

# РАСЧЕТ УРОВНЕЙ ОТРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ВЛАЖНОЙ ПОЧВЫ С УЧЕТОМ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ МОДЕЛЕЙ

К.О. Безлюдников, Д.Н. Панин

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия

**Обоснование.** В настоящее время в сельском хозяйстве крайне важно качественно определять влажность почвы в корнеобитаемом слое. Это позволяет грамотно подобрать подходящее время посева, прогнозировать урожайность [1, 2]. Методы измерения влажности почвы подразделяются на прямые, косвенные и дистанционные. К прямым методам относится извлечение воды из образца почвы с помощью испарения, промывки и химической реакции, расчет влажности производится из соотношения масс влажной и сухой почвы. Косвенные методы подразумевают измерение характеристик почвы в зависимости от содержания влаги. К сожалению, связность физических и химических свойств почвы и ее влажности не до конца изучены. На сегодня существуют перспективные дистанционные методы определения влажности почвы, которые основаны на данных, полученных из отраженной от почвы электромагнитной волны определенного диапазона частот.

**Цель** — определить влияние шероховатости почвы на уровни отражения электромагнитного излучения.

**Методы.** Для исследований применяли двухкомпонентную гетерогенную модель почвы из контейнера сухой почвы и включенные в него пористые области одинакового объема, заполненных водой (рис. 1).

Тогда комплексную диэлектрическую проницаемость (КДП) влажной почвы можно описать по математическим моделям Максвелла – Гарнетта (1) и Бруггемана (2).

$$\varepsilon_{MG} = \varepsilon_c \frac{1 + 2\alpha\varepsilon_x}{1 - \alpha\varepsilon_x}, \quad \varepsilon_x = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_c}{\varepsilon_s + 2\varepsilon_c}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{BR} = \sqrt{\frac{\{\varepsilon_s(1-3\alpha) - \varepsilon_c(2-3\alpha)\}^2}{16} + \frac{\varepsilon_s\varepsilon_c}{2} - \frac{\{\varepsilon_s(1-3\alpha) - \varepsilon_c(2-3\alpha)\}}{4}}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{MG}$  и  $\varepsilon_{BR}$  — относительные КДП сред, описываемые моделями Максвелла – Гарнетта и Бруггемана;  $\varepsilon_c$  — относительная КДП сухой почвы;  $\varepsilon_s$  — относительная КДП чистой воды.

Сначала необходимо было рассчитать модули коэффициентов отражения плоской электромагнитной волны без учета шероховатости для дальнейшего сравнения результатов.

Для коэффициентов отражения плоской электромагнитной волны  $E$ - или  $H$ -поляризации ( $r_e$ ,  $r_h$ ) известны следующие соотношения [3]:

$$r_e = \frac{\cos\theta(1-g^2)2\cos\theta_2 + 2g(\cos^2\theta - \cos^2\theta_2)}{\cos\theta(1+g^2)2\cos\theta_2 + 2g(\cos^2\theta + \cos^2\theta_2)}, \quad (3)$$

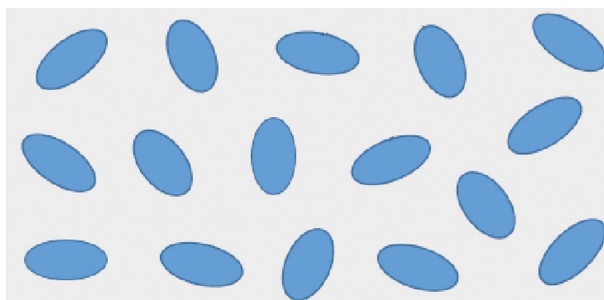


Рис. 1. Сухой грунт и области с влагой

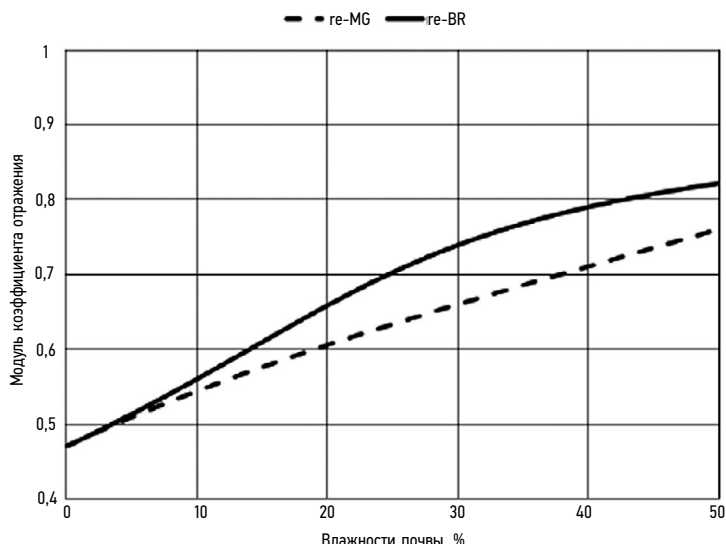


Рис. 2. Зависимости модулей коэффициентов отражения от влажности почвы для гетерогенных моделей

$$r_h = \frac{\cos\theta(1-g^2)2\cos\theta_2 - 2g(\cos^2\theta - \cos^2\theta_2)}{\cos\theta(1+g^2)2\cos\theta_2 + 2g(\cos^2\theta + \cos^2\theta_2)}, \tag{4}$$

где  $g = \sqrt{\frac{\epsilon_2\mu_1}{\epsilon_1\mu_2}}$ ,  $\theta_2 = \arcsin\left(\sqrt{\frac{\epsilon_1\mu_1}{\epsilon_2\mu_2}} \sin\theta\right)$  — угол прохождения;  $\theta$  — угол отражения, равный углу падения.

Далее, учитывая шероховатость почвы (в ходе расчетов использовали значение средней шероховатости почвы в 0,5 см и данные по почве, рекомендуемые МСЭ-R P.527 от 06/2017 [4]), были рассчитаны модули коэффициентов отражения электромагнитной волны Е-поляризации, используя модель, предложенную в [5]:

$$r_e = \frac{\cos\theta - \sqrt{\epsilon_2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon_2 - \sin^2\theta}} \exp\left(-\frac{1}{2}h \cos^2\theta\right), \tag{5}$$

$$r_h = \frac{\epsilon_2 \cos\theta - \sqrt{\epsilon_2 - \sin^2\theta}}{\epsilon_2 \cos\theta + \sqrt{\epsilon_2 - \sin^2\theta}} \exp\left(-\frac{1}{2}h \cos^2\theta\right), \tag{6}$$

где  $h$  — параметр шероховатости:  $h = 4\sigma_s^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2$  (7)

где  $\sigma_s$  — среднеквадратическое отклонение шероховатостей на поверхности.

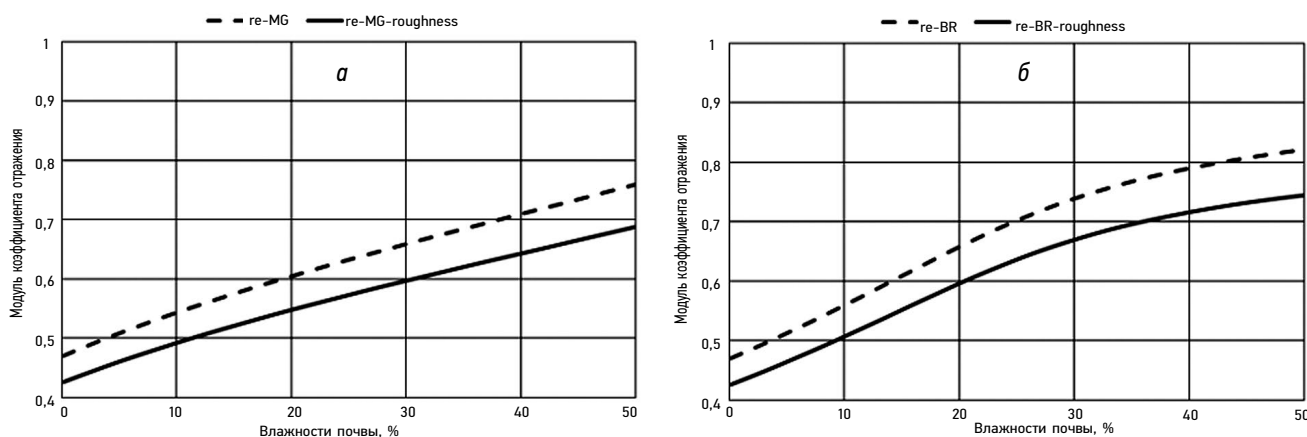


Рис. 3. Зависимости модулей коэффициентов отражения от влажности почвы для гетерогенных моделей с учетом средней шероховатости поверхности: а — модель Максвелла – Гарнетта; б — модель Бруггемана.

**Результаты.** Графики зависимостей модулей коэффициентов отражения электромагнитной волны  $E$ -поляризации от влажности почвы без учета шероховатости представлены на рис. 2.

На рис. 3 представлены результаты расчетов модулей коэффициентов отражения электромагнитной волны  $E$ -поляризации от влажности почвы по моделям, Максвелла – Гарнетта и Бруггемана. Данные зависимости приведены для случая нормального падения электромагнитной волны на частоте 3 ГГц.

**Выводы.** На рис. 2 видно, что при влажности почвы менее 10 % модули коэффициентов отражения, рассчитанные по обоим математическим моделям практически совпадают, небольшие отклонения наблюдаются в диапазоне от 10 до 50 %. Это говорит о сопоставимости используемых моделей Максвелла – Гарнетта и Бруггемана.

По рис. 3 можно заключить, что на частоте 3 ГГц шероховатость поверхности будет достаточно сильно влиять на модули коэффициентов отражения.

**Ключевые слова:** отражение электромагнитного излучения; поляризация волн; диэлектрическая проницаемость; корнеобитаемый слой почвы; влажность почвы.

### 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 // J Hydrol. 2021. Vol. 593. ID 125622. DOI: 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. ID 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/577/1/012022
3. 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». Самара, 2020. С. 220–221.
4. Международный союз электросвязи. Рекомендация МСЭ-R P.527-4 от 06/2017. Электрические характеристики земной поверхности. Серия Р. Распространение радиоволн. Женева, 2018. 19 с.
5. Choudhury B.J., Schmugge T.J., Chang A., Newton R.W. Effect of surface roughness on the microwave emission from soils // J Geophys Res: Oceans. 1979. Vol. 84, No. C9. P. 5699–5706. DOI: 10.1029/JC084iC09p05699

*Сведения об авторах:*

**Кирилл Олегович Безлюдников** — студент ПГУТИ, 2 курс, группа ИКТп-03, факультет базового телекоммуникационного образования; Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия. E-mail: yakobix@ya.ru

**Дмитрий Николаевич Панин** — кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники и связи (ТОРС); Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия. E-mail: panin-dn@psuti.ru