

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА МЕТОДИ РОЗРАХУНКІВ
У БУДІВНИЦТВІ**

Збірник наукових праць

Випуск 6

Луцьк – 2017

У збірнику висвітлюються результати експериментально-теоретичних досліджень будівельних матеріалів і конструкцій, технологій їхнього виготовлення та експлуатації, теорії опору елементів будівельних конструкцій зовнішнім впливам, методів їхнього розрахунку.

Призначений для наукових працівників, спеціалістів проектних установ і виробничих підприємств будівельної галузі, докторантів, аспірантів і студентів вищих навчальних закладів.

Редакційна колегія:

Головний редактор - **Шваб'юк В.І.**, д.т.н., професор (Луцький НТУ);
Заступник редактора - **Максимович В.М.**, д.ф.-м.н., професор (Луцький НТУ);
Відповідальний секретар - **Андрійчук О.В.**, к.т.н. (Луцький НТУ);

Бабич Є.М., д.т.н., професор (Національний університет водного господарства та природокористування); **Белятинський А.О.**, д.т.н., професор (Національний авіаційний університет); **Бондарський О.Г.**, к.т.н., доцент (Луцький НТУ); **Делявський М.В.**, д.т.н., професор (Луцький НТУ); **Жданюк В.К.**, д.т.н., професор (Харківський національний автомобільно-дорожній університет); **Іванченко Г.М.**, д.т.н., професор (Київський національний університет будівництва і архітектури); **Славомир Карась** доктор інженерії (Люблінська політехніка, Польща); **Максимович О.В.**, д.т.н., професор (Луцький НТУ); **Пастернак Я.М.**, д.ф.-м.н., доцент (Луцький НТУ); **Пустьюльга С.І.**, д.т.н., професор (Луцький НТУ); **Савенко В.Я.**, д.т.н., професор (Національний транспортний університет); **Солодкий С.Й.**, д.т.н., професор (Національний університет "Львівська політехніка"); **Трач В.М.**, д.т.н., професор (НУВГП); **Ужегова О.А.**, к.т.н., доцент (Луцький НТУ).

Зареєстрований Державною реєстраційною службою України
(свідоцтво серія КВ, № 20340-10140Р від 31.05.2013 р.).

Включений Міністерством освіти і науки України до переліку наукових фахових видань України (Наказ МОН України, № 747 від 13.07.2015 р.).

Матеріали збірника рекомендовані до друку на засіданні Вченої ради Луцького національного технічного університету (протокол № 6 від 07 лютого 2017 р.).

Адреса редакції: 43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56, Луцький НТУ, кафедра "Промислове та цивільне будівництво", e-mail: lntu_pcb@ukr.net, телефон (0332) 26-24-60.

УДК 625.7

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МЕТОДУ ГЕОРАДІОЛОКАЦІЇ В ДІАГНОСТИЦІ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ

PHYSICAL BASIS OF GPR METHOD IN PAVEMENT DIAGNOSTICS

Процюк В.О., асистент (Луцький національний технічний університет, м. Луцьк)

Protsiuk V.O., assistant (Lutsk national technical university, Lutsk)

В статті розглянуті та порівняні існуючі методи діагностики дорожніх одягів. Описано метод діагностики, що заснований на випромінюванні електромагнітних імпульсів у конструкцію дорожнього одягу. Охарактеризовано фізичні основи методу георадіолокації.

The article considered and compared to existing diagnostic methods of pavements. The method of diagnosis, based on the emission of electromagnetic pulses in the construction of pavement. Characterized physical basis of the georadiolocation method.

Ключові слова: діагностика, георадіолокація, дорожній одяг, електромагнітна хвиля, відбиття, заломлення, дифракція, загасання.

Keywords: diagnostic, georadiolocation, pavement, electromagnetic wave, reflection, refraction, diffraction, attenuation

Вступ

Діагностика дорожнього одягу є основною складовою в процесі експлуатації автомобільних доріг. Від точної і оперативної інформації про стан шарів покриття, основи та земляного покриття залежить призначення «правильних» заходів щодо утримання автомобільної дороги у задовільному стані. А це дозволяє забезпечувати всі необхідні транспортно-експлуатаційні характеристики дороги.

Найбільш поширеними в Україні методами по діагностиці стану конструкції дорожнього одягу є методи, що базуються на

візуальному (поверхневому) обстеженні, а також методи, що базуються на інструментальних вимірюваннях.

Згадані методи набули свою популярність через простоту і економічність. Проте мають ряд недоліків (відсутність можливості дослідити деформаційні та механічні характеристики і товщини шарів конструкції без їх руйнування). На зміну їм приходять методи оперативної діагностики (відеореєстрація, вібродіагностика, підповерхнева георадіолокація).

Георадіолокація є безконтактним високочастотним електромагнітним методом, що володіє рядом переваг перед іншими геофізичними методами. Основними перевагами є велика продуктивність методу і швидкість отримання достовірної якісної інформації.

Аналіз останніх досліджень

Значний внесок у розвиток інженерних задач методів георадіолокації внесли такі вчені: М.Л. Владов, В.В. Капустін, В.В. Копейкін, О.М. Куліжніковим, Г.П. Почанін, А.В. Старовойтов, М.І. Фінкельштейн, З.Б. Хакієвим, В.А. Явна, Т. Saarenketo та інші.

Постановка мети і завдань досліджень

Робота георадара заснована на використанні класичних принципів радіолокації [1]. Передавальною антеною георадара у конструкції дорожнього одягу випромінюються електромагнітні надширокосмугові імпульси метрового і дециметрового діапазону електромагнітних хвиль, які мають тривалість в одиниці і долі наносекунди. Випромінюваний імпульс у середовищі відбивається від границь об'єктів або неоднорідностей, які мають різні електричні властивості, а саме: електропровідність, магнітну провідність і діелектрична проникність. Такими границями в досліджуваних середовищах є, контакти між шарами нового і старого асфальтобетонів, контакти між сухими і водонасиченими ґрунтами, рівень ґрунтових вод, контакти між породами різного літологічного складу, між породою і матеріалом штучного походження, між мерзлими і талими ґрунтами, між корінними і осадовими породами і т.д. Імпульси, які відбиті від границь середовищ, проходять зворотно через середовище і сприймається приймальною антеною георадара. Георадар перетворює їх в цифровий вид і вони записується у цифровий файл на електронний носій портативного комп'ютера [2, 3]. Принцип георадіолокації схематично зображений на рис. 1.

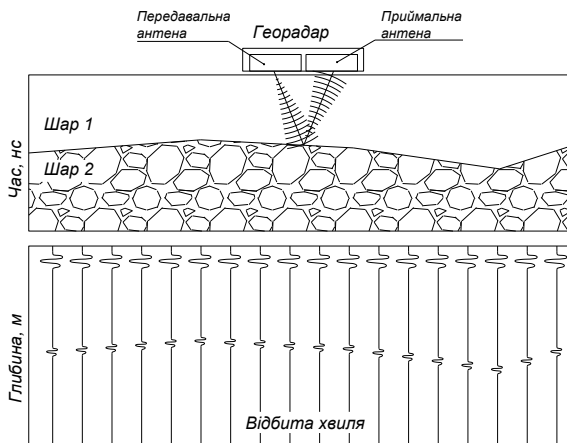


Рис. 1 – Принцип роботи георадару

Основними величинами, які вимірюються під час георадарних дослідженнях, є час проходження електромагнітної хвилі від джерела до границі середовищ (або об'єкту) і назад до приймальної антени георадару, а також амплітуда цього імпульсу.

Найбільш важливими параметрами середовищ, що характеризують поширення електромагнітних хвиль в них, є швидкість поширення хвиль в середовищі і питоме загасання.

Для кожного матеріалу притаманна різна швидкість поширення електромагнітної хвилі, а тому за вимірним часом проходження хвиль і відомими фізичними властивостями матеріалу досліджуваних середовищ, є можливість дізнатися про будову об'єкта.

Швидкість поширення електромагнітних хвиль залежить від відносної діелектричної проникності і відносної магнітної проникності досліджуваного середовище. Частота прикладеного електромагнітного поля також впливає на швидкість. Швидкість поширення описується рівнянням [4]:

$$V = \frac{C}{\sqrt{\mu_{відн.} \cdot \epsilon_{відн.}}}, \quad (1)$$

де V – швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі в середовищі, м/нс;

C – швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі у вакуумі ($C=0,3$ м/нс);

$\mu_{відн.}$ – магнітна проникність середовища, од.;

$\varepsilon_{\text{відн.}}$ – діелектрична проникність середовища, од.

Для більшості середовищ, що зустрічаються під час діагностики дорожніх одягів, відносна магнітна проникність дорівнює одиниці ($\mu_{\text{відн.}}=1$), а впливом частоти можна знехтувати (враховуючи припущення про малі втрати у середовищі). Таким чином отримаємо спрощену формулу для визначення швидкості поширення хвиль в середовищі [5]:

$$V = \frac{C}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad (2)$$

де ε – дійсна частина відносної комплексної діелектричної проникності в середовищі, од.

Ще одним важливим параметром є питома загасання в середовищі – це загасання електромагнітної хвилі на одиницю пройденого шляху. В залежності від частоти випромінювання георадару сигнал по-різному може загасати в середовищі і суттєво може впливати на глибину дослідження. А тому це потрібно враховувати для вирішення різних завдань дослідження.

Для практичних розрахунків під час дослідження ґрунтового середовища питома загасання електромагнітної хвилі визначається за формулою [5]:

$$A = 1637 / (\rho_{\omega} \cdot \sqrt{\varepsilon'}), \quad (3)$$

де A – питома загасання, дБ/м;

ρ_{ω} – питомий опір для центральної частоти спектру випромінювального імпульсу, Ом/м.

Важливими характеристиками швидкості електромагнітних хвиль є те, що відбиті хвилі, які приймає георадар, виникають на границях середовищ з різними швидкостями. Окрім того роздільна здатність хвильових методів визначається довжиною хвилі λ , яка знаходиться за формулою:

$$\lambda = V/f, \quad (4)$$

де f – частота розповсюдження електромагнітної хвилі, Гц.

Здебільшого в георадіолокаційних дослідженнях використовують хвилі з діапазоном частот від 50 до 3000 МГц, а тому довжина хвиль в геологічному середовищі варіюється від 1 см до 2 м. При цьому роздільна здатність георадіолокаційного зондування становить $\frac{1}{2}$ довжини хвилі, тобто, приблизно, від 1 см

до 1 м [5].

У георадіолокаційних дослідженнях дорожніх одягів розрізняють такі основні типи хвиль:

- пряма хвиля – хвиля, яка проходить від передавальної антени безпосередньо до приймальної по повітрю зі швидкістю $V=30$ см/нс і по ґрунті зі швидкістю $V=V_1$, яка буде різною для кожного типу ґрунту. Перше відображення на радарограмі буде прямою хвилею. Пряма хвиля залежить від конструкції антени і поверхні середовища;

- відбита хвиля – це хвилі відбиті від границь шарів або локальних об'єктів в шарах дорожнього одягу або ґрунті земляного полотна. Відбита хвиля йде від границі розділу середовищ з різними електричними властивостями в напрямку, зворотному до випромінюваної хвилі;

- дифрагована хвиля – хвиля, яка утворюється в результаті явища дифракції. Дифракція – це явище, яке виникає в тому випадку, коли розмір перешкоди менший за довжину хвилі, що розповсюджується. Дифракція найчастіше спостерігаються коли хвиля перетинає в поперечному напрямку витягнуті об'єкти (труби, арматуру, кабелі).

Дифракція на радарограмі зображується у вигляді характерної гіперболи дифракції. Об'єкт, від якого виникла дифрагована хвиля, знаходиться в точці, що відповідає вершині гіперболи (Рис. 2).

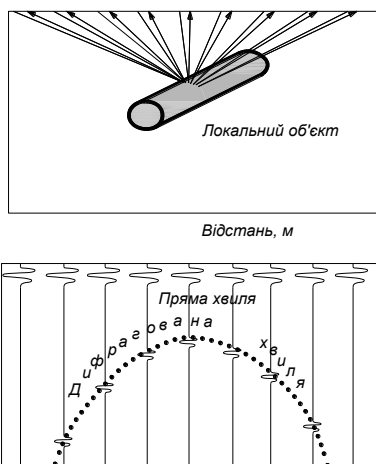


Рис. 2 – Процес утворення дифрагованих хвиль

Визначивши швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі в середовищі і вимірявши час проходження хвилі, можемо визначити товщину цього шару h за формулою [5]:

$$h = \frac{(V \cdot t)}{2}, \quad (5)$$

де h – товщина шару, см;

V – швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі, см/нс;

t – час проходження хвилі, нс.

У практиці, поширення хвиль розглядається в рамках законів геометричної оптики. Для цього методу притаманні принципи Ферма, принцип Гюйгенса – Френеля і закон Снелліуса [5]. Відповідно, під час розповсюдження в середовищі з електромагнітною хвилею відбуваються наступні процеси:

- відбиття від границь розділу середовищ з різною відносною діелектричною проникністю.

- заломлення на границі розділу середовищ з різною відносною діелектричною проникністю. Важливим випадком заломлення є заломлення під критичним кутом, коли заломлена хвиля розповсюджується паралельно межі розділу середовищ.

- дифракція – явище виникає коли розмір перешкоди менший за довжину хвилі, що розповсюджується. На цьому явищі заснований пошук локальних об'єктів.

- загасання – загальне зменшення амплітуди зонduючого сигналу під час проходження його в середовищі.

Тепер більш детально зупинимось на кожному процесі.

Відбиття електромагнітних хвиль характеризується коефіцієнтом відбиття. Під час нормального падіння хвилі на границю двох шарів з різною діелектричною проникністю коефіцієнт відбиття обчислюється за формулою [5]:

$$K_{\text{від.}} = \frac{(\sqrt{\varepsilon'_1} - \sqrt{\varepsilon'_2})}{(\sqrt{\varepsilon'_1} + \sqrt{\varepsilon'_2})}, \quad (6)$$

де ε'_1 і ε'_2 – діелектрична проникність відповідного першого і другого шарів середовища.

Заломлення електромагнітних хвиль характеризується коефіцієнтом заломлення. Коефіцієнт заломлення (або проходження через границю) дорівнює [5]:

$$K_{зал.} = 1 - K_{від.} = 2 \cdot \sqrt{\epsilon'_2} \cdot (\sqrt{\epsilon'_1} + \sqrt{\epsilon'_2}). \quad (7)$$

Під час дворазового проходження через границю, наприклад, при відбитті від глибшої границі сумарне зменшення амплітуди сигналу дорівнює коефіцієнту проходження в квадраті:

$$K_{зал.}^2 = 1 - K_{від.}^2. \quad (8)$$

Дифракція електромагнітних хвиль.

Суть дифракції полягає в тому, що відповідно згідно з принципом Гюйгенса, кожна точка фронту хвилі являє собою елементарне вторинне джерело хвиль. На невеликій (меншій за довжиною хвилі) розміром поверхні об'єкта ці елементарні джерела додаються. У результаті весь об'єкт являє собою вторинне джерело електромагнітних хвиль в середовищі [5]. Це надзвичайно важливе для георадіолокаційних досліджень явище, так як дозволяє проводити пошук локальних об'єктів за допомогою виявлення на радарограмі вторинних джерел випромінювання. Також дифракція дозволяє визначити глибину залягання локального об'єкта і швидкість поширення електромагнітних хвиль у середовищі над об'єктом [5].

Загасання електромагнітних хвиль. Під загасанням найчастіше розуміють загальне зменшення амплітуди зонduючого сигналу під час проходження його через середовище до відбиття з границею і назад до приймача.

Фактори, що викликають зменшення амплітуди сигналу [5]:

- відбиття і заломлення на проміжних границях;
- втрати, пов'язані з провідністю середовища;
- геометрична розбіжність фронту хвилі.

Висновок

У сучасній практиці застосування георадарних технологій в процесі діагностики дорожнього одягу є важливим питанням, так як дозволяє отримати більш точну і оперативну інформацію про існуючий стан шарів та матеріалів конструкції. Проте на даному етапі застосування георадарних технологій існує ще багато обмежень, які необхідно вирішувати для досягнення поставлених задач по діагностиці.

Література

1. Изюмов В.К. Теория и методы георадиолокации: Учеб. пособие / В.К. Изюмов, С.В. Дручин, А.С. Вознесенский. – М. : Издательство «Горная книга», Издательство Московского государственного горного университета, 2008. – 196 с.
2. Георадары, дороги - 2000: Материалы Международного научно-технического семинара. – Архангельск: Изд-во Архангельск, гос. техн. ун-та, 2000. – 104 с.
3. Велли Ю.Я. Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах / Велли Ю.Я., Докучаева В.В., Федоров Н.Ф., Л.: «Стройиздат», 1977. – 652с.
4. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / [О.В. Сытник, И.А. Вязьмитинов, А.Ю. Гринев и др.] ; Под ред. А.Ю. Гринева. – М. : Радиотехника, 2005. – 416 с.
5. Владов М.Л. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М.: МГУ, 2004. – 153 с.

З М І С Т

Andriichuk O.V., Uzhehov S.O.	Steel fiber concrete – effective material in road building	3
Андрушков В.І.	Про один підхід до розрахунку оболонки довільної форми в прямокутних координатах з урахуванням неоднорідності її матеріалу по серединній поверхні	9
Батракова А.Г., Урдзик С.Н.	Влияние положения нагрузки на напряженно- деформированное состояние конструкции дорожной одежды	16
Богомолов В.А., Жданюк В.К., Цинка А.А., Богомолов С.В.	Сравнение некоторых схем приложения нагрузки при лабораторных испытаниях асфальтобетонів	26
Бондаренко Л.П.	Дослідження впливу різних станів дорожнього покриття на екологічний стан придорожньої смуги	37
Возний С.П.	Перспективи розвитку цементобетонних доріг в Україні	47
Вяткін К.І., Нестеренко С.Г., Мамонов К.А.	Геоінформаційні технології для транспортної галузі міського будівництва	56
Гавриш В.С.	Экспериментальные исследования по определению уровня акустического и вибрационного загрязнения на автомобильных дорогах	64
Доненко І.В., Якімцов Ю.В., Джамалов А.А.	Проблеми організаційно-технологічного планування будівельних проектів, як симбіоз сучасних вимог та застарілих підходів	70
Дробишинець С.Я., Бондарський О.Г., Павлів О.І.	Аналіз безпеки дорожнього руху на автомобільній дорозі т-03-02 Шацького району Волинської області	82

Дробишинець С.Я., Киричук М.В.	Перспективи використання сталефібробетону в дорожньому будівництві	90
Жданюк В.К., Костін Д.Ю., Арінушкіна О.О.	Дослідження впливу комбінованих в'язучих на властивості щебенево-піщаних сумішей ...	99
Жгаллі Ш., Резніков А.О.	Многокритериальная оптимизация сэндвич параболических панелей под действием комбинированной нагрузки	108
Ільчук Н.І., Шафранська О.З.	Технічний стан шляхопроводів міста луцька в умовах їх реконструкції	118
Івко А. В., Лук'янова Т. В.	Організаційні, статистичні та правові аспекти вирішення проблеми об'єктів незавершеного будівництва	125
Коваленко Л.О.	Оцінка забруднення атмосферного повітря населених пунктів	133
Мудрий І.Б.	Використання малогабаритної стрілової техніки при зведенні будівель та споруд	140
Мусяненко І.В.	Вписание максимальных радиусов в тангенциальный ход трассы автомобильной дороги при полевом трассировании	146
Павленко Н.В.	Вплив геометричних параметрів транспортних розв'язок на визначення меж смуги відведення землі на стадії інженерно- геодезичних вишукувань	152
Пасічник О.С., Пасічник Р.В., Мельник О.В.	Застосування сучасних покриттів підлог для цивільних будівель і промислових споруд	161
Пасічник Р.В., Пасічник О.С., Войтович П.О.	Огляд досліджень впливу пожежного навантаження в приміщеннях	169
Перова О.С.	Аналіз використання мобільного датчика для вимірювання коефіцієнта зчеплення на злітно-посадковій смузі	177

Приймак О.В., Задорожнікова І.В., Дмитрук О.І., Кузицький І.Т.	Аналіз можливості використання енергетичних палів у якості низькопотенційних джерел енергії для тепло- холодопостачання	186
Процюк В.О.	Фізичні основи методу георадіолокації в діагностиці дорожніх одягів	192
Романюк Н.Г., Процюк В.О.	Економічна доцільність впровадження плати за проїзд на автомобільних дорогах	200
Савенко В.Я., Петрович В.В., Каськів В.І., Каськів С.В.	Розроблення норм на габіонні конструкції ...	205
Сиваченко Л.А., Реутский И.А., Ровский А.М.	Цепные агрегаты многоцелевого назначения для переработки влажных сырьевых материалов	213
Сиваченко Т.Л.	Измельчители ударного действия с рельефной поверхностью рабочих органов ...	222
Смирнова Н.В.	Основные положения расчета максимально возможных расстояний видимости в свете фар	229
Сорочук Н. І.	Математичне моделювання та управління якістю очистки поверхневих стоків з автомобільних доріг	237
Талах Л.О., Коваль М.І.	Екологічні засади при будівництві та реконструкції автомобільних доріг	245
Талах Л.О., Коваль М.І.	Проектування зупинок громадського транспорту	252
Тимченко О.Н.	Анализ деформации сооружений и методов наблюдения за ними	260
Ткаченко І. В., Бризгалін І.С., Козлов В.В.	Особливості створення баз даних автомобільних доріг з застосуванням геоінформаційних технологій	268

Трач В.М., Панчук О.Ю.	Стійкість оболонок обертання подвійної кривини	275
Угненко Е.Б.	Анализ и оценка однородности инженерно-геодезических измерений	283
Ужвиева Е.Н.	Построение сети триангуляции и существующие методы уравнивания геодезических сетей	290
Чернишев Д.О.	Сучасна парадигма організаційно-технологічної надійності будівництва як засіб забезпечення ефективної реалізації будівельних проектів	296
Шваб'юк В.І., Ротко С. В., Шваб'юк В.В.	До проблеми розробки нових некласичних теорій згину оболонок, пластин та балок (огляд)	304
Шимчук О.П., Бондар А.П.	Перспективи використання модифікаторів у дорожньому будівництві	312