

УДК 621.9.048.4

**І.І. Єніна, доц., канд. техн. наук**

*Кіровоградський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна*

*E-mail: omata@ukr.net*

## Дослідження взаємодії електромагнітного поля з ґрунтом

В роботі запропоновано та досліджено використання нормальних хвиль до поверхні ґрунту. Основними інформативними параметрами при цьому є характеристики середовища: діелектрична проникність і кут падіння електромагнітної хвилі. Характеристиками взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею ґрунту є коефіцієнт відбиття та коефіцієнт проходження електромагнітних хвиль.

При цьому, джерело та приймач випромінювання можуть бути об'єднані в одній приймально-передавальній антені.

**ґрунт, електромагнітне поле, діелектрична проникність, електромагнітні хвилі, коефіцієнт відбиття, параметр оптимізації**

**И.И. Енина, доц., канд. техн. наук**

*Кировоградский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина*

**Исследование взаимодействия электромагнитного поля с почвой**

В работе предложено и исследовано использования нормальных волн к поверхности почвы. Основными информативными параметрами при этом являются характеристики среды: диэлектрическая проницаемость и угол падения электромагнитной волны. Характеристиками взаимодействия электромагнитной волны с поверхностью почвы является коэффициент отражения и коэффициент прохождения электромагнитных волн.

При этом источник и приемник излучения могут быть объединены в одной приемо-передающей антенне.

**почва, электромагнитное поле, диэлектрическая проницаемость, электромагнитные волны, коэффициент отражения, параметр оптимизации**

**Постановка проблеми.** Метою даної роботи є обґрунтування інформативних параметрів ґрунту, а саме взаємодії високочастотного електромагнітного поля з середовищем.

Поставлена мета реалізується шляхом вирішення наступних задач: дослідження та аналізу амплітудних коефіцієнтів відбиття та проходження електромагнітних хвиль при падінні на границю розподілу середовища; використання можливості об'єднання функцій випромінювання та прийому в одній приймально-передаючій антені.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Характеристиками поширення електромагнітних хвиль у хвилеводі зазнають впливу від зміни вологості розміщеного у ньому матеріалу. Використання хвилевих вологоміврів обмежується рідкими середовищами. При дискретних вимірах вологості керамічної ваги у діапазоні 17–21%, абсолютна похибка склала  $\pm 1,2\%$  [2].

Основою методів прохідних хвиль є залежність від вологовмісту матеріалу затухання або фазового зсуву хвилі, яка проходить крізь нього. Серед методів надвисокочутливий (НВЧ) цей найбільш поширений. Окрім вологості на затухання хвилі значно впливає щільність матеріалу. Приймальна та передаюча антени, або

пасивний відбивач повинні пересуватися у ґрунті. При цьому втрачається перевага безконтактності методу.

Прикладом реалізації методу є пристрій, розроблений в ЦНІРЕС Росії. Він розроблений на базі НВЧ-радару зі ступінчастою зміною частоти. Передавач працює на частотах 200, 400, 600, 800 і 1000 МГц. Вимірювання проводиться на поверхні ґрунту з допомогою малозаглиблених (7,5 см) штирьових антен. Відновлення профілю вологості здійснюється на основі фазово-частотних і амплітудно-частотних характеристик з застосуванням модельних залежностей. Метод не є безконтактним.

**Постановка завдання.** Виходячи із наведеного, метою даної роботи є оцінка використання нормальної хвилі до поверхні ґрунту для контролю вологості по коефіцієнту відбиття; застосування електромагнітного контролю характеристик середовищ і узгодження характеристики з параметрами електромагнітних хвиль кількісних характеристик інформативних параметрів ґрунту для безконтактного виміру.

**Виклад основного матеріалу.** Для вирішення задачі вимірювання вологості ґрунту необхідні дані про електричні характеристики середовища, отримані методом розповсюдження хвиль у вільному просторі [1].

Плоска електромагнітна хвиля, з деякими допущеннями, відповідає законам геометричної оптики. Комплексний коефіцієнт заломлення речовини на яку падає хвиля

$$n^* = n - jk, \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт поглинання, який визначає швидкість згасання амплітуди хвилі по мірі її проходження в середовище.

В свою чергу із рівняння Максвелла [2]:

$$n^* = \sqrt{\varepsilon^*} = \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon''}, \quad (2)$$

де  $\varepsilon'$  та  $\varepsilon''$  – дійсна та уявна частини діелектричної проникливості.

Таким чином, речовина в високочастотному електромагнітному полі може бути однозначно охарактеризована однією комплексною електричною величиною або парою скалярних. Згідно Дебаю використовується поняття комплексної відносної діелектричної проникливості [2]:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j \cdot \varepsilon'' = \varepsilon'_{\infty 0} + \varepsilon_{\infty 0} - \frac{\varepsilon'_{\infty 0}}{1 + j\omega\tau}, \quad (3)$$

де  $\varepsilon'$  і  $\varepsilon''$  – дійсна та уявна частини діелектричної проникливості;

$\varepsilon'_{\infty 0}$  і  $\varepsilon''_{\infty 0}$  – оптична та статична діелектричні постійні;

$\omega$  – циклічна частота;

$\tau$  – час релаксації.

Діелектрична проникність є характеристикою речовини, що відображає процеси поляризації її атомів, іонів, молекул, ансамблей молекул і цілих структур.  $\varepsilon'$  для ґрунту, що представляє собою складну гетерогенну систему, залежить від складу діелектричних властивостей мінеральної основи твердого тіла, структури, дисперсності, пористості від особливостей діелектричної поляризації, форми зв'язку повітря та води з твердою фазою, вологості та температури системи, частоти електромагнітного поля. Для характеристики речовин в електромагнітному полі використовують також похідні величини: провідність  $\sigma$  та тангенс кута діелектричних втрат  $tg\delta$ , причому

$$\sigma = \omega \varepsilon_0 \cdot \omega'' , \quad (4)$$

де  $\varepsilon_0$  – абсолютна діелектрична проникливість вакууму.

Під дією змінного електромагнітного поля в середовищі виникає струм, який містить дві складові. Одна з них співпадає по фазі з зовнішнім полем та визиває поглинання його енергії на нагрів середовища. Це струм провідності. Друга – випереджає зовнішнє поле по фазі на  $\pi/2$  та вкладу в поглинання енергії не вносить і його називають струмом зміщення. Складові комплексної діелектричної проникливості і тангенс кута втрат зв'язані співвідношенням  $tg\delta = \varepsilon''/\varepsilon'$ . Якщо  $tg\delta \gg 1$ , то середовище може вважатися провідником, якщо  $tg\delta \ll 1$ , середовище представляє собою діелектрик. Величина  $\varepsilon$  та  $tg\delta$  залежать від частоти. При зміні частоти електромагнітних хвиль в широкому діапазоні частот властивості одного і того ж середовища можуть значно змінюватися. Це, в першу чергу, відноситься до середовищ, що займають проміжне положення між провідником та діелектриком, до яких відноситься ґрунт. Гранична частота, при якій  $tg\delta = 1$ , для сухого і вологого ґрунту, відповідно, 0,5 та 10 МГц [3].

При застосуванні електромагнітного контролю характеристик середовищ і матеріалів необхідно узгодити характеристики з параметрами електромагнітних хвиль. Це здійснюється за допомогою хвильового рівняння Максвелла. Рішення цього рівняння виглядає наступним чином [4, 5, 6]

$$\left. \begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_0 e^{j\omega t - \gamma x} \\ \vec{H} &= \vec{H}_0 e^{j\omega t - \gamma x} \end{aligned} \right\} , \quad (5)$$

де  $\vec{E}, \vec{H}$  – вектори напруженостей електричного і магнітного полів в момент  $t$ , в точці простору з координатою  $X$ ;

$\vec{E}_0, \vec{H}_0$  – початкові значення  $\vec{E}$  та  $\vec{H}$ ;

$\gamma$  – постійна розповсюдження,

$$\gamma = j\omega \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0} = \alpha + j\beta , \quad (6)$$

де  $\mu$  – комплексна магнітна проникливість:

$$\mu = \mu' - j\mu'' , \quad (7)$$

але для ґрунту – маломанітного середовища  $-\mu'' = 0$  і  $\mu = \mu'' = 1$ ;  $\alpha$  – коефіцієнт затухання;  $\beta$  – фазова постійна, причому [8]:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \omega \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon' \mu_0} \sqrt{1/2(-1 + \sqrt{1 + tg^2 \delta})} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon'/2(-1 + \sqrt{1 + tg^2 \delta})} , \\ \beta &= \omega \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon' \mu_0} \sqrt{1/2(1 + \sqrt{1 + tg^2 \delta})} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon'/2(1 + \sqrt{1 + tg^2 \delta})} , \end{aligned} \right\} , \quad (8)$$

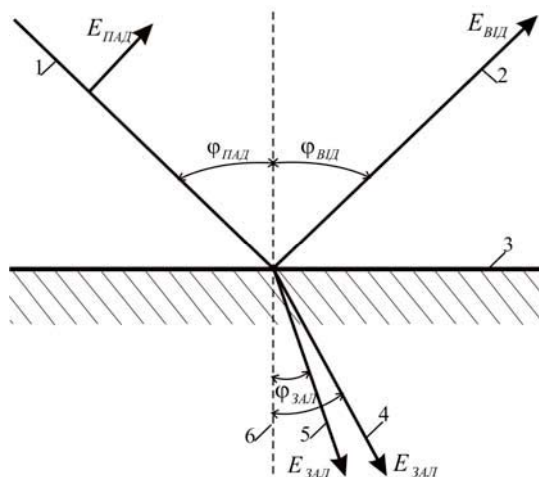
де  $\lambda_0$  – довжина хвилі в вакуумі;

$\alpha$  – характеристика поглинання енергії хвиль речовиною. Відстань, на якій компоненти (8) поля зменшуються у  $e$  раз, називається ефективною глибиною проникнення хвиль у речовину  $D$  та визначається рівнянням:

$$D = 1/\alpha. \quad (9)$$

Взаємодія хвиль з ґрунтом супроводжується їх відбиттям та заломленням на границі розподілу.

Процеси при відбитті та проходженні плоскої хвилі через плоску границю повітря-середовище пояснюються (рис. 1) [2].



1,2 – падаючий, відбитий промені; 4,5 - заломлені промені; 3 – середовище;  
6 – нормаль до поверхні;  $\varphi_{пад}$  – кут падіння, відбиття;  $\varphi_{зал}$  – кут заломлення;  
 $E_{пад}$ ,  $E_{від}$ ,  $E_{зал}$  – електричні вектори падаючої, відбитої і заломленої хвиль

Рисунок 1 – Відбиття і заломлення електромагнітних хвиль на межі двох середовищ

При цьому виконуються два відомих закони Снеліуса – закони відбиття:

$$\varphi_{пад} = \varphi_{від}, \quad (10)$$

та закон заломлення (для хвилі, що розповсюджується з першого середовища в друге):

$$\frac{\sin \varphi_{пад}}{\sin \varphi_{зал}} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}, \quad (11)$$

де  $\varphi_{пад}$ ,  $\varphi_{від}$ ,  $\varphi_{зал}$  – кути падіння, відбиття та заломлення;

$\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – довжини хвиль;

$v_1$ ,  $v_2$  – швидкості розповсюдження в першому та другому середовищах, відповідно.

Амплітудні коефіцієнти відбиття  $r$  та проходження  $\tau$  електромагнітних хвиль при падінні на плоску границю розподілу середовища визначаються рівняннями Френеля [7]. Якщо хвиля падає з повітряного середовища  $\varepsilon_1 = 1$  на поверхню речовини

з комплексною діелектричною проникливістю  $\varepsilon_2 = \varepsilon$ , то формули Френеля коефіцієнтів відбиття перпендикулярно та паралельно поляризованих хвиль, мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} r_{\perp} &= \left( \cos \varphi_{na\partial} - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi_{na\partial}} \right) / \left( \cos \varphi_{na\partial} + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi_{na\partial}} \right), \\ r_{\parallel} &= - \left( \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi_{na\partial}} - \varepsilon \cdot \cos \varphi_{na\partial} \right) / \left( \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi_{na\partial}} + \varepsilon \cdot \cos \varphi_{na\partial} \right) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Коефіцієнти відбиття являються функціями характеристики середовища  $\varepsilon$  та кута падіння електромагнітної хвилі  $\varphi_{na\partial}$ . Якщо джерело та приймач електромагнітних хвиль встановити на мобільному об'єкті та здійснити контроль вологості ґрунту, підібравши в якості інформативного параметра коефіцієнт відбиття  $r$ , то останній буде змінюватись як від зміни вологості, так і зміни положення первинного перетворювача відносно поверхні контрольованої поверхні ґрунту. Це можливо відобразити рівнянням:

$$dr(\varepsilon, \varphi_{na\partial}) = \frac{\partial r}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial r}{\partial \varphi_{na\partial}} d\varphi_{na\partial}. \quad (13)$$

Перший доданок представляє собою корисний сигнал, а другий є заважаючим фактором.

Параметром оптимізації  $k$  можна прийняти відношення сигнал-перешкода, максимальне значення якого буде критерієм при виборі виду поляризації та оптимального кута  $\varphi_{na\partial}$ . Обчисливши похідні, що входять у вираз (12), для двох можливих типів поляризації, отримаємо:

$$k_{\perp} = \left| \frac{\partial r_{\perp}}{\partial \varepsilon} \right| / \left| \frac{\partial r_{\perp}}{\partial \varphi_{na\partial}} \right| = \left| \frac{\text{ctg} \varphi_{na\partial}}{2(\varepsilon - 1)} \right|, \quad (14)$$

$$k_{\parallel} = \left| \frac{\partial r_{\parallel}}{\partial \varepsilon} \right| / \left| \frac{\partial r_{\parallel}}{\partial \varphi_{na\partial}} \right| = k_{\perp} \left( 1 - \frac{2}{\varepsilon} \sin^2 \varphi_{na\partial} \right). \quad (15)$$

Максимум обох параметрів досягається одночасно при  $\varphi_{na\partial} = \varphi_0$ . При цьому два рівняння (14, 15) перетворюються в одне:

$$r = E_{\text{від}} / E_{na\partial} = r_{\perp} \Big|_{\varphi_{na\partial}=\varphi_0} = r_{\parallel} \Big|_{\varphi_{na\partial}=\varphi_0} = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon}}{1 + \sqrt{\varepsilon}}. \quad (16)$$

Для коефіцієнта проходження аналогічно отримаємо:

$$\tau = E_{\text{прох}} / E_{\text{від}} = \tau_{\perp} \Big|_{\varphi_{na\partial}=\varphi_0} = \tau_{\parallel} \Big|_{\varphi_{na\partial}=\varphi_0} = \frac{2}{1 + \sqrt{\varepsilon}}. \quad (17)$$

**Висновки.** Для контролю вологості по коефіцієнту відбиття запропоновано використання нормальної хвилі до поверхні ґрунту. Джерело та приймач хвиль в цьому випадку повинні розташовуватись на одній нормалі, тобто бажано використовувати можливість об'єднання функцій випромінювання та прийому в одній прийнятно-передаючій антені. Остання повинна бути такою, щоб вектори  $\vec{E}$  та  $\vec{H}$  створеного нею поля лежали в горизонтальній площині.

## Список літератури

1. Єніна І.І. Експериментальні дослідження електричних характеристик ґрунту для автоматичного дистанційного вимірювання вологості [Текст] / І.І. Єніна // Тезиси докладов междунар. научно-практической конф. «Современные информационные технологии в управлении и профессиональной подготовке операторов сложных систем», ДЛАУ. г.Кировоград, 18-19 декабря, ДЛАУ, 2003. – С. 55-57.
2. Федоткин И.М. Физико-технические основы влагометрии в пищевой промышленности [Текст] / И.М. Федоткин, В.П. Ключков. – К. : Техника, 1974. –320 с.
3. Троицкий Н.В. Диэлектрические свойства и влажность почвы: автореф. дис. канд. техн. наук. [Текст] / Ленинград, Агрофизический институт. – Л., 1974. –18 с.
4. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн [Текст] / Б.М. Петров. – М. : Радио и связь, 2000. – 559 с.
5. Тимофеев В.А. Электромагнитные поля и волны: Учебное пособие [Текст] / В.А. Тимофеев. – Ярославль: ЯрГУ, 2008. –180 с.
6. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны[Текст] / А.Р. Хиппель. –М.: Иностранная литер., 1960. –438 с.
7. Салимгареева О.А. Использование рефлектометрии во временной области для оценки пространственного варьирования влажности почвы / О.А. Салимгареева, А.А. Понизовский, С.М. Чудинова, Е.В. Мироненко, А.М. Ермолаев // Почвоведение. –1998. –№12. – С. 1438-1443.
8. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн [Текст] / В.В. Никольский. – М. : Наука, 1982. –384 с.

**Irina Enina, Assoc. Prof., PhD tech. sci**

*Kirovohrad National Technical University, Kropyvnickiy, Ukraine*

### **Research of electromagnetic field and soil interaction**

Interaction of electromagnetic waves and environment was considered to develop means of one-sided access radio waves control.

On irradiation of system surface reflection and refraction of radio waves are observed at the boundary of air and environment. Here the law of reflection is fulfilled. Amplitude coefficient of electromagnetic waves reflection and passage to the plain interface of air and environment is determined by Fresnel equation.

The basic information-bearing parameters here are environmental characteristics, in particular, dielectric permittivity and electromagnetic waves incidence angle. The characteristic of electromagnetic wave and soil surface interaction is the coefficient of electromagnetic waves reflection and the coefficient of electromagnetic waves passage.

It is desirable to use normal waves to the surface of soil to reduce the interfering factor effect as the formula shows. Upon that the source and receiver of radiation can be combined in one receiving-transmitting antenna.

**soil, electromagnetic field, dielectric permittivity, electromagnetic waves, reflection coefficient, optimization parameter**

Одержано 03.11.16