

Рассмотрены методы эквивалентирования цилиндрических объектов, имеющих некруговую форму, круговыми цилиндрами. Определены корректирующие коэффициенты, позволяющие уменьшить погрешность расчетов энергетических параметров индукторов для нагрева металлических элементов некругового сечения.

Индуктор, эквивалентный диаметр, индукционный нагрев, эксперимент, сопротивление индуктора.

Considers the methods to simplify calculation of cylindrical objects that are not circular shape, a circular cylinder. Definitely adjustment factors to reduce the error calculations of energy parameters inductors for heating metal elements are not circular section.

Inductor, Equivalent diameter of the inductors, induction heating, experiment, inductor resistance.

УДК 535:537:546

ВПЛИВ ЗМІНИ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ НА КОЕФІЦІЄНТ ВІДБИТТЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ

***В.В. Бойко, Г.І. Булах, С.В.Шостак,
кандидати фізико-математичних наук***

Теоретично досліджено вплив вологості ґрунту на зміну діелектричної проникності ϵ , відповідно, на коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль від його поверхні. Визначено комплексні коефіцієнти відбиття для перпендикулярно і паралельно поляризованих електромагнітних плоских хвиль від шаруватого напівпростору. Обґрунтовано можливість практичного застосування безконтактних радіолокаційних методів зондування для визначення структури і вологості ґрунтів у системі точного землеробства.

Діелектрична проникність, коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль, вологість ґрунту, система точного землеробства.

Присутність води у ґрунтах змінює їх фізико-механічні характеристики, і, зокрема, їх діелектричну проникність. Пов'язано це з тим, що комплексна діелектрична проникність води в діапазоні надвисоких частот (НВЧ) радіовипромінювання суттєво відрізняється від діелектричної проникності ґрунтів, і тому ефективна діелектрична проникність зволоженого ґрунту буде відрізнятися від відповідної характеристики сухих ґрунтів. Ця зміна, зокрема, буде впливати на коефіцієнт відбиття електромагнітної хвилі від поверхні ґрунту. Оскільки вимірювання коефіцієнта відбиття є дослідженою експериментальною задачею [6], то це, в принципі, дозволяє за зміною коефіцієнта відбиття простежити за зміною

кількості вологи, присутньої у ґрунті. У зв'язку з поширенням систем точного землеробства проведення таких досліджень є актуальним.

У цій роботі наведено результати проведеного кількісного аналізу впливу зміни вологості ґрунту на коефіцієнт відбиття з метою з'ясування ефективності практичної можливості застосування означеного методу. Товща ґрунту моделюється шаруватим напівпростором, діелектрична проникність шарів якого залежить від кількості води у шарі та його будови. Для визначення діелектричної проникності шарів ґрунту використовується розроблена раніше методика визначення ефективної діелектричної функції пористих середовищ [2–5]. Коефіцієнти відбиття електромагнітної хвилі від шаруватого напівпростору обчислюються за допомогою імпедансного методу [1].

Мета досліджень – аналіз впливу зміни вологості ґрунту на коефіцієнт відбиття електромагнітної хвилі від поверхні ґрунту для з'ясування можливості застосування безконтактних радіолокаційних методів зондування при визначенні структури і вологості ґрунтів у системі точного землеробства.

Тому, цей напрям наукових досліджень є актуальним та перспективним.

Результати досліджень. 1. Знаходження коефіцієнта відбиття електромагнітного випромінювання від шаруватого напівпростору. Будемо моделювати ґрунт шаруватим напівпростором і розглянемо плоску гармонійну електромагнітну хвилю з електричним вектором E і магнітним вектором H відповідно, яка поширюється у верхньому напівпросторі і падає на межу поділу двох напівпросторів:

$$E = E_0 e^{i(kr - \omega t)}; H = (c / \mu \omega) [k \cdot E], \quad (1)$$

де $k = \{k_x, k_y, k_z\}$ – хвильовий вектор; $r = \{x, y, z\}$ – радіус-вектор довільної точки верхнього напівпростору; ω – частота, c^{-1} ; t – час, c ; c – швидкість світла, м/с; μ – магнітна проникність верхнього напівпростору, Гн/м.

Модуль хвильового вектора при цьому визначається за формулою:

$$k = (\omega / c) \sqrt{\varepsilon \mu} = (2\pi / \lambda) \sqrt{\varepsilon \mu}, \quad (2)$$

де λ – довжина хвилі, м; $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' = \varepsilon'(1 + itg\delta)$ – комплексна діелектрична проникність, Ф/м; де ε' , ε'' – дійсна та уявна частини; $tg\delta$ – тангенс кута діелектричних втрат, який визначається співвідношенням $tg\delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$.

Спочатку розглянемо випадок однорідного нижнього середовища. Позначимо комплексні діелектричну і магнітну проникності у верхньому і нижньому середовищах відповідно через ε , μ та ε_1 , μ_1 . Виберемо прямокутну систему координат так, щоб площина xy збігалася з площиною поділу двох середовищ, а площина xz – із площиною падіння плоскої хвилі. Кут падіння хвилі, тобто кут між хвильовим вектором та площиною поділу позначимо через ϑ , кут заломлення через ϑ_1 (рис.1).

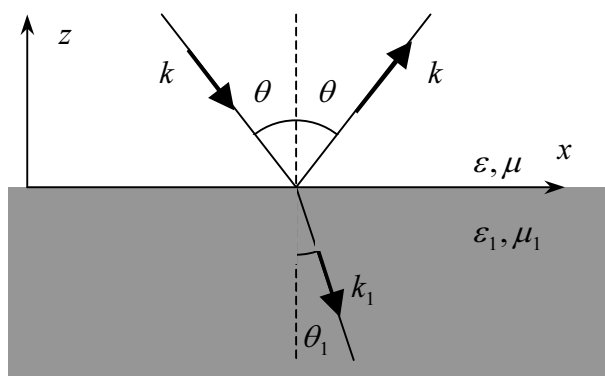


Рис.1. Відбиття плоскої хвилі від межі поділу двох напівпросторів

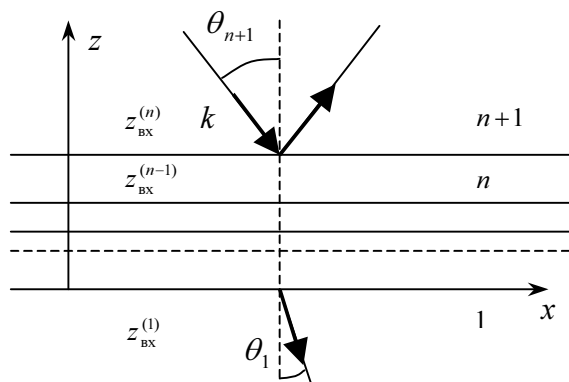


Рис.2. Відбиття плоскої хвилі від шаруватого напівпростору

Як відомо, будь-яка плоска електромагнітна хвиля може бути представлена у вигляді суперпозиції двох хвиль. Для однієї з них вектор електричної складової E є перпендикулярним площині падіння (перпендикулярна поляризація), а для іншої лежить у цій площині (паралельна поляризація).

Електричне поле у верхньому середовищі можна записати у вигляді

$$E = E_y = E_0 e^{i(k_x x - k_z z)} + V E_0 e^{i(k_x x + k_z z)}, \quad (3)$$

де перший доданок являє собою падаючу хвилю, а другий – відбиту хвилю. Амплітуда падаючої хвилі позначена через E_0 , а коефіцієнт відбиття – через V ($V_{\perp}$ – для перпендикулярно поляризованої хвилі, $V_{\parallel}$ – для паралельно поляризованої хвилі). Компоненти хвильового вектора при цьому $k_x = k \sin \vartheta$, $k_z = k \cos \vartheta$.

У нижньому середовищі електричне поле

$$E_1 = E_{1y} = W E_0 e^{i(k_{1x} x - k_{1z} z)}, \quad (4)$$

де W – коефіцієнт прозорості межі ($W_{\perp}$ – для перпендикулярно поляризованої хвилі, $W_{\parallel}$ – для паралельно поляризованої хвилі), а

$$k_{1x} = k_1 \sin \vartheta_1; \quad k_{1z} = k_1 \cos \vartheta_1; \quad k_1 = k(\epsilon_1 \mu_1 / \epsilon \mu)^{1/2}. \quad (5)$$

Сталі V , W , а також кут заломлення ϑ_1 визначаються з граничних умов, які забезпечують неперервність тангенціальних складових E, H по різних сторонах поверхні поділу. Надалі зручно ввести поняття імпедансів. Для верхнього та нижнього напівпросторів відповідно імпеданси дорівнюють:

$$Z = E / H_x; \quad Z_1 = E_1 / H_{1x}, \quad (6)$$

а після запису граничних умов через імпеданси отримуємо вирази для обчислення коефіцієнта відбиття у випадках перпендикулярної та паралельної поляризації:

$$V_{\perp} = \frac{Z_1^0 / \cos \vartheta_1 - Z^0 / \cos \vartheta}{Z_1^0 / \cos \vartheta_1 + Z^0 / \cos \vartheta}; \quad (7)$$

$$V_{||} = \frac{Z_1^0 \cos \vartheta_1 - Z^0 \cos \vartheta}{Z_1^0 \cos \vartheta_1 + Z^0 \cos \vartheta}, \quad (8)$$

де $Z^0 = (\mu / \varepsilon)^{1/2}$, $Z_1^0 = (\mu_1 / \varepsilon_1)^{1/2}$ – хвильові опори верхнього і нижнього середовищ відповідно.

Кути падіння і заломлення для обох поляризацій пов'язані співвідношенням закону заломлення:

$$k_x = k_{1x} \Rightarrow k \sin \vartheta = k_1 \sin \vartheta_1. \quad (9)$$

Поняття вхідного імпедансу дозволяє отримати рекурентну формулу для обчислення коефіцієнта відбиття для системи n шарів, що поділяють два середовища (рис. 2). Вхідний імпеданс обчислюється рекурентно [1]:

$$Z_{\text{ex}}^{(n)} = \frac{Z_{\text{ex}}^{(n-1)} - iZ_n \operatorname{tg} k_{nz} d_n}{Z_n - iZ_{\text{ex}}^{(n-1)} \operatorname{tg} k_{nz} d_n} Z_n, \quad (10)$$

де d_n – товщина n -го шару, м.

Маємо послідовно:

$$Z_{\text{ex}}^{(1)} = Z_1, \quad d_n = d_2; \quad Z_{\text{ex}}^{(2)} = \frac{Z_{\text{ex}}^{(1)} - iZ_2 \operatorname{tg} k_{2z} d_2}{Z_2 - iZ_{\text{ex}}^{(1)} \operatorname{tg} k_{2z} d_2} Z_2 = \frac{Z_1 - iZ_2 \operatorname{tg} k_{2z} d_2}{Z_2 - iZ_1 \operatorname{tg} k_{2z} d_2} Z_2$$

і т.д.

Для n шарів коефіцієнт відбиття можна обчислити за формулою:

$$V = \frac{Z_{\text{ex}}^{(n)} - Z_{n+1}}{Z_{\text{ex}}^{(n)} + Z_{n+1}}, \quad (11)$$

де імпеданси шарів наведено виразами:

$$Z_j = Z_j^0 / \cos \vartheta_j; \quad Z_j = Z_j^0 \cos \vartheta_j, \quad (12)$$

відповідно для перпендикулярної і паралельної поляризацій. При цьому через $Z_j^0 = (\mu_j / \varepsilon_j)^{1/2}$ позначено хвильовий опір j -го шару.

Зауважимо, що для комплексних діелектричних проникностей шарів коефіцієнт відбиття теж буде комплексним числом. Тому звичайно вводять коефіцієнт відбиття за потужністю, який визначається співвідношенням

$$|R|^2 = VV^*, \quad (13)$$

де V^* – спряжене число.

Наведені формули дозволяють повністю розв'язати задачу про встановлення залежності коефіцієнта відбиття плоскої хвилі від шарування середовища від її довжини, кута падіння і поляризації. У випадку нормального падіння коефіцієнти відбиття для обох поляризацій збігаються.

2. Визначення ефективної діелектричної проникності ґрунтів.

Ґрунти моделюємо пористими середовищами. Довжина хвилі λ у діапазоні НВЧ значно більше розмірів характерних утворень пористого середовища, тому ефективна діелектрична проникність зволожених

ґрунтів $\varepsilon = \varepsilon(\omega)$ визначається за допомогою моделі двокомпонентного пористого середовища [2–5] з рівняння:

$$\int_0^1 \frac{\varepsilon_c(\omega, \varphi) - \varepsilon(\omega)}{\varepsilon_c(\omega, \varphi) + 2\varepsilon(\omega)} \lambda(\varphi) \mu(\varphi) d\varphi + \int_0^1 \frac{\varepsilon_B(\omega, \varphi) - \varepsilon(\omega)}{\varepsilon_B(\omega, \varphi) + 2\varepsilon(\omega)} [1 - \lambda(\varphi)] \mu(\varphi) d\varphi = 0, \quad (14)$$

де $\varepsilon_B = \varepsilon_B(\omega)$; $\varepsilon_C = \varepsilon_C(\omega)$ – діелектричні проникності, які характеризують скелетну і перколяційну частини вибраної комірки характерного розміру і обчислюються за формулами:

$$\varepsilon_B = \varepsilon_R \frac{2\varepsilon_R + \varepsilon_w - 2(\varepsilon_R - \varepsilon_w)\varphi}{2\varepsilon_R + \varepsilon_R + 2(\varepsilon_R - \varepsilon_w)\varphi}, \quad (15)$$

$$\varepsilon_C = \varepsilon_W \frac{\varepsilon_R + (2/3)(\varepsilon_R - \varepsilon_w)\varphi}{\varepsilon_W - (1/3)(\varepsilon_w - \varepsilon_R)\varphi}. \quad (16)$$

У свою чергу $\varepsilon_R, \varepsilon_W$ – це діелектричні проникності скелета та включень відповідно. Усі діелектричні проникності є комплексними величинами.

Функція $\mu(\varphi)$ визначає щільність розподілу ймовірності розмірів пор, а функція $\lambda(\varphi)$ – щільність розподілу довжини зв'язаних між собою пор (перколяційна складова пористих середовищ). Функція $\mu(\varphi)$ може бути визначена експериментально після обробки фотографій перерізів зразків, але для функції $\lambda(\varphi)$ можна отримати тільки деякі теоретичні оцінки [7]. У цій роботі наведено модель однорідно зв'язаних пор, для якої $\lambda(\varphi) = \text{const} = p$ [2,3,7], а функція розподілу пор за розмірами $\mu(\varphi)$ описується бета-розподілом, який при певних значеннях параметрів вироджується в кусочно-сталу функцію. Як і раніше [3,5], приймаємо, що

$$\mu(\varphi) = \begin{cases} 4, & 0 \leq \varphi \leq 0,2 \\ 0, & 0,2 \leq \varphi \end{cases} \quad (17)$$

Формула (14) дозволяє обчислити ефективну діелектричну проникність при відомих проникностях скелета та рідини, що заповнює пори, і функціях розподілу $\mu(\varphi)$, $\lambda(\varphi)$. Для цього потрібно при фіксованому значенні частоти розв'язати рівняння (14), яке можна подати у вигляді: $F(\varepsilon; \lambda, \varphi) = 0$ відносно $\varepsilon = \varepsilon(\omega)$. З цією метою доцільно використовувати метод Ньютона, який поширюється і на функції комплексного аргументу. Тоді невідоме значення діелектричної проникності знаходиться ітеративно за формулою:

$$\varepsilon_{k+1} = \varepsilon_k - F(\varepsilon_k) / F'_{\varepsilon}(\varepsilon_k). \quad (18)$$

Як початкове наближення зручно прийняти середнє арифметичне значення діелектричних проникностей скелета і включень. З фізичних міркувань очевидно, що процес буде завжди збіжним. Застосування формули (18) згідно з (14) пов'язано з обчисленням значень функції, аргумент якої входить під знак визначених інтегралів як параметр. Ці інтеграли при фіксованих значеннях ε, ω знаходяться чисельно.

Як приклад, розглянемо зволожений ґрунт з двома значеннями дійсної частини діелектричної проникності матеріалу скелета $\varepsilon_R' = 5$ та ε_R''

$= 10$, а для води приймемо $\varepsilon_W' = 79$ і провідність $\sigma_W = \varepsilon_W$. При завданні перколяційної функції в моделі однорідно зв'язаних пор приймемо два значення $p=1,0$ і $p=0,5$. Залежності дійсної частини діелектричної проникності та провідності таких пористих середовища від безрозмірної частоти $\omega^* = \omega / \omega_0$ для цих випадків наведено на рис. 3, де $\omega_0 = 1/(\varepsilon_0 \varepsilon_W') = 1,43 \text{ ГГц}$ – це частота релаксації води, а $\varepsilon_0 = 8,8452 \cdot 10^{12} \text{ Ф/м}$.

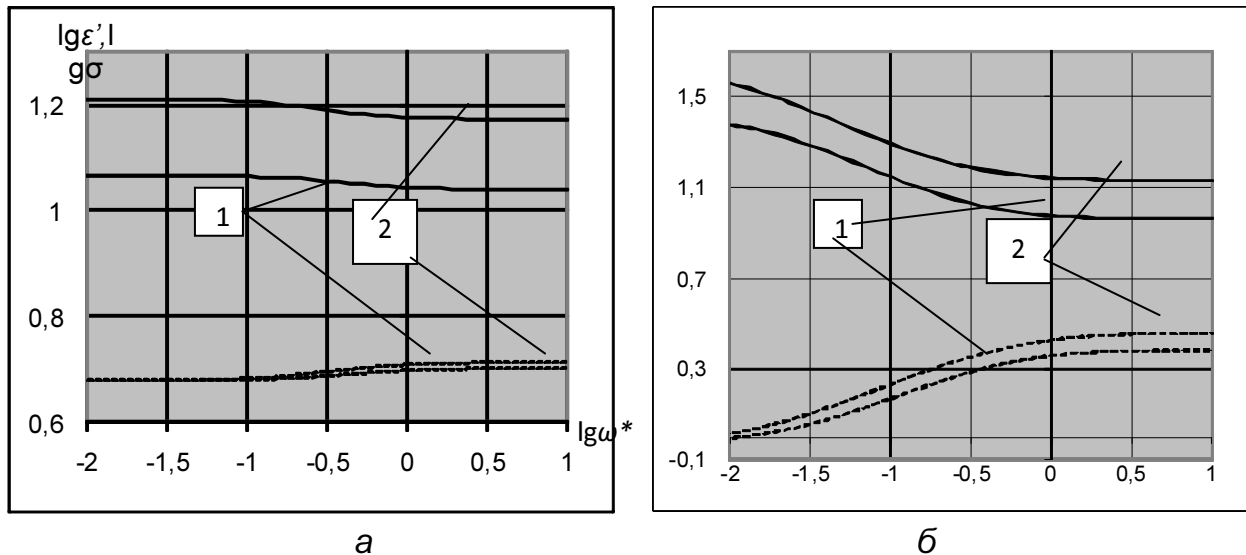


Рис. 3. Частотна залежність дійсної частини діелектричної проникності та провідності для моделі однорідно зв'язаних пор при $\lambda = 1$ (а) та при $\lambda = 0,5$ (б):

1 – $\varepsilon_R = 5$; 2 – $\varepsilon_R = 10$; ----- - ε' ; ——— - σ

Розрахунки були виконані в діапазоні $0,03\omega_0 \leq \omega \leq \omega_0$. На графіках використано подвійні логарифмічні шкали з десятинною основою, суцільними лініями показано криві для ефективної дійсної частини діелектричної проникності, а штриховими – для ефективної провідності.

З наведених даних випливає, що підвищення діелектричної проникності скелета збільшує одночасно і діелектричну проникність пористого середовища і його провідність. Суттєвий вплив має перколяційна складова, яка не тільки змінює ефективні характеристики, а також помітно впливає на їх частотну залежність. При цьому існує певний діапазон частот при $\omega > \omega_0$, тобто діапазон НВЧ, в якому діелектричні характеристики зберігають практично сталі значення. Ця обставина є досить суттєвою, оскільки дозволяє використовувати прилади, які працюють у сантиметровому діапазоні хвиль.

Висновки

Запропонована методика дозволила зв'язати діелектричні характеристики ґрунтів, що знаходяться з використанням запропонованої раніше моделі пористих середовищ, з такою характеристикою, як коефіцієнт

відбиття електромагнітної хвилі від поверхні ґрунту, який визначається за допомогою точного розв'язку рівнянь Максвелла для шаруватого напівпростору із застосуванням імпедансного методу. Визначено діапазон зміни коефіцієнта відбиття, що теоретично обґрунтовує можливість використання безконтактних радіолокаційних методів зондування при визначенні вологості та внутрішньої структури ґрунтів у системі точного землеробства.

Список літератури

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / Бреховских Л.М. – М.: Наука, 1973. – 343 с.
2. Гречко Л.Г. Эффективна діелектрична проникність матричних дисперсних систем з багат шаровими включеннями: пряма та обернена задачі / Л.Г. Гречко, Л.Б. Лерман, Н.Г. Шкода // Вісник Київ. ун-ту. Серія: фіз.-мат. науки. – 2004. – №2. – С. 181–186.
3. Діелектрична проникність пористих середовищ / Л.Г. Гречко, Л. Б. Лерман, А.І. Лесьо [та ін.]. // Вісник Київ. ун-ту. Серія: фіз.-мат. науки. – 2005. – №2. – С. 127–132.
4. Електродинамічні характеристики зволжених дисперсних систем / В.В. Бойко, Л.Г. Гречко, Н.Г. Шкода, С.В. Шостак // Зб. наук. праць НАУ. – 2002. – Т. XII. – С. 21–30.
5. Эффективна діелектрична проникність зволжених дисперсних систем в наближенні локальної пористості / В.В. Бойко, Л.Г. Гречко, Н.Г. Шкода, С.В. Шостак // Збірник наукових праць НАУ. – 2003. – Т. XIII. – С. 103 – 113.
6. Шутко А.М. СВЧ -радиометрия водной поверхности и грунтов / Шутко А.М. – М.: Наука, 1986. – 189 с.
7. Dielectric response of porous medium// Hilfer R. Phys. Rew. – 1991, 44. – P. 60 – 76.

Теоретически исследовано влияние влажности грунта на изменение диэлектрической проницаемости и, соответственно, на коэффициент отражения электромагнитных волн от поверхности. Определены комплексные коэффициенты отражения для перпендикулярно и параллельно поляризованных электромагнитных плоских волн от слоистого полупространства. Обоснована возможность практического применения бесконтактных радиолокационных методов зондирования для определения структуры и влажности грунтов в системе точного земледелия.

Диэлектрическая проницаемость, коэффициент отражения электромагнитных волн, влажность грунта, система точного земледелия.

The change of soil humidity on changing of permittivity, and correspondent on coefficients of electromagnetic waves is investigated theoretically. Complex reflection coefficients for perpendicular and parallel polarization from layered semi-space are determinate by impedance method. Elaborated method of solution gives the opportunity of practical determination of soils' humidity and structure with help of the radiometry, and can be used in the systems of fine agriculture also.

Dielectric permittivity, reflection coefficients of electromagnetic waves, soil humidity, system of fine agriculture.