УКРАЇНА

(19) UA (11) 128271 (13) C2

(51) МПК (2024.01)
G01N 33/42 (2006.01)
G01B 15/02 (2006.01)
G01V 3/12 (2006.01)
G01S 13/88 (2006.01)
G01V 3/08 (2006.01)
E01C 23/00
G01R 29/08 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(21) Номер заявки: **a 2021 07445**

(22) Дата подання заявки: **20.12.2021**

(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **23.05.2024**

(41) Публікація відомостей про заявку: **21.06.2023, Бюл.№ 25**

(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: **22.05.2024, Бюл.№ 21**

(72) Винахідник(и):
Батраков Дмитро Олегович (UA),
Батракова Анжеліка Геннадіївна (UA),
Антюфеєва Марія Станіславівна (UA)

(73) Володілець (володільці):
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ,
вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002 (UA),
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В.Н. КАРАЗІНА,
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022 (UA)

(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:
Nondestructive diagnostics and detection of subsurface cracks in non-rigid pavements with GPR / D. O. Batrakov et al. // Diagnostyka. May, 20. 2021. Vol. 22. Issue 2. P. 85 - 95. URL: https://doi.org/10.29354/diag/137915 (дата звернення: 05.04.2024)
The effect of secondary reflections on the quality of layers thickness assessment using UWB GPR signals / D. O. Batrakov et al. // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Kharkiv, Ukraine, 21-25 September 2020 / IEEE Xplore. November, 11. 2020. P. 1132 – 1135. URL: https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252812 (дата звернення: 05.04.2024)
UWB Signal Processing for the Road Pavements Assessment / D. Batrakov et al. // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 02-06 July 2019 / IEEE Xplore. October, 24. 2019. P. 192-195
Combined GPR data analysis technique for diagnostics of structures with thin near-surface layers / D. O. Batrakov et al. // Diagnostyka. 2018. Vol. 19. Issue 3. P. 11 - 20. URL: http://dx.doi.org/10.29354/diag/91489 (дата звернення: 05.04.2024)
POCHANIN G. P. Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying/ G. P. Pochanin et al. // Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications / edited by J. M. Taylor. Boca Raton: CRC Press, 2016. P. 19 - 64

UA 128271 C2

(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:
Батраков Д. О. Обработка импульсных сигналов при толщинометрии биологических тканей и в неразрушающем контроле. Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна. Серія "Радіофізика та електроніка". 2016. Вип. 26. С. 48 - 52
Батраков Д. О., Батракова А. Г., Головин Д. В. и др. Определение толщин слоев дорожной одежды методом георадиолокационного зондирования. Физические Основы Приборостроения. 2014. Том 3. № 2. С. 46 - 57
Inverse scattering problem in the polarization parameters domain for isotropic layered media: solution via Newton-Kantorovick iterative technique / N. P. Zhuck et al. Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 1994. Vol. 8. Issue 6. P. 759 - 777. URL: http://dx.doi.org/10.1163/156939394X00551 (дата звернення: 05.04.2024)
Solution of a general inverse scattering problem using the distorted Born approximation and iterative technique / D. Batrakov et al. Inverse Problems. 1994. Vol. 10. P. 39 - 54
UA 118409 C2, 10.01.2019
UA 118736 C2, 25.02.2019
US 2008129316 A1, 05.06.2008
US 6429802 B1, 06.08.2002
US 2004239338 A1, 02.12.2004
US 2015268218 A1, 24.09.2015

(54) СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ОЦІНКИ ТОВЩИНИ ШАРІВ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ, ЯКІ МАЮТЬ СЛАБКИЙ РІВЕНЬ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО КОНТРАСТУ, ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕОРАДАРА

(57) Реферат:

Заявлений спосіб належить до неруйнівного контролю поточного стану при будівництві та експлуатації автомобільних доріг. Спосіб підвищення роздільної здатності оцінки товщини шарів дорожніх одягів зі слабким з електродинамічної точки зору контрастом за допомогою застосування даних про стан поляризації відбитих сигналів полягає в тому, що на першому етапі вимірювань передавальну і приймальні антени розмішують над металевим листом на поверхні досліджуваної конструкції спочатку для вимірювання відбитого надширокосмугового імпульсу при похилому падінні і паралельній поляризації, а потім проводять реєстрацію відбитого імпульсу на перпендикулярній поляризації, після цього лист металу забирається з поверхні дорожнього покриття і повторюються вимірювання коефіцієнта відбиття від дорожнього одягу на паралельній і перпендикулярній поляризаціях, після чого отримані дані зберігаються в комп'ютері. Далі проводиться обробка отриманих даних в два етапи. На етапі 1, відповідно до алгоритму калібрування, знаходиться розподіл в часі імпульсу, що падає на конструкцію, що зондується; в результаті в комп'ютері зберігається розподіл в часі нормованих відбитих сигналів на двох ортогональних поляризаціях. На етапі 2 знаходиться вирішення завдання товщинометрії згідно з алгоритмом розв'язання оберненої задачі в області значень поляризаційних параметрів. Завдяки застосуванню георадара для отримання даних щодо коефіцієнтів відбиття імпульсного сигналу від досліджуваної структури на різних поляризаціях в сукупності з алгоритмами вирішення обернених завдань в області поляризаційних параметрів підвищується точність та надійність визначення границь розподілу шарів покриття, які мають слабкий рівень електродинамічного контрасту та їх діелектричної проникності.

Винахід належить до галузі експлуатації та контролю поточного стану автомобільних доріг з одягами нежорсткого типу і може бути використана для підвищення надійності та роздільної здатності георадарних даних і, як наслідок, оцінки товщини шарів, які мають слабкий рівень електродинамічного контрасту і на цій підставі забезпечити більш достовірні оцінки поточного стану конструкцій автомобільних доріг з покриттям нежорсткого типу під час будівництва та експлуатації.

Георадари, завдяки випромінюванню та прийому надширокосмугових імпульсних сигналів дозволяють за допомогою алгоритмів обробки даних проводити визначення товщини та діелектричної проникності шарів покриття та оцінку властивостей матеріалів, знаходять широке застосування в дорожній галузі під час контролю якості дорожніх одягів нежорсткого типу на етапі будівництва та для моніторингу поточного стану конструкцій автомобільних доріг, що знаходяться в експлуатації

Для контролю якості нових та поточного стану таких, що знаходяться в експлуатації дорожніх одягів нежорсткого типу, застосовуються як прямі (такі, що передбачають локальне руйнування конструкції), так і неруйнівні методи. До перших належить відомий спосіб контролю якості покриття дороги та основи [Смеси асфальтобетонные дорожные и аэродромные, дегтебетонные дорожные, асфальтобетон и дегтебетон. Методы испытания. - Государственный стандарт Союза ССР. ГОСТ 12801-84, Постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 23 февраля 1984 г. № 16 срок введения установлен с 01.01.85], який передбачає проведення вирубки з дорожнього покриття (та основи) зразків-вирубків прямокутної форми або висвердлення циліндричних кернів. Вирубку проводять за допомогою пневмомолотка, а циліндричні керни висвердлюють на всю товщину покриття (верхній і нижній шар разом) за допомогою самохідної або причіпної бурової установки (наприклад, IE-180) і потім вже розділяють шари в лабораторії. Кількість висвердлених кернів та розміри вирубок призначають залежно від типу асфальтобетону (дьогтебетону) за максимальним розміром зерен та необхідної для випробувань кількості зразків. В такому разі діаметр кернів D повинен бути: при відборі проб з піщаного асфальтобетону (дьогтебетону) не менше 50 мм, з дрібнозернистого - не менше 70 мм і з крупнозернистого - не менше ніж 100 мм.

Суттєвими недоліками цього способу є необхідність буріння (руйнування) покриття та дуже висока собівартість робіт.

Серед неруйнівних методів відомий метод визначення деформативних властивостей та товщини асфальтобетонних шарів дорожнього одягу, влаштованих на етапі будівництва або ремонту [Новаковський Д.М. Визначення товщини та модуля Юнга асфальтобетонних шарів дорожнього одягу методом неруйнівної діагностики / Д.М. Новаковський, І.В. Кіяшко. // Автошляховик України: науково-виробничий журнал. - 2010. - № 3 (215) травень - червень. - С. 40-43], який полягає в застосуванні розробленої авторами методики визначення товщини та модуля Юнга асфальтобетонних шарів дорожнього одягу за аналізом параметрів розповсюдження поверхневих хвиль, що виникають під дією відомого тестового імпульсного навантаження.

Недоліками такого методу є:

- неможливість визначення або оцінки значення модуля Юнга та товщини шарів асфальтобетонного покриття, яке вже деякий час знаходиться в експлуатації;

- велика собівартість проведення досліджень, оскільки для проведення контролю потрібні як створення змінних в часі великих навантажень, так і реєстрація поверхневих хвиль Релея на різних відстанях від центра навантаження за допомогою набору датчиків, що потребують нерухомого та якісного зчеплення з поверхнею покриття.

Найбільш близьким до способу, що заявляється, є Патент США [SYSTEM IDENTIFICATION AND ANALYSIS OF SUBSURFACE RADAR SIGNALS" Inventor: Robert L. Lytton, Bryan, Tex., Patent Number: 5,384,715; Date of Patent: Jan. 24, 1995.], який полягає в тому, що: a. - випромінюючо-приймальну антену систему радіолокатора підповерхневого зондування розміщують над поверхнею дорожнього одягу в напрямку до неба (тобто таким чином, щоб до приймальної антени не надходили сигнали, які відбиті від навколишніх предметів); b. - проводять запис в комп'ютер радіоімпульсу, який за таких умов відповідає власним шумам передавальної системи (генератора та антени), таким чином проводячи процес калібрування; c. - розміщують великий металевий лист на поверхні дорожнього покриття, яке буде досліджуватися, та розміщують передавальну антену таким чином, щоб випромінювання відбувалося в напрямку металевого листа, а приймальну антену орієнтують на прийом відбитого сигналу і реєструють відбитий сигнал; d. - за допомогою комп'ютерних програм вираховують сигнал прямого проходження, що був зареєстрований на етапі b. із сигналу, що

відбитий від металевого листа і зареєстрований на етапі d. На цьому закінчується етап калібрування і починається етап вимірювання.

Недоліком такого способу є неможливість відновлення товщини та діелектричної проникності шарів покриття, що мають слабкий рівень контрасту. Це пов'язано з тим, що неможливо відрізнити імпульсні сигнали від границь з незначними відмінностями у значеннях діелектричної проникності.

В основу винаходу, що пропонується, поставлено задачу удосконалення способу отримання і обробки даних, а саме підвищення точності та надійності визначення границь розподілу шарів покриття, які мають відносно слабкий рівень електродинамічного контрасту, а також значень їх діелектричної проникності, шляхом вимірювання відбитого надширокосмугового імпульсу від листа металу при похилому падінні і паралельній поляризації, а потім реєстрації відбитого імпульсу на перпендикулярній поляризації, після чого лист металу забирають з поверхні дорожнього покриття і повторюють вимірювання коефіцієнта відбиття тепер вже від дорожнього одягу на паралельній і перпендикулярній поляризації, після чого отримані дані зберігаються в комп'ютері.

На першому етапі вимірювань лист металу розміщують на поверхні досліджуваної конструкції, а передавальну і приймальну антени - над металевим листом, спочатку відповідно до фіг. 1 для вимірювання відбитого надширокосмугового імпульсу при похилому падінні і паралельній поляризації (компоненти вектора електричного поля падаючої $A_{||}$ та відбитої $R_{m,||}$ хвиль знаходяться в площині, яка паралельна площині падіння) і реєстрації відбитого імпульсу; потім передавальна і приймальна антени повертаються на кут 90 градусів відповідно до фіг. 2 для реєстрації відбитого імпульсу на перпендикулярній поляризації (компоненти вектора електричного поля падаючої хвилі $A_{\perp}$ і відбитої хвилі $R_{m,\perp}$ знаходяться в площині, яка перпендикулярна площині падіння); після цього лист металу забирається з поверхні дорожнього покриття і повторюються вимірювання коефіцієнта відбиття тепер вже від дорожнього одягу на паралельній і перпендикулярній поляризаціях ($R_{k,||}$, $Rk,_{\perp}$) відповідно до фіг. 1 і фіг. 2; отримані дані зберігаються в комп'ютері. Далі проводиться обробка отриманих даних в два етапи.

На першому етапі відповідно до алгоритму калібрування, який запропонований у [Батраков Д.О. Определение толщин слоев дорожной одежды методом георадиолокационного зондирования / Д.О. Батраков, А.Г. Батракова, Д.В. Головин, О.В. Кравченко, Г.П. Почанин // Физические Основы Приборостроения. - 2014. - Том 3. - № 2. - С. 46-57; Pochanin, G. P.; Masalov, S. A.; Ruban, V. P.; Kholod, P. V.; Batrakov, D. O.; Batrakova, A. G.; Urdzik, S. N.; Pochanin, O. G., Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying, in: Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications. CRC Press-Taylor & Francis Group, London, 2016. 20-65. ISBN 9781466586574-CAT# K20299] знаходиться розподіл в часі імпульсу, що падає на конструкцію, яка зондується; для цього обчислюються відношення коефіцієнтів відбиття від конструкції до цих же коефіцієнтів відбиття від листа металу на відповідних поляризаціях:

$$R_{n,||} = \frac{R_{k,||}}{R_{m,||}}; \quad R_{n,\perp} = \frac{R_{k,\perp}}{R_{m,\perp}}, \qquad (1)$$

де: $R_{n||}$, $R_{k||}$, $R_{m||}$ - відповідні коефіцієнти відбиття для паралельної поляризації, $R_{n\perp}$, $R_{k\perp}$, $R_{m\perp}$ коефіцієнти відбиття для ортогональної поляризації.

В результаті в комп'ютері зберігається (з фізичної точки зору) розподіл в часі нормованих відбитих сигналів (імпульсів) на двох ортогональних поляризаціях. На наступному етапі знаходиться вирішення завдання товщинометрії згідно з алгоритмом розв'язання оберненої задачі в області значень поляризаційних параметрів, який був запропонований у (Batrakov D.O., Zhuck N.P. Inverse Scattering Problem in the Polarization Parameters Domain for Isotropic Layered Media: Solution via Newton-Kantorovich Iterative Technique. Journal of Elec-tromagnrtic Waves and Applications. - June 1994. - Vol.8, № 6. - P.759-779.). Рішення задачі полягає в знаходженні поправки до деякого початкового наближення (розподілу діелектричної проникності), яке може бути знайдено, наприклад, з рішення задачі визначення товщини шарів відповідно до алгоритму першого етапу. В такому випадку це рішення використовується як початкове наближення $\varepsilon_{aux}(R)$ до шуканого профілю (розподілу) діелектричної проникності $\varepsilon_p(R)$, яке потім уточнюється, для чого вводиться поправка $\eta(\vec{R}) = \varepsilon_p(\vec{R}) - \varepsilon_{aux}(\vec{R})$, значення якої обчислюється з рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР):

$$x_j + \sum_{n=1}^{N} a_{jn} x_n = \psi_j;\ (j = 1,2...N), \qquad (2)$$

де:

$$a_{jn} = w_n \int_{V_P} L^{(j)}\left(\vec{R}_H, \vec{R}'\right) L^{(n)*}\left(\vec{R}_H, \vec{R}'\right) \frac{dV}{\alpha w\left(\vec{R}'\right)};$$

$$\psi_j = \int_{V_P} L^{(j)}\left(\vec{R}_H, \vec{R}'\right) \frac{q\left(\vec{R}'\right)}{\alpha w\left(\vec{R}'\right)} dV'$$

$$L\left(R_H, R'\right) = p\left(R_H\right) G_{ee}\left(R_H, R'\right) E_{aux}\left(R'\right)\left[\frac{ik_0 c}{4\pi}\right];$$

$G_{ee}(R_H,R')$, $E_{aux}(R')$ - відповідно функція Гріна та вектор напруженості електричного поля в області середовища, що зондується;

$\vec{p}(\vec{R})$ - вектор, що визначає поляризацію, на якій реєструється поле в точці спостереження, а $\vec{R}_H$ - радіус-вектор точки спостереження поза досліджуваним середовищем;

Vp, $\vec{R}'$ - область простору, де проводиться зондування та радіус-вектор точок цієї області;

w_n, α, $w\left(\vec{R}\right)$ - відповідно невід'ємні сталі та функція, значення яких обираються згідно відомому алгоритму (Batrakov D.O., Zhuck N.P. Solution of a General Inverse Scattering Problem Using the Distorted Born Approximation and Iterative Technique. Inverse Problems. - Feb., 1994. - vol. 10, № 1. - P.39-54),

j - індекс, що відповідає номеру вимірювання.

Далі знаходиться значення поправки (відхилення від $\varepsilon_{aux}(\vec{R})$ згідно формулі

$$\eta\left(\vec{R}\right) = \frac{1}{\alpha w\left(\vec{R}\right)}\left[q\left(\vec{R}\right) + \sum_{j=1}^{N} w_j L^{(j)*}\left(\vec{R}_H, \vec{R}'\right) x_j\right], \qquad (3)$$

де:

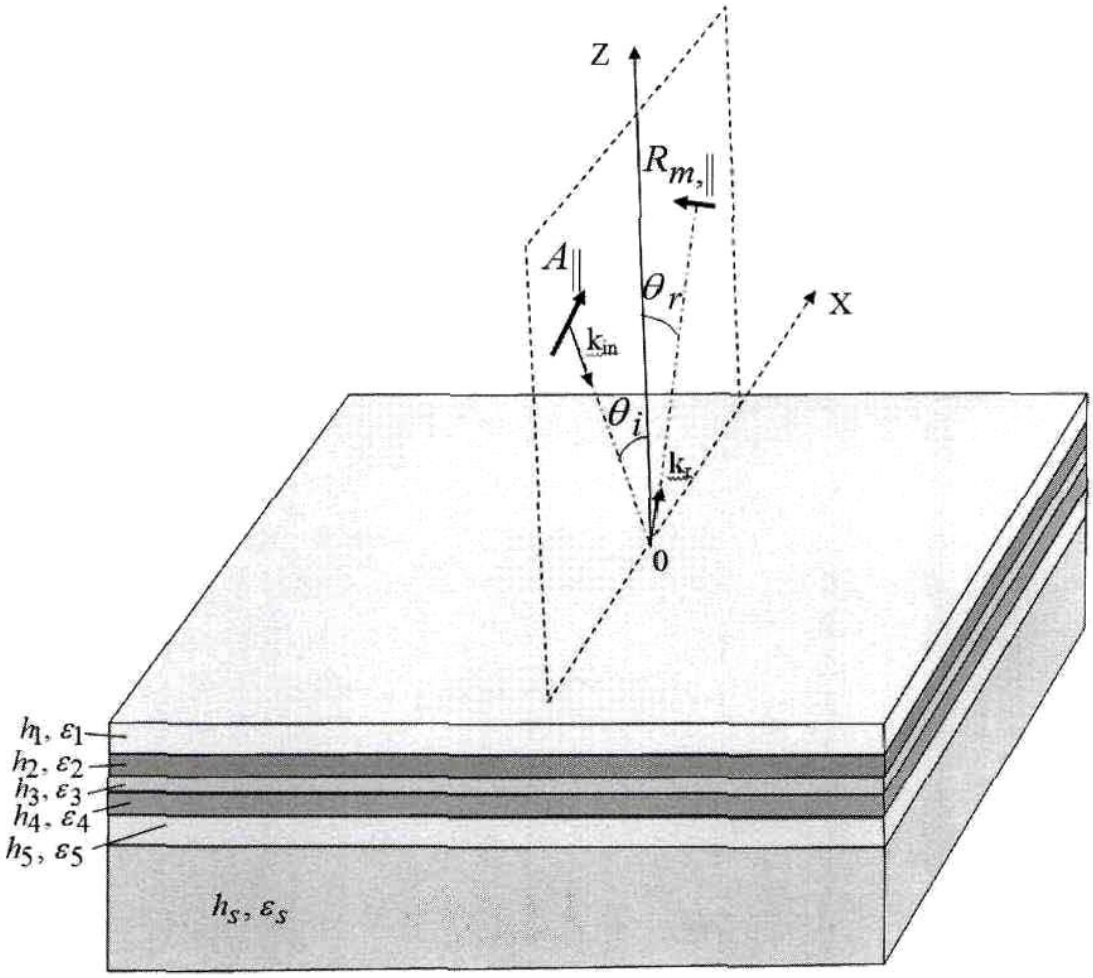
$$q\left(\vec{R}\right) = \sum_{i=1}^{N} w_j L^{(j)*}\left(\vec{R}_H, \vec{R}\right)\left[U_{in}^{(j)}\left(\vec{R}_H\right) - U^{(j)}\left(\vec{R}_H, \vec{R}'\right) x_j\right],$$

та остаточно визначається шуканий розподіл $\varepsilon_p\left(\vec{R}\right) = \varepsilon_{aux}\left(\vec{R}\right) - \eta(\vec{R})$.

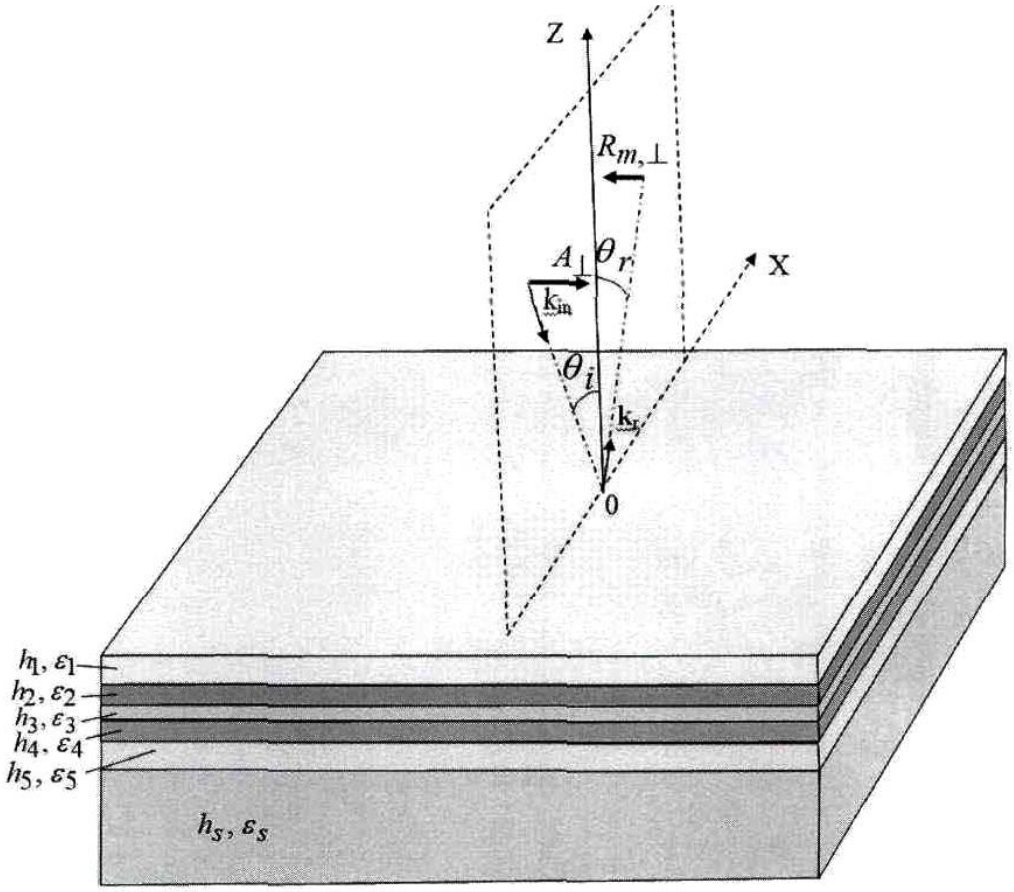
Таким чином, завдяки описаним вище змінам алгоритмів обробки даних неруйнівного контролю підвищується точність та надійність визначення границь розподілу шарів покриття, які мають відносно слабкий рівень електродинамічного контрасту, а також значень їх діелектричної проникності. Знання цих параметрів дозволяє ефективно з точки зору кошторису спланувати і виконати відновлювальні роботи на автомобільних дорогах загального користування.

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Спосіб підвищення роздільної здатності результатів оцінки товщини шарів дорожніх одягів, які мають слабкий рівень електродинамічного контрасту, за допомогою застосування даних про стан поляризації відбитих сигналів, який **відрізняється** тим, що на першому етапі вимірювань лист металу розміщують на поверхні досліджуваної конструкції, а передавальну і приймальну антени - над металевим листом, спочатку для вимірювання відбитого надширокосмугового імпульсу при похилому падінні і паралельній поляризації, а потім - реєстрації відбитого імпульсу на перпендикулярній поляризації, після цього лист металу забирається з поверхні дорожнього покриття і повторюються вимірювання коефіцієнта відбиття від дорожнього одягу на паралельній і перпендикулярній поляризаціях, після чого отримані дані зберігаються в комп'ютері, далі проводиться обробка отриманих даних в два етапи: на першому етапі, відповідно до алгоритму калібрування, визначають розподіл в часі імпульсу, що падає на конструкцію, яка зондується; в результаті в комп'ютері зберігається розподіл в часі нормованих відбитих сигналів на двох ортогональних поляризаціях; на наступному етапі вирішують завдання товщинометрії згідно з алгоритмом розв'язання оберненої задачі в області значень поляризаційних параметрів.


Z
$R_{m,\parallel}$
$A_{\parallel}$
θ_r
X
k_{in}
θ_i
k_r
0
h_1, ε_1
h_2, ε_2
h_3, ε_3
h_4, ε_4
h_5, ε_5
h_s, ε_s

Фіг. 1



Фіг. 2

Комп'ютерна верстка Л. Ціхановська

ДО "Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій", вул. Дмитра Годзенка, 1, м. Київ – 42, 01601