

УДК 621.574.4

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОРАДАРОВ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ В ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЯХ

Д. О. Батраков¹, М. С. Антюфеева¹, А. Г. Батракова², А. В. Антюфеев¹,
Фан Хаоцзе¹

1- Харьковський національний університет імені В. Н. Каразіна, факультет радіофізики, біомедицинської
електроніки і комп'ютерних систем
пл. Свободи 4, Харків, 61022, Україна

2 - Харьковський національний автомобільно-дорожній університет.
ул. Ярослава Мудрого 25, Харків, 61001, Україна

Поступила в редакцію 19 апреля 2017 г.

В работе рассмотрена задача позиционирования и идентификации подповерхностных дефектов (трещин) в нижних слоях покрытия дорожных одежд нежесткого типа. Для решения предложено использовать поляризационное состояние зондирующих и, соответственно, отраженных сигналов - регистрацию так называемых кросс-поляризационных компонент сигналов. Предложены модифицированные алгоритмы определения глубины залегания подповерхностной трещины, а также компарационный алгоритм для оценки ширины раскрытия трещины. Приведены результаты как численного моделирования с помощью разработанных компьютерных программ, так и результаты лабораторных исследований. Также представлены результаты экспериментов по обследованию автомобильных дорог Харьковской области.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: георадары, подповерхностное зондирование, автомобильные дороги

В роботі розглянуто задачу позиціонування та ідентифікації підповерхневих дефектів (тріщин) в нижніх шарах покриття дорожніх одягів нежорсткого типу. Для вирішення запропоновано використовувати поляризаційний стан зондуючих і, відповідно, відбитих сигналів - реєстрацію так званих крос-поляризаційних компонент сигналів. Запропоновано модифіковані алгоритми визначення глибини залягання підповерхневої тріщини, а також компаративний алгоритм для оцінки ширини розкриття тріщини. Наведено результати як чисельного моделювання за допомогою розроблених комп'ютерних програм, так і результати лабораторних досліджень. Також представлені результати експериментів з обстеження автомобільних доріг Харківської області.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: георадари, підповерхнєве зондування, автомобільні дороги

The paper deals with the problem of positioning and identification of subsurface defects (cracks) in the lower layers of non-rigid type road pavements. Using the polarization state of probing and, respectively, reflected signals, that is the registration of the so-called cross-polarization signal components is proposed for the problem solution. Modified algorithms for determining the subsurface crack depth are proposed, as well as a comparative algorithm for estimating the width of a crack. The results of numerical modeling by developed software and the laboratory studies are presented. The experimental results of the road survey of the Kharkiv region are also presented.

KEY WORDS: GPR, subsurface sensing, public roads

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее распространенных дефектов, возникающим в покрытиях автомобильных дорог в процессе эксплуатации являются трещины. При этом трещины, выходящие на поверхность, легко обнаруживаются современными средствами видеодиагностики, что позволяет провести автоматизированную оценку их влияния на текущее состояние покрытий и построить достаточно точные прогнозы дальнейшей деградации покрытия [1,2]. В то же время, возможность детального изучения подповерхностных дефектов и, в частности, трещин, появилась сравнительно недавно. Эта возможность обусловлена появлением и развитием в первую очередь таких средств дистанционного мониторинга конструкций дорожных одежд (КДО) как георадары [3-6]. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с другими современными техническими средствами неразрушающего контроля покрытий автомобильных дорог [7,8]. Например, так называемый дефлектометр падающего груза (FWD) в отличие от георадаров, не позволяет осуществлять диагностику при движении лаборатории [9]. Современные георадары позволяют осуществлять мониторинг состояния покрытия при движении автомобиля – лаборатории даже со скоростью транспортного потока. Анализ получаемых данных (временного профиля, или набора профилей – радарограммы) может проводиться оператором, но тогда результаты во многом будут зависеть от его опыта и квалификации [3]. По мере дальнейшего развития возможностей аппаратуры и вычислительных средств были предложены методы и алгоритмы для обработки первичных данных для получения количественных характеристик слоев конструкции – числовых значений

диэлектрической проницаемости и толщины [8, 10-12]. Применение этих технологий и алгоритмов открывает возможности для последующей оценки состояния дорожного покрытия и построения прогнозов хода процесса разрушения покрытия. Также были предложены средства и алгоритмы обработки данных для обнаружения подповерхностных неоднородностей [13-15]. Эти методы предполагают регистрацию сигналов, отраженных от исследуемой среды с внутренней неоднородностью и дальнейшую обработку этих сигналов различными специальными методами. Они дают возможность определения диэлектрической проницаемости среды (по углу раскрыва гиперболы) и глубины залегания неоднородности (по времени задержки отраженного сигнала). Однако такие алгоритмы не позволяют одновременно восстанавливать характеристики плоскостных сред (численные значения толщины и диэлектрической проницаемости слоев) и параметры включений, в частности подповерхностных трещин (глубина залегания, геометрические размеры поперечного сечения). Для решения этих задач было предложено использовать информацию, которую содержит состояние поляризации отраженного импульсного сигнала [14,15]. Важными преимуществами такого подхода являются возможности осуществления неразрушающей диагностики дорожных одежд с дефектами при одновременном определении параметров слоев покрытия (диэлектрической проницаемости и толщины). Существенно, что современные электронные компоненты, созданные алгоритмы обработки информации и разработанное программное обеспечение позволяют осуществлять мониторинг дорожных покрытий с дефектами в режиме непрерывного движения автомобиля - лаборатории.

В настоящей работе приведены результаты решения задачи позиционирования и идентификации подповерхностных трещин в нижних слоях дорожной одежды. Актуальность поставленной задачи связана с высокой удельной стоимостью строительства и ремонта автомобильных дорог и существенным удешевлением процедуры мониторинга текущего состояния дорожных одежд.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ДИФРАКЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТРЕЩИНЕ В АСФАЛЬТОБЕТОННОМ ПОКРЫТИИ

Рассмотрим задачу зондирования конструкции дорожной одежды, которая имеет четырехслойную структуру (рис. 1 а): два слоя асфальтобетонного покрытия (L_1, L_2) различного состава; два слоя зернистого материала (L_3 и L_4). В нижнем слое покрытия на некоторой глубине находится трещина ТР.

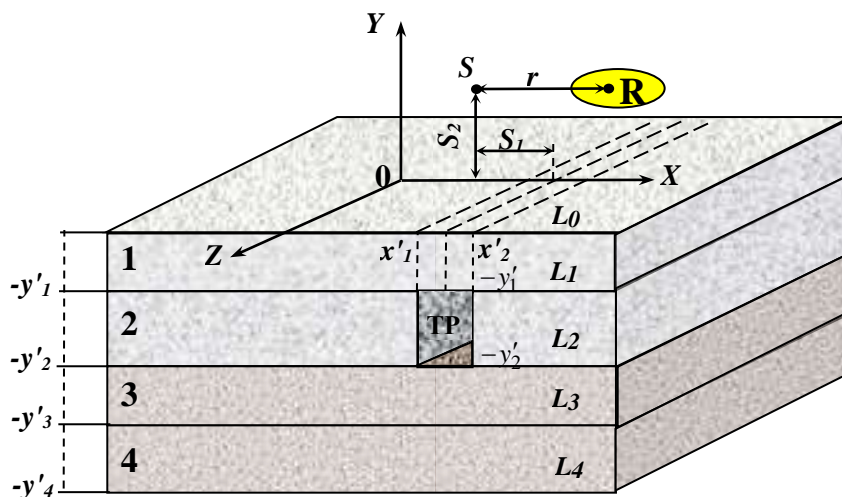


Рис. 1. Геометрия задачи и вид лабораторной модели

С электродинамической точки зрения ставится задача анализа электромагнитного поля, рассеянного такой структурой, при разных параметрах ширины трещины ($x'_2 - x'_1$), глубины расположения трещины ($-y'_1$), высоты расположения антенной системы над поверхностью конструкции S_2 , продолжительности и поляризации зондирующего импульса.

При решении задачи используем следующие предположения:

- а) влиянием на отраженный сигнал неровности поверхности слоев дорожного покрытия можно пренебречь;
- б) вариацией толщины каждого слоя также можно пренебречь, что подтвердили результаты моделирования и лабораторных экспериментов;
- в) трещина представляет собой прямоугольный параллелепипед.

Пусть из верхнего полупространства $L_0 = \{(x, y, z) : y > 0\}$ (воздух) (рис. 1), имеющего диэлектрические свойства вакуума, на плоскую границу раздела сред $y = 0$ падает импульсный сигнал, источник которого S .

Нижнее полупространство представляет собой четыре однородных слоя диэлектрика ($L_i = \{(x, y, z) : -y_{i-1} \leq y < -y_i\}, i = 1 \div 4, y_0 = 0$), за исключением некоторой, ограниченной по направлениям x и y и бесконечной в направлении z , прямоугольной в поперечном сечении области $TP = \{(x, y, z) : -y'_1 \leq y \leq -y'_2, x'_1 \leq x \leq x'_2\}$ (трещина).

Точки наблюдения, в которых определяются параметры электромагнитного поля, сосредоточены в некоторой ограниченной подобласти R полупространства L_0 . Эта область отвечает положению приемной антенны георадара.

С математической точки зрения ставится задача отыскания решений системы векторных дифференциальных уравнений (уравнений Максвелла) с соответствующими начальными и граничными условиями. В декартовой системе координат уравнения Максвелла имеют вид:

$$\begin{cases} \operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon \varepsilon_0}; & \operatorname{div} \mathbf{B} = 0; \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; & \operatorname{rot} \mathbf{B} = \frac{\varepsilon \mu}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu \mu_0 (\sigma \mathbf{E} + \mathbf{j}_i(t)), \end{cases} \quad (1)$$

где \mathbf{E} – напряжённость электрического поля, \mathbf{B} – магнитная индукция,

ε_0 – диэлектрическая проницаемость в Ф/м, μ_0 – магнитная проницаемость в Гн/м,

$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{j}_s$, σ – удельная электрическая проводимость в См/м, \mathbf{j}_s – сторонние источники,

ε – относительная диэлектрическая проницаемость, c – скорость света в вакууме,

$\mu_0 = 1$ – относительная магнитная проницаемость.

Начальные условия по сути задают форму во времени зондирующего СШП сигнала (видеоимпульса) – $\mathbf{j}_i(t)$.

Импульсное электромагнитное поле, рассеянное подповерхностными неоднородностями, формируется волной, которая возбуждается зондирующим импульсом. В рассмотренной задаче в качестве возбуждающего антенну сигнала используется импульс тока, временная зависимость которого имеет вид гауссовского импульса:

$$I(t) = A \exp\left(-[(t-t_0)/t_C]^2\right) \quad (2)$$

где t_0 – сдвиг по временной оси от начала координат;

t_C – время спада исходного гауссовского импульса;

A – амплитудный коэффициент.

Для решения задач зондирования дорожных одежд с учетом поглощения сигналов в реальных материалах целесообразно использовать импульсы с центральной частотой 0.9-1.2 ГГц.

При определении диэлектрических характеристик конструктивных слоев дорожной одежды сделаны дополнительные предположения:

а) слои асфальтобетона (L_1, L_2) и нижние слои (L_3, L_4) состоят из однородных изотропных немагнитных материалов;

б) трещина TP в геометрическом приближении представляет собой прямоугольный параллелепипед, также немагнитный и однородный во всех точках ($\mu_{TP} = 1, \varepsilon_{TP} = \text{const}_{TP}$);

При рассмотрении задачи в плоскости, ортогональной направлению движения георадара ее удобно считать двумерной.

Для проведения вычислений использовались программы, ранее описанные в [8,11,12].

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также обобщения опыта применения антенных блоков с антеннами типа «Бабочка» (рис. 2 а) и блока планарных щелевых антенн Вивальди (блок КП) для регистрации кросс-поляризационной компоненты (рис. 2 б) [14,15], разработан алгоритм позиционирования и идентификации подповерхностных трещин.



Рис. 2. Антенные блоки для дефектоскопии дорожных одежд: а) планарный; б) щелевой.

Основными этапами алгоритма позиционирования и идентификации подповерхностных трещин являются:

а) калибровка антенных блоков с целью выбора эталонного участка (без трещин и других подповерхностных дефектов) и записи соответствующих (эталонных) радарограмм;

б) получение исходных данных и их первичной обработки с целью улучшения качества полученной информации (удаление помех, фильтрация);

в) вычитание из эхо-профиля сигнала прямого прохождения с целью повышения достоверности результатов дальнейшей обработки;

г) оценка глубины залегания центра неоднородности (дефекта). В процессе выполнения этого этапа используются данные сканирования блоком АБ (определяются значения диэлектрической проницаемости и толщины слоев конструкции). В случае трещин шириной свыше 0,4 см. в слоях с диэлектрической проницаемостью более 5 и толщиной от 4 см возможна оценка координат нижней и верхней границ трещины (рис. 3);

д) оценка геометрических параметров – ширины трещины. Основу этого этапа составляет компарационный алгоритм, который заключается в сравнении полученных сигналов с сигналами из базы данных (сформированной по результатам лабораторных исследований). При этом основным критерием является «близость» сигналов, которая может оцениваться как оператором, так и с помощью программного вычисления невязки (квадрата разности временных распределений).



Рис. 3. Оценка и верификация глубины залегания границ трещины: а) окно монитора; б) фактическое значение

Решение задачи определения глубины залегания трещины нижнего слоя асфальтобетонного покрытия осуществляется в следующей последовательности:

а) определение диэлектрической проницаемости (ϵ_1) верхнего слоя над трещиной [8]:

$$\epsilon_1 = \epsilon_0 \frac{(1 - R_0)^2}{(1 + R_0)^2}, \quad (3)$$

где R_0 – коэффициент отражения от верхней границы покрытия, определяемый как $R_0 = \frac{A_0}{B_0}$;

б) измерение задержки первого сигнала, т.е. времени прохождения сигнала от антенны до нижней границы верхнего слоя (t_1);

в) вычисление глубины залегания трещины:

$$h_1 = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_1}} \left(\frac{t_2}{2} - \frac{t_1}{2} \right). \quad (4)$$

В (4) t_2 – время задержки сигнала от нижней границы верхнего слоя. Следует подчеркнуть, что определение диэлектрической проницаемости верхнего слоя и глубины залегания трещины проводятся по результатам измерений с помощью разных антенн. Это связано с тем, что такие слабоконтрастные объекты, как подповерхностные трещины, не позволяют использовать для их обнаружения и позиционирования стандартные антенные блоки георадаров, а требуют привлечения специализированных антенных блоков [11,14].

Задачу определения ширины трещины предлагается решать с помощью модификации компарационного алгоритма. Суть данного подхода в сравнении наблюдаемых (регистрируемых) данных с набором эталонных и вычислении соответствующей невязки:

$$N_i = \int_0^T (\bar{f}(t) - \bar{F}_i(t))^2 dt, \quad (5)$$

где $\bar{F}_i(t)$ – распределения эталонных сигналов (сигналов, отраженных от трещин с известными параметрами). С помощью операции выбора наименьшего из функционалов N_i делается заключение о ширине трещины. Основным результатам работы алгоритма являются: значение местоположения трещины, глубины ее залегания и ширины.



Рис. 4. Экспериментальная проверка адекватности модели: а) на дорогах общего пользования; б) на территории ХНУ им. В.Н. Каразина блоком TRF-1.

Экспериментальная проверка предложенных алгоритмов проводилась на автомобильных дорогах общего пользования (рис. 4 а) и на территории ХНУ (рис. 4 б).

При проведении экспериментальных исследований варьировалась:

а) диэлектрическая проницаемость материала слоя покрытия над дефектом путем применения слоев из разных материалов;

б) глубина залегания трещины путем изменения толщины покрытия над дефектом;

в) высота подповерхностной трещины путем изменения толщины слоя, содержащего трещину.

В результате обработки георадарных данных оценивались:

а) значение диэлектрической проницаемости слоя покрытия над трещиной, таблица 1;

б) глубина заложения трещины и ее высота.

Максимальная относительная ошибка измерений составила 5%. Анализ полученных результатов позволил подтвердить возможность обнаружения и идентификации трещин в нижних слоях покрытия с помощью совместного использования антенных блоков планарного и щелевого типов (рис. 2.)

Результатами экспериментальных исследований, проведенных на моделях дорожных одежд с применением антенного блока КП-1 георадара «Одяг-1» совместно с антенным блоком АБ, подтверждена адекватность модели и алгоритма обнаружения, позиционирования и идентификации подповерхностных трещин в слоях дорожного покрытия. Проверка адекватности методики дефектоскопии на автомобильных дорогах общего пользования подтвердила работоспособность алгоритмов при позиционировании и идентификации швов в цементобетонном основании. Относительная погрешность определения глубины заложения и высоты подповерхностных трещин составила от 3 % до 8 %.

Таблица 1. Оценка геометрических параметров подповерхностной трещины

Параметр	Значение параметра			
	фактическое		определенное методом обработки сигналов	
Глубина заложения трещины, см	5,5	6,9	5,4	7,02
Высота трещины, см	7,0	6,0	7,1	6,2

ВЫВОДЫ

Результатами экспериментальных исследований, проведенных на моделях дорожных одежд с применением антенного блока КП-1 георадара «Одяг-1» совместно с антенным блоком АБ георадара TRF-1 (рис. 4. б), подтверждена адекватность модели и алгоритма обнаружения, позиционирования и идентификации подповерхностных трещин в слоях дорожного покрытия. Проверка адекватности методики дефектоскопии на автомобильных дорогах общего пользования подтвердила работоспособность алгоритмов при позиционировании и идентификации швов в цементобетонном основании. Относительная погрешность определения глубины заложения и высоты подповерхностных трещин составила от 3 % до 8 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автомобильные дороги. Оценка и регистрация состояния дорожных покрытий и технических средств автомобильных дорог автоматизированными системами видеодиагностики: СОУ 45.2-00018112-080:2011. – [Действующий от 2012-03-01]. – К. : Государственная служба автомобильных дорог Украины (Укравтордор), 2012. – 45 с. – (Стандарт Организации Украины)
2. Кіяшко І.В. Використання систем відеодіагностики для оцінки стану поверхні та елементів облаштування автомобільних доріг / І.В. Кіяшко, Р.В. Смолянюк // Автошляховик України. – 2008. – № 6. – С. 23–30.
3. Ground penetrating radar, theory and applications / [Jol Harry M. (Editor)]. – Amsterdam : Elsevier B.V., 2009. – 508 p.
4. Saarenketo T. Road evaluation with ground penetrating radar / T. Saarenketo, T. Scullion // Journal of Applied Geophysics. – 2000. – Vol. 43. – P. 119–138.
5. Владов М.Л. Введение в георадиолокацию : учеб. пособие [для студ. высш. уч. завед.] / Владов М.Л., Старовойтов А.В. – М. : МГУ, 2004. – 153 с.
6. Вопросы подповерхностной радиолокации : коллективная монография / [под ред. А.Ю. Гринева]. – М. : Радиотехника, 2005. – 416 с.
7. Батракова А.Г. Оценка состояния дорожных одежд с привлечением георадарных технологий : монография / А.Г. Батракова. – Х. : ХНАДУ, 2013 – 152 с.
8. 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.
9. Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys : ASTM D 6433–11. – 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2011. – 49 p.
10. Cao Y. Pavement Evaluation using Ground Penetrating Radar : Final Report, March, 2008 / Y. Cao, B.B. Guzina, J.F. Labuz. – Minnesota : Department of Civil Engineering, University of Minnesota. – 2010. – 102 p.

11. Batrakov D.O. Hilbert transform application to the impulse signal processing / D.O. Batrakov, A.G. Batrakova, D.V. Golovin, A.A. Simachev // «UWBUSIS'2010» : 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 6-10 September, 2010, Sevastopol, Ukraine : Proceedings. – Sevastopol, 2010. – P. 113–115.
12. 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
13. Капустин В.В. Применение георадарного метода в квазиоднородных средах / В.В. Капустин, Р.Р. Денисов, Л.О. Мойшнен // «ЭМЗ-2011» : 5-я Всероссийская школа-семинар им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям земли : сб. материалов. – 2011. – Т. 2. – С. 343–346.
14. Пат. 81296 Україна, (51) МПК E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01) Спосіб виявлення та визначення місць знаходження у тому числі і підповерхневих тріщин в асфальтобетонному покритті / Батракова А.Г., Батраков Д.О., Почанін Г.П.; заявник та патентоутримувач Батракова А.Г., Батраков Д.О., Почанін Г.П.. – u201300256; заявл. 08.01.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12/2013.
15. Пат. 113916 Україна, (51) МПК E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01) Спосіб виявлення підповерхневих тріщин у асфальтобетонному покритті дороги під час руху діагностичної лабораторії в транспортному потоці / Батраков Д.О., Урдзік С.М., Почанін Г.П., Батракова А. Г.; заявник та патентоутримувач Батраков Д.О., Урдзік С.М., Почанін Г.П., Батракова А. Г. – a201511191; заявл. 13.11.2015; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6/2017