

УДК 537.876.4

О.М. Сотніков¹, Б.О. Дем'янчук²¹ Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків² Військова академія, Одеса

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОГЛИНАННЯ ХВИЛЬ СЕРЕДОВИЩЕМ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ВТРАТАМИ

Шляхом рішення хвильового рівняння відносно коефіцієнта загасання хвилі, отримане значення частоти, що пропорційне параметру поглинання хвилі середовищем і дорівнює відношенню його електричної провідності до діелектричної проникності, розмежує частотні інтервали наявності та відсутності властивостей диспергування та поглинання хвиль середовищем. Це дозволяє вибирати доцільний частотний діапазон, залежно від виду середовища і втрат енергії поля під час розповсюдження хвилі.

Ключові слова: діелектричне середовище, хвильове рівняння, параметр поглинання хвиль, властивості диспергування та поглинання.

Вступ

Успішний розвиток теорії і практики радіолокації повітряних і космічних об'єктів впродовж минулого століття (за допомогою поширення електромагнітних хвиль в повітряному або космічному просторі з малими втратами енергії) вимагає зараз також рішення проблеми радіолокації об'єктів на фоні поверхні та об'єктів під поверхнею землі або інших планет.

Крім того, все гостріше стають потреби радіолокації об'єктів, які задалегідь покриті радіо поглинаючим матеріалом (англ. – RAM).

Ці завдання потребують нових зусиль, що безпосередньо пов'язані з дослідженням і необхідністю визначення закономірностей розповсюдження хвиль в просторі з властивостями інтенсивного поглинання хвиль середовищем з електромагнітними втратами.

Це пов'язано також і з необхідністю застосування теорії мікро електродинаміки, яка набуває зараз інтенсивного розвитку.

Зрозуміло, що підповерхневе зондування потребує рішень, що спрямовані на зменшення втрат енергії поля з метою збільшення глибини зондування.

В той же час створення радіо поглинаючих матеріалів потребує рішення протилежних завдань, що спрямовані на більші втрати енергії поля під час розповсюдження, з метою зменшення глибини проникнення поля, а саме, зменшення товщини покриття металевих об'єктів з метою надійного захисту їх від засобів радіолокаційного виявлення противником.

Висловлення автора фундаментальної роботи «Діелектрики і хвилі» А.Р. Хіппеля в середині 20-го віку про недостатню увагу інженерів до складних питань залежності впливу електрофізичних параметрів реальних середовищ на розповсюдження в них електромагнітних хвиль, на жаль, і зараз не втратило

актуальність [1].

Всі ці аргументи, а також обмежена кількість публікацій щодо цих нових завдань, спричиняють висновок про актуальність теми даної статті.

Виклад основного матеріалу

Спочатку отримаємо і проаналізуємо початкове хвильове рівняння електродинаміки для діелектричного середовища, використовуючи систему рівнянь Дж. Максвелла і матеріальні рівняння середовища у виді [1–2]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D} + \mathbf{J}; \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}; \quad (1)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}; \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}; \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}. \quad (3)$$

де \mathbf{D} , \mathbf{B} – електрична і магнітна індукція;

\mathbf{E} , \mathbf{H} – електрична і магнітна напруженості (компоненти) поля.

Напруженості поля, у зв'язку з кінцевою швидкістю розповсюдження хвилі і потоку електромагнітної енергії, який дорівнює

$$\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H},$$

можуть існувати у просторі також незалежно від джерела поля. Механізм поглинання енергії залежить від частотного діапазону хвиль.

Електричний момент \mathbf{P} одиниці об'єму середовища, проявляється в мікрохвильовому діапазоні частот, передусім, із-за орієнтації постійних диполів поляризованих молекул, існуючих і у відсутність зовнішнього поля.

В ІЧ- та в ультрафіолетовому діапазоні хвиль він проявляється внаслідок іонної і електронної поляризації середовища.

Магнітний момент \mathbf{M} одиниці об'єму середовища проявляється в перемагнічуванні магнітних доменів, в зміщенні меж доменів і у виникненні вихрових струмів.

Перше рівняння (1) є законом М. Фарадея електромагнітної індукції в середовищі.

Друге означає, що область простору, де протікає струм зміщення і струм провідності, охоплюється магнітним полем.

Диференціюючи перше рівняння у стрічки (1) і рівняння (3) з урахуванням першого рівняння стрічки (2) за часом, а друге рівняння (1) з урахуванням другого рівняння (2) по просторових координатах, використовуючи диференціальний оператор $\nabla \times$, отримуємо систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} \nabla \times \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{H} &= \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{E} + \sigma \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}; \\ -\nabla^2 \mathbf{E} &= -\mu_0 \mu \nabla \times \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{H}, \end{aligned} \quad (4)$$

а саме, хвильове рівняння для електричної компоненти \mathbf{E} електромагнітної хвилі в середовищі з діелектричною проникністю ε , магнітною проникністю μ і провідністю σ у виді

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{\varepsilon \mu}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0, \quad (5)$$

де $c/(\varepsilon \mu)^{0.5}$ – швидкість розповсюдження хвилі в діелектричному середовищі с проницаемостями ε , μ .

Провідність діелектричного середовища σ в рівнянні (5) є коефіцієнтом у похідній за часом і, природно, визначає інтенсивність дисипації (поглинання) енергії хвилі.

Саме цей доданок хвильового рівняння визначає коефіцієнт загасання хвилі в середовищі і, отже, глибину проникнення поля в середовище з електромагнітними втратами.

Для непровідного діелектричного середовища ($\sigma = 0$) рішення хвильового рівняння у вигляді незгадуваної монохроматичної хвилі

$$\mathbf{E} = \exp(-ikx + i2\pi ft) \quad (6)$$

дозволяє визначити коефіцієнт віддзеркалення ρ хвилі від межі розділу «повітря-поверхня» середовища з проникністями ε і μ та ε_a і μ_a , який дорівнює відношенню різниці хвильових опорів повітря і поверхні до їх суми у виді

$$\rho = \frac{[(\mu/\varepsilon)^{0.5} - (\mu_a/\varepsilon_a)^{0.5}]}{[(\mu/\varepsilon)^{0.5} + (\mu_a/\varepsilon_a)^{0.5}]}, \quad (7)$$

а також визначити коефіцієнт проходження τ поля через межу розділу середовищ у виді

$$\tau = \frac{2(\mu/\varepsilon)^{0.5}}{[(\mu/\varepsilon)^{0.5} + (\mu_a/\varepsilon_a)^{0.5}]}. \quad (8)$$

З (7) витікає, що коефіцієнт відбиття від межі

розділу «повітря-поверхня» довільного діелектричного середовища є негативною величиною, оскільки хвильовий опір цього середовища завжди менший, ніж хвильовий опір повітряного середовища.

Коефіцієнт поглинання енергії хвилі в діелектричному непровідному середовищі, природно, дорівнює нулю, оскільки $\sigma=0$, а $\tau=1+\rho$.

З'ясування (при $\sigma \neq 0$) залежності коефіцієнта загасання K_z поля в середовищі від проникності, провідності середовища і, особливо, від частоти коливань поля представляє значний інтерес, оскільки, як відомо, думки фахівців про залежність глибини проникнення поля в середу від частоти іноді розходяться, і це – не випадкове явище.

Для відповіді на це питання знайдемо рішення хвильового рівняння (5) для середовища з електропровідністю σ у вигляді монохроматичної хвилі, затухаючої з коефіцієнтом K_z .

$$\mathbf{E} = \exp(-K_z x - ikx + i2\pi ft); \quad (9)$$

$$k = 2\pi f (\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \mu)^{0.5} = 2\pi f (\varepsilon \mu)^{0.5} / c,$$

де k – хвильове число.

Підставляючи (4) в хвильове рівняння (5), отримуємо нове рівняння, що зв'язує параметри хвилі (9) з провідністю і іншими параметрами середовища.

$$\begin{aligned} K_z^2 - k^2 + 2iK_z k + (2\pi f)^2 \varepsilon \mu / c^2 - \\ - i2\pi f \mu_0 \sigma = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

З рівності нулю дійсної і уявної частин рівняння (10) слідує бікватратне рівняння

$$\begin{aligned} K_z^4 + [(2\pi f)^2 \varepsilon \mu / c^2] K_z^2 - \\ - (2\pi f \mu_0 \sigma)^2 / 4 = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Рішення рівняння (11) має вид

$$K_z = \left\langle \begin{aligned} & -[(2\pi f)^2 \varepsilon \mu / 2c^2] + \\ & + \left\{ [(2\pi f)^2 \varepsilon \mu / 2c^2]^2 + \right. \\ & \left. + (2\pi f \mu_0 \sigma)^2 / 4 \right\}^{0.5} \end{aligned} \right\rangle^{0.5}. \quad (12)$$

З (12) отримуємо граничні значення коефіцієнта загасання хвиль в області низьких K_z^H і високих K_z^B частот по формулам:

$$K_z^H (f \rightarrow 0) = (\pi f \mu_0 \sigma)^{0.5};$$

$$K_z^B (f \rightarrow \infty) = [(\mu_0 / \varepsilon \varepsilon_0)^{0.5} \sigma] / 2. \quad (13)$$

Коефіцієнти (13) показують, що в області нижчих частот коливань поля має місце залежність загасання поля від частоти і, отже, під час розповсюдження в середовищі сукупності гармонійних складових поля неминуче спотворення спектру сигналу.

В інтервалі високих частот мікрохвильового

діапазону послаблення поля практично не залежить від частоти, воно пропорційне питомій електропровідності середовища і величині його хвилевого опору.

Прирівнюючи коефіцієнти (13), знаходимо частоту, що розмежує вказані області, які відрізняються механізмами поглинання електромагнітного поля в діелектричному середовищі з втратами енергії поля. Ця частота, що розмежує, дорівнює

$$f^* = (\sigma / \epsilon) / (2\pi\epsilon_0) = \eta / (2\pi\epsilon_0). \quad (14)$$

Значення частоти, що розмежує, залежить, таким чином, від деякого узагальненого параметра, рівного відношенню питомої електропровідності середовища до його діелектричної проникності. По суті, такий η -параметр інтегрального поглинання (назвемо його таким чином), рівний

$$\eta = \frac{\sigma}{\epsilon}, \quad (15)$$

характеризує поглинаючі властивості діелектричного середовища, оскільки чим менше проникність ϵ середовища, тим більша частка електромагнітної енергії хвилі, що падає на поверхню середовища, проходить в середовище крізь межу розділу «повітря-поверхня» (8).

В той же час, чим більше питома електропровідність σ середовища, тим більше коефіцієнт загасання хвилі в середовищі, велика частина енергії поля виявиться поглиненим середовищем, не пройде крізь її товщу.

Отже, величина частоти, що розмежує, інтервали частот, визначає рівень поглинаючих властивостей кожного конкретного діелектричного середовища з втратами енергії поля.

Наприклад, для звичайної води, що має:

$$\sigma = 0,012 \frac{5m}{m}; \quad \epsilon = 81,$$

$$\text{а саме, } \eta = 1,50 \cdot 10^{-4},$$

отримаємо $f^* = 2,70$ МГц, а для морської води, у якої інші параметри:

$$\sigma = 1,33 \frac{5m}{m}; \quad \epsilon = 79\epsilon = 79, \quad \text{а саме,}$$

$$\eta = 1,67 \cdot 10^{-2}, \quad \text{маємо важливий результат}$$

для f^* та η .
Знаходимо $f^* = 300$ МГц, тобто η -параметр та f^* у 110 разів є більшими.

Повернемося тепер до коефіцієнтів загасання (13) хвилі в середовищі, які однозначно визначають глибину проникнення поля в середу, оскільки, як відомо, для довільного середовища (з електричними і магнітними властивостями), згідно до (15), ці значення глибини дорівнюють:

$$\Delta^a = (K_3^a)^{-1} = 1 / (\pi f \mu_0 \sigma)^{0,5}; \quad (16)$$

$$\Delta^b = (K_3^b)^{-1} = 2(\epsilon\epsilon_0)^{0,5} / [(\mu\mu_0)^{0,5} \sigma].$$

Отже, для визначення очікуваної фактичної глибини проникнення електромагнітної хвилі в діелектричне середовище, доцільно, по-перше, визначити граничне значення частоти по формулі (15), враховуючи питому електропровідність і проникність середовища, по-друге, застосувати алгоритм обчислення у виді

$$\Delta^* = [\sigma \pi f \mu_0]^{-0,5}, \rightarrow f \leq f^*;$$

$$\Delta^* = [\sigma^2 \mu_0 / 2(\epsilon_0 \epsilon)]^{-0,5}, \rightarrow f \geq f^*;$$

$$f^* = (\sigma / \epsilon) / (2\pi\epsilon_0) = \frac{\eta}{2\pi\epsilon_0}. \quad (17)$$

Відмітимо спеціально, що традиційно застосовують формулу для глибини проникнення поля в діелектричне середовище у виді [2–5]

$$\Delta^* = 1 / [(\mu_0 \epsilon_0)^{0,5} \pi f (\epsilon)^{0,5} \text{tg} \delta]. \quad (18)$$

Але вона не суперечить формулі (для середовищ, що не мають магнітних властивостей). Це твердження довести неважко, підставивши значення тангенса кута втрат поля в діелектричному середовищі, який дорівнює

$$\text{tg} \delta = [\sigma / (2\pi\epsilon_0 \epsilon)] / f, \quad (19)$$

в (18). Сравнивая результати, получим точное равенство

$$\Delta_0^* = \Delta^* (\mu = 1).$$

Фізичну суть і кількісне значення введеного нами η -параметра інтегрального поглинання енергії поля в діелектричних середовищах з втратами необхідно обговорити додатково, спираючись на відомі експериментальні результати дослідження властивостей цих середовищ.

З експериментальних даних для багатьох немагнітних середовищ відомі залежності їх тангенса кута втрат від частоти.

Аналіз подібних даних дозволив встановити, що такі середовища в інтервалі частот $f < f^*$ однозначно характеризуються залежністю $\text{tg} \delta$ від частоти і двох параметрів α^* і β^* та не залежних від частоти і є конкретними для кожного середовища, у виді

$$\text{tg} \delta = \alpha^* \cdot 10^{\beta^*} / f, \quad f < f^*, \quad (20)$$

де $\alpha^* = 2$; $\beta^* = 5$ – для прісної води; $\alpha^* = 3$; $\beta^* = 8$ – для морської води; $\alpha^* = 7$; $\beta^* = 5$ – для сухого ґрунту; $\alpha^* = 1$; $\beta^* = 7$ – для волого ґрунту; $\alpha^* = 2$; $\beta^* = 1$ – для мармуру і також інше.

Прирівнюючи (19) і (20) і враховуючи (15),

знаходимо залежність η -параметра поглинання від конкретних параметрів середовищ, відомих за результатами експериментальних вимірів, а саме

$$\eta = 2\pi\epsilon_0 \cdot \alpha^* \cdot 10^{\beta^*} \quad (21)$$

Підставляючи (20) в (18) і порівнюючи результат з (16) (при $\mu=1$), знову отримаємо вираження для η , співпадаюче з (21). Підставляючи (21) в (14), отримаємо, що граничне значення частоти мікрохвильового діапазону, при якому діелектричне середовище втрачає диспергувальні властивості, також залежить від її конкретних параметрів α^* і β^* у виді

$$f^* = \alpha^* \cdot 10^{\beta^*} \quad (22)$$

Таким чином, відповідно до (21) і (22) для безлічі діелектричних середовищ, наприклад, природного походження, може бути складений перелік значень η -параметрів поглинання поля і граничних значень частоти f^* , що характеризують властивості цих середовищ. Цей перелік для середовищ, відмічених вище, має вид, що наданий в табл. 1.

Таблиця 1
Електрофізичні параметри діелектричних середовищ

Діелектричне середовище	α^*	β^*	Параметр поглинання η	Розбіжна частота f^*
Прісна вода	2	5	$1,11 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^5$
Морська вода	3	8		$3 \cdot 10^8$ $3 \cdot 10^8$
Сухий ґрунт	7	5		$7 \cdot 10^5$ $7 \cdot 10^5$
Вологий ґрунт	1	7		$1 \cdot 10^7$ $1 \cdot 10^7$

З приведеної таблиці видно, що діапазон зміни (розкид значень) параметра поглинання досліджуваних діелектричних середовищ природного походження, природно, співпадаючий з діапазоном зміни граничної частоти, є дуже значним.

Подібні результати оцінки електрофізичних параметрів діелектричних середовищ (табл. 1) і залежності (17) у вигляді алгоритму для оцінки втрат поля в різних середовищах дозволяють зробити узагальнення, корисні для практики.

В процесі виявлення радіолокації технічного об'єкту або людини на фоні підстильної поверхні у виді сухого ґрунту, втрати енергії сигналів є мінімальними, тому дальності виявлення цих об'єктів збільшуються приблизно в 2 рази, в порівнянні з дальністю виявлення на фоні вологого ґрунту.

Дійсно, з табл. 1 маємо, що відношення цих відстаней виявлення дорівнює

$$\begin{aligned} D_C / D_B &= \sqrt[4]{\eta_B} / \eta_C = \\ &= \sqrt[4]{56 / 3,89} = 1,95. \end{aligned}$$

Радіолокація на фоні морської підстильної поверхні в метровому діапазоні хвиль утруднюється додатково через диспергування спектру частот сигналів, що приймаються саме через спотворення інформації, що приймається.

Висновки

1. Рішення хвильового рівняння відносно коефіцієнтів загасання хвилі на нижчих і на більш високих частотах мікрохвильового діапазону, дозволяє визначити значення частоти f^* , що розмежовує, розділяє, частотний діапазон на два інтервали: наявність диспергувальних властивостей діелектричного середовища і практичну відсутність цих властивостей.

Це значення пропорційно параметру η поглинання середовища і, отже, визначає глибину проникнення поля в середу, що дозволяє обґрунтовано вибирати доцільний частотний діапазон, залежно від функціонального призначення радіолокатора і властивостей середовища.

2. Результати кількісних оцінок η -параметрів поглинання різних середовищ, на фоні яких здійснюється радіолокаційне виявлення, низько летючих цілей, показують, що у разі вологої підстильної поверхні інтегральний параметр поглинання і, отже, втрати енергії сигналів, в порівнянні з втратами на фоні сухого ґрунту, збільшуються в 15 разів, а у разі радіолокації на фоні морської поверхні втрати збільшуються більш ніж в 100 разів.

Більше того, радіолокація в метровому діапазоні хвиль на морської підстильної поверхні додатково утруднюється із-за диспергування спектру частот сигналів, що приймаються.

У сантиметровому ж діапазоні таке диспергування спектру сигналів, що приймаються, практично виключене.

Список літератури

- Хіппель А.Р. Диэлектрики и волны / Пер. с англ.; под ред. проф. Н.Г. Дроздова. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. – 417 с.
- Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. 3-е изд./ В.В. Никольский, Т.И. Никольская. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1989. – 543 с.
- Сидорчук Н.В. Рассеяние электромагнитных волн в двоякопериодическом магнитодиэлектрическом слое / Н.В. Сидорчук, В.В. Ячин // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, № 1. – С. 50-61.
- Клоков Ю.В. О глубине проникновения ЭМП СВЧ в среды/ Ю.В. Клоков //Электронная обработка материалов. – 1988. – №5. – С.65-68.
- Машуня Е.П. Электропроводность термопластических композиций, содержащих дисперсный токопроводящий наполнитель / Е.П. Машуня // Композицион-

ные полимерные материалы. АН УССР. Институт химии высокомолекулярных соединений. – 1989. – Вып. 43. – С. 5-25.

6. Дем'ячук Б.О. Статистична модель виборчої дії електромагнітного поля на компоненти діелектричних середовищ. / Б.О. Дем'ячук // Техніка і прилади надвисоких частот. – 2009. – №1. – С. 44-48.

7. Дем'ячук Б.О. Експериментально-розрахункова методика визначення комплексних проникностей ферромагнітних композитів. / Б.О. Дем'ячук // Технологія і конструювання в електронній апаратурі. – 2005. – № 1. – С. 14-17.

8. Дем'ячук Б.О. Матеріали - перетворювачі електромагнітної енергії в теплову. Вимоги. Основи технології. / Б.О. Дем'ячук // Технологія і конструювання в електронній апаратурі. – 2006. – № 5. – С. 31-35.

Надійшла до редколегії 6.06.2017

Рецензент: д-р техн. наук ст. наук. співробітник Г.С. Залевський, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОГЛОЩЕННЯ ВОЛН СРЕДОЙ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОТЕРЯМИ

А.М. Сотников, Б.А. Дем'ячук

Путем решения волнового уравнения относительно коэффициента затухания волны определено значение частоты, которое пропорционально параметру поглощения волны средой, который равен отношению удельной электропроводности к диэлектрической проницаемости и разграничивает частотный интервал наличия и отсутствия диспергирующих свойств среды, что позволяет обоснованно выбирать целесообразный частотный диапазон в зависимости от вида и свойств поглощения энергии в среде распространения волны и допустимых потерь энергии поля

Ключевые слова: диэлектрическая среда, волновое уравнение, параметр поглощения волны средой, диспергирующие и поглощающие свойства среды.

DESCRIPTIONS OF ABSORPTION OF WAVES ENVIRONMENT WITH ELECTROMAGNETIC BY LOSSES

A.M. Sotnikov, B.A. Dem'yanchuk

The near decision of wave equalization is relative the coefficient of disappearance of wave, defined value of frequency, that proportionally to absorption of parameter of wave by an environment, equals attitude of specific conductivity toward inductivity and differentiates the frequency intervals of presence and absence of dispersive and absorptive property of environment, it allows to choose an expedient frequency range, depending on the type of environment of distributive signal of wave and lost energy in influence of terms of surface of taxation.

Keywords: dielectric environment, wave equalization, parameter of absorption of wave, dispersive and absorptive property of environment.