

Оглядова стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-31-02>

УДК 535.361:535.555:535.573+577.3.0

АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ДЕФЕКТОВ В ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЯХ С ПОМОЩЬЮ ГЕОРАДАРОВ (ОБЗОР. ЧАСТЬ I)

Д.О. Батраков

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4

Поступила в редакцию 24 октября 2019 г.

Актуальность проблемы развития технических средств (импульсных георадаров) и алгоритмов обработки сверхширокополосных сигналов следует из широкого спектра возможностей, которые дают эти средства неразрушающего контроля и дистанционного зондирования совместно с потенциалом современных вычислительных средств и программного обеспечения. Особый интерес в этой связи представляют результаты, полученные на основе использования различных эффектов, связанных с изменением состояния поляризации как первичных (зондирующих) импульсов, так и сигналов, отраженных от сложных многослойных сред для обнаружения дефектов в них. Это связано с возможностью не только быстрого обнаружения неоднородностей, но и с относительно небольшой себестоимостью таких работ.

Цель работы. Обзор различных технических средств (импульсных георадаров) и методов обработки сигналов для обнаружения различных внутренних неоднородностей в плоскостойких средах. К этим неоднородностям относят помимо различных элементов внутренних коммуникаций (кабели) и технических элементов (дренажные трубы) также и опасные внешне невидимые дефекты – подповерхностные трещины и расслоение (нарушение контакта между слоями).

Материалы и методы. В работе приведен обзор методов, которые разработаны, в том числе и автором, и предназначены для решения, в первую очередь, практических задач обнаружения подповерхностных неоднородностей и дефектов в плоскостойких средах. Физическим основанием для создания этих методов послужили результаты многолетних исследований автора, связанных с применением анализа поляризационного состояния сложных (в том числе и импульсных) сигналов, рассеянных различными объектами.

Результаты. Основу рассмотренных результатов составляют как научные статьи, так и патенты Украины на изобретения и полезные модели, полученные автором.

Выводы. Приведенный в статье обзор результатов и различных методов служит еще одним подтверждением широких возможностей, открываемых новыми средствами дистанционного зондирования и неразрушающего контроля. К этим средствам следует отнести не только собственно приборы (элементы получения первичных данных), но и алгоритмы обработки информации и программное обеспечение, объединенные в единую методологию сбора, обработки и последующего хранения данных о текущем состоянии обследуемых технических и природных объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: поляризационное состояние, импульсные георадары, неразрушающий контроль, дистанционное зондирование.

АЛГОРИТМИ ПОШУКУ ДЕФЕКТІВ В ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУДАХ ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕОРАДАРІВ. (ОГЛЯД. ЧАСТИНА I)

Д.О. Батраков

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 61022, м. Харків, м. Свободи, 4

Актуальність проблеми розвитку технічних засобів (імпульсних георадарів) і алгоритмів обробки надширококутних сигналів впливає з широкого спектру можливостей, які дають ці засоби неруйнівного контролю і дистанційного зондування спільно з потенціалом сучасних обчислювальних засобів і програмного забезпечення. Особливий інтерес у зв'язку з цим представляють результати, отримані на основі використання різних ефектів, пов'язаних зі зміною стану поляризації як первинних (зондуючих) імпульсів, так і сигналів, відбитих від складних багатоповушкових середовищ для виявлення дефектів в них. це пов'язано з можливістю не тільки швидкого виявлення неоднорідностей, але і з відносно невеликою собівартістю таких робіт.

Мета роботи. Огляд різних технічних засобів (імпульсних георадарів) і методів обробки сигналів для виявлення різних внутрішніх неоднорідностей в плоскошаруватих середовищах. До таких неоднорідностей відносять крім різних елементів внутрішніх комунікацій (кабелі) і технічних елементів (дренажні труби) також і небезпечні зовні невидимі дефекти - підповерхневі тріщини і розшарування (порушення контакту між шарами).

Матеріали та методи: в роботі наведено огляд методів, розроблених в тому числі і автором, які призначені для вирішення, в першу чергу, практичних завдань виявлення підповерхневих неоднорідностей і дефектів в плоскошаруватих середовищах. Фізичним підґрунтям для створення цих методів послужили результати

багаторічних досліджень автора, які пов'язані із застосуванням аналізу поляризаційного стану складних (в тому числі і імпульсних) сигналів, що розсіяні різними об'єктами.

Результати. Основу розглянутих результатів складають як наукові статті, так і патенти України на винаходи і корисні моделі, отримані автором.

Висновки. Наведений у статті огляд результатів і різних методів являє собою ще одне підтвердження широких можливостей, які відкриваються новими засобами дистанційного зондування і неруйнівного контролю. До цих засобів слід віднести не тільки власне прилади (елементи отримання первинних даних), але і алгоритми обробки інформації та програмне забезпечення, що об'єднані в єдину методологію збору, обробки і подальшого зберігання даних про поточний стан обстежуваних технічних і природних об'єктів.

Ключові слова: поляризаційний стан, імпульсні георадари, неруйнівний контроль, дистанційне зондування.

ALGORITHMS FOR SEARCHING DEFECTS IN ENGINEERING STRUCTURES USING GPR

(Review. Part I)

D. O. Batrakov

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Relevance of the problem of the development of technical means (GPR) and algorithms for processing ultra-wideband signals follows from the wide range of possibilities that these means of non-destructive testing and remote sensing provides, together with the potential of modern computing tools and software. Of particular interest in this regard are the results obtained by using various effects associated with a change in the polarization state of both primary (probing) pulses and signals reflected from complex multilayer media to detect defects in them. This is due to the possibility of not only quickly detecting heterogeneities, but also with the relatively low cost of such work.

The purpose of the work is a review of various technical means (pulsed georadars) and signal processing methods for detecting various internal inhomogeneities in plane-layered media. These heterogeneities include, in addition to various internal communications elements (cables) and technical elements (drainage pipes), also dangerous externally invisible defects - subsurface cracks and delamination (interruption of contact between the layers).

Materials and methods. The paper provides an overview of methods developed by the author, among others, which are designed to solve primarily the practical problems of detecting subsurface inhomogeneities and defects in plane-layered media. The physical basis for the creation of these methods was the result of many years of research by the author related to the analysis of the polarization state of complex (including pulsed) signals scattered by various objects.

Results. The basis of the considered results is made up of both scientific articles and patents of Ukraine for inventions and utility models obtained by the author.

Conclusions. The review of the results and various methods presented in the article is another confirmation of the wide possibilities offered by new means of remote sensing and non-destructive testing. These tools include not only the devices themselves (elements for obtaining primary data), but also information processing algorithms and software, combined into a single methodology for collecting, processing and subsequent storage of data on the current state of the examined technical and natural objects.

Key words: polarization state, pulsed ground penetrating radar, non-destructive testing, remote sensing.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых распространенных и в то же время опасных дефектов, возникающих в покрытиях автомобильных дорог в процессе эксплуатации, являются трещины. При этом трещины, которые выходят на поверхность, могут быть легко обнаружены современными средствами видеодиагностики. Это позволяет провести автоматизированную оценку их влияния на текущее состояние покрытий и построить достаточно точные прогнозы дальнейшей деградации дорожной одежды [1, 2]. В то же время возможность детального изучения внутренних неоднородностей и, в частности, трещин, появилась относительно недавно. Такая возможность обусловлена появлением и развитием в первую очередь новых средств дистанционного мониторинга конструкций дорожных одежд (КДО) – георадаров [3-6]. Эти приборы имеют ряд преимуществ по сравнению с другими современными техническими средствами неразрушающего контроля покрытий автомобильных дорог [7, 8]. Например, так называемый дефлектометр падающего груза (в иностранной литературе - FWD), в отличие от георадаров, не позволяет осуществлять диагностику во время движения лаборатории [9]. В то же время, современные георадары уже позволяют осуществлять получение данных о состоянии дорожной одежды при движении автомобиля-лаборатории даже со скоростью транспортного потока. Анализ полученных данных (временного профиля, или набора профилей – радарограмм) 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 дальнейшей оценки состояния дорожного покрытия и построения прогнозов хода процесса разрушения покрытия. Также были предложены средства и алгоритмы обработки данных для выявления подповерхностных неоднородностей [13-15]. Эти методы предусматривают регистрацию сигналов, отражённых от исследуемой среды с внутренней

неоднородностью и последующую обработку этих сигналов различными специальными методами. Они дают возможность определения диэлектрической проницаемости среды (по углу раскрытия гиперболы) и глубины залегания неоднородности (по времени задержки отраженного сигнала). Однако такие алгоритмы не позволяют одновременно восстанавливать характеристики плоскостойких сред (численные значения толщины и диэлектрической проницаемости слоев) и параметры включений. В качестве включений мы подразумеваем подповерхностные трещины и их параметры (глубина залегания и геометрические размеры поперечного сечения). Для решения этих задач было предложено использовать информацию, которую содержит состояние поляризации отраженного импульсного сигнала [14,15]. Важным преимуществом такого подхода является возможность осуществления неразрушающей диагностики дорожных одежд с дефектами при одновременном определении параметров слоев покрытия (диэлектрической проницаемости и толщины). Существенно, что разработанное программное обеспечение, современные электронные компоненты и созданные алгоритмы обработки информации позволяют в итоге осуществлять не только получение первичных наборов данных, но и осуществлять мониторинг дорожных покрытий с дефектами в режиме непрерывного движения автомобиля-лаборатории.

Поэтому в данной работе представлены 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. Данная работа является первой частью исследования. Дело в том, что помимо вертикальных трещин, в том числе и подповерхностных, существуют другие опасные дефекты, например, нарушение контакта между верхними слоями покрытия (расслоение), нарушения связи вяжущего (битума) с наполнителем (щебнем) [16-18]. На радарограммах в качестве дефектов могут быть ошибочно признаны и элементы инженерных сооружений – кабели, трубы, элементы инженерных конструкций. Понятно, что отразить все накопленные в данном направлении результаты в одной статье не представляется возможным. Исходя из этих соображений, в данном материале приведена лишь первая часть результатов, которые относятся к возможностям использования состояния поляризации сигналов для решения задач обнаружения подповерхностных дефектов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОБНАРУЖЕНИЯ ТРЕЩИН И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Теоретические основы решения обратных задач с привлечением информации о поляризационном состоянии дифрагированных на неоднородностях полей были рассмотрены ранее в [19-21]. Основу для предложенного в этих работах формализма составила нелинейная связь измеряемых величин с информативным параметром – состоянием поляризации регистрируемого сигнала. Эта связь в общем случае в рамках модели плоской волны дается известными формулами Френеля [22, 23]:

$$T_{\parallel} = \frac{2 \cdot n_1 \cdot \cos \theta_i}{(\cos \theta_i \cdot n_2 + n_1 \cdot \cos \theta_t)} A_{\parallel} ; T_{\perp} = \frac{2 \cdot n_1 \cdot \cos \theta_i}{(n_1 \cdot \cos \theta_i + n_2 \cdot \cos \theta_t)} \cdot A_{\perp}. \quad (1)$$

$$R_{\parallel} = \frac{(\cos \theta_t \cdot n_1 - n_2 \cdot \cos \theta_i)}{(n_2 \cdot \cos \theta_i + \cos \theta_t \cdot n_1)} \cdot A_{\parallel} ; R_{\perp} = \frac{(n_1 \cdot \cos \theta_i - n_2 \cdot \cos \theta_t)}{(n_2 \cdot \cos \theta_t + n_1 \cdot \cos \theta_i)} \cdot A_{\perp}. \quad (2)$$

Эти соотношения можно переписать и в альтернативной форме в случае привлечения только угловых переменных и закона преломления. Для удобства восприятия часто в таком случае применяют также следующие обозначения ($n_{12} = n_2 / n_1$) [23]:

$$T_{\parallel} = \frac{2 \cdot \cos \theta_i}{\left(\cos \theta_i \cdot n_{12} + \sqrt{1 - \left(\sin \theta_i \frac{1}{n_{12}} \right)^2} \right)} A_{\parallel} ; T_{\perp} = \frac{2 \cdot \cos \theta_i}{\left(\cos \theta_i + n_{12} \sqrt{1 - \left(\sin \theta_i \frac{1}{n_{12}} \right)^2} \right)} \cdot A_{\perp}. \quad (1a)$$

$$R_{\parallel} = \frac{\left(\sqrt{1 - \left(\sin \theta_i \frac{1}{n_{12}} \right)^2} - n_{12} \cdot \cos \theta_i \right)}{\left(n_{12} \cdot \cos \theta_i + \sqrt{1 - \left(\sin \theta_i \frac{1}{n_{12}} \right)^2} \right)} A_{\parallel}; R_{\perp} = \frac{\left(\cos \theta_i - \frac{n_2}{n_1} \cdot \sqrt{1 - \left(\sin \theta_i \frac{1}{n_{12}} \right)^2} \right)}{\left(\frac{n_2}{n_1} \cdot \sqrt{1 - \left(\sin \theta_i \frac{1}{n_{12}} \right)^2} + \cos \theta_i \right)} A_{\perp}. \quad (2a)$$

Основной результат, который следует из этих формул, заключается в том, что в общем виде при наклонном падении зависимость коэффициентов отражения и преломления от угла падения, и, главное, от соотношения между ортогональными компонентами (они отмечены знаками \parallel и \perp) является нелинейной. Как следует из вида этих формул при нормальном падении:

$$T_{\parallel} = \frac{2}{(n_{12} + 1)} A_{\parallel}; \quad T_{\perp} = \frac{2}{(1 + n_{12})} \cdot A_{\perp}; \quad (16)$$

$$R_{\parallel} = \frac{(1 - n_{12})}{(n_{12} + 1)} \cdot A_{\parallel}; \quad R_{\perp} = \frac{(1 - n_{12})}{(n_{12} + 1)} \cdot A_{\perp}; \quad (n_{12} = n_2 / n_1), \quad (26)$$

рассматриваемая зависимость является линейной (ввиду отсутствия множителей с тригонометрическими функциями). Поэтому постановка обратной задачи в таком виде [19, 20] невозможна. В [24] предложенный подход расширен на случай зондирования импульсными сигналами. При решении задачи были использованы следующие предположения:

а) влияние неровностей поверхности слоев (внутренних границ) покрытия на параметры отраженного сигнала незначительно и им можно пренебречь;

б) изменение толщины каждого слоя от участка к участку незначительно и им также можно пренебречь (это подтвердили как результаты моделирования, так и проведенных лабораторных экспериментов);

в) моделью трещины был прямоугольный параллелепипед – простейший случай.

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

При проведении расчётов применялось программное обеспечение, ранее описанное в [8,12].

Одним из ключевых параметров подповерхностных трещин является глубина залегания. В работе [24] предложен следующий алгоритм решения такой задачи:

а) определение значения диэлектрической проницаемости (ε_1) слоя, расположенного над трещиной согласно формуле:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 \frac{(1 - R_0)^2}{(1 + R_0)^2}, \quad (3)$$

где R_0 - коэффициент отражения сигнала от верхней границы дорожного покрытия, который

определяется согласно соотношению $R_0 = \frac{A_0}{B_0}$;

б) измерение времени задержки – времени прохождения сигнала от антенны до второй (нижней) границы верхнего (первого) слоя (t_1);

в) вычисление собственно глубины залегания трещины по формуле:

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

В (4) обозначено t_2 – время задержки сигнала, отраженного от верхней границы второго слоя. В [24] также подчеркнуто, что определение диэлектрической проницаемости верхнего слоя, а также

глубины залегания трещины проводятся в результате измерений с помощью различных антенн. Это вызвано специфическими особенностями таких слабоконтрастных объектов, как подповерхностные трещины. Они, к сожалению, не позволяют привлекать для их позиционирования/ обнаружения стандартные антенны георадаров. Для решения столь сложных задач были с успехом применены специализированные антенные блоки [24]. Определение ширины раскрыва трещины предложено решать на основе модификации так называемого компарационного алгоритма. Его суть состоит в сравнении регистрируемых данных с некоторым набором заранее измеренных эталонных данных и последующего вычисления невязки по формуле:

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

В (5) $\bar{F}_i(t)$ – некоторые заранее измеренные распределения сигналов, отраженных от трещин с известными параметрами. Далее, с помощью выбора наименьшего из функционалов невязки N_i делается заключение о числовом значении ширины трещины. Результатом работы алгоритма являются следующие параметры: местоположение трещины, глубина ее залегания и ширина раскрыва.

КРАТКИЙ ОБЗОР ПАТЕНТОВ

Практическая значимость проблемы обнаружения скрытых неоднородностей и дефектов стимулировала и появление определенного числа патентов Украины на полезную модель и изобретение [25-27]. Основная идея первого патента [14] – новый способ обнаружения и определения мест нахождения неоднородностей (в том числе и подповерхностных трещин в асфальтобетонном покрытии) путем использования явления возбуждения в отраженном электромагнитном поле кросс-поляризационной компоненты. В силу известных теоретических моделей [28] кросс-поляризационная компонента возникает после облучения узкого протяженного объекта с электрофизическими параметрами, которые отличны от параметров окружающей среды, линейно поляризованной импульсной электромагнитной волной с углом поляризации, отличным от направления вдоль этого объекта. Поставленная задача решается в [14] с помощью размещения над поверхностью дорожного покрытия антенн (передающей и приемной) излучающих сигналы с линейной поляризацией. Поляризацию сигналов выбирают таким образом, чтобы направления поляризации обеих антенн были взаимно ортогональными. Затем возбуждают излучающую антенну сверхширокополосным импульсным сигналом и регистрируют отраженный импульс. Затем всю систему поворачивают на заранее определенные один или более углов и в каждом случае регистрируют отраженные сигналы. Далее с помощью программной обработки анализируют зависимость амплитуды принятой импульсной электромагнитной волны от угла поворота антенной системы. Индикатором наличия трещины является присутствие в принятом импульсе кросс-поляризованной компоненты. Очевидными недостатками такого способа диагностики являются необходимость вращения блока антенн над областью предположительного нахождения подповерхностной трещины и, как следствие, невозможность осуществления диагностики при перемещении лаборатории. Поэтому следующие патенты направлены на устранение этих ограничений.

Основу изобретения [15] составляет задача усовершенствования способа [14]. Цель усовершенствования достигается путем применения зондирующего сигнала с синусоидальной временной зависимостью и использования для излучения одной антенны, которая формирует электромагнитное поле первичного сигнала с круговой поляризацией. Для приема предложено использовать одновременно четыре линейно поляризованных приемных антенны. Эти антенны ориентированы под заранее определёнными углами к излучающей антенне. Благодаря этому обеспечивается обнаружение сигналов, отраженных именно трещинами. Важно, что теперь, благодаря исключению операции вращения антенн, появляется возможность обнаружения трещин и при движении по дороге со скоростью транспортного потока. Принцип функционирования предложенного в [15] способа иллюстрируют Рис. 1 и Рис. 2. На Рис. 1 приведена схема размещения и взаимной ориентации передающей (Т) и набора из четырёх приёмных (R₁-R₄) антенн. Рис. 2 представляет собой диаграмму, позволяющую по результатам измерений сигналов в каждой из четырех приемных антенн определить угол ориентации неоднородности (трещины).

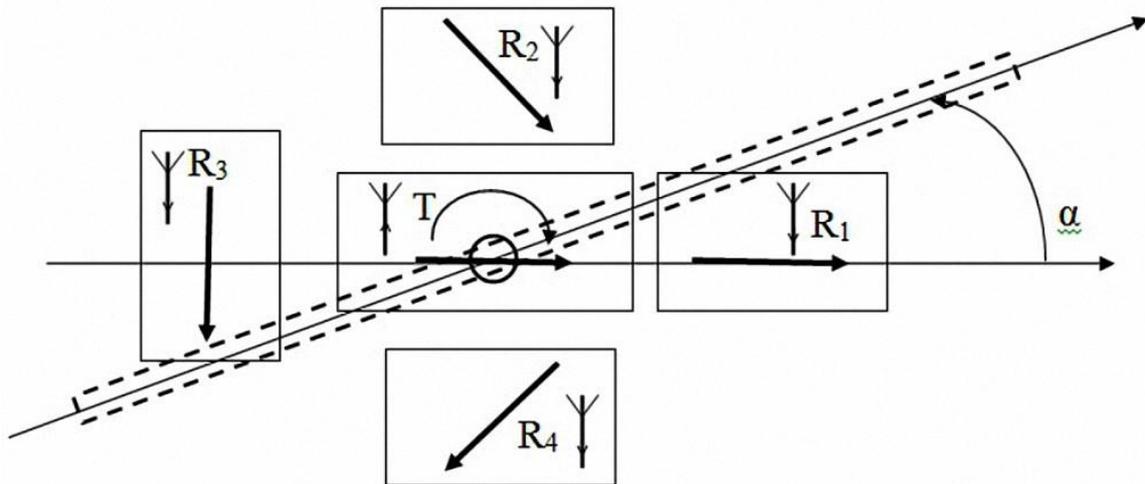
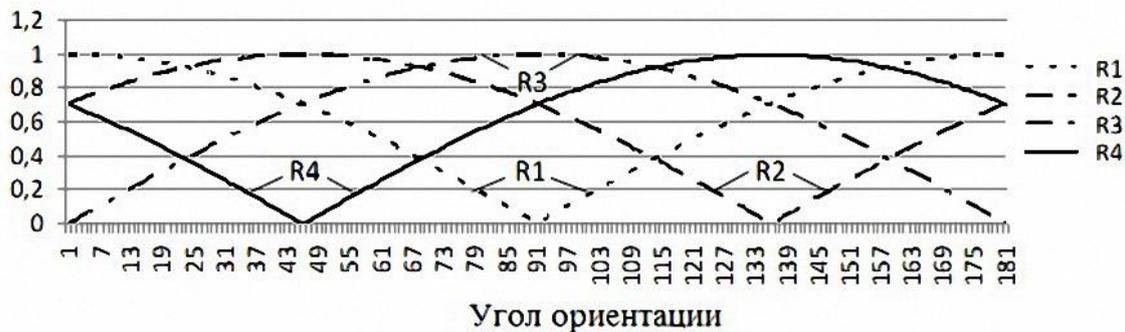


Рис. 1. Схема размещения и взаимной ориентации передающей (Т) и приемных (R1-R4) антенн.

Рис. 2. Диаграмма распределения сигналов между антеннами для определения угла ориентации (α) трещины.

Причинами, ограничивающими применение способа, предложенного в [15], является невысокая вероятность обнаружения трещин из-за малой чувствительности георадара по отношению к слабо контрастным (например, малым по ширине) трещинам в асфальтобетонном покрытии. Эти недостатки обусловлены тем, что, во-первых, из-за отсутствия характерных параметров сигнала (кроме несущей частоты), которые отличали бы зондирующий сигнал, от других сигналов, сигналы, отражённые только подповерхностными трещинами, трудно отличить от других сигналов, не имеющих отношения к объектам поиска. Эти паразитные сигналы по сути маскируют слабые полезные отраженные сигналы, что уменьшает вероятность обнаружения трещин. Во-вторых, шумовые характеристики усилителей постоянного напряжения, использование которых предусмотрено в прототипе, является не самым эффективным способом достижения цели. Это ограничивает потенциально возможную чувствительность локатора к слабым сигналам. В-третьих, для дальнейшей интерпретации результатов зондирования нужно знать текущее значение угла поляризации излучаемого сигнала (вдоль или поперек) во время зондирования, что практически сложно реализовать при использовании антенн с круговой поляризацией.

Поэтому в основу изобретения [27] поставлена задача усовершенствования ранее предложенного подхода путем замены поляризованного по кругу облучения на управляемое во времени пошаговое облучение полем с двумя ортогональными линейными поляризациями и усилению полезного сигнала на частоте модуляции, которая совпадает с частотой пошагового подключения излучателей. Это позволяет добиться повышения чувствительности к подповерхностным трещинам в дорожном покрытии и обеспечивает повышение как вероятности обнаружения трещин, так и определения направления ориентации выявленных трещин. Также при этом достигается уменьшение необходимого количества приемных антенн до двух.

Суть процесса получения первичных данных и последующей обработки заключается в том, что приемо-передающую антенную систему радиолокатора размещают над поверхностью дорожного покрытия и, перемещая ее вдоль поверхности дороги, выполняют сканирование. Для этого возбуждают передающую антенну электрическим сигналом с синусоидальной временной зависимостью и регистрируют отраженный сигнал. В рамках предложенного способа согласно полезной модели

возбуждают поочередно два расположенных взаимно ортогонально линейно поляризованных излучателя передающей антенны с переключаемой поляризацией. А затем антеннами с ортогональной линейной поляризацией принимают отраженный сигнал. Направления поляризации приемных антенн ориентированы под углом 60 градусов друг к другу, и далее детектируют принятые сигналы, после чего усиливают их узкополосными усилителями переменного напряжения, которые заблаговременно настраивают на частоту переключения излучателей. Усиленные сигналы с помощью многозарядных аналого-цифровых преобразователей превращают в соответствующие цифровые коды и с помощью компьютерных программ анализируют зависимость амплитуд принятых сигналов от направлений поляризации излучателей и приемных антенн. Вывод по выявлению трещин в асфальтобетонном покрытии, в том числе и подповерхностных, делают на основании появления расхождения между амплитудами сигналов, принятых одновременно двумя приемными антеннами, а направление трещины определяют по разнице амплитуд этих сигналов.

Суть полезной модели объясняется иллюстрациями. На Рис. 3. схематично изображена антенная система, а на Рис. 4. приведены калибровочные диаграммы углового распределения амплитуд сигналов.

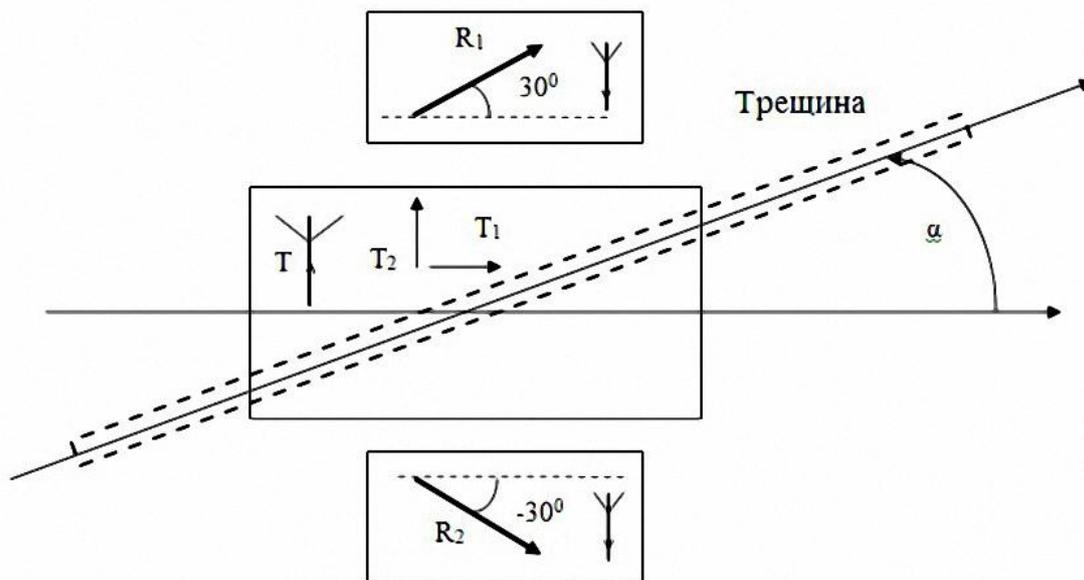


Рис. 3. Схема размещения и взаимной ориентации передающей (Т) и приемных (R1-R4) антенн.

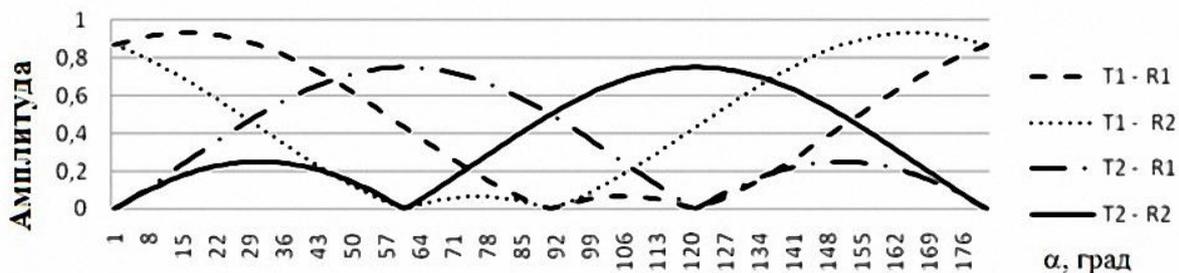


Рисунок 4. Схема размещения и взаимной ориентации передающей (Т) и приемных (R1-R4) антенн.

Чтобы обеспечить обнаружение в том числе и подповерхностных трещин в асфальтобетонном покрытии, излучающая антенна Т георадара с переключаемой поляризацией состоит из двух возбуждаемых по очереди линейно поляризованных излучателей T1 и T2 (Рис.3) с направлениями поляризации (обозначены стрелками), ориентированными взаимно ортогонально друг к другу [29]. Приемные антенны размещают над поверхностью дорожной одежды таким образом, чтобы направления поляризации двух линейно поляризованных антенн R1 и R2, были ориентированы под углом 60° друг к другу (+30° и -30°) относительно направления поляризации одного из излучателей (Рис. 3). Затем возбуждают элементы излучающей антенны таким образом, чтобы направления поляризации и

излучения создавали углы 30^0 и 60^0 (Рис. 3) с направлениями поляризации приемных антенн, благодаря чему при облучении трещины, обозначенной на Рис.3 пунктирной линией и ориентированной под углом α к одному из направлений поляризации одного из двух излучателей T1 или T2, в дорожной одежде за счет явления деполяризации формируется, в общем случае, эллиптически поляризованная дифрагированная электромагнитная волна [28]. Компоненты дифрагированной электромагнитной волны принимают приемными антеннами и превращают в электрические сигналы.

Поскольку, в соответствии с рассмотренной выше моделью, зондирующие сигналы отличаются от других не только частотой синусоидальной несущей, но и тем, что они имеют еще и амплитудную модуляцию с частотой переключения излучающих антенн, то эти сигналы легко отличить от других – тех, которые не имеют отношения к георадару и объектам поиска. Далее принятый сигнал детектируют, выделяя низкочастотную огибающую, которая совпадает по временным характеристикам с сигналом, который переключает излучающие антенны. Благодаря амплитудной модуляции излучаемого сигнала и также ввиду того, что сигнал, который переключает излучатели, доступен для того, чтобы подать его также и в приёмник, для повышения чувствительности приемника используется узкополосный или даже параметрический усилитель. Эти усилители по шумовым характеристикам и селективности гораздо лучше усилителей постоянного напряжения (или постоянного тока). Таким образом, возрастает чувствительность радара именно к объектам поиска.

Для дальнейшей интерпретации результатов зондирования нужно знать угол поляризации излучаемого сигнала (вдоль или поперек) во время приема отраженного сигнала. Это обеспечивается благодаря контролируемому поочередному излучению зондирующих сигналов с помощью двух излучателей передающей антенны. Если материал среды является однородным в горизонтальной плоскости (дефектов нет, трещина отсутствует), амплитуды сигналов в приемных антеннах одинаковы.

Поскольку возможны три базовые ситуации, то алгоритм обработки информации, направленный на выявление и определение направления подповерхностных трещин имеет следующий вид:

а) сигналы в приемных антеннах имеют одинаковые амплитуды – тогда угол α может равняться 0^0 или 90^0 . При этом, угол $\alpha = 0^0$, если при излучении с поляризацией T1 сигналы больше, чем при излучении с поляризацией T2. В противном случае (при условии, что амплитуды одинаковы) угол $\alpha = 90^0$.

б) сигналы в приемных антеннах имеют различные амплитуды – тогда угол α не может равняться 0^0 или 90^0 . Понятно, что в результате симметрии конструкции антенного блока, достаточно рассмотреть случай $0^0 \leq \alpha \leq \pm 90^0$. В этом случае вывод о направлении трещины (угол α) осуществляется на основе сопоставления показателей приемных и излучающей антенн. Например (Рис.3), если $\alpha = 30^0$, то при излучении с поляризацией T1 амплитуда сигнала в R1 больше, чем в R2. Вследствие симметрии конструкции, если $\alpha = -30^0$, то при излучении с поляризацией T1 амплитуда сигнала в R2 больше, чем в R1 (фиг. 2).

в) в промежуточных случаях угол α должно быть в пределах $0^0 < \alpha < 30^0$ или $30^0 < \alpha < 90^0$ и $0^0 > \alpha > -30^0$ или $-30^0 > \alpha > -90^0$. В этих условиях вывод о направлении трещины (угол α) делается на основе сопоставления показателей приемных и излучающей антенн. Например, если $\alpha = 20^0$ (Рис.3), то при излучении с поляризацией T1 амплитуда сигнала в R1 больше, чем в R2. В то же время, при излучении с поляризацией T2 амплитуда сигнала в R1 меньше, чем при излучении с поляризацией T1. Понятно, что при $\alpha = -20^0$ ситуация будет зеркальной, то есть амплитуда сигнала будет больше в R2. Также она будет больше при излучении с поляризацией T1, чем при излучении с поляризацией T2.

На Рис.4 показаны результаты расчета нормированных амплитуд сигналов в приемных антеннах при изменении направления трещины - угла α (Рис.3) от 0 градусов до 180 градусов. Рис. 4 показывает, что не существует двух состояний системы с одинаковыми показателями (не существует точки, где бы пересекались все четыре графика).

Таким образом, благодаря описанному выше алгоритму [27] обработки данных подповерхностного зондирования и мерам, принятым для повышения чувствительности радара и минимизации влияния помех, вероятность обнаружения подповерхностных трещин в асфальтобетонном покрытии, повышается, а вероятность ложной тревоги (принятие вывода о наличии объекта, когда объекта на самом деле нет) уменьшается. К тому же, количество необходимых приемных антенн уменьшается до двух. Кроме того знание направления подповерхностной трещины позволяет оптимально с точки зрения сметы, спланировать и выполнить работы по обслуживанию и ремонту.

ВЫВОДЫ

Рассмотренные результаты имеют не только важное прикладное, но и теоретическое значение. С одной стороны, рассмотренные модели плоскостных сред с неоднородностями сыграли большую роль в разработке и дальнейшем усовершенствовании как технических средств неразрушающего контроля и дистанционного зондирования, так и алгоритмов обработки данных о сложных сигналах,

которые взаимодействуют с неоднородными средами. С другой стороны, полученные в ходе численного моделирования, лабораторных экспериментов и полевых испытаний разнообразные результаты способствовали дальнейшему прогрессу в области совершенствования технических средств – антенн, генераторов, усилителей и других СВЧ элементов. Но значимость полученных ранее результатов заключается также и в том импульсе, который получили теоретические модели обработки данных зондирования. Дело в том, что предсказать априори и тем более, дать количественную оценку сложным явлениям взаимодействия импульсных СШП сигналов со слоисто неоднородными средами, даже в рамках простейших плоскостойких сред, не представляется возможным. Это связано с невозможностью учета всего богатства физических явлений, сопровождающих процессы дистанционного зондирования и неразрушающего контроля промышленных образцов и строительных и инженерных конструкций. Поэтому во многих случаях накопленный практический опыт и результаты экспериментальных исследований являются фундаментом для разработки более совершенных моделей и алгоритмов. Некоторые из соответствующих примеров приведены в данной работе. В заключение также необходимо отметить возможные пути дальнейшего развития данного научного направления. Они могут быть связаны как с совершенствованием методов и алгоритмов обработки сигналов с учетом накопленного опыта, так и с разработкой вспомогательных методов для обеспечения более надежной регистрации сигналов и повышении достоверности принимаемых технических решений. Некоторые вопросы, связанные с этими проблемами, будут рассмотрены в следующей части работы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.

Authors' ORCID ID

Батраков Д.О. <http://orcid.org/0000-0002-6726-8162>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Avtomobilni dorohy. Otsinka ta reiestratsiia stanu dorozhnykh pokryttiv ta tekhnichnykh zasobiv avtomobilnykh dorih avtomatyzovany my systemamy video diahnostryky: SOU 45.2-00018112-080:2011. – [Diisnyi vid 2012-03-01]. – К. : Derzhavna sluzhba avtomobilnykh dorih Ukrainy (Ukravtodor), 2012. 45 s. – (Standart Orhanyzatsii Ukrainy). [In Ukrainian].
2. Kiiashko I.V., Smolianiuk R.V. Vykorystannia system videodiahnostryky dlia otsinky stanu poverkhni pokryttiv ta elementiv oblashtuvannia avtomobilnykh dorih. Avtoshliakhovyk Ukrainy; 2008. № 6. S. 23–30. [In Ukrainian].
3. Jol Harry M., Editor. Ground penetrating radar, theory and applications. 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. Vladov M.L., Starovoitov A.V. Vvedenie v georadiolokatciiu : ucheb. posobie [dlia stud. vissh. uch. zaved.] – М. : MGU; 2004. 153 P. [In Russian]
6. Grinev A.Iu., Editor. Voprosy podpoverkhnostnoi radiolokatcii : kollektivnaia monografiia. М. : Radiotekhnika; 2005. 416 s. [In Russian]
7. Batrakova A.G. Otcenka sostoianii dorozhnykh odezhd s privlecheniem georadarnykh tekhnologii : monografiia – Kh. : KhNADU; 2013. 152 P. [In Russian]
8. Batrakov, D. O., Batrakova, A. G., Golovin, D. V., Kravchenko, O. V., Pochanin, G. P. Determination of Thicknesses of the Pavement Layers with GPR Probing. Physical Bases of Instrumentation. 2014. Vol. 3. No. 2(11). P. 46–57. DOI: <http://dx.doi.org/10.25210/jfop-1402-046057> <http://red.jfop.ru/jfop-1402/> [In Russian]
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,, United States 2011. 49 p. Rep. PA 19428-2959.
10. Cao Y., Guzina B.B., Labuz J.F.. Pavement Evaluation using Ground Penetrating Radar : Final Report, March, 2008 Minnesota : Department of Civil Engineering, University of Minnesota; 2010. 102 p. Rep. № MN/RC 2008-10.
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. Kapustin V.V., Denisov P.P., Moishnen L.O. Primenenie georadarnogo metoda v kvaziodnorodnykh sredakh. «EMZ-2011» : 5-ia Vserossiiskaia shkola-seminar im. M.N. Berdichevskogo i L.L. Vaniana po elektromagnitnym zondirovaniiam zemli : sb. Materialov; 2011. Vol. 2. PP. 343–346. [In Russian]
14. Batrakova, A. G. zaiavnyk ta patentoutrymuvach, Batrakov D.O., Pochanin H.P.; Sposib vyivlennia ta vyznachennia mistv znakhodzhennia u tomu chysli i pidpoverkhnevnykh trishchyn v asfaltobetonomu pokrytti. Pat. 81296 Ukraine, (51) MPK E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01), u201300256; zaiavl. 08.01.2013; opubl. 25.06.2013, Biul. № 12/2013. [In Ukrainian].
15. Batrakov D.O. - zaiavnyk ta patentoutrymuvach, Urdzik S.M., Pochanin H.P., Batrakova A. H. Sposib vyivlennia pidpoverkhnevnykh trishchyn u asfaltobetonomu pokrytti dorohy pid chas rukhu diahnostychnoi laboratorii v transportnomu pototsi. Pat. 113916 Ukraine, (51) MPK E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01) – a201511191; zaiavl. 13.11.2015; opubl. 27.03.2017, Biul. № 6/2017. [In Ukrainian].
16. Sudyka J. and Krysiński L. Radar technique application in structural analysis and identification of interlayer bonding, Int. J. Pavement Res. Technol., vol. 4, no. 3, 2011, Pp. 176-184. http://www.ijprt.org.tw/mailweb/files/sample/V4N3_176-184.pdf
17. Krysiński L. and Sudyka J. Typology of reflections in the assessment of the interlayer bonding condition of the bituminous pavement by the use of an impulse high- frequency ground-penetrating radar, Nondestruct. Test. Eval., vol. 27, no. 3, 2012, Pp. 219-227. www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10589759.2012.
18. Batrakov D. O., Luo Yiyang, Antufeeva M.S., Shulga S.N., Batrakova, A. G. Detection of delamination between plane layered media using pulse geodars. Radiophysics and Electronics Bulletin, V.N. Karazin National University; 2019, V. 30. PP. 27-37.
19. Batrakov D.O., Zhuk N.P. An iterative solution to the inverse problem of remote sensing of nonuniform media based on values of the polarization parameters. Journal of communications technology & electronics, MAIK Nauka/Interperiodika; 38 (12), 108-115. T.38, №6. - C.1106-1114. [In Russian].
20. Zhuck N. P., Batrakov D. O. Inverse scattering problem in the polarization parameters domain for isotropic layered media: solution via Newton-Kantorovich iterative technique // Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 1994, Vol. 8, No. 6, PP.759-779.
21. Batrakov D.O., Budko N.V., Zhuk N.P. Interpretation of sounding data of layered structures based on the solution of the inverse problem of scattering of electromagnetic waves. I. Technical Physics - ISSN:1063-7842, 1994. Vol. 64, № 1. PP. 152-161. <https://journals.ioffe.ru/articles/18622> . [In Russian]
22. Born M., Volf E. Osnovy optiki. M. : Nauka. – 1973. – 720 s. [In Russian]
23. Batrakov D.O., Beloshenko K.S., Batrakova A.G., Antufeeva M. S. The use of GPR polarization parameters for the control of plane-layered media condition. Radiophysics and Electronics Bulletin, V.N. Karazin National University, 2017, V. 26. PP. 10-16. [In Russian].
24. Batrakov D.O., Antufeeva M. S., Batrakova A.G., Antufeev A.V., Fang Haojie. The use of georadars to identify subsurface defects in road surfaces. Radiophysics and Electronics Bulletin, V.N. Karazin National University, 2017, V. 26. – PP. 17-23. [In Russian].
25. Batrakov D.O., Batrakova A.H., Pochanin H.P., Orlenko O.A.; zaiavnyk ta patentoutrymuvach Kharkivskiy natsionalnyi avtomobilno-dorozhniy universytet; Kharkivskiy natsionalnyi universytet im. V.N. Karazina. Sposib vyivlennia ta vyznachennia napriamku u tomu chysli i pidpoverkhnevnykh trishchyn v asfaltobetonomu pokrytti. Pat. 121483 Ukraine, (51) MPK E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01) u201705440; zaiavl. 02.06.2017; opubl. 11.12.2017, Biul. № 23/2017. <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=search> [In Ukrainian].
26. Batrakov D.O., Batrakova A. H.; zaiavnyk ta patentoutrymuvach Kharkivskiy natsionalnyi avtomobilno-dorozhniy universytet; Kharkivskiy natsionalnyi universytet im. V.N. Karazina. Sposib kalibruvannia ta vydalennia parazytnykh vidbyttyv pry neruivnomu kontroli verkhnoho sharu asfaltobetonu za dopomohoiu heoradara. Pat. 118408 Ukraine, (51) MPK E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01). a201705444; zaiavl. 02.06.2017; opubl. 10.01.2019, Biul. № 1/2019 (vynakhid). [In Ukrainian].
27. Batrakov D.O., Batrakova A. H., Pochanin H.P., Orlenko O.A.; zaiavnyk ta patentoutrymuvach Kharkivskiy natsionalnyi avtomobilno-dorozhniy universytet; Kharkivskiy natsionalnyi universytet im. V.N. Karazina. Sposib vyivlennia ta vyznachennia napriamku u tomu chysli i pidpoverkhnevnykh trishchyn v asfaltobetonomu pokrytti. Pat. 118409 Ukraine, (51) MPK E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01). a201705456; zaiavl. 02.06.2017; opubl. 10.01.2019, Biul. № 1/2019 (vynakhid). [In Ukrainian].

28. Vaganov R.B. Katcenelenbaum B.Z. *Osnovy teorii difraktsii* M.: Nauka. Glavnaia redaktsiia fiziko-matematicheskoi literatury; (Sovremennye fiziko-tekhnicheskie problemy). 1982. 272 P. [In Russian]
29. Vasylieva O. M., Bukin O.V., Suhak V. H. Shchilynna antena dlia radiolokatoriv pidpoverkhnevoho zonduvannia, Pat. UA 103381. MPK H01Q 3/24 zaiavl. 14.11.2011, nomer zaiavky a 2011 13332, opubl. 10.10.2013, Biul . № 19/2013. [In Ukrainian].