

КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ

УДК 004.056.2:528.082

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2023.2-66.7>

Тарасенко Ю. С., кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних технологій
та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-4226-5707

Савченко Ю. В., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-7177-6311

ГЕОРАДІОЛОКАЦІЙНІ АСПЕКТИ БЕЗПЕКИ ПРИПОВЕРХНЕВИХ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Значна частина наявної техносфери соціуму належить до об'єктів критичної інфраструктури, які зобов'язані застосовувати сучасні системи безпеки та кібербезпеки з потенційно високим рівнем їх реалізації. У статті представлено матеріал, присвячений георадіолокаційним можливостям приповерхневої діагностики землі з позицій забезпечення безпеки підземних інженерних споруд. Однак, при забезпеченні такої безпеки засобами георадіолокації, складно позбутися високого рівня неоднозначності інтерпретації одержуваних даних про глибинні неоднорідності. Зазначено, що, навіть за апіорно низького заданого рівня достовірності результатів досліджень, що проводяться засобами георадіолокації, вони у своїй більшості мають якісний характер через слабку передбачуваність гетерогенного характеру приповерхневих шарів землі. У зв'язку з чим, з позицій моделювання гіпотетичних вимірювань, насамперед щодо приймально-передавального рупорного антенного блоку, використано пізнавальну методику «чорного ящика». Орієнтуючись на Рекомендації МСЕ-R (серія Р, Поширення радіохвиль) щодо електричних характеристики земної поверхні, запропоновано замінити параметри реального середовища на його ефективні значення, але вже для однорідного ґрунту. Відповідно до чого введено імпедансні параметри електричних характеристик ґрунту та розглянуто аспекти узгодження антенної системи із зондованим середовищем за ефективними значеннями його (ґрунту) електричних характеристик, реалізація яких забезпечує підвищення ймовірного рівня діагностики шарувато-неоднорідної земної поверхні. Викладені аспекти приповерхневої діагностики Землі за допомогою електромагнітного глибинного її зондування зі змінним набором «лінз проясненої оптики», що орієнтовані на успішне виявлення локальних неоднорідностей, сприяють реалізації позитивної тенденції підвищення результативності в процесі розв'язання геофізичних задач розпізнавання демаскувальних параметрів об'єктів дослідження, перш за все зі сфери георозвідки. При цьому, стрімко розвиваючись, сучасні експериментальні методи, способи та пристрої, включно з теоретичними розробками, уже впритул підійшли до успішної реалізації не лише геофізичних задач глибинного розпізнавання з високим рівнем достовірності, а й до задач георадарної променевої томографії.

Ключові слова: георадіолокація, діелектрична проникність, хвильовий опір, просвітлювальна структура, рупорна антена, імпедансне узгодження.

Tarasenko Yu. S., Savchenko Yu. V. Georadar aspects of security of near-surface critical infrastructure facilities

A significant part of the existing technosphere of the society refers to critical infrastructure objects, which are obliged to apply modern security and cybersecurity systems with a potentially high level of their realization. The article presents the material devoted to the georadiolocation capabilities of near-surface ground diagnostics from the position of ensuring the safety of underground engineering structures. However, when ensuring such safety by means of georadiolocation, it is difficult to get rid of the high level of ambiguity of interpretation of the obtained data on deep inhomogeneities. It is noted that, even at a priori low level of reliability of the results of conducted studies by means of georadiolocation, they are mostly of qualitative nature due to poor predictability of the heterogeneous nature of the near-surface layers of the earth. In this connection, from the point of view of modelling hypothetical measurements, first of all concerning the receiving and transmitting horn antenna unit, the cognitive method of "black box" was used. Being oriented on ITU-R Recommendations (series P, Radio Wave Propagation) concerning electrical characteristics of the earth surface, it is proposed to replace the parameters of the real environment by its

effective values, but for homogeneous soil. In accordance with what impedance parameters of electrical characteristics of the soil are introduced and aspects of matching the antenna system with the probed medium by effective values of its (soil) electrical characteristics are considered, the implementation of which provides an increase in the probabilistic level of diagnostics of the layered inhomogeneous earth surface. The described aspects of the near-surface diagnostics of the Earth by means of electromagnetic deep sounding with a variable set of "lenses of clarified optics", which are focused on the successful detection of local inhomogeneities, contribute to the realization of a positive trend of increasing the efficiency in the process of solving geophysical problems of recognizing the demasking parameters of research objects, primarily in the field of geological exploration. At the same time, rapidly developing, modern experimental methods, techniques and devices, including theoretical developments, have already come close to the successful implementation of not only geophysical problems of deep recognition with a high level of reliability, but also the problems of GPR radar tomography.

Key words: georadiolocation, dielectric permittivity, wave impedance, illumination structure, horn antenna, impedance matching.

Вступ і постановка проблеми. Наразі, у світлі тенденції життєдіяльності сучасного соціуму у вигляді прагнення до об'єднання та проживання на високоурбанізованих територіях [1, 2], надійна експлуатація супутньої їм техносфери вимагає створювати відповідні системи безпеки та кібербезпеки щодо об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ) [3, 4], серед яких на особливу увагу заслуговують об'єкти приповерхневої (глибинної) локалізації наявних підземних комунікацій у вигляді газопроводів, водогонів, нафтопроводів та кабельних магістралей, а також інших підземних споруд, визначаючи місця витоку рідини, приховані конструктивні підземні порожнини, незаконні врізки в наявних інженерних мережах, зсувні процеси, рівень та об'єм ґрунтових вод тощо.д.

Відповідно до методологічного принципу пізнання, в основі якого прийнято теорію раціональної діяльності для досягнення поставленої мети, скористаємося елементами комплексування: *методичними* з радіофізики та геофізики (використовуючи напрацювання з галузі радіолокації, дефектоскопії та підземної електророзвідки) [5, 6, 7]); *міждисциплінарними* (спираючись на наукові дані петрофізики, НВЧ електродинаміки, геоінформаційних систем та технологій); *різнорівневими* (дистанційно-космічними та повітряно-приповерхневими). Причому бажаний рівень апіорної достовірності електророзвідки земної кори забезпечують здебільшого завдяки підвищенню потужності зондувального сигналу, способам його створення шляхом зміни несучої частоти, виду модуляції, тривалості впливу та методів оптимального накопичення. Так, на постійному струмі і на інфранизьких частотах реалізація глибинного розрізу можлива від сотень до десятків кілометрів, а на частотах понад гігагерц ($1\text{ГГц} = 10^9\text{ Гц}$) – до сантиметрів і міліметрів. Крім того, через різноманіття використовуваних полів, їхніх частотно-часових спектрів (низькочастотного, високочастотного, надвисокочастотного), електромагнітних властивостей геологічного середовища, електророзвідці (на відміну від інших геофізичних способів) притаманне більш ніж 50 методів дослідження, в основі інформаційних джерел яких лежать, як правило, поляризаційні, індукційні, імпедансні, геоелектрохімічні, біогеофізичні параметри та характеристики [6, с. 40–41]. При цьому, в контексті забезпечення безпеки підземних інженерних споруд, доцільно використовувати георадарну променеву томографію. В основі її реалізації закладено досягнення активної, пасивної та нелінійної радіолокацій ближнього електромагнітного поля взаємодії з глибинними об'єктами, а методика отримання та обробки даних у такій томографії запозичена із сейсмозвідки [8]. Очевидно, що використовуючи кілька циклів вимірювань за різних відстаней між джерелом випромінювання і приймачем вторинного випромінювання, вдається знизити, а найчастіше навіть позбутися неоднозначності інтерпретації одержуваних даних, яка так характерна для георадіолокації. Проте, за швидкістю отримання інформації про глибинний розріз, за трудовитратами і, відповідно, вартістю робіт, георадіолокаційна томографія, що використовує сигнал, який проходить, з метою отримання кількісних електромагнітних характеристик у кожній точці досліджуваного простору, випереджає геофізичні методи із сейсмозвідки, гравірозвідки, ядерної геофізики та інших, фізична основа яких не має кореляції з природою полів, використовуваних у георадіолокації. Саме за кількісною оцінкою значень швидкості поширення електромагнітних хвиль, як правило, і вдається виявити так звані аномальні зони і навіть (для конкретного заданого, як правило, низького рівня достовірності) визначити вологість шарів та об'єм порожнин, хоча інформація про внутрішню будову середовища, яке локується, в більшості випадків залишається якісною [9], і це здебільшого через гетерогенний характер поведінки досліджуваних (приповерхневих) шарів Землі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно з [10], «електромагнітний відгук геосередовища на зовнішні енергетичні впливи» насамперед залежить від його (геосередовища) властивостей, «які досі залишаються недостатньо осмисленими або відомими». Для сучасної геоелектродинаміки гетерогенних середовищ, «діелектрична сприйнятливості яких підпорядковується дрібно-ступінчастим законам у широкому діапазоні частот», властива багатоаспектність проблем теоретичного та експериментального характеру. Зокрема, узагальнюючі багаторічні експериментальні дослідження, «стався перелом у розумінні визначальних властивостей геосередовища як відкритої нерівноважної дисипативної динамічної системи, нелінійної, активної, енергетично насиченої, з безперервно мінливими параметрами», де «мотором» усієї геодинаміки «є тепловий потік із земних надр, зумовлений і дифузєю легких газів (водень, гелій)» [10].

У зв'язку з викладеним, акцентуючи увагу на апіорну супутню складність побудови електродинамічної моделі з вивчення багатфакторного впливу внутрішніх і зовнішніх (зондувальних) полів на зосереджені (локальні) або розподілені об'єкти в приповерхневому геосередовищі, нижче викладено аспекти (перш за все, у частині приймально-передавального антенного блока) георадіолокаційного виявлення глибинних неоднорідностей на тлі (у масиві) гетерогенної структури з позицій моделювання потенційних гіпотетичних вимірів, використовуючи пізнавальну методику «чорної скриньки» (ЧС). Уразливість такої методики цілком очевидна, проте її ретроспектива позитивної результативності, найімовірніше, дає змогу використовувати дану методику як «пробну кулю», як інструмент пізнання для дослідження електромагнітного відгуку від зосередженої неоднорідності, наприклад у вигляді конструктивних підземних порожнеч. У такому разі, застосовуючи апіорно напрацьований радіолокаційний «арсенал» з ефективних поверхонь (портретів) вторинних зразкових (каліброваних) випромінювачів, з'являється додаткова можливість інтерпретації характеристик геосфери (або її локальних неоднорідностей як додаткового джерела-об'єкта інформації) з позицій її локації та безпосереднього розпізнавання властивостей фону від гетерогенної структури.

По суті, «чорною скринькою» може бути будь-який об'єкт, процес або фізичне явище, властивості чи реакцію яких вивчають за результатами зовнішніх впливів на такий ЧС, не маючи змоги безпосередньо дослідити його внутрішню структуру [11]. Так, для встановлення закону функціонування системи будь-якого ступеня складності можуть використовувати кібернетичний метод «чорної скриньки», що об'єднує чотири моделі опису системи, а саме: входів, виходів, межі та зовнішнього середовища [12]. Тому, насамперед, у міру подачі (уявної або реальної) різних типів впливів зі змінними параметрами на вхідний канал ЧС прагнуть виявити його реакцію на вихідному каналі для конкретного (пробного) впливу. Цей процес заведено називати експериментом над «чорною скринькою». Якщо вдається здійснити розпізнавання конкретних видів впливу на відповідність між апіорними станами «входу» та апостеріорними «виходу» «чорної скриньки», то, як правило, вводять певні фільтрові обмеження її (ЧС) функціонування. Зокрема, у процесі розв'язання задачі георадіолокаційного розпізнавання, наприклад, конструктивних підземних порожнин у гетерогенному середовищі, зазвичай спочатку уточнюють межі можливої поведінки швидкості поширення електромагнітної хвилі зондування в застосовуваній хвилевідновлювальній структурі, яка, зазвичай, об'єднує у повітряному просторі приймально-передавальну антенну систему та об'єкт виявлення, який локується, у приповерхневій півсфері землі. При цьому безпідставним представляти або розмежовувати сейсмоакустичну, теплову, електромагнітну та інші компоненти як власного, так і вторинного випромінювання від фонового геосередовища, яке з позицій ЧС доцільно ототожнювати з якимось інтегральним (ефективним) електромагнітним вторинним впливом на приймальну антену георадара. Також доречно нагадати, що відповідно до принципу суперпозиції для реальної електромагнітної хвилі, представленій у вигляді суми гармонійних хвиль, тобто у вигляді хвильового пакету, швидкість переміщення максимуму її амплітуди (інакше групова швидкість) лише тільки у не диспергувальному середовищі, збігається з фазовою. Причому, згідно з теорією відносності, групова швидкість $u \leq c$ – швидкості світла у вакуумі, а фазова швидкість $v = \omega_0 \lambda / (2\pi)$, де ω_0 і λ – відповідно кругова частота і довжина хвилі. Оскільки для частоти обмежень не існує, то за відношенням швидкості світла у вакуумі до фазової швидкості поширення в тракті, остання, тобто v , може перевищувати c . У зв'язку з чим вводять і використовують поняття швидких і повільних хвиль, а залежність вигляду $v \cdot u = c^2$ вважають здійсненою для швидкостей поширення монохроматичних хвиль тільки в середовищах, які не диспергують. Однак з огляду на те, що в природі строго монохроматичних хвиль не існує, то, отже, згідно з [13], не повинно бути й фазової швидкості для реальних хвиль у диспергувальних середовищах (ДС). Це твердження збігається з висловлюваннями провідних учених минулого століття лауреатів Нобелівських премій з фізики М. Борна і Л. Ландау, які незалежно один від одного стверджували, що в ДС фазова швидкість хвиль не має жодного фізичного змісту і з фазовою швидкістю ніщо не поширюється.

Далі, відходячи від дискусії щодо методичних аспектів вимірювання швидкостей (фазової та групової) поширення хвиль різної природи в ДС, електродинамічний показник заломлення в якій залежить від частоти хвилі, орієнтуватимемось на Рекомендації МСЕ-R P.527-6 (09/2021) (Серія Р, Розповсюдження радіохвиль) [14] стосовно електричних характеристики земної поверхні, у яких, під час моделювання розповсюдження радіохвиль, рекомендують ураховувати що:

- a) електричні характеристики можуть бути виражені трьома параметрами у вигляді *магнітної проникності* μ (як міри здатності матеріалу підтримувати формування всередині себе магнітного поля у відповідь на прикладене магнітне поле), *діелектричної проникності* ϵ (як міри здатності матеріалу протистояти електричному полю) та *електропровідності* σ (як міри здатності матеріалу проводити електричний струм);
- b) магнітну проникність поверхні Землі μ можна вважати такою, що дорівнює магнітній проникності у вакуумі;
- c) електричні властивості поверхні Землі можуть бути виражені комплексною діелектричною проникністю або, що те саме, дійсною і уявною частинами комплексної діелектричної проникності;
- d) необхідна інформація про зміну глибини проникнення радіохвиль із частотою.

Оскільки земна поверхня не однорідна (вона складається з безлічі шарів різної товщини з різними електричними характеристиками), то запровадили інтегральне поняття *ефективних* параметрів під час заміщення реального середовища на його представлення у вигляді однорідного ґрунту. При цьому, «ефективні параметри можна використовувати з однорідними гладкими кривими поширення земних хвиль відповідно до Рекомендації МСЕ-К Р.368» [14, п. 2.1].

Результати дослідження. На практиці, як правило, зручно використовувати відносні (безрозмірні) проникності: діелектричну ϵ_r і магнітну μ_r , які вводять як $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ та $\mu_r = \mu/\mu_0$, де ϵ та μ – відповідно діелектрична та магнітна проникність середовища, а значення діелектричної проникності, магнітної проникності та електропровідності відповідно для вакууму дорівнюють: $\epsilon_0 = 8,854187817 \times 10^{-12}$ (Ф/м); $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (Н/А²); $\sigma_0 = 0,0$ (См/м). Причому, відповідно до цих Рекомендацій, вважають $\mu = \mu_0$ і, отже, $\mu_r = 1$. Тоді, для випадку плоскої хвилі, що падає, $E^{\rightarrow}(r,t) = E_0^{\rightarrow} e^{j(\omega t - kr)}$ (при частоті випромінювання ω , поточному часі t , магнітній проникності μ , діелектричній проникності ϵ і електропровідності σ) модуль вектору хвильового числа k^{\rightarrow} має вигляд $k^{\rightarrow} = (-j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon))^{1/2}$.

У Рекомендаціях прийнято оцінювати електричні характеристики земної поверхні за рівнем нормального глибинного проникнення електромагнітного поля у вигляді «скін-шару» δ , уздовж якого амплітуда напруженості електромагнітного поля випромінювання (усередині матеріалу) падає в e разів від свого початкового значення на поверхні ($\approx 37\%$). Так, глибину проникнення δ в однорідному середовищі з комплексною відносною діелектричною проникністю ϵ_r ($\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$) визначають за співвідношенням

$$\delta = \frac{\lambda}{\sqrt{2A}} ((\Delta^{1/2} - \epsilon_r'')^{1/2}) \text{ (м)}, \quad (1)$$

де λ – довжина хвилі в метрах, $A = (\epsilon_r')^2 + (\epsilon_r'')^2$. Очевидно, що в міру того як уявна частина комплексної відносною діелектричної проникності ϵ_r'' у рівнянні (1) наближається до нуля, глибина проникнення прямує до нескінченності.

Зокрема [14, п. 3], на рис. 1 наведено типові значення глибини проникнення електромагнітного поля залежно від частоти для різних типів поверхневих компонентів земної поверхні, включно з чистою водою (1), морською водою (2), сухим ґрунтом (3), вологим ґрунтом (4) та сухим льодом (5). При цьому глибину проникнення чистої й морської води розраховували за 20°C, солоність S морської води становила 35 г/кг, а в сухому й вологому ґрунтах враховували об'ємний вміст вологи, відповідно, що дорівнював 0,07 і 0,5. Глибина проникнення для сухого льоду дана при 0°C.

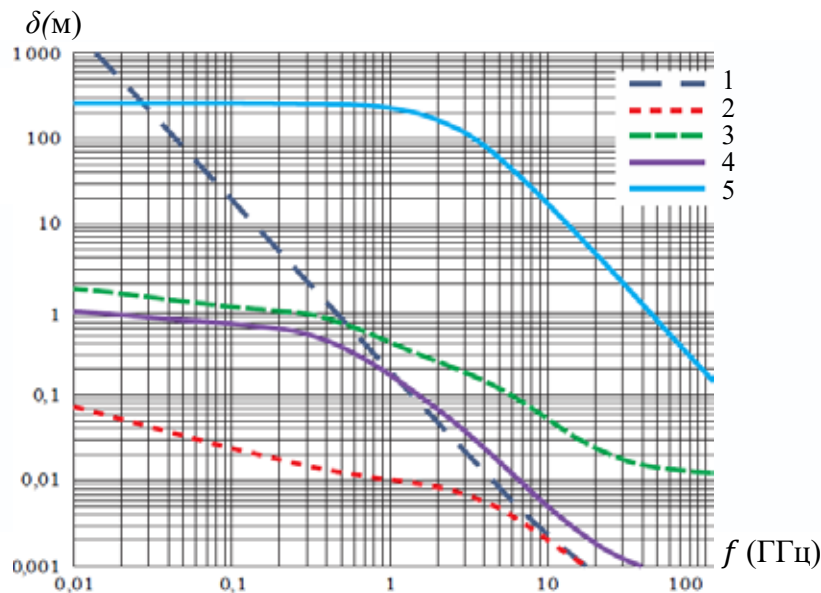


Рис. 1. Глибина проникнення δ (м) для різних типів поверхні залежно від частоти f (ГГц) [14]

Причому, на частотах до 1000 ГГц розсіювання на земній поверхні пояснювалося або поступальним рухом зарядів (провідністю), або їхнім коливальним рухом (коливання диполів), де уявну частину комплексної відносною діелектричної проникності ϵ_r'' представляють у вигляді

$$\epsilon_r'' = \epsilon_d'' + \sigma / (2\pi f \epsilon_0) \quad (2)$$

Тоді перший доданок з ϵ_d'' зумовлює розсіювання, спричинене струмами зміщення, наприклад, індуковані вібрацією диполів, а другий доданок $\sigma / (2\pi f \epsilon_0)$ – розсіювання, спричинене струмом провідності. Як

приклад залежності комплексної відносної діелектричної проникності чистої і морської води від частоти за $T = 20^\circ\text{C}$ і 0°C наведені на рис. 2 і 3 відповідно.

Доцільно зазначити, що струм провідності – це об'ємне переміщення вільних зарядів і фактично єдиний струм на нульовій частоті (тобто за постійного струму). Струм провідності завжди більший за струм зсуву при частотах, нижчих за перехідну частоту f_t , і менший за струм зсуву при частотах, вищих за перехідну частоту f_t . Перехідна частота f_t визначається як частота, за якої струм провідності дорівнює струму зміщення:

$$f_t = \sigma / (2\pi\epsilon_0\epsilon_d''). \quad (3)$$

Для непровідних діелектричних матеріалів (матеріалів без втрат) $\sigma=0$ і, отже, $\epsilon_r'' = \epsilon_d''$. Для деяких із них, таких як сухий ґрунт і суха рослинність, $\epsilon_d''=0$ і, отже, $\epsilon_r''=0$ незалежно від частоти. З іншого боку, для деяких інших непровідних матеріалів, як-от чиста вода і сухий сніг, ϵ_d'' і, отже, ϵ_r'' дорівнюють нулю тільки за нульової частоти. Для провідних діелектричних матеріалів (з втратами), таких як морська вода і вологий ґрунт, електропровідність σ має кінцеву величину, відмінну від нуля. У цьому разі замість уявної частини комплексної відносної діелектричної проникності легше працювати з провідністю σ , яку можна отримати з рівняння (2), прирівнявши ϵ_d'' до 0, тобто:

$$\sigma = 2\pi\epsilon_0 f \epsilon_r'' = 0,05563 f_{\text{GHz}} \epsilon_r'', \quad (3a)$$

де f_{GHz} – частота в ГГц. Узагальнюючи наведену вище формулу з урахуванням запису (2), отримуємо суму двох доданків, з яких один член відповідає за електропровідність, а інший – враховує розсіювання потужності, пов'язане зі струмом зсуву.

Таким чином, відповідно до [14], ефективні значення електричних характеристик ґрунту визначаються типом ґрунту, його вологістю, температурою, загальною геологічною структурою і частотою зондувального електромагнітного випромінювання. Причому, згідно з численними вимірюваннями, значення електричних характеристик ґрунту варіюються залежно від типу ґрунту, що зазвичай пов'язано з його здатністю поглинати й утримувати вологу, а не з хімічним складом самого ґрунту. Завдяки наведеним залежностям комплексної відносної діелектричної проникності, наприклад, чистої води ($S = 0$ г/кг) і морської води ($S = 35$ г/кг) від частоти (рис. 2 для $T = 20^\circ\text{C}$ і рис. 3 для $T = 0^\circ\text{C}$) та аналогічним для інших середовищ [14], з'являється можливість аналізу імпедансних параметрів ґрунту.

При цьому, фізичні та математичні аспекти дискусії щодо «проблеми, що визначає методологічну основу геоелектромагнетизму», при імпедансному описі електромагнітного поля на межі розділу «діелектрик-провідник», також залишаємо в межах раніше озвученої пізнавальної методики ЧС [15]. Проте в контексті «імпедансного опису електромагнітного поля на межі розділу діелектрик-провідник» [16], безсумнівно ключового в питанні узгодження під час діагностики ґрунту, його земну півсферу ототожнюємо з пасивним об'єктом, а систему, яка безпосередньо зондує, – з активним георадіолокаційним пристроєм (георадаром), здатним забезпечувати «приблизно плоску електромагнітну хвилю» на межі розділу «земля-повітря».

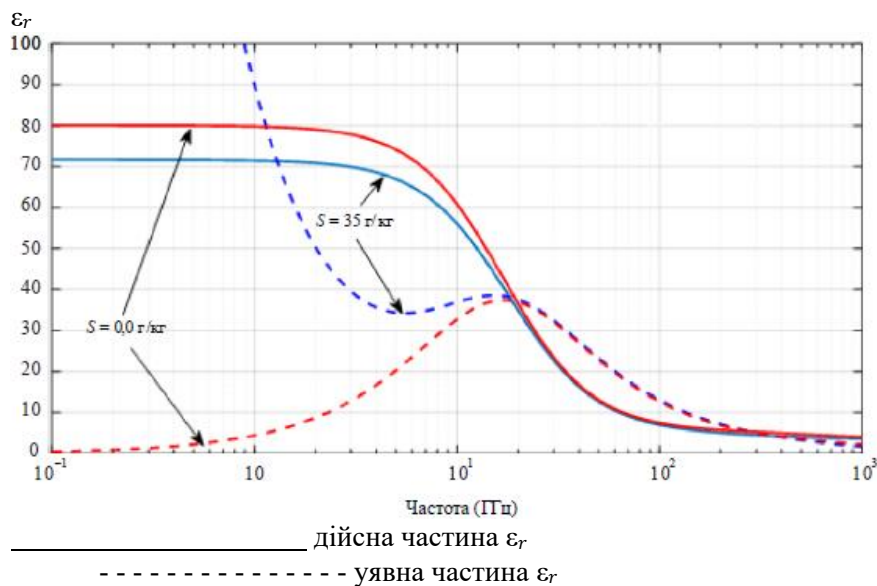


Рис. 2. Залежність комплексної відносної діелектричної проникності ϵ_r чистої та морської води від частоти за $T = 20^\circ\text{C}$ [14]

Під час реалізації приповерхневої діагностики Землі є актуальним вибір антенної системи, яка має бути узгоджена насамперед із вільним простором, оскільки складно уникнути повітряного зазору між антенним блоком і приповерхневим досліджуваним шаром землі.

Бажано забезпечити максимальний рівень електромагнітного впливу на півсферу зондування і звести до мінімуму (відфільтрувати) супутні перешкоди індустріального та іншого походження, унеможливаючи в такий спосіб різноманітні перевідбиття від об'єктів, що демаскують, як докільця, так і стандартних (досвідчених) гетерогенних структур (або їхніх моделей), параметри яких уже вивчені в геофізичній сфері дослідження.

У зв'язку з чим зазначимо, що питання узгодження вже добре реалізуються в сучасній оптиці, що адекватно дає змогу використовувати передові структурні рішення щодо синтезу інтерференційних антивідбивних покриттів, наприклад, детально викладеними в [17]. У цій роботі запропоновано метод зв'язаних хвильових товщин, завдяки реалізації якого у вигляді тонкошарових інтерференційних структур і « π -структур» (що утворюють окремий клас структур, що просвітлюють, – ПС) забезпечується на заданій довжині хвилі λ одночасне виконання амплітудної та фазової умов узгодження, які приводять коефіцієнт відбиття від усієї структури до тотожного нуля.

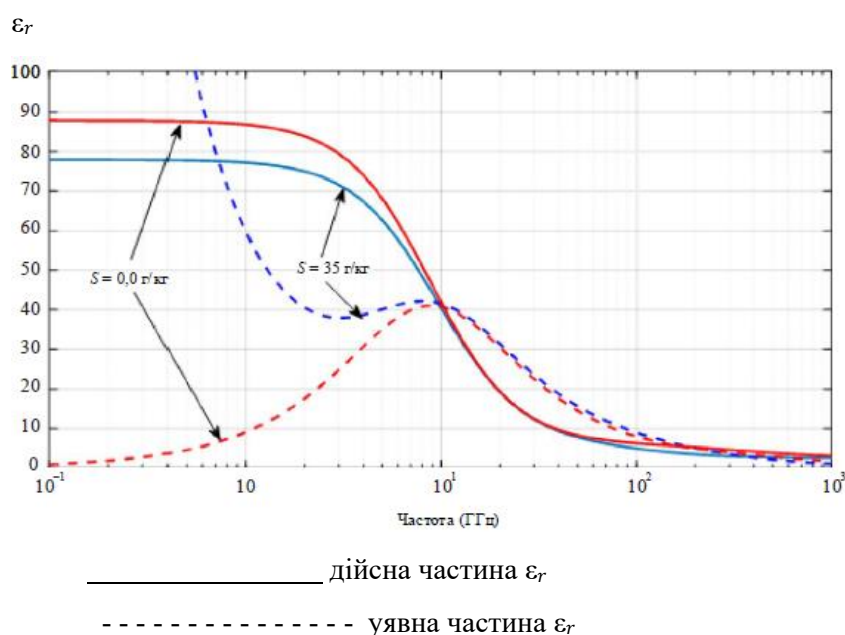


Рис. 3. Залежність комплексної відносної діелектричної проникності ϵ_r чистої та морської води від частоти за $T = 0^\circ\text{C}$ [14]

Причому, в результаті чисельного експерименту показано, що під час синтезу запропонованих багатошарових інтерференційних покриттів їхня дискретна множина (кількість) «має як структурне рішення чвертьхвильові оптичні товщини шарів».

Отже, і для нашого випадку діагностики шарувато-неоднорідної підповерхневої земної півсфери, спираючись на викладене вище, як початкове наближення, доцільно використовувати не тільки рупорні антени, які серед більшості антен найбільш узгоджені з повітряним простором завдяки конструктивному плавному переходу від хвилеводної частини до випромінювальної апертури антени, а й чвертьхвильові (або ж їм непарно кратні) діелектричні вставки, призначені для досягнення мінімуму коефіцієнта відбиття на заданій довжині електромагнітних хвиль. При цьому, сам по собі оптимальний розкрив рупорної антени апріорі зобов'язаний забезпечувати узгодження з вільним простором, у якому лінії векторів напруженості електричного E і магнітного H полів лежать у площині поперечного перерізу хвилі, а сама хвиля є поперечною ($E_z=0, H_z=0$), що позначається як ТЕМ-хвиля (transvers – поперечний). Під час використання однозв'язних напрямних систем для реалізації випромінювання електромагнітної хвилі через рупорну антену заведено використовувати поперечно-магнітні (ТМ) або поперечно-електричні (ТЕ) типи хвиль, що можуть розповсюджуватися як E_{mn} та H_{mn} хвилі на відповідних частотах, які перевищують їхні критичні частоти. У зв'язку з чим можливе використання різних типів рупорів. Зокрема, рупор, утворений збільшенням розміру b по вузькій стінці хвилеводу, паралельного вектору E , є секторіальним E - площинним. Рупор, утворений збільшенням розміру a по широкій стінці хвилеводу, паралельного вектору H , є секторіальним H -площинним. Рупор,

утворений одночасним збільшенням розмірів a і b поперечного перерізу хвилеводу, прийнято називати пірамідальним, а збільшенням поперечного перерізу круглого хвилеводу – конічним. При плавному переході від хвилеводу до рупора структура поля в останньому нагадує структуру поля у хвилеводі. Причому про вхідний опір $Z_{\text{вх}}$ таких антен можна судити за відбиттям від антени, яке виникає в хвилеводному тракті. У цьому разі вимірюють коефіцієнт відбиття $\dot{\Gamma}$, який визначається формулою

$$\dot{\Gamma} = \frac{\dot{Z}_{\text{вх}} - Z_0}{\dot{Z}_{\text{вх}} + Z_0}; \text{ або } \dot{\Gamma} = \frac{\frac{Z_{\text{вх}}}{Z_0} - 1}{\frac{Z_{\text{вх}}}{Z_0} + 1} \text{ или } \frac{Z_{\text{вх}}}{Z_0} (1 - \dot{\Gamma}) = 1 + \dot{\Gamma},$$

где: $\dot{Z}_{\text{вх}}$ – вхідний опір антени, а Z_0 – хвильовий опір підвідного фідера (хвилеводу). Таким чином:

$$\frac{Z_{\text{вх}}}{Z_0} = \frac{1 + \dot{\Gamma}}{1 - \dot{\Gamma}}$$

де $\frac{\dot{Z}_{\text{вх}}}{Z_0} = \frac{\dot{\Gamma} + 1}{1 - \dot{\Gamma}}$ – нормований опір антени.

Наведені співвідношення справедливі для основного типу хвилі. Причому плавне збільшення перерізу хвилеводу, що конструктивно приводить до рупора, тільки покращує узгодження його (хвилеводу) з вільним простором. Отже, якщо антена узгоджена з трактом, то коефіцієнт відбиття $\Gamma = 0$ і $Z_{\text{вх}} = Z_0$, припускаючи, що тракт працює в одномодовому режимі. Наявність же будь-яких відображень призводить до низки негативних наслідків, включно зі зниженням ККД живильного фідера, порушенням стабільності роботи генератора, спотворенням інформації, що передається, зниженням рівня допустимої потужності тощо. Причому, рупорна антена здатна забезпечувати приблизно подвійний діапазон хвиль перекриття, хоча, справедливості заради, діапазонність такої рупорної антени обмежується хвилеводом, що живить її. Саме тому (через широку діапазонність рупорних антен, простоту їхньої конструкції та інші позитивні характеристики) такі антени знаходять широке застосування не тільки в техніці антенних вимірювань, а й можуть гідно експлуатуватися і в технічній сфері георозвідки з вимірювання характеристик вторинного електромагнітного поля в процесі георадіолокаційної приповерхневої діагностики Землі.

Зазвичай в реальних умовах експлуатації більшість георадарів мають повітряний зазор між антенним блоком і діагностованою землею поверхнею. Тому часто прагнуть до ліквідації (або зменшення) такого зазору з багатьох причин (передусім енергетичних, шумових тощо), домагаючись у такий спосіб нібито істотного зниження коефіцієнта відбиття від межі дотику повітряного простору з півсферою земної поверхні. Для забезпечення ж необхідної умови узгодження із землею півсферою можна в ділянці зазору застосувати шарувату, екрановану від зовнішніх індустриальних та інших електромагнітних перешкод, діелектричну вставку (як ЧС у вигляді якоїсь лінзи), в якій прилеглий шар до апертури антени відповідає електричним параметрам повітряного середовища (заповнюючи в такий спосіб нібито «небажаний» повітряний зазор), а непарно кратний чвертьхвильовий шар, прилеглий до поверхні землі і необхідний для узгодження, зобов'язаний відповідати хвильовому опору $Z_{\text{нр.стр}}$:

$$Z_{\text{нр.стр}} = (Z_0 \cdot Z_x)^{1/2},$$

де: $Z_{\text{нр.стр}}$ – характеристичний (хвильовий) опір «просвітлювальної» структури у вигляді чвертьхвильового трансформатора;

$Z_0 = |E/H| = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2} = 120\pi \approx 377 \text{ Ом}$ – хвильовий опір вільного простору;

Z_x – апріорно заданий (корельований з даними рис. 3) хвильовий опір діагностованого приповерхневого шару Землі з μ і ϵ , що визначається як $(\mu_0 \mu/\epsilon_0 \epsilon)^{1/2}$. Причому бажано мати цілий арсенал таких «просвітлювальних лінз», що апріорно моделюють потенційно мінливий характер шаруватого ґрунту

Висновки. Викладені аспекти приповерхневої діагностики Землі за допомогою електромагнітного глибинного її зондування зі змінним набором «лінз проясненої оптики», що орієнтовані на успішне виявлення локальних неоднорідностей, сприяють реалізації позитивної тенденції підвищення результативності в процесі розв'язання геофізичних задач розпізнавання демаскувальних параметрів об'єктів дослідження, перш за все зі сфери георозвідки. При цьому, стрімко розвиваючись, сучасні експериментальні методи, способи та пристрої, включно з теоретичними розробками, наприклад, у вигляді публікації [18], уже впритул підійшли до успішної реалізації не лише геофізичних задач глибинного розпізнавання з високим рівнем достовірності, а й до задач георадарної променевої томографії [9].

Список використаних джерел:

1. Рейтинг країн світу за рівнем урбанізації. *Гуманітарний портал: Дослідження. Центр гуманітарних технологій, 2006-2023* (остання редакція: 04.10.2023). URL: <https://gtmarket.ru/ratings/urbanization-index>.

-
2. Ю.С. Тарасенко. Транспортна система як об'єкт критичної інфраструктури в реаліях техносфери високоурбанізованої території. *4-а міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні транспортні технології»*, Харків, 27-28 листопада 2023 р.: *Тези доповідей*. – Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 115-118.
 3. Закон України «Про критичну інфраструктуру» № 1882-IX від 16.11.2021р. *Голос України*. 14 груд. 2021 (№ 236).
 4. Закон України «Про основні засади забезпечення кібербезпеки України». Документ 2163-VIII (Відомості Верховної Ради (ВВР), 2017, № 45, ст.403), чинний, редакція від 15.12.2021
 5. Підповерхнева радіолокація. М.І. Фінкельштейн, В.І. Карпукін, В.А. Кутєв, В.М. Метьюлкін; за ред. М.І. Фінкельштейна. М.: Радіо і зв'язок. 1994. 215 с.
 6. В.К. Хмелевський. Геофізичні методи дослідження земної кори. Міжнародний університет природи, суспільства і людини «Дубна», 1997р.
 7. Ю.С. Тарасенко. Фізичні основи радіолокації [Текст]: навч. Посіб. Т 19. Д.: «Пороги». 2011. 487 с.
 8. Marina S. Sudakova, Evgeniya V. Terentieva, Alexey Yu. Kalashnikov. Searching and Measurement of Functional Voids by Means of Gpr Tomography by the Example of Two Columns. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2017. 13(1) 94-109, Volume 13, Issue 1. pp. 94-109.
 9. М.С. Судакова, М.Л. Владов. Сучасні напрямки георадіолокації. *Вісн. ун-ту. Сер.4.Геологія*. 2018. № 2. С. 3-12.
 10. Шуман В.М. Електродинаміка і відгук геосередовища на вплив зовнішніх електромагнітних полів. *Геофіз. Журн.* 2023. 35, № 5. С. 129-149.
 11. Ю.С. Акініна, С.В. Тюрін. Елементи теорії автоматів: навчальний посібник. В: ФДБОУ ВО «ВДТУ». 2017. 184 с.
 12. Yurii Ratushniak. The “black box” model of intelligent decision support system in the process of designing the electronic editions for tablet computers. *Інтернет-журнал «Наукознавство»* № 6, листопад–грудень 2013. Рр. 2-13.
 13. Кошелев О.В. Про надсвітлові швидкості хвиль у сучасній геодезії та фізиці. *Віст. внз. Геодезія та аерофотозйомка*. 2011. № 4. С. 11-18.
 14. Рекомендація МСЕ-R P.527-6 (09/2021) Електричні характеристики земної поверхні. Серія Р, Поширення радіохвиль. ІТУ 2022. Міжнародний союз електрозв'язку. Електронна публікація. Женева, 2022 р. с. 31.
 15. Шуман В.М. Магнітотелуричний імпеданс: фундаментальні моделі та нові підходи. *Геофіз. Журн.* 2010. №. 32, № 3. С. 18-28.
 16. Шуман В.М. Сучасні електромагнітні зондувальні системи: стан, тенденції розвитку, нові ідеї та задачі. *Геофіз. журн.* 2012. 34, № 4. С. 282-294.
 17. Козар О. В. Метод зв'язаних хвильових товщин – універсальний метод синтезу інтерференційних антивідбивних покриттів (π -структури). *Вісн. ун-ту. Фіз. Астрон.* 2020. № 6. С. 92-98.
 18. Шварцбург А.Б. Дисперсія електромагнітних хвиль у шаруватих і нестационарних середовищах (точно розв'язувані моделі). *Успіхи фізичних наук*. 2000. Том 170, № 12. С. 1297-1324.

References:

1. *Reytnyh krayin svitu za rivnem urbanizatsiyi /Humanitarnyy portal: Doslidzhennya [Elektronnyy resurs] // Tsentri humanitarnykh tekhnolohiy, 2006-2023 (ostannya redaktsiya: 04.10.2023).* [Ranking of countries by urbanization level / Humanitarian portal: Research [Electronic resource] // Center for Humanitarian Technologies, 2006-2023 (last modified: 04.10.2023).] URL: <https://gtmarket.ru/ratings/urbanization-index>.
2. Yu.S. Tarasenko. (2023). *Transportna systema yak obyekt krytychnoyi infrastruktury v realiyakh tekhnosfery vysokourbanizovanoi terytoriyi. 4-a mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiya “Intelektualni transportni tekhnolohiyi”*, Kharkiv, 27-28 lystopada 2023 r.: *Tezy dopovidey*. [Transport system as an object of critical infrastructure in the realities of the technosphere of a highly urbanized territory. 4th International Scientific and Technical Conference “Intelligent Transport Technologies”, Kharkiv, November 27-28, 2023: Abstracts] – Kharkiv: UkrDUZT, 2023. S. 115-118.
3. *Zakon Ukrayiny. (2021). Pro krytychnu infrastrukturu № 1882-IX vid 16.11.2021r. Holos Ukrayiny. 2021. 14 hrud.* [Law of Ukraine. On Critical Infrastructure No. 1882-IX of November 16, 2021. Voice of Ukraine. December 14.] (№ 236).
4. *Zakon Ukrayiny “Pro osnovni zasady zabezpechennya kiberbezpeky Ukrayiny”. 2017. Dokument 2163-VIII (Vidomosti Verkhovnoyi Rady (VVR), № 45, st.403), chynnyy, redaktsiya vid 15.12.2021* [Law of Ukraine “On the Basic Principles of Ensuring Cybersecurity of Ukraine”. Document 2163-VIII (Bulletin of the Verkhovna Rada (Jubilee), 2017, No. 45, Art. 403), current, edition of 15.12.2021]
5. *Pidpoverkhneva radiolokatsiya. [Subsurface radar] (1994). M.I. Finkel'shteyn, V.I. Karpukhin, V.A. Kutuyev, V.M. Met'olkin; za red. M.I. Finkel'shteyna. M.: Radio i zv'yazok. 1994. 215 s.*
6. V.K. Khmelevskyy. (1997). *Heofizychni metody doslidzhennya zemnoyi kory. Mizhnarodnyy universytet pryrody, suspil'stva i lyudyny “Dubna”*. [Geophysical methods of studying the Earth's crust. Dubna International University of Nature, Society and Man, 1997.]

-
7. Yu.S. Tarasenko. (2011). *Fizychni osnovy radiolokatsiyi* [Physical foundations of radar] [Tekst]: navch. Posib. T 19. – D.: “Porohy”, 2011. 487 s.
 8. Marina S. Sudakova, Evgeniya B. Terentieva, Alexey Yu. Kalashnikov. (2017). *Se arching and Measurement of Functional Voids by Means of Gpr Tomography by the Example of Two Columns*. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 13(1) 94-109, Volume 13, Issue. pp. 94-109.
 9. M.S. Sudakova, M.L. Vladov. (2018). *Suchasni napryamky heoradiolokatsiyi*. [Modern directions of georadiolocation] Visn. un-tu. Ser.4.Heolohiya. № 2. S. 3-12.
 10. Shuman V.M. (2013). *Elektrodynamika i vidhuk heoseredovyshcha na vplyv zovnishnikh elektromahnitnykh poliv*. [Electrodynamics and response of the geoenvironment to external electromagnetic fields]. Heofiz. Zhurn. 35, № 5. S. 129-149.
 11. Yu.S. Akinina, S.V. Tyurin. (2017). *Elementy teoriiy avtomativ* [Elements of automata theory]: navchalnyy posibnyk. V: FDBOU VO “VDTU”. 184 s.
 12. Yurii Ratushniak. (2013). *The “black box” model of intelligent decision support system in the process of designing the electronic editions for tablet computers*. Internet-zhurnal “Naukovedennya” Vyp. 6, lystopad–hruden 2013. Rr. 2-13.
 13. Koshelyev O.V. (2011). *Pro nadsvitlovi shvydkosti khvyl u suchasniy heodeziyi ta fizytsi*. [On FTL wave speeds in modern geodesy and physics]. Vist. vnz. Heodeziya ta aerofotozyomka. № 4. S. 11-18.
 14. *Rekomendatsiya MSE-R P.527-6 (09/2021) Elektrychni kharakterystyky zemnoyi poverkhni Seriya P, Poshyrennya radiokhvyl. ITU 2022. Mizhnarodnyy soyuz elektrovyvazku. Elektronna publikatsiya*. [Recommendation ITU-R P.527-6 (09/2021) Electrical characteristics of the earth's surface. Series P, Radio wave propagation. ITU 2022. International Telecommunication Union. Electronic publication]. Zheneva, 2022 r. s. 31.
 15. Shuman V.M. (2010). *Mahnitotelurychnyy impedans: fundamentalni modeli ta novi pidkhody*. [Magnetotelluric impedance: fundamental models and new approaches]. Heofiz. Zhurn. №. 32, № 3. S. 18-28.
 16. Shuman V.M. (2012). *Suchasni elektromahnitni zondovalni systemy: stan, tendentsiyi rozvytku, novi ideyi ta zadachi*. [Modern electromagnetic sensing systems: state of the art, development trends, new ideas and tasks]. Heofiz. zhurn. 34, № 4. S. 282-294.
 17. Kozar O. V. (2020). *Metod zvyazanykh khvylovykh tovshchyn – universalnyy metod syntezy interferentsiynykh antyvidbyvnykh pokryttiv (p-struktury)*. [The method of coupled wave thicknesses is a universal method for the synthesis of interference-reflective coatings (π -structures)]. Visn. un-tu. Fiz. Astron. № 6. S. 92-98.
 18. Shvartsburh A.B. (2000). *Dypersiya elektromahnitnykh khvyl u sharuvatykh i nestatsionarnykh seredovyshchakh (tochno rozvyazuvani modeli)*. [Dispersion of electromagnetic waves in layered and unsteady media (exact models)]. Uspikhy fizychnykh nauk. № 170, № 12. S. 1297-1324.