

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

УДК 535:537:539:546

ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ ПОРИСТИХ СЕРЕДОВИЩ З
ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ РАДІОМЕТРІЇ (ОБЕРНЕНІ ЗАДАЧІ)

Криворучко Я.С., Лерман Л.Б., Люценко М.О., Якимів Р.Я.

Для визначення діелектричних проникностей та товщин шарів неоднорідних ґрунто-ґрунтів розроблено методику чисельного розв'язання оберненої задачі взаємодії електромагнітних хвиль з шаруватим середовищем. Запропоновані методи можуть знайти широке застосування в системі точного землеробства.

Вступ. Постановка задачі

Необхідність отримання інформації про вологість пористих середовищ та глибину проникнення вологи в них виникає в різних галузях народного господарства. Присутність води у таких середовищах змінює їх фізико-механічні характеристики, і, зокрема, діелектричну проникність. Відомо [1,2], що ця зміна може суттєво впливати на коефіцієнт відбиття електромагнітної хвилі (R) від поверхні досліджуваного об'єкту. Оскільки задача вимірювання R експериментально вирішена [3], це дозволяє за зміною коефіцієнта відбиття оцінювати кількість вологи у досліджуваному об'єкті методами радіометрії ґрунтів в діапазоні НВЧ з використанням літаків та космічних супутників [3]. Практичне застосування цих методів потребує оперативного розв'язування обернених задач. В даній роботі розглядаються неоднорідно зволожені ґрунти в умовах неглибокого рівня залягання ґрунтових вод (1,5...3,5 м) та пропонується методика чисельного розв'язання таких задач, що дозволяє з використанням співвідношень для обчислення ефективної комплексної діелектричної проникності пористих середовищ та розв'язків вказаної вище прямої задачі отримати кількісну оцінку присутності вологи в ґрунтах.

Розглядається неоднорідний шар ґрунтоґрунту, розташований між двома нескінченими середовищами: верхнє – це повітря, а нижнє – це ґрунтові води, або якась інша основа. В неоднорідному шарі ґрунту комплексна діелектрична проникність ϵ є функцією вертикальної координати z , тобто $\epsilon = \epsilon(z)$. Аналітичні розв'язки про поширення хвиль в неоднорідних шарах відомі лише для деяких функцій [1], тому цю залежність ми моделюємо кусочно-сталою функцією, і шар ґрунту розглядається, як система плоскопаралельних n шарів з різними комплексними діелектричними проникностями $\epsilon_j = \epsilon'_j + i\epsilon''_j$ (ϵ'_j - дійсна, ϵ''_j - уявна частини, i - уявна одиниця, ($j = 1, 2, \dots, n$) і товщинами d_j ($j=1, 2, \dots, n$). Зауважимо, що на практиці зручно задавати дійсну частину діелектричної проникності та тангенс діелектричних втрат $tg\delta = \epsilon''/\epsilon'$, або використовувати провідність σ . В останньому випадку $\epsilon = \epsilon' + i(4\pi\sigma/\omega)$, де $\omega = 2\pi c/\lambda$ - частота випромінювання,

c - швидкість світла, λ - довжина хвилі. Запишемо комплексний коефіцієнт відбиття R , як функцію параметрів шарів, при цьому кут падіння ϑ і довжина λ плоскої електромагнітної хвилі – постійні:

$$R = F(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n; d_1, d_2, \dots, d_n; \vartheta; \lambda) \quad (1)$$

Якщо $\vartheta \neq 0$, то коефіцієнт відбиття буде залежати ще й від поляризації хвилі, і фактично матимемо дві залежності для перпендикулярної і паралельної поляризацій

$$\begin{aligned} R_{\perp} &= F_1(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n; d_1, d_2, \dots, d_n; \vartheta; \lambda), \\ R_{\parallel} &= F_2(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n; d_1, d_2, \dots, d_n; \vartheta; \lambda) \end{aligned} \quad (2)$$

Радіометрія дозволяє визначити залежності R від кута падіння та довжини хвилі, тобто отримати експериментальні залежності

$$R_{\perp}^{ex} = G_1(\vartheta; \lambda), \quad R_{\parallel}^{ex} = G_2(\vartheta; \lambda) \quad (3)$$

Задача полягає в визначенні параметрів $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n; d_1, d_2, \dots, d_n$ за експериментальними залежностями (3), тобто з системи рівнянь

$$\begin{aligned} F_1(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n; d_1, d_2, \dots, d_n; \vartheta; \lambda) &= G_1(\vartheta; \lambda) \\ F_2(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n; d_1, d_2, \dots, d_n; \vartheta; \lambda) &= G_2(\vartheta; \lambda). \end{aligned} \quad (4)$$

З рівнянь (4) видно, що існує дві можливості для визначення невідомих параметрів шарів. Перша пов'язана з використанням спектральної залежності, тобто залежності коефіцієнта відбиття від довжини хвилі (частоти) при фіксованому куті падіння, а друга – з використанням результатів сканування по кутах падіння при фіксованій довжині хвилі для обраного, або для обох типів поляризацій. На практиці можливо застосування обох підходів, але другий має певні переваги, оскільки дозволяє використовувати при вимірюваннях лише один генератор електромагнітного випромінювання. В цій роботі розглядається друга можливість, але в розробленій методиці можливо застосування комбінованого методу, коли використовується інформація, отримана в певному інтервалі кутів сканування і деякому діапазоні довжин хвиль. Після знаходження діелектричних проникностей шарів кількість води ρ_w (об'ємної концентрації води у шарах ґрунтів) може бути оцінена, наприклад, за формулою Бругемана-Ханаи [3])

$$\rho_w = (\varepsilon_c - \varepsilon_{ef}) / (\varepsilon_c - \varepsilon_w) \sqrt[3]{\varepsilon_w / \varepsilon_{ef}} \quad (5)$$

або формулою Брауна

$$\sqrt{\varepsilon_{ef}} = \rho_w \sqrt{\varepsilon_w} + (1 - \rho_w) \sqrt{\varepsilon_{ef}} \quad (6)$$

де $\varepsilon_c, \varepsilon_{ef}, \varepsilon_w$ - діелектрична проникність відповідно сухого ґрунту, шару зволоженого ґрунту (ефективна), води.

Розв'язання оберненої задачі для визначення параметрів шарів

Система (4) для n шарів містить $3n$ невідомих, оскільки комплексна діелектрична проникність кожного шару визначається двома дійсними пара-

метрами, наприклад, дійсною частиною ε'_j та $\operatorname{tg}\delta$, і до рівнянь входять розміри шарів d_j ($j=1,2,\dots,n$). Якщо вибрати в інтервалі кутів сканування $\Theta=[0,\vartheta_{\max}]$ відповідне число m точок ϑ_l ($l=1,2,\dots,m$), то можна отримати алгебраїчну систему нелінійних рівнянь

$$\begin{aligned} F_1(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n; d_1, d_2, \dots, d_n; \vartheta_l; \lambda) &= G_1(\vartheta_l; \lambda) \\ F_2(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n; d_1, d_2, \dots, d_n; \vartheta_l; \lambda) &= G_2(\vartheta_l; \lambda) \end{aligned} \quad (7)$$

яка дозволяє визначити шукані параметри і яку доцільно застосовувати при невеликій кількості шарів, коли для коефіцієнтів відбиття можна отримати кінцеві формули. Для великої кількості шарів доцільне використання методу нев'язок [6]. При цьому вводиться узагальнений функціонал

$$\begin{aligned} &\Phi(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n; d_1, d_2, \dots, d_n; \lambda) = \\ &\alpha \sum_{l=1}^m [F_{1l}(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n; d_1, d_2, \dots, d_n; \lambda) - G_{1l}(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n; d_1, d_2, \dots, d_n; \lambda)]^2 + \\ &+\beta \sum_{j=1}^m [F_{2j}(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n; d_1, d_2, \dots, d_n; \lambda) - G_{2j}(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n; d_1, d_2, \dots, d_n; \lambda)]^2 \end{aligned} \quad (8)$$

де α, β - деякі вагові коефіцієнти, а

$$\begin{aligned} F_{jl}(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n; d_1, \dots, d_n; \vartheta_j; \lambda) &= F_{jl}(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n; d_1, \dots, d_n; \vartheta_l; \lambda), \\ G_{jl}(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n; d_1, \dots, d_n; \vartheta_j; \lambda) &= G_{jl}(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n; d_1, \dots, d_n; \vartheta_l; \lambda), \quad (j=1,2) \end{aligned} \quad (9)$$

Оскільки на практиці вимірюється коефіцієнт відбиття за потужністю, в рівнянні (8) будемо розуміти модулі коефіцієнтів відбиття. Функціонал (8) – є сума середньоквадратичних відхилень розрахованих та вимірних значень модулів коефіцієнтів відбиття і його можна узагальнити, додавши відповідні суми середньоквадратичних відхилень за фазою. Тобто задача полягає у відшуканні значень параметрів шарів, які забезпечують

$$\Phi(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n; d_1, d_2, \dots, d_n; \lambda) \rightarrow \min. \quad (10)$$

В сумах, що входять до (8) число m може бути довільним, і, на відміну від системи (5), не повинно дорівнювати числу невідомих параметрів шарів. Для досягнення кращої узгодженості з експериментальними даними число точок в інтервалі кутів сканування прийняте з умови $m > 3n$. Інтервали зміни параметрів шарів обмежені і відомі з фізичних міркувань, тобто

$$\varepsilon_j^{\min} \leq \varepsilon_j' \leq \varepsilon_j^{\max}, \varepsilon_j^{\min} \leq \varepsilon_j'' \leq \varepsilon_j^{\max}, d_j^{\min} \leq d_j \leq d_j^{\max} \quad (11)$$

Це означає, що мінімум (10) шукається у $3n$ - вимірному замкненому паралелепіпеді, і цей мінімум для неперервної функції, якою є функціонал (8), завжди буде існувати. Як і в [6], мінімум будемо шукати методом випадкового пошуку у $3n$ - вимірному паралелепіпеді із застосуванням, так званих, ЛП- τ у двійкових послідовностей [7].

Чисельні результати

Для апробації наведеного алгоритму були змодельовані експериментальні дані, отримані за допомогою розв’язку прямої задачі [1]. Для цього використовувалась формула

$$G_j(\vartheta; \lambda) = (1 + \delta \xi) F_j(\vartheta; \lambda) \tag{12}$$

де ξ - рівномірно розподілена в інтервалі $(-1,1)$ випадкова величина, δ - амплітуда відносної похибки.

Як тестову задачу розглянемо відбиття електромагнітної хвилі від півпростору, за який приймемо товщу морської води (залежності модуля коефіцієнта відбиття для такої задачі наведені в [1]). Результати розрахунків показані на рис.1 для двох типів поляризацій. Експериментальні дані показані пунктиром. Для амплітуди похибки було прийнято значення 5%, а для діелектричних параметрів води і повітря - $\epsilon_1 = 81$, $\text{tg}\delta_1 = 0,05$, $\epsilon_2 = 1$, $\text{tg}\delta_2 = 0$, відповідно. За цими даними були отримані відновлені значення діелектричних характеристик води $\epsilon_1 = 77,5$, $\text{tg}\delta_1 = 0,03$. Розрахункові залежності R від кута сканування для цих значень параметрів показані на рис. 1 суцільними лініями. При розрахунках було використано 512 пробних точок, значення ваг приймалися рівними одиниці, що дозволило досягти похибки при відновленні ϵ менше 5%, тобто в межах похибки модельованого експерименту. Одночасно похибка відновлення $\text{tg}\delta$ виявилась досить великою (до 40 %), але ця розбіжність, як показують прямі розрахунки, не суттєво впливає на коефіцієнт відбиття.

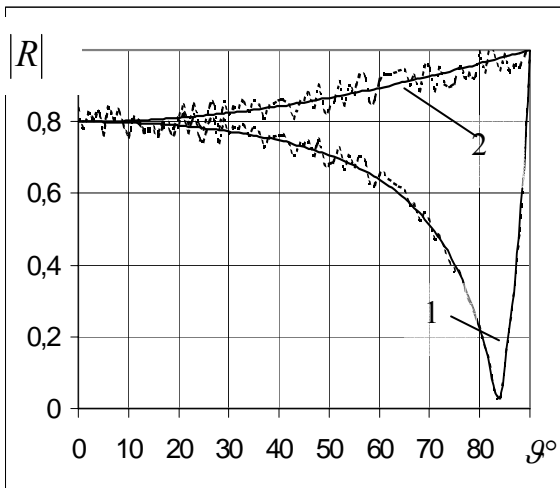


Рис.1. Коефіцієнти відбиття від поверхні морської води

1 - паралельна поляризація; 2 – перпендикулярна поляризація;

_____ розрахункові значення за відновленими параметрами.

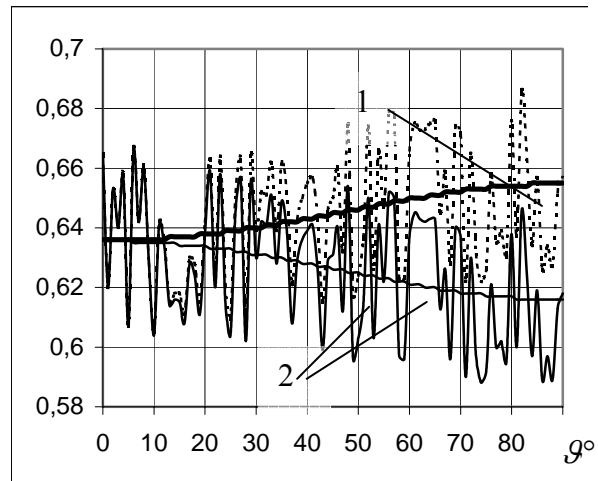


Рис.2. Коефіцієнти відбиття від шару зволоженого ґрунту

Як другий приклад, розглянемо шар зволоженого ґрунту, товщиною 0,3 м, розташований між повітрям і сухим глиняним простором. Значення

параметрів, прийнятих при симуляції експерименту та відновлені значення тих самих параметрів наведені в таблиці. Амплітуда заданої похибки при розрахунках складала 5%. Результати симуляції експерименту та розрахункові залежності коефіцієнтів відбиття за відновленими параметрами півпростору і шару ґрунту для двох типів поляризації хвилі наведені на рис. 2.

Таблиця

Задані і відновлені значення діелектричних характеристик шару зволоженого ґрунту і нижнього півпростору.

Шар	Задані значення		Відновлені значення	
Півпростір	$\epsilon'_3 = 6,0$	$\text{tg}\delta_3 = 0,05$	$\epsilon'_3 = 5,5$	$\text{tg}\delta_3 = 0,06$
Зволожений ґрунт	$\epsilon'_2 = 20$	$\text{tg}\delta_2 = 0,10$	$\epsilon'_2 = 22,5$	$\text{tg}\delta_2 = 0,09$

Похибка при відновленні діелектричних характеристик знаходилась в межах 10% і може бути зменшена збільшенням числа тестових точок і звуженні проміжків пошуку невідомих значень параметрів.

Висновки

Розроблено методику визначення параметрів шарів ґрунту за даними радіометрії в діапазоні НВЧ за допомогою розв'язання оберненої задачі. Наведені тестові приклади розрахунків свідчать, що похибка в відновленні значень діелектричних параметрів знаходиться в межах похибки модельованих експериментальних залежностей коефіцієнтів відбиття.

Література

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука. – 1973. – 343 с.
2. Lerman L.B., Grechko L.G, Semchuk A.Yu. // Antenna Theory and Techniques. Effect of water absorption on radio technical characteristics of radar covers. Proceeding IV-th International Conference. – 9-12 September 2003, Sevastopol, 2003. – V.2. P. 301-303.
3. Шутко А.М. СВЧ -радиометрия водной поверхности и ґрунтов. – М.: Наука, 1986.
4. Ефективна діелектрична проникність зволожених дисперсних систем в наближенні локальної пористості Бойко В.В., Гречко Л.Г., Шкода Н.Г., Шостак С.В. // Механізація сільськогосподарського виробництва. – 2002, – Т. XII. – С. 103 – 113.
5. Діелектрична проникність пористих середовищ. Гречко Л.Г., Лерман Л. Б., ін.// Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки. 2005, 2. С. 287-293.
6. Гречко Л.Г., Лерман Л. Б., Шкода Н.Г. Ефективна діелектрична проникність матричних дисперсних систем з багат шаровими включеннями: пряма та обернена задачі // Вісник Київ. університету. Серія: фіз.-мат. науки. - 2004, 2. – С. 181-186.
7. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – М.: Наука, 1981. – 111 с.

Криворучко Я.С., Герман Л.Б., Лющенко М.О., Якимов Р.Я.	Lerman L.B., Liushchenko M.O., Krivoruchko Ya.S., Yakymiv R.Ja.
Определение влажности пористых сред с использованием методов радиометрии (обратные задачи).	Defining of the humidity porous medium with using of the radiometric methods (inverse tasks).
Для определения диэлектрических проницаемостей и толщины слоев неоднородных почвогрунтов разработана методика численного решения обратной задачи взаимодействия электромагнитных волн со слоистой средой. Предложенные методы решения могут найти применение в земледелии.	The numerical method of an inverse problem solution of interaction electromagnetic waves with a lamellar media to determination of slabs' permeability and cross-dimensions of not uniform soils is elaborated. The methods of solving may be used in the system of fine agriculture.