Подходы к измерению влажности почвы обычно подразделяются на прямые, косвенные и дистанционные. Прямые методы заключаются в извлечении воды из образца грунта путем испарения, промывки и химической реакции. Расчет влажности

почвы в этом случае основан на измерении массы извлеченной воды и уровне сухости. Косвенные методы включают измерение характеристик почвы в зависимости от содержания воды. К сожалению, взаимосвязь между физическими и химическими свойствами почвы и влажностью почвы до конца не изучена.

На сегодняшний момент времени наиболее перспективными являются дистанционные методы измерения влажности почвы, основанные на данных об уровне отражения электромагнитного излучения определенного диапазона частот от поверхности почвы [9–12]. В данной статье на основании ранее предложенной математической модели комплексной диэлектрической проницаемости влажной почвы с учетом гетерогенности [13] проведен численный анализ отражения плоской электромагнитной волны с параллельной и перпендикулярной поляризациями от поверхности влажной почвы.

### 1. Гетерогенная математическая модель комплексной диэлектрической проницаемости влажной почвы

Влажную почву по аналогии с метаматериалом можно представить как двухкомпонентную среду,

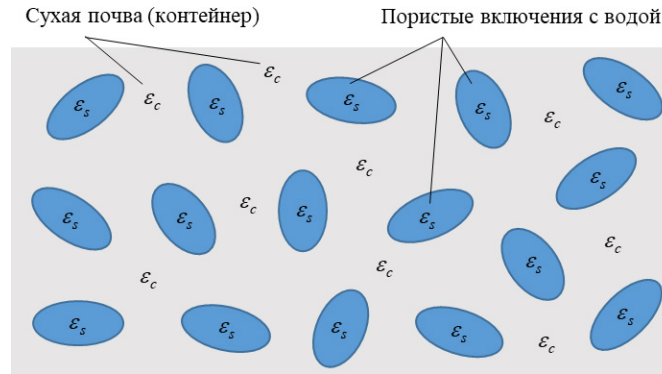


Рис. 1. Влажная почва как двухкомпонентная гетерогенная система  
 Fig. 1. Moist soil as a two-component heterogeneous system

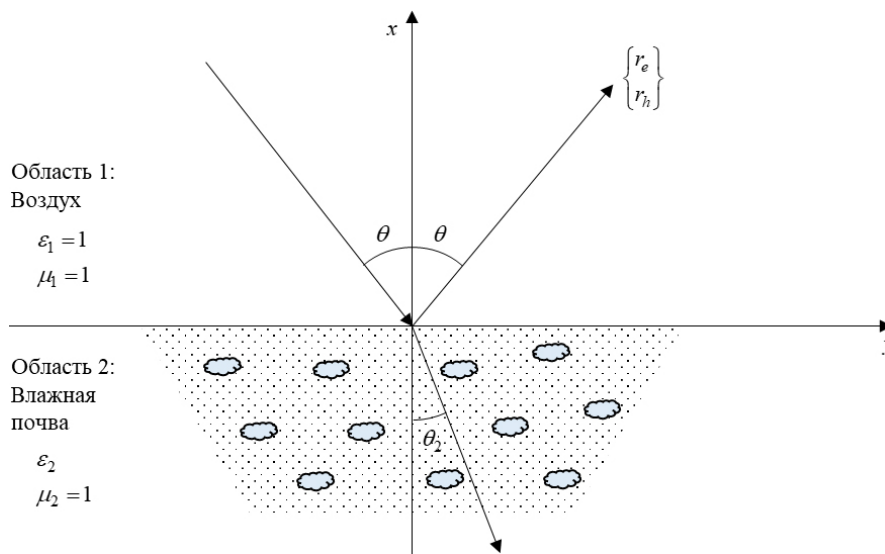


Рис. 2. Геометрия задачи  
 Fig. 2. Geometry of the problem

состоящую из контейнера из сухого грунта и внедренных в него с определенной концентрацией  $\alpha$  пористых включений, заполненных водой (рис. 1).

Относительная комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) почвы в рамках двух гетерогенных моделей описывается выражениями вида:

$$\epsilon_{MG} = \epsilon_c \frac{1 + 2\alpha\epsilon_x}{1 - \alpha\epsilon_x}; \quad \epsilon_x = \frac{\epsilon_s - \epsilon_c}{\epsilon_s + 2\epsilon_c}; \quad (1)$$

$$\epsilon_{BR} = \sqrt{\frac{\{\epsilon_s(1 - 3\alpha) - \epsilon_c(2 - 3\alpha)\}^2}{16} + \frac{\epsilon_c\epsilon_s}{2}} - \frac{\epsilon_s(1 - 3\alpha) - \epsilon_c(2 - 3\alpha)}{4}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_{MG}$ ,  $\epsilon_{BR}$  – относительные КДП сред, описываемых моделями Максвелла Гарнетта и Бруггемана соответственно;  $\epsilon_c$  – относительная КДП сухой почвы;  $\epsilon_s$  – относительная КДП чистой воды.

Концентрация пористых включений, заполненных водой, связана с влажностью почвы  $W$  и описывается выражением вида

$$\alpha = W \frac{\rho_d}{\rho_w} = W \rho_{dw}, \quad (3)$$

где  $\rho_d$  – плотность сухого грунта;  $\rho_w$  – плотность воды;  $\rho_{dw}$  – нормированная плотность, которая определяет тип почвы (рыхлая, твердая и т. д.).

Влажность почвы на основе прямых измерений рассчитывается по формуле

$$W = \frac{m_w}{m_s} = \frac{m - m_s}{m_s}, \quad (4)$$

где  $m_w$  – масса воды в порах;  $m_s$  – масса сухой почвы;  $m$  – масса влажной почвы.

## 2. Отражение плоской электромагнитной волны от границы раздела «воздух – почва»

Рассмотрим задачу о наклонном падении плоской электромагнитной волны E- или H-поляризации на границу раздела «воздух – почва». Геометрия задачи приведена на рис. 2. Волна падает

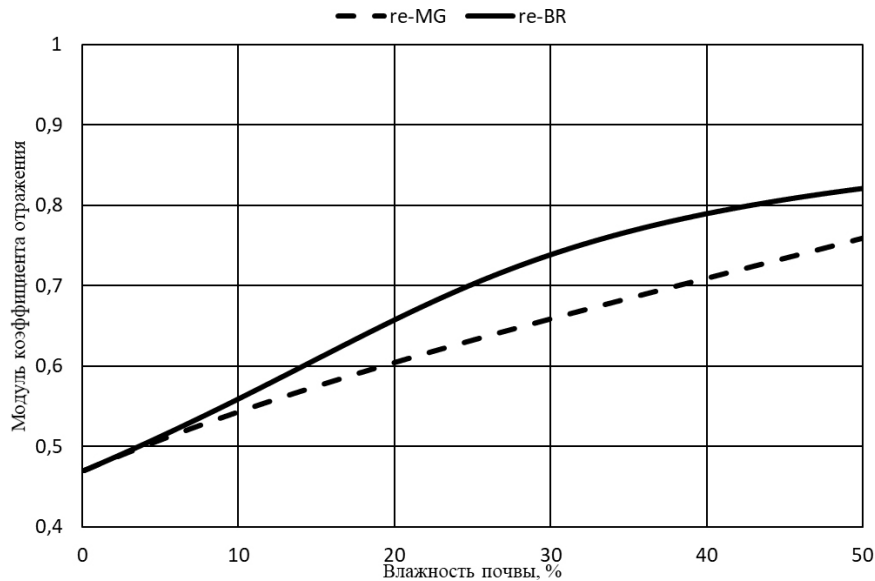


Рис. 3. Зависимости модулей коэффициентов отражения электромагнитной волны Е-поляризации от влажности почвы для гетерогенных моделей

Fig. 3. Dependences of the modules of the reflection coefficients of the E-polarization electromagnetic wave on soil moisture for heterogeneous models

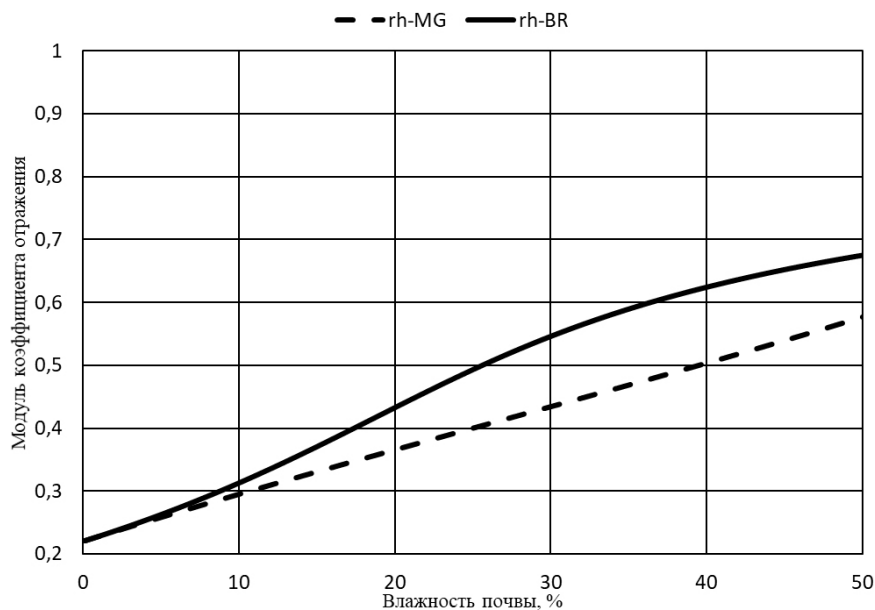


Рис. 4. Зависимости модулей коэффициентов отражения электромагнитной волны Н-поляризации от влажности почвы для гетерогенных моделей

Fig. 4. Dependences of the modules of the reflection coefficients of an electromagnetic wave of H-polarization on soil moisture for heterogeneous models

на границу раздела под углом  $\theta$ . Область 1 представляет собой вакуум с проницаемостями:  $\epsilon_1 = 1$ ,  $\mu_1 = 1$ . Влажная почва (область 2) описывается материальными параметрами  $\epsilon_2$  и  $\mu_2 = 1$ . При  $\epsilon_2 = \epsilon_{MG}$  среда описывается гетерогенной моделью Максвелла Гарнетта; при  $\epsilon_2 = \epsilon_{BR}$  - моделью Бруггемана.

Для коэффициентов отражения плоской электромагнитной волны Е- или Н-поляризации ( $r_e$ ,  $r_h$ ) известны следующие соотношения [14]:

$$r_e = \frac{2 \cos \theta (1 - g^2) \cos \theta_2 + 2g (\cos^2 \theta - \cos^2 \theta_2)}{2 \cos \theta (1 + g^2) \cos \theta_2 + 2g (\cos^2 \theta + \cos^2 \theta_2)}; \quad (5)$$

$$r_h = \frac{2 \cos \theta (1 - g^2) \cos \theta_2 - 2g (\cos^2 \theta - \cos^2 \theta_2)}{2 \cos \theta (1 + g^2) \cos \theta_2 + 2g (\cos^2 \theta + \cos^2 \theta_2)}; \quad (6)$$

где

$$g = \sqrt{\frac{\epsilon_2 \mu_1}{\epsilon_1 \mu_2}};$$

$$\theta_2 = \arcsin \left( \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \mu_1}{\varepsilon_2 \mu_2}} \sin \theta \right)$$

– угол прохождения.

### 3. Результаты расчетов

В ходе расчетов использовались данные по почве, взятые из рекомендаций международного союза электросвязи МСЭ-R P.527-4 при температуре 20 градусов по Цельсию [15], а именно:  $\varepsilon_s = 80 - j2,5$ ,  $\varepsilon_c = 4 - j1,2$ . Угол падения волны –  $\theta = 45^\circ$ . Полагаем, что почва очень рыхлая, пригодная для посева, при этом  $\rho_{dw} = 1,5$ .

На рис. 3 и 4 представлены графики расчетов модулей коэффициентов отражения плоской электромагнитной волны Е- и Н-поляризации в зависимости от влажности почвы, КДП которой описывается моделями Максвелла Гарнетта (пунктирная линия) и Бруггемана (сплошная линия). Из графиков, представленных на рис. 3, 4, видно, что уровень отражения в случае Н-поляризованной падающей волны меньше, чем для Е-поляризованной волны. Из графиков также можно сделать вывод, что при значениях влажности почвы до 10 % модули коэффициентов от-

ражений от границы раздела «воздух – почва» практически совпадают по своим значениям при применении двух используемых гетерогенных моделей; небольшие отклонения в расчетах наблюдаются в диапазоне влажности от 10 до 50 %. Увеличение влажности почвы усиливает обратное отражение электромагнитного излучения.

### Заключение

Результаты численных расчетов доказывают возможность использования гетерогенных моделей Максвелла Гарнетта и Бруггемана для определения характеристик влажной почвы. Полученные данные можно использовать для составления карт полей распределения влажности в системах дистанционного зондирования Земли.

Результаты работы могут быть полезными при разработке программного обеспечения на основе нейронных сетей для определения по заданному датасету коэффициентов отражения профиля влажности исследуемых образцов почвы, радиоэлектронного оборудования, реализации натуральных экспериментов по зондированию почвы на опытных полях с помощью БПЛА.

### Список литературы

1. Martínez-Fernández J., González-Zamora A., Almendra-Martín L. Soil moisture memory and soil properties: An analysis with the stored precipitation fraction // *Journal of Hydrology*. 2021. Vol. 593. P. 125622. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125622>
2. Borodychev V.V., Lytov M.N. Irrigation management model based on soil moisture distribution profile // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 577, no. 1. P. 012022. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/577/1/012022>
3. Shutko A.M., Reutov E.A., Golovachev S.P. Estimation of soil moisture profiles and root zone moisture content by means of microwave radiometry and a priori information // *Passive Microwave Remote Sensing of Land-Atmosphere Interactions*. Berlin: De Gruyter, 2020. P. 461–474. DOI: <https://doi.org/10.1515/9783112319307-toc>
4. Hao X., Hao H., Zhang J. Soil moisture influenced the variability of air temperature and oasis effect in a large inland basin of an arid region // *Hydrological Processes*. 2021. Vol. 35, no. 6. P. 14246. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.14246>
5. Bo T., Baowen Y. Effect of cavity structure on the saving up and dissipation of moisture in loess soil // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 791, no. 1. P. 012013. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/791/1/012013>
6. Sungmin O., Orth R. Global soil moisture data derived through machine learning trained with in-situ measurements // *Scientific Data*. 2021. Vol. 8, no. 1. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.14790510>
7. Grillakis M.G. Increase in severe and extreme soil moisture droughts for Europe under climate change // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 660. P. 1245–1255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.001>
8. Berg A., Sheffield J. Climate change and drought: the soil moisture perspective // *Current Climate Change Reports*. 2018. Vol. 4, no. 2. P. 180–191. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0095-0>
9. Srivastava P.K. Satellite soil moisture: Review of theory and applications in water resources // *Water Resources Management*. 2017. Vol. 31, no. 10. P. 3161–3176. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1722-6>
10. Kim H., Lakshmi V. Use of Cyclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS) observations for estimation of soil moisture // *Geophysical Research Letters*. 2018. Vol. 45, no. 16. P. 8272–8282. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018GL078923>
11. Chew C., Small E. Description of the UCAR/CU soil moisture product // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, no. 10. P. 1558. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12101558>
12. Fang K., Shen C. Near-real-time forecast of satellite-based soil moisture using long short-term memory with an adaptive data integration kernel // *Journal of Hydrometeorology*. 2020. Vol. 21, no. 3. P. 399–413. DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0169.1>
13. Матвеев И.В., Осипов О.В., Панин Д.Н. Математическая модель неоднородной комплексной диэлектрической проницаемости влажной почвы с учетом гетерогенности // *Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: сб. статей восьмой Всероссийской научной школы-семинара*. 2021. С. 237–241.

14. Матвеев И.В., Осипов О.В., Панин Д.Н. Взаимодействие электромагнитной волны с киральным метаматериалом на основе модели Максвелла Гарнетта // IV Научный форум телекоммуникации: теория и технологии (ТТТ-2020). Физика и технические приложения волновых процессов (ФиТПВП-2020). 2020. С. 220–221.
15. Рекомендация МСЭ-R P.527-4 от 06/2017. Электрические характеристики земной поверхности. Серия Р. Распространение радиоволн.

## References

1. Martínez-Fernández J., González-Zamora A., Almendra-Martín L. Soil moisture memory and soil properties: An analysis with the stored precipitation fraction. *Journal of Hydrology*, 2021, vol. 593, p. 125622. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125622>
2. Borodychev V.V., Lytov M.N. Irrigation management model based on soil moisture distribution profile. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 577, no. 1, p. 012022. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/577/1/012022>
3. Shutko A.M., Reutov E.A., Golovachev S.P. Estimation of soil moisture profiles and root zone moisture content by means of microwave radiometry and a priori information. *Passive Microwave Remote Sensing of Land-Atmosphere Interactions*. Berlin: De Gruyter, 2020, pp. 461–474. DOI: <https://doi.org/10.1515/9783112319307-toc>
4. Hao X., Hao H., Zhang J. Soil moisture influenced the variability of air temperature and oasis effect in a large inland basin of an arid region. *Hydrological Processes*, 2021, vol. 35, no. 6, p. 14246. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.14246>
5. Bo T., Baowen Y. Effect of cavity structure on the saving up and dissipation of moisture in loess soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 791, no. 1, p. 012013. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/791/1/012013>
6. Sungmin O., Orth R. Global soil moisture data derived through machine learning trained with in-situ measurements. *Scientific Data*, 2021, vol. 8, no. 1, pp. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.14790510>
7. Grillakis M.G. Increase in severe and extreme soil moisture droughts for Europe under climate change. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 660, pp. 1245–1255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.001>
8. Berg A., Sheffield J. Climate change and drought: the soil moisture perspective. *Current Climate Change Reports*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 180–191. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0095-0>
9. Srivastava P.K. Satellite soil moisture: Review of theory and applications in water resources. *Water Resources Management*, 2017, vol. 31, no. 10, pp. 3161–3176. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1722-6>
10. Kim H., Lakshmi V. Use of Cyclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS) observations for estimation of soil moisture. *Geophysical Research Letters*, 2018, vol. 45, no. 16, pp. 8272–8282. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018GL078923>
11. Chew C., Small E. Description of the UCAR/CU soil moisture product. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 10, p. 1558. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12101558>
12. Fang K., Shen C. Near-real-time forecast of satellite-based soil moisture using long short-term memory with an adaptive data integration kernel. *Journal of Hydrometeorology*, 2020, vol. 21, no. 3, pp. 399–413. DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0169.1>
13. Matveev I.V., Osipov O.V., Panin D.N. Mathematical model of the inhomogeneous complex permittivity of wet soil, taking into account heterogeneity. *Vzaimodejstvie sverhvysochastotnogo, teragertsovogo i opticheskogo izlucheniya s poluprovodnikovymi mikro- i nanostrukturami, metamaterialami i bioob'ektami: sb. statej vos'moj Vserossijskoj nauchnoj shkoly-seminara*, 2021, pp. 237–241. (In Russ.)
14. Matveev I.V., Osipov O.V., Panin D.N. Interaction of an electromagnetic wave with a chiral metamaterial based on the Maxwell Garnett model. *IV Nauchnyj forum telekommunikatsii: teorija i tehnologii (TTT-2020). Fizika i tehnicheckie prilozhenija volnovyh protsessov (FiTPVP-2020)*, 2020, pp. 220–221. (In Russ.)
15. Recommendation ITU-R P.527-4 dated 06/2017. Electrical characteristics of the earth's surface. Series R. Propagation of radio waves.

## Physics of Wave Processes and Radio Systems 2022, vol. 25, no. 2, pp. 22–27

DOI 10.18469/1810-3189.2022.25.2.22-27

Received 11 December 2021

Accepted 12 January 2022

### The calculation of reflections of linear polarization plane electromagnetic wave from the boundary of the «air – wet soil» based on heterogeneous Maxwell Garnett and Bruggeman models

Dmitry N. Panin, Oleg V. Osipov, Kirill O. Bezlyudnikov

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics  
23, L. Tolstoy Street,  
Samara, 443010, Russia

*Abstract* – In this work we calculated the reflection coefficients modules of a linear polarization plane electromagnetic wave depending on soil moisture with a relative complex dielectric constant described by the heterogeneous Maxwell Garnett and Bruggeman models. A comparison is made of the calculated dependences of reflection coefficients for incident E- and

H-polarization waves on soil moisture according to the two proposed heterogeneous two-component models. The correctness of the applied models is shown within the soil moisture content up to 10 %. Within the limits of soil moisture change from 10 to 50 %, there are slight discrepancies in the calculation results for two heterogeneous models. The reflection level of an electromagnetic wave from the soil surface in the case of its H-polarization is less than in the case of E-polarization. With an increase in soil moisture, a monotonous increase in the reflection level is observed. The proposed heterogeneous models of wet soil and the calculation method can be used for remote radar sensing of the Earth's surface in order to determine the moisture content in the rooted layer of the soil.

*Keywords* – metamaterial; electromagnetic wave; soil moisture; reflection coefficient; heterogeneous model; Earth remote sensing.

## Информация об авторах

**Панин Дмитрий Николаевич**, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники и связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия. В 1999 г. окончил физический факультет Самарского государственного университета. В 2003 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Численный анализ отражений в слоистых средах и синтез плавных согласующих переходов в линиях передачи». В 2007 г. присвоено ученое звание доцента. В 2016 г. награжден значком «Почетный радист». Автор более 50 публикаций и научных трудов в области теории волновых процессов в средах с пространственной и временной дисперсией.

*Область научных интересов:* теория волновых процессов и компьютерное моделирование в радиофизике.

*E-mail:* panin-dn@psuti.ru

**Осипов Олег Владимирович**, доктор физико-математических наук, доцент, проректор по цифровому развитию Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия. В 2000 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование отражающих и волноведущих структур с киральными слоями». В 2006 г. получил благодарственное письмо Администрации городского округа Самара за значительный вклад в высшее образование Самарской области. В 2006 г. Осипов О.В. успешно защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика на тему «Электродинамика отражающих и волноведущих структур с киральными слоями». В 2008 г. Осипову О.В. присужден грант в области естественных и гуманитарных наук по номинации «Доктора наук РАН» от Российской академии наук. В 2011 г. награжден значком «Почетный радист». Осипов О.В. является известным специалистом в области радиофизики и электродинамики, а именно в теории киральных сред и метаструктур СВЧ. Автор и соавтор 7 монографий, 3 учебников и 8 учебных пособий с грифами Министерства образования и науки РФ и УМО, в списке научных и методических трудов более 300 публикаций.

*Область научных интересов:* электродинамика метаматериалов, антенны и устройства СВЧ, нелинейная оптика.

*E-mail:* o.osipov@psuti.ru

**Безлюдников Кирилл Олегович**, студент 2-го курса Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия. В 2020 г. окончил МАОУ «Самарский лицей информационных технологий». Участник и призер олимпиад по физике и телекоммуникационным технологиям. Автор 2 научных работ.

*Область научных интересов:* электромагнитные поля и волны, методы и средства математического моделирования электродинамических систем, антенны и устройства СВЧ, теория помехоустойчивости передачи дискретных и непрерывных сообщений.

*E-mail:* yakobix@ya.ru

## Information about the Authors

**Dmitry N. Panin**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor, head of the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering and Communications, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia. In 1999 he graduated from the Faculty of Physics of the Samara State University. In 2003 he defended his PhD thesis on the topic: «Numerical analysis of reflections in layered media and synthesis of smooth matching transitions in transmission lines». In 2007 he was awarded the academic title of Associate Professor. In 2016, he was awarded the Honorary Radio Operator badge. Author of more than 50 publications and scientific papers in the field of the theory of wave processes in media with spatial and temporal dispersion.

*Research interests:* theory of wave processes and computer simulation in radiophysics.

*E-mail:* panin-dn@psuti.ru

**Oleg V. Osipov**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, associate professor, vice-rector for Digital Development, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia. In 2000 he defended his PhD thesis on the topic «Study of reflective and waveguide structures with chiral layers». In 2006, he received a letter of thanks from the Administration of the Samara City District for a significant contribution to higher education in the Samara region. In 2006, Osipov O.V. successfully defended his dissertation for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences in the specialty 01.04.03 – Radiophysics on the topic «Electrodynamics of reflecting and waveguide structures with chiral layers». In 2008, Osipov O.V. was awarded a grant in the field of natural and human sciences in the nomination «Doctor of Science of the Russian Academy of Sciences» from the Russian Academy of Sciences. In 2011, he was awarded the Honorary Radio Operator badge. Osipov O.V. is a well-known specialist in the field of radiophysics and electrodynamics, namely in the theory of chiral media and microwave metastructures. Author and co-author of 7 monographs, 3 textbooks and 8 manuals certified by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and UMO, the list of scientific and methodological works includes more than 300 publications.

*Research interests:* electrodynamics of metamaterials, antennas and microwave devices, nonlinear optics.

*E-mail:* o.osipov@psuti.ru

**Kirill O. Bezlyudnikov**, 2nd year student of the Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia. In 2020, he graduated from the Samara Lyceum of Information Technologies. Participant and winner of Olympiads in physics and telecommunication technologies. Author of 2 scientific papers.

*Research interests:* electromagnetic fields and waves, methods and means of mathematical modeling of electrodynamic systems, antennas and microwave devices, theory of noise immunity of transmission of discrete and continuous messages.

*E-mail:* yakobix@ya.ru