

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-03>

УДК 621.574.4

## ОБНАРУЖЕНИЕ НАРУШЕНИЯ КОНТАКТА МЕЖДУ ПЛОСКИМИ СЛОЯМИ С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНЫХ ГЕОРАДАРОВ

Д. О. Батраков<sup>1</sup>, Иян Ло<sup>1</sup> (LUO Yiyang 骆一阳), М. С. Антюфеева<sup>1</sup>,  
С. Н. Шульга<sup>1</sup>, А.Г. Батракова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4  
E-mail: Dmitry.O.Batrakov@univer.kharkov.ua

<sup>2</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61000, г. Харьков, ул. Ярослава  
Мудрого, 25

Поступила в редакцию 12 февраля 2019 г.

**Актуальность** данной задачи следует из рассмотрения последствий такого дефекта дорожного покрытия как расслоение. Также актуальность обусловлена тем, что применение современных импульсных георадаров обеспечивает низкую себестоимость мониторинга автомобильных дорог. Это становится возможным при получении первичных георадарных данных в процессе движения автомобиля-лаборатории со скоростью транспортного потока, и, кроме того, благодаря исключению таких трудоёмких операций, как отбор кернов или проведение вырубки участков дорожной одежды.

**Цель работы** - проведение анализа различных методов обработки сверхширокополосных сигналов импульсных георадаров для изучения возможностей методов и алгоритмов обработки сигналов с целью повышения надёжности обнаружения расслоения.

**Материалы и методы.** В процессе обработки модельных и экспериментальных данных применялись в первую очередь современные теоретические методы обработки сигналов и компьютерного моделирования.

**Результаты.** Установлены и проанализированы факторы, определяющие отличия и характерные особенности импульсных сигналов георадаров, которые могут использоваться для обнаружения расслоения, как нарушения контакта между слоями, или обнаружения наличия тонких слоёв в составе многослойной среды.

**Выводы.** Предложенный подход к постановке задачи совместно с проделанным теоретическим анализом и результатами численного моделирования позволили в итоге обосновать возможность повышения надёжности процедуры неразрушающего контроля качества различных конструкций и эффективного выявления критических дефектов с помощью методов георадиолокации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** георадары, дистанционное зондирование, тонкие слои, плоскостойкие среды.

## ВИЯВЛЕННЯ ПОРУШЕННЯ КОНТАКТУ МІЖ ПЛОСКИМИ ШАРАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ІМПУЛЬСНИХ ГЕОРАДАРИВ

Д. О. Батраков<sup>1</sup>, Иян Ло<sup>1</sup>, М. С. Антюфеева<sup>1</sup>, С. М. Шульга<sup>1</sup>, А.Г. Батракова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 61022, м. Харків, м. Свободи, 4

<sup>2</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61000, м. Харків, вул. Ярослава  
Мудрого, 25

**Актуальність** даної задачі впливає з розгляду наслідків такого дефекту дорожнього покриття як розшарування. Також актуальність обумовлена тим, що застосування сучасних імпульсних георадарів забезпечує низьку собівартість моніторингу автошляхів. Це стає можливим при отриманні первинних георадарних даних в процесі руху автомобіля-лабораторії зі швидкістю транспортного потоку, і, крім того, завдяки виключенню таких трудомістких операцій, як відбір кернів або проведення вирубки ділянок дорожнього одягу.

**Мета роботи** - проведення аналізу різних методів обробки надширококутних сигналів імпульсних георадарів для вивчення можливостей методів і алгоритмів обробки сигналів з метою підвищення надійності виявлення розшарування.

**Матеріали та методи.** В процесі обробки модельних і експериментальних даних застосовувалися в першу чергу сучасні теоретичні методи обробки сигналів і комп'ютерного моделювання.

**Результати.** Встановлено та проаналізовано чинники, що визначають відмінності і характерні особливості імпульсних сигналів георадарів, які можуть використовуватися для виявлення розшарування, як порушення контакту між шарами, або виявлення наявності тонких шарів в складі багатошарового середовища.

**Висновки.** Запропонований підхід до постановки задачі спільно з виконаним теоретичним аналізом і результатами чисельного моделювання дозволили в підсумку обґрунтувати можливість підвищення надійності процедури неруйнівного контролю якості різних конструкцій і ефективного виявлення критичних дефектів за допомогою методів георадіолокації.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** георадари, дистанційне зондування, тонкі шари, плоскошаруваті середовища.

## DETECTION OF DELAMINATION BETWEEN PLANE LAYERED MEDIA USING PULSE GEODARS

D.O. Batrakov<sup>1</sup>, Luo Yiyang<sup>1</sup>, M.S. Antyufeyeva<sup>1</sup>, S.N. Shulga<sup>1</sup>, A.G. Batrakova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

<sup>2</sup> Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo st, Kharkiv, 61000, Ukraine.

**The relevance** of the problem follows from the consideration of the consequences of such serious road pavement defect as delamination. Also, the validity of the problem stems from the fact that the use of modern pulsed GPR provides low-cost monitoring of roads. This becomes possible when obtaining primary GPR data during the movement of the laboratory car with the speed of the transport stream, and, in addition, due to the exclusion of such labour-intensive operations as coring or cutting sections of pavement.

**The purpose** of the work is to analyze various processing methods for ultra-wideband signals of pulsed GPR to study the capabilities of signal processing methods and algorithms to increase the reliability of detection of delamination.

**Materials and methods.** During the investigation of the processing model and experimental data, first of all, modern theoretical methods of signal processing and computer modelling were used.

**Results.** The factors determining the differences and characteristic features of pulsed signals of GPR, which can be used to detect delamination, as a violation of contact between layers, or to detect the presence of thin layers in a multilayer medium, are established and analyzed.

**Conclusions.** The proposed approach to the formulation of the problem, together with the theoretical analysis and the results of numerical modelling, made it possible to justify the possibility of increasing the reliability of the non-destructive quality control of various structures and the effective detection of critical defects using GPR methods.

**KEY WORDS:** GPR, remote sensing, thin layers, plane-layered media.

## ВВЕДЕНИЕ

Вопросам неразрушающего контроля слоистонеоднородных сред с помощью импульсных георадаров посвящено множество публикаций [1-5]. Актуальность решения данной задачи применительно к дорожной отрасли обусловлена необходимостью оперативного контроля текущего состояния автомобильных дорог на участках большой протяжённости и большими затратами на ремонт и обслуживание [1,5-8]. С точки зрения используемых физико-математических приближений простейшей моделью дорожного покрытия является плоскостроистая среда, которая может содержать неоднородности (трещины, дренажные трубы и др.). В рамках такой модели не учитываются неровности (шероховатости) наружной поверхности и внутренних структурных границ раздела. Однако, как показали многочисленные экспериментальные наблюдения, неровности внешней границы практически не влияют на результат обработки данных при условии привлечения процедур предварительной калибровки сигналов с привлечением измерения отражения от листа металла [2,9]. Дело в том, что с одной стороны, реально используемый для измерения первичного импульса металла не является идеальным проводником и, как следствие, даёт меньшую амплитуду импульса, а с другой стороны – шероховатая поверхность асфальтобетона в силу рассеяния части мощности во флуктуационную компоненту, также дает в итоге меньшую амплитуду отражённого сигнала. В итоге, как показали проведённые ранее эксперименты, определить диэлектрическую проницаемость верхнего слоя асфальтобетона при тщательном соблюдении процедуры измерения удаётся с относительно высокой точностью (порядка нескольких процентов). Однако, ситуация значительно меняется с продвижением процедуры обработки данных вглубь конструкции. Уже при решении задачи определения толщины верхнего слоя могут возникнуть трудности, связанные с наличием так называемого расслоения. В мировой англоязычной литературе существуют два сходных термина – delamination и segregation (расслоение и отслоение соответственно). Первый термин обозначает нарушение контакта между слоями покрытия, которое при условии проникновения влаги, особенно в осенне-зимний период, приводит к ускоренному разрушению покрытия. Второй термин – отслоение обозначает нарушение сцепления между вяжущим (битумом) и наполнителем (щебнем). Поскольку наличие расслоения приводит к быстрому разрушению дорожной одежды, разработка методики и средств обнаружения таких дефектов является важной практической задачей. С математической точки зрения задача заключается в определении наличия тонкого слоя (толщина до 5-9 мм) между двумя верхними слоями покрытия. Отметим, что это не единственный случай подобной постановки задачи. В некоторых случаях в контролируемых технических либо строительных конструкциях могут присутствовать слои небольшой по сравнению с другими слоями толщины. Имеется в виду, что такой слой изначально предусмотрен конструкцией и требуется определить его фактическую толщину. В такой ситуации задача с точки зрения получения и обработки информации является более простой, поскольку изначально известно о требованиях к слоистой среде и задача после начальной калибровки может быть сведена к оценке невязки между эталонными измерениями и результатами, полученными на контролируемом образце. Ключевое значение имеет тот факт, что все образцы по

остальным параметрам одинаковы. В дорожной отрасли и в строительной инженерии при контроле текущего состояния транспортных сооружений и строительных конструкций часто могут существенно изменяться все другие характеристики. Поэтому, если ранее были предложены методы решения обратных задач, основанные на применении процедуры минимизации некоторого сглаживающего функционала (фактически процедуры подгонки наблюдаемых данных под некоторый эталон), то теперь необходимо решать задачу пошагового восстановления свойств всей слоистой среды (всех слоев). Понятно, что даже с точки зрения чисто вычислительной реализации это существенно более сложная задача. Исходя из общей накопленной информации, сформулируем цель данной работы следующим образом – разработка методов, позволяющих обнаружить расслоение с помощью обработки данных дистанционного зондирования георадаром при выполнении определенных условий и ограничений.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ТОЛЩИНОМЕТРИИ И ВОЗМОЖНЫЕ МОДЕЛИ

Общая постановка задачи толщинометрии состоит в определении толщины слоёв и значений их диэлектрической проницаемости и, согласно [2,9], может быть представлена следующим образом:

- исследуемая среда (конструкция) облучается сверхширокополосным (СШП) импульсным зондирующим сигналом (Рис. 1);
- по результатам обработки временного профиля отражённого сигнала необходимо определить внутреннюю структуру плоскостройной среды и значения диэлектрической проницаемости слоёв;
- полученные данные необходимо сохранить для дальнейшего анализа.

В рамках стандартной постановки задачи решение обычно разбивают на несколько этапов [10]:

- после калибровки и первичной обработки набора данных с привлечением преобразования Гильберта определяются величины временных задержек сигналов ( $\Delta t_i$ ), отражённых от структурных границ и соответствующие амплитуды сигналов;
- по формуле, следующей из формул Френеля [11], определяется  $\sqrt{\varepsilon_1}$  и далее  $\varepsilon_1$  - диэлектрическая проницаемость верхнего слоя (где  $R_{j,j+1}$  - коэффициент отражения от нижней среды в верхнюю, которая в данном случае является свободным пространством):

$$\sqrt{\varepsilon_{j+1}} = \sqrt{\varepsilon_j} \frac{1 - R_{j,j+1}}{1 + R_{j,j+1}} \quad (1)$$

- далее, с помощью известных формул для коэффициентов прохождения  $T_{n\mp 1,n}$  [11]:

$$T_{n\mp 1,n} = \begin{cases} \frac{2\sqrt{\varepsilon_{n-1}}}{\sqrt{\varepsilon_{n-1}} + \sqrt{\varepsilon_n}} \\ \frac{2\sqrt{\varepsilon_n}}{\sqrt{\varepsilon_n} + \sqrt{\varepsilon_{n+1}}} \end{cases} \quad (2)$$

определяются  $T_{0,1}$ ,  $T_{1,0}$  - коэффициенты прохождения через верхнюю границу в первый слой и обратно, а также  $R_{1,2}$  - коэффициент отражения от нижней поверхности первого слоя,

$$R_{n-1,n} = \frac{A_{n,n-1}}{A_{n-1,n}} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{n-1}} - \sqrt{\varepsilon_n}}{\sqrt{\varepsilon_{n-1}} + \sqrt{\varepsilon_n}} \quad (3)$$

и далее согласно формуле (1) вычисляется уже значение  $\varepsilon_2$  - диэлектрической проницаемости второго слоя;

- затем вышеуказанные шаги повторяются вплоть до последней границы, где определяется только диэлектрическая проницаемость полубесконечной подложки;

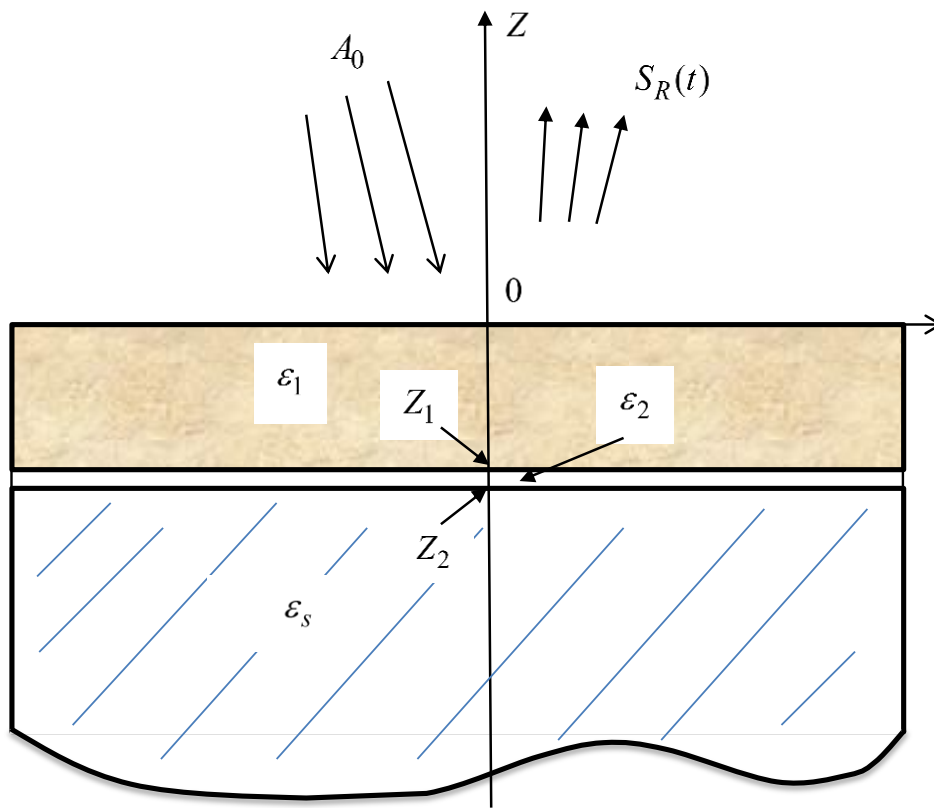


Рис. 1. Геометрия исследуемой среды.

- вычисляются координаты границ раздела между слоями как решение основного уравнения радиолокации [2, 10]:

$$D_i = \sum_{i=1}^I \frac{(\tau_i - \tau_{i-1}) \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_i}} = \sum_{i=1}^I \frac{\Delta \tau_i \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_i}}, \quad (4)$$

где:  $Z_i$  – координата  $i$ -й границы (верхняя граница имеет индекс 0),

$\tau_i, \tau_{i-1}$  – моменты прохождения сигналом  $i$  – й ( $i-1$ )– й границ соответственно, определенные на этапе 1,

$\epsilon_i$  - диэлектрическая проницаемость  $i$  – го слоя (определенная ранее),

$c$  – скорость распространения света в свободном пространстве (в воздухе);

- рассчитываются значения толщины слоев  $H_i$  по формуле:

$$H_i = Z_i - Z_{i-1}; \quad Z_0 = 0, i = 1, 2 \dots I. \quad (5)$$

В заключение добавим, что многие авторы рассматривают задачу в так называемом приближении однократного рассеяния. Иными словами, повторными отражениями сигнала от границ слоев пренебрегают. В такой постановке говорят о задаче определения формы импульсного сигнала и об алгоритме обработки такого сигнала. Для решения задач данного типа наиболее эффективным инструментом является использование так называемых сверхширокополосных (СШП) импульсных сигналов, иначе называемых импульсами без несущей. Большинство методов обработки таких сигналов основывается на модели возбуждения георадара с помощью сигнала, близкого к так называемой гауссоиде (иначе - импульс Гаусса) [1, 2]:

$$S(t) = A_1 \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right). \quad (6)$$

Дело в том, что в процессе излучения и приема сигналов дипольными антеннами форма сигнала меняется. В итоге приемная антенна регистрирует вместо сигнала (6) сигнал близкий ко второй производной от (6) [1, 2]:

$$S''(t) = A_1 \cdot (t^2 - 1) \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right). \quad (7)$$

В таком случае решение задачи толщинометрии может быть алгоритмизировано путем сведения ее к поиску максимумов положительно определенной функции [2]:

$$S_G(t) = |h(t)| = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)}, \quad (8)$$

где:  $\tilde{x}(t)$ ,  $x(t)$  – результаты применения преобразования Гильберта (прямого и обратного соответственно) к принятому антенной системой георадара сигналу [2, 9].

Наконец, еще раз отметим, что в рамках задачи о тонких слоях возможны две ситуации, о которых говорилось выше. В первом случае речь следует вести о слоях со значением электрической толщины, соизмеримой с пространственным размером зондирующего импульса. Такая ситуация детально рассмотрена ранее в [12]. Второй случай – задача по обнаружению расслоения с помощью методов дистанционного зондирования. Каждая из этих задач имеет свою специфику, и поэтому в рамках данной публикации мы сосредоточим основное внимание на второй задаче – поиска расслоения, т.е. нарушения контакта между слоями конструкции.

### АНАЛИЗ ТРУДНОСТЕЙ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ И РАНЕЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ ПОДХОДОВ К ИХ ПРЕОДОЛЕНИЮ

Сначала в данном разделе подробно рассмотрим алгоритм оценки расслоения, предложенный в работе [13]. Авторы этой работы рассматривают модель расслоения в виде наличия тонкого слоя конечной толщины. Для лабораторных экспериментов они использовали акриловые панели и георадар с центральной частотой 2 ГГц. Основные трудности в рамках такой постановки задачи возникают по нескольким причинам:

- в лабораторных условиях образцы имеют конечные размеры в горизонтальных направлениях,
- при наличии нескольких слоёв могут возникать многократные отражения между их границами (далее для краткости будем называть их переотражениями),
- толщина (в данном случае также иногда говорят о расслоении как о горизонтальной трещине) трещины может быть настолько малой, что отражения от ее верхней и нижней границ могут сливаться.

Для преодоления этих трудностей возможны различные меры. Например, самым простым вариантом преодоления первой проблемы является увеличение горизонтальных размеров модели. Такой вариант предложен в [13], где размеры модели составили около 2 метров вдоль каждой из горизонтальных осей при значении центральной частоты георадара, равной 2 ГГц. Существуют и другие методы борьбы с дифракционными эффектами отражения от краёв модельного образца, состоящие в привлечении процедур калибровки – проведения специализированных измерений с последующим выделением и вычитанием дифракционных отражений [14]. Для преодоления второй трудности можно выбрать значения толщины слоёв таким образом, чтобы избежать наложения сигналов, отраженных от разных границ [13]. Также может быть использован метод вычитания парциальных сигналов [14], суть которого в последовательном расчёте значений диэлектрической проницаемости слоёв и их толщины с последующей обработкой исходного сигнала, принятого приёмной антенной. Такая обработка предполагает формирование виртуальных сигналов, соответствующих отражениям от нижних структурных границ раздела верхнего слоя и последующее формирование сигнала, который был бы принят приёмной антенной при отсутствии верхнего слоя [13, 15]. Однако, в любом случае сигнал от участка с расслоением будет представлять собой либо сумму двух (или большего числа при наличии значительных переотражений) сигналов, либо один сигнал в случае, когда между слоями нет зазора. На Рис. 2 приведены фото двух кернов с нормальным контактом между слоями (а) и с небольшим зазором между слоями (б). Самую же большую сложность представляет третья проблема (Рис. 3). Дело в том, что как показывает опыт практических обследований автомобильных дорог с жесткими покрытиями, между слоями с нарушенным контактом может вообще, не существовать никакого зазора. В таком случае в процессе эксплуатации происходит взаимная «притирка» поверхностей и контактирующие поверхности являются практически гладкими. Понятно, что обнаружить нарушение сцепления между ними чисто радиолокационными методами в такой ситуации без привлечения дополнительной информации не представляется возможным. Один из возможных путей решения этой задачи заключается в проведении дополнительных измерений, например измерения упругого прогиба под эталонной нагрузкой или использование дефлектометра падающего груза. В таком случае появляется дополнительная информация о различиях в характеристиках соседних участков дороги, которая в совокупности с данными георадарного обследования может служить основой для построения алгоритмов



обнаружения и локализации расслоения.



а)

б)

Рис.2. Керна со сцепленными слоями (а) и с расслоением (б).



а)

б)

Рис.3. Керна с расслоением и плотным контактом. Общий вид (а) и вид разделенных поверхностей (б).

Однако, эта методика выходит за рамки чисто радиофизических задач и требует отдельного рассмотрения с привлечением соответствующих моделей и программного обеспечения. Поэтому в данной работе прежде всего проведём анализ метода обработки сигналов, предложенного в [13]. Используя стандартные формулы (в приближении плоской волны) для расчёта коэффициентов отражения и прохождения, соответствующие формулам (1,2), авторы приводят теоретические результаты расчётов сигналов, пришедших от тонкого промежуточного слоя, находящегося в составе общей многослойной среды. С точки зрения теории сигнал, отражённый такой продольной неоднородностью, представляет собой интерференционную картину волн, которые пришли в приёмную антенну от наружной и внутренней границ трещины с учётом затухающих повторных отражений между границами этого тонкого слоя [13]. Однако, для получения корректных математических оценок этот вопрос необходимо исследовать более тщательно. Для достижения наглядности и преодоления неоправданного усложнения выкладок, введём следующую систему обозначений:

$S_0, S_0(\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2), S_0(\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_2)$  – временное распределение сигналов с учётом задержки,

$R_0^+$  – коэффициент отражения от наружной поверхности в сторону положительного направления оси Z,

$T_0^-, T_0^+$  – коэффициенты прохождения сигнала через внешнюю поверхность среды ( $Z=0$ ) в отрицательном и положительном направлениях оси  $Z$  соответственно,

$T_1^-, T_1^+$  – коэффициенты прохождения сигнала через вторую границу среды ( $Z_1$ ) в отрицательном и положительном направлениях оси  $Z$  соответственно,

$R_1^+, R_1^-, R_2^+$  – коэффициенты отражения от первой границы (индекс 1) и от второй границы (индекс 2) в положительном направлении оси  $Z$  (знак +) и отрицательном направлении оси  $Z$  (знак -),

$$TT_0 = T_0^- \cdot T_0^+; \quad TT_1 = T_1^- \cdot T_1^+.$$

Тогда, учитывая, что толщина первого слоя много больше толщины второго, а третий слой имеет практически бесконечную толщину, запишем выражение для результирующего сигнала с учётом лишь двукратного отражения между границами второго слоя в следующем виде:

$$S_R(t) = S_0 \cdot R_0^+ + S_0 (\Delta\tau_1) \cdot R_1^+ \cdot TT_0 + S_0 (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2) \cdot TT_0 \cdot TT_1 \cdot R_2^+ + S_0 (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_2) \cdot TT_0 \cdot TT_1 \cdot R_2^+ \cdot R_1^- \cdot R_2^+ + \dots \quad (9)$$

В (9) первое слагаемое соответствует отражению от наружной границы среды, второе – сигналу, отражённому от нижней границы первого слоя и затем принятому приёмной антенной, третье слагаемое – сигналу, прошедшему один раз через нижний слой и принятому приёмной антенной, и последнее слагаемое соответствует сигналу, зарегистрированному приёмной антенной после двукратного прохождения через нижний слой. Далее необходимо с помощью формул (2,3) рассчитать амплитуды этих сигналов для различных соотношений между параметрами модели. Для этих целей выберем значения параметров, характерные для нескольких распространённых ситуаций. Первый набор параметров характерен для нового слоя асфальтобетона, уложенного на уже существующее покрытие, когда в результате нарушения технологии работ возникло расслоение, но при этом вода в месте нарушения контакта между слоями отсутствует. Второй вариант соответствует наличию большого радиоконтраста между слоями, что может быть связано с наличием воды в месте нарушения контакта. Третий вариант приведён для сравнения и соответствует наличию близкого по толщине слоя, но без нарушения контакта между слоями.

Для наглядности полученные результаты расчётов сведены в таблицу, где данные представлены в виде слагаемых выражения (9), которое теперь запишем в виде:

$$S_R(t) = S_0 \cdot C_0 + S_0 (\Delta\tau_1) \cdot C_1 + S_0 (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2) \cdot C_2 + S_0 (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_2) \cdot C_3 + \dots \quad (10)$$

Таблица .Результаты расчетов.

	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$
1 вариант	6,800	1,000	5,900	-0,446	0,357	-0,268	-0,050
2 вариант	6,800	80,000	5,900	-0,446	-0,440	-0,026	0,006
3 вариант	6,800	6,100	5,500	-0,446	0,022	-0,130	-0,001

При анализе расчётных данных, представленных в таблице, следует помнить, что все величины  $C_0, C_1, C_2, C_3$  в (10) содержат и ещё один множитель  $S_0$  с различными значениями аргументов. Вариации в значениях аргументов отражают временную задержку сигналов, пришедших от разных неоднородностей (первые три слагаемых) или претерпевших разное число переотражений (последнее слагаемое). Основу первого этапа анализа расчётных данных составляет сравнение амплитуд первых четырёх сигналов в (9). Прежде всего, отметим, что во всех рассмотренных случаях амплитуда последнего сигнала (результат повторного отражения внутри второго слоя) оказывается существенно меньше, чем для предыдущего сигнала. К тому же необходимо принимать во внимание тот факт, что при наличии зазора между слоями конструкции их поверхности не испытывают трения и могут сохранить естественную шероховатость, возникшую в процессе уплотнения при строительстве. С точки зрения дефектоскопии это приведёт к дополнительному рассеянию во флуктуационную компоненту и ещё более уменьшит амплитуду сигнала. Поэтому с учётом результатов моделирования можно сделать вывод о возможности учёта лишь первых трёх слагаемых в (10) в ситуации наличия расслоения при условии, что пространство между слоями не заполнено водой. При наличии воды между слоями асфальтобетона механизм взаимодействия приобретает иной характер ввиду величины относительной диэлектрической проницаемости воды (80). В такой ситуации второй слой является своеобразным «экраном» для дальнейшего распространения сигнала и при этом амплитуда сигнала, отражённого от внешней границы соизмерима по величине с амплитудой аналогичного сигнала в первом случае (заполнение воздухом). По понятным причинам знаки у соответствующих множителей разные. Таким образом, дальнейший анализ

необходимо проводить с учётом отмеченных результатов (Таблица) и также с учётом формы зондирующего импульса во временной области. Очевидно, что необходимо также учитывать и знаки при коэффициентах в Таблице 1. В частности, авторы работы [13] предлагают строить алгоритм распознавания наличия расслоения именно на обнаружении наличия двух сигналов разной полярности, пришедших от близко расположенных границ. Это подтверждают и данные первой строки в Таблице 1. Конкретно, коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$  имеют незначительно отличающиеся амплитуды, а  $C_3$  также отрицателен, но при этом он и значительно меньше по величине, чем  $C_1$  и  $C_2$ . Следовательно, для дальнейшего продвижения необходимо более детально исследовать форму распределения такого сигнала во времени. Для этого используем программу «GeoVizu» сначала в режиме моделирования сигналов. Общая задача проведённых вычислительных экспериментов заключалась в:

- подтверждении принципиальной возможности обнаружения факта наличия расслоения в дорожной одежде нежесткого типа;
- исследовании влияния характеристик как самой дорожной одежды, так и импульсных СШП сигналов;
- оптимизации параметров зондирующего сигнала с целью повышения надёжности и достоверности обнаружения расслоения (очевидно, что речь идёт о верхних слоях конструкции);
- разработке практических рекомендаций для дорожных инженеров и операторов георадаров с целью повышения производительности их труда и обеспечения эффективных решений;
- формулировке задач последующих этапов как в чисто научном плане (с точки зрения электродинамики и теории дифракции), так и для создания более эффективных алгоритмов интерпретации наборов данных, получаемых с помощью современных СШП георадаров.

Для решения задач первых трёх пунктов были проведены серии вычислений временного распределения импульсного СШП сигнала, отражённого конструкцией дорожной одежды с расслоением в рамках простейшей модели, которая представляла собой верхний слой толщиной 6 см с относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_1 = 6.8$ , и следующий слой толщиной 0.7 см (модель расслоения) с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_2 = 1.0$  (заполнение - воздух) и подложку, как модель старого покрытия с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_3 = 5.9$  (это типичное значение для изношенного асфальтобетона, который уже имеет много пор). Для упрощения анализа и достижения большей наглядности мы приняли толщину нижнего слоя такой (90 см), чтобы отражение от ее нижней границы не попадало в область развёртки сигнала (10 нс), разумеется, с учётом начального момента регистрации сигнала. Зондирующий импульс имеет следующие характеристики: смещение момента максимума импульса относительно начала шкалы отсчёта – 2 нс, амплитуда - 1, значение так называемого частотного множителя  $M$ , определяющего возбуждающий генератор импульс:

$$S(t) = A_1 \cdot \exp\left(-M \cdot \left(\frac{t^2}{2}\right)\right) \quad (11)$$

и, как следствие, форму зондирующего импульса (крутизну фронта импульсного сигнала), который теперь описывается соотношением:

$$S''(t) = A_1 \cdot M \cdot [M \cdot t^2 - 1] \exp\left(M \cdot \left(-\frac{t^2}{2}\right)\right). \quad (12)$$

Вид сигнала, отражённого от такой конструкции, приведён на Рис. 4. В правом верхнем углу в таблице приведены значения толщины и диэлектрической проницаемости слоёв. Амплитуда исходного сигнала равна 1, а значение множителя  $M$  в (12) принято равным 45. На рисунке хорошо виден сигнал (2), отражённый от расслоения (тонкий промежуточный слой). Он, как и говорилось ранее, имеет два практически одинаковых экстремума и внешне похож на график первой производной от гауссоиды (6).

Для наглядности на Рис.5 представлены два графика, соответствующие первой производной от гауссоиды (линия 1):

$$S'(t) = -A_1 \cdot M \cdot (t - t_s) \cdot \exp\left(-M \cdot \left(\frac{(t - t_s)^2}{2}\right)\right) \quad (13)$$

и двум графикам второй производной, но сдвинутым во времени (линия 2).

Сравнительный анализ графиков на Рис. 4, 5 свидетельствует, что сигнал 2 на Рис. 4 соответствует отражению импульса от тонкого слоя (расслоения) поскольку, как видно из Рис. 5, сигнал, соответствующий первой производной от гауссоиды, имеет два экстремума. В то же время, сигнал,



соответствующий двум графикам второй производной, но сдвинутым во времени, имеет еще небольшой третий экстремум (он обведён овалом на Рис. 5). Ещё необходимо выяснить природу сигнала на Рис. 4, который по форме похож на зондирующий импульс с относительно небольшим максимумом в точке 4.2 нс. Для выяснения природы этого сигнала было проведено моделирование с целью установить влияние повторных отражений зондирующего сигнала между границами (верхней и нижней) первого слоя. Для этого были проведены расчёты по двум моделям, соответствующим разной толщине верхнего слоя. Результаты расчётов представлены на Рис. 6.

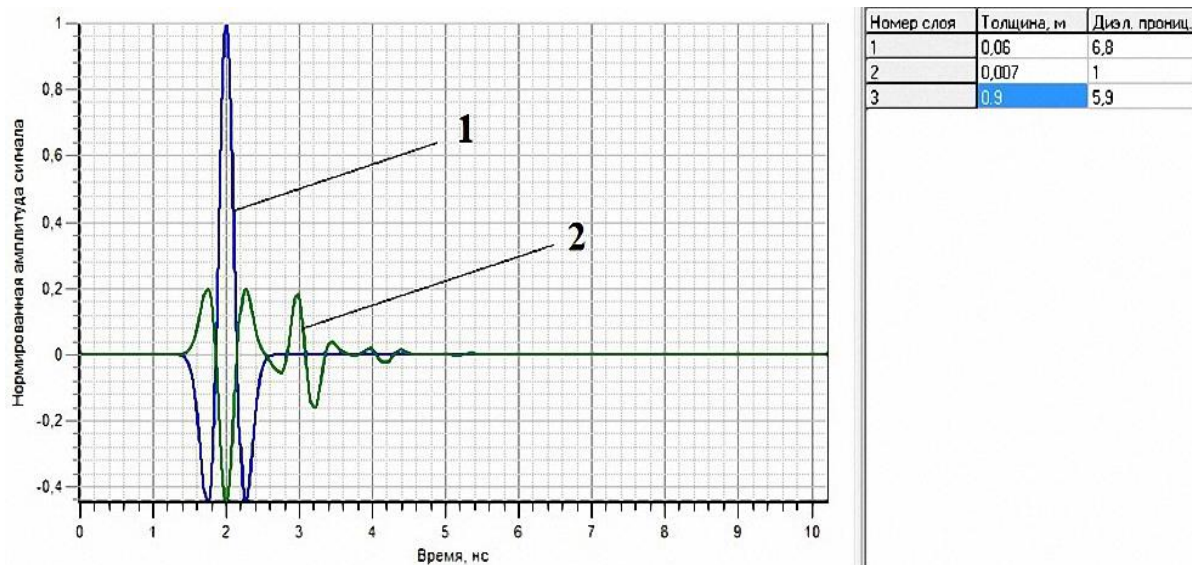


Рис. 4. Вид временного распределения зондирующего сигнала (1) и импульса, отражённого от трёхслойной конструкции (2).

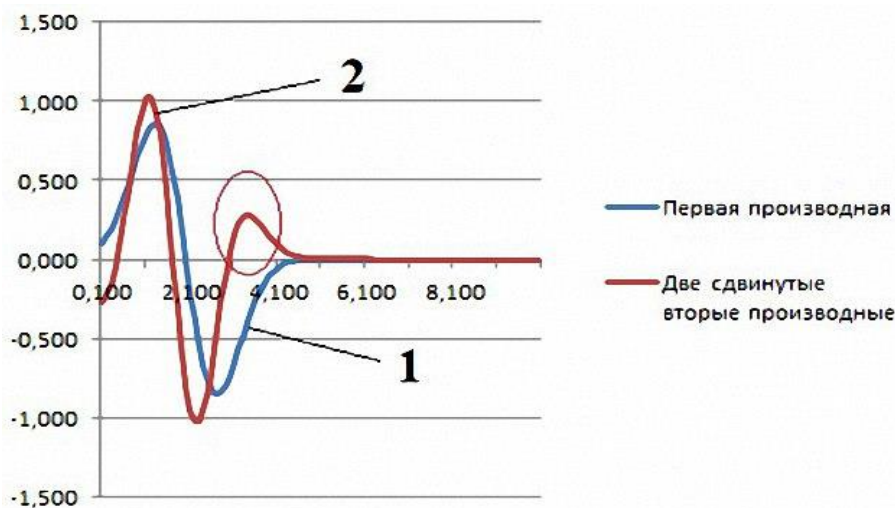


Рис. 5. Вид временного распределения сигнала, соответствующего первой производной от гауссоиды (1) и двум графикам второй производной, но сдвинутым во времени (2).

Если учесть, что временная задержка  $\Delta T$  связана со значением толщины слоя  $H$  так называемым основным уравнением радиолокации, которое в данном случае можно переписать в следующем виде:

$$\Delta T = \frac{c \cdot \sqrt{\epsilon_1}}{2 \cdot H}; \quad (14)$$

то с учётом изменения толщины слоя в  $8.4/5.5=1.5$  раза получаем в точности такую же временную задержку  $D$  на Рис. 6. Максимум первого сигнала приходится на момент  $(4-2=2)$  нс, а второго сигнала – на момент  $(5-2=3)$  нс. Отсюда вычисляем  $3/2=1.5$ , что и является подтверждением высказанной выше гипотезы о том, что этот сигнал является повторным отражением зондирующего импульса между

границами верхнего слоя. К сожалению, ограниченный объем данной работы не позволяет детально рассмотреть все аспекты, связанные с процессом взаимодействия импульсных СШП сигналов с плоскостойкими средами. Авторы надеются уделить этим проблемам внимание в последующих публикациях.

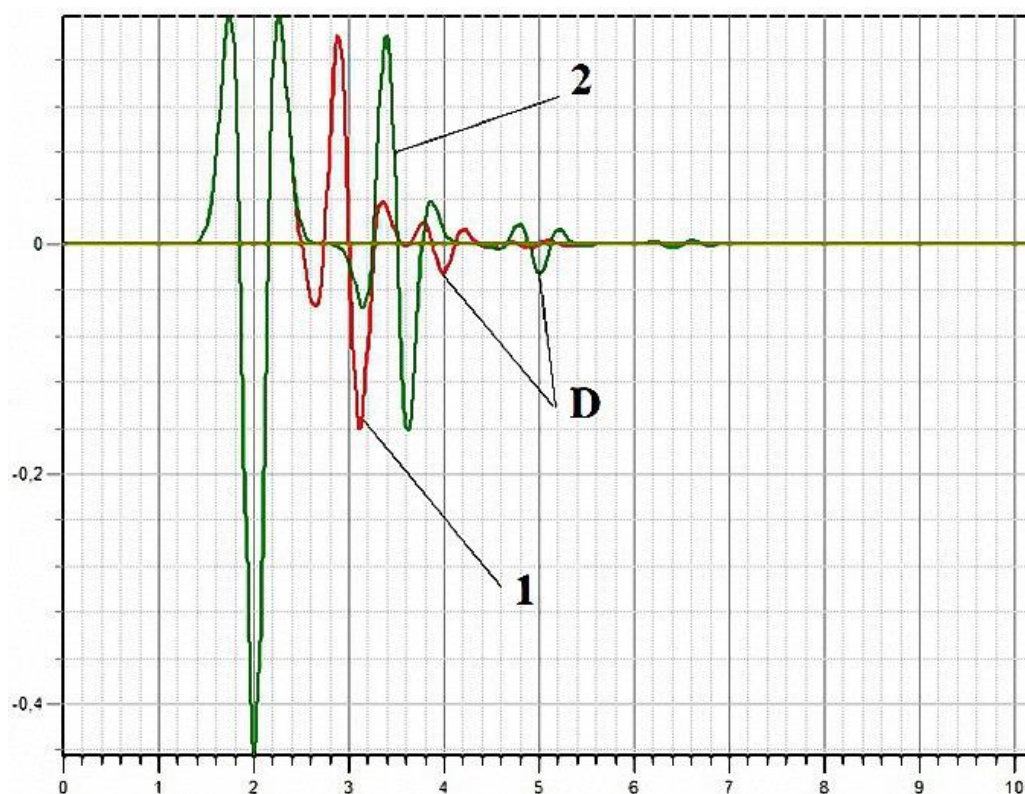


Рис. 6. Вид временного распределения сигналов, соответствующего толщине верхнего слоя 5.5 см. (1) и 8.4 см. (2).

## ВЫВОДЫ

В работе проведён анализ различных методов обработки сигналов импульсных георадаров с целью изучения возможностей методов и алгоритмов обработки георадарных данных для повышения надёжности обнаружения такого опасного дефекта технических конструкций как расслоение. В процессе обработки модельных и экспериментальных данных применялись, в первую очередь, современные теоретические методы обработки сигналов и программное обеспечение GeoVizu. В итоге установлены и проанализированы факторы, определяющие отличия и характерные особенности импульсных сигналов георадаров, которые могут использоваться для обнаружения расслоения как нарушения контакта между слоями, или обнаружения наличия тонких слоёв в составе многослойной среды. Таким образом, предложенный подход к постановке задачи совместно с проделанным теоретическим анализом и результатами численного моделирования позволили в итоге обосновать возможность повышения надёжности процедуры неразрушающего контроля качества и эффективного выявления критических дефектов в плоскостойких конструкциях с помощью методов георадиолокации.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

### Authors' ORCID ID

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

Иян Ло <https://orcid.org/0000-0002-3376-5814>

Антюфеева М.С. <http://orcid.org/0000-0002-6654-4794>

Шульга С.Н. <https://orcid.org/0000-0003-0626-4405>

Батракова А.Г. <http://orcid.org/0000-0002-4067-4371>

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ground penetrating radar, theory and applications / [Jol Harry M. (Editor)]. Amsterdam: Elsevier B.V., 2009, 508 p.
2. S 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. P. 20-65. ISBN 9781466586574 - CAT# K20299
3. Tarefder R. A. and Ahmed M. U. Ground penetrating radar for measuring thickness of an unbound layer of a pavement. In Advances in Intelligent Systems and Computing, 2018, vol. 598, pp. 160–167.
4. Saarenketo T.: Electrical Properties of Road Materials and Subgrade Soils and the Use of Ground Penetrating Radar in Traffic Infrastructure Surveys, Faculty of Science, Department of Geosciences, University of Oulu, Academic dissertation, 2006, 125pages. <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9514282221.pdf>
5. Saarenketo T. Road evaluation with ground penetrating radar / T. Saarenketo, T. Scullion // Journal of Applied Geophysics. – 2000. – Vol. 43. – P. 119–138.
6. Loizos A. Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches./ Loizos A.; Plati C. / NDT E Int. **2007**, 40, 147–157. [CrossRef]
7. Oliveira D.B. A well posed inverse problem for automatic pavement parameter estimation based on GPR data. / Oliveira D.B.; Vieira D.A.G.; Lisboa A.C.; Goulart F./ NDT E Int. **2014**, 65, 22–27. [CrossRef]
8. Dong Z. Rapid Detection Methods for Asphalt Pavement Thicknesses and Defects by a Vehicle-Mounted Ground Penetrating Radar (GPR) System. / Dong Z.; Ye S.; Gao Y.; Fang G.; Zhang X.; Xue Z.; Zhang T. / Sensors 2016, 16(12), 2067; <https://doi.org/10.3390/s16122067>. <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/12/2067>
9. 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.
10. Батраков Д.О. Обработка импульсных сигналов при толщинометрии биологических тканей и неразрушающем контроле / Д.О. Батраков // Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна. – X. : ХНУ, 2016. – вип. 25. – С. 48-52. – (Серія: «Радіофізика та електроніка»)
11. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / М.: Наука, 1973. 720 с.
12. Batrakov, D.O., Antyufeyeva, M.S., Antyufeyev, A.V., Batrakova, A.G. UWB signal processing during thin layers thickness assessment. 2016 IEEE Radar Methods and Systems Workshop, September 27-28, 2016, Kyiv, Ukraine, P. 36-39.
13. 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](http://www.ijprt.org.tw/mailweb/files/sample/V4N3_176-184.pdf)
14. Батраков Д. О. Інформаційні технології та обробка георадарних сигналів у системі моніторингу транспортних споруд. (Розділ 3. С. 66-108) У кн. Інформаційні технології та інженерія транспортних і промислових споруд. Колективна монографія під загальною редакцією проф. Батракової А.Г., Харків, 2019, 244 с., Міносвіти і науки України, ХНАДУ, затверджено до видання Вченою Радою ХНАДУ, протокол №1, від 31. 05. 2019р. ISBN978-617-7771-45-5. ФОП Панов А. М.
15. 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](http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10589759.2012).