

УДК 621.574.4

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ АЛГОРИТМОВ ТОЛЩИНОМЕТРИИ  
ПЛОСКОСЛОИСТЫХ СРЕД С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНЫХ ГЕОРАДАРОВ****Д.О. Батраков<sup>1</sup>, У Дион<sup>1</sup>, К.С. Белошенко<sup>1</sup>, М.С. Антюфеева<sup>1</sup>,  
А.Г. Батракова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, факультет радиофизики, биомедицинской электроники и компьютерных систем  
пл. Свободы 4, Харьков, 61022, Украина  
E-mail: rff\_bat5@yahoo.com*

<sup>2</sup> *Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет.  
ул. Ярослава Мудрого 25, Харьков, 61001, Украина  
Поступила в редакцию 10 мая 2018 г.*

Проведен сравнительный анализ двух методов обработки сверхширокополосных сигналов импульсных георадаров в процессе мониторинга текущего состояния нежестких дорожных одежд. Подтверждена высокая эффективность обследований автомобильных дорог с помощью георадарных комплексов, установленных на автомобиле-лаборатории. Применение георадаров обеспечивает низкую себестоимость мониторинга за счет с одной стороны возможности получения первичных данных при движении автомобиля-лаборатории со скоростью транспортного потока, а с другой стороны – за счет исключения таких дорогостоящих операций контроля как отбор кернов и вырубки покрытия. Также установлены преимущества применения преобразования Гильберта и интегрального преобразования для обеспечения надежного и удобного разделения парциальных импульсов в сложных сигналах, отраженных от плоскостойких сред с близко расположенными внутренними границами (тонкими слоями). Указаны практические критерии пределов применения визуальной обработки сигналов и практические рекомендации по дальнейшему усовершенствованию алгоритмов интерпретации массивов георадарных данных.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** толщинометрия, георадары, подповерхностное зондирование, импульсные сигналы

Проведено порівняльний аналіз двох методів обробки надширококутових сигналів імпульсних георадарів в процесі моніторингу поточного стану нежорстких дорожніх одягів. Підтверджено високу ефективність обстежень автомобільних доріг за допомогою георадарних комплексів, встановлених на автомобілі-лабораторії. Застосування георадарів забезпечує низьку собівартість моніторингу за рахунок з одного боку можливості отримання первинних даних при русі автомобіля-лабораторії зі швидкістю транспортного потоку, а з іншого боку - за рахунок виключення таких дорогих операцій контролю як відбір кернів і вирубки покриття. Також встановлено переваги застосування перетворення Гільберта і інтегрального перетворення для забезпечення надійного і зручного розділення парціальних імпульсів в складних сигналах, відбитих від плоскошаруватих середовищ з близько розташованими внутрішніми границями (тонкими шарами). Вказані практичні критерії меж застосування візуальної обробки сигналів і практичні рекомендації щодо подальшого удосконалення алгоритмів інтерпретації масивів георадарних даних.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** товщинометрія, георадари, підповерхнєве зондування, імпульсні сигнали

A comparative analysis of two methods for processing ultra-wideband signals of pulsed ground penetrating radar during monitoring the current condition of non-rigid pavements was provided. The high efficiency of inspections of highways with the help of GPR systems installed on the automobile laboratory was confirmed. The use of georadars ensures low monitoring cost due to the possibility of obtaining primary data while car-laboratory moves at a speed of traffic flow, and on the other hand, by eliminating such costly control operations as core sampling and cutting of the pavement. The advantages of using the Hilbert transform and integral transform to ensure reliable and convenient separation of partial pulses in complex signals reflected from plane-layered media with closely spaced internal boundaries (thin layers) are also established. The practical criteria for the limits of the application of visual signal processing and practical recommendations for the further improvement of algorithms for the interpretation of GPR data arrays are indicated.

**KEY WORDS:** thickness measurement, GPR, subsurface sounding, impulse signals

**ВВЕДЕНИЕ**

Развитие таких эффективных средств дистанционного зондирования, как импульсные георадары, привлекает внимание многих исследователей к решению задач разработки новых и повышения эффективности существующих методов обработки первичной информации и интерпретации получаемых данных [1-6]. Изначально такие задачи сводились к определению пространственного распределения неизвестных коэффициентов (например, диэлектрической проницаемости) в известных уравнениях (краевых задачах) по наборам регистрируемых в дальней зоне решений (полей) [1, 2]. Это наиболее общая постановка задачи, поскольку допускает восстановление свойств не только дискретных (кусочно-

непрерывных), но и непрерывных профилей (распределений). С математической точки зрения такие задачи, вообще говоря, принадлежат классу так называемых некорректных задач, что вызвано неполнотой исходных данных и, как следствие, неустойчивостью решений и невозможностью получить единственное решение. Однако в одном важном частном случае – кусочно-постоянного распределения диэлектрической проницаемости при условии, что потерями можно пренебречь (с физической точки зрения – это плоскослоистая среда с конечным числом слоев конечной толщины на полубесконечной подложке) задача упрощается и может быть поставлена в математически корректной формулировке [4]. Подчеркнем, что в такой постановке речь идет о задаче существенно меньшей размерности – требуется определить  $2N+1$  чисел: значений толщины и диэлектрической проницаемости  $N$  слоев и еще одно число – значение диэлектрической проницаемости полубесконечной подложки. Кроме того, использование так называемых видеоимпульсов (импульсов без несущей) позволяет применить алгоритм пошагового восстановления толщины и диэлектрической проницаемости слоев, начиная с наружной границы. Такой алгоритм подробно изложен в [7-9]. Суть алгоритма состоит в первичной калибровке – определении сигнала прямого прохождения и отражения от листа металла (для использования затем в качестве зондирующего сигнала). Далее осуществляется пошаговый процесс определения значений диэлектрической проницаемости и толщины слоев, начиная от наружной границы среды. Для относительно небольшого числа слоев (3-5), толщина которых соизмерима с пространственным размером импульса и при возможности пренебречь поглощением такой подход позволяет получить, и притом единственное, решение задачи толщинометрии. Еще одной актуальной прикладной задачей является поиск внутренних неоднородностей в плоскослоистых средах. Модели неоднородностей могут соответствовать как дефектам (подповерхностные трещины, расслоение – нарушение контакта между слоями, полости), так и различным коммуникациям или инженерным конструкциям (кабели, трубы, дренаж) [5, 6, 10].

Для решения задач этого класса предложено большое число различных методов и алгоритмов обработки информации. Они основаны на базовой модели и нескольких фундаментальных формулах, которые, по сути, являются формулами Френеля, записанными в той или иной форме. Однако с точки зрения практической реализации (с точки зрения конечного пользователя, например, дорожного инженера) возникает естественный вопрос об эффективности, точности и достоверности соответствующих методов и алгоритмов обработки информации. Понятно, что простого и однозначного ответа на такой вопрос не существует ввиду значительного разнообразия как самих методов, так и технических средств, и исследуемых конструкций. Это значит, что возможен лишь сравнительный анализ основных подходов с целью выбора наиболее адекватного метода обработки информации в соответствии со спецификой конкретной задачи и имеющимися техническими средствами. Поэтому **целью** настоящей работы является проведение такого анализа в отношении двух методов, предложенных первоначально в работах [5] и [8, 9].

#### **РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТОЛЩИНОМЕТРИИ И ДЕФЕКТОСКОПИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АМПЛИТУД И ЗАДЕРЖЕК**

В данном разделе рассмотрим подход к решению задачи контроля текущего состояния покрытий автомобильных дорог, предложенный в работе [5]. Авторы используют систему из двух георадаров с так называемой воздушной связью (air-coupled) с центральными частотами 1 и 2 ГГц и четырех георадаров с так называемыми «заземленными» (ground-coupled) антеннами с центральной частотой 300 МГц. Первые две антенны использовались для определения толщины верхних слоев покрытия асфальтобетона и поиска дефектов в них. В современных условиях при измерениях георадарами на автомобильных дорогах необходимо учитывать электромагнитный фон (out-of-band environment noise) и наличие так называемого сигнала прямого прохождения. Последний представляет собой часть мощности зондирующего сигнала, которая проникла на вход приемной антенны. С точки зрения радиолокации проблема заключается в невозможности разделения сигнала прямого прохождения и сигнала, отраженного от наружной границы зондируемой среды, поскольку время прохождения сигнала между излучающей апертурой антенны и внешней поверхностью среды (в двух направлениях) соизмеримо с длительностью импульса. В таком случае понятно, что часть излучаемого сигнала будет накладываться на приходящий в антенну отраженный сигнал. По этой же причине использование одной приемопередающей антенны приводит к необходимости переключения антенны в режим приема до окончания излучаемого импульса. Задачу учета сигнала прямого прохождения, как правило во всех случаях [5, 8, 9], решают стандартным методом – записывают сигнал, полученный при ориентации антенн в свободное пространство (рис. 1) и затем вычитают его из всех остальных сигналов. Кроме того, при необходимости можно провести удаление постоянной составляющей тока, не несущей никакой полезной информации. Стандартная процедура такой операции состоит в вычислении среднего значения сигнала по всему окну развертки и последующего вычитания полученного значения из всех сигналов. С точки зрения оператора

это приводит к смещению горизонтальной средней линии сигнала к нулевому уровню. Иными словами, после такой операции среднее значение сигналов должно быть равным нулю, что соответствует физической сути процесса зондирования. С математической точки зрения эта процедура описывается формулой:

$$U_m = U_{reg,m} - \frac{1}{N_{max}} \sum_{n=1}^{N_{max}} u_n, \quad m = 1, 2, \dots, N_{max}. \quad (1)$$

где:  $U_m$ ,  $U_{reg,m}$ ,  $u_n$ ,  $N_{max}$  – результирующее значение уровня сигнала в отсчете с номером  $m$ , зарегистрированное значение уровня сигнала в отсчете с номером  $m$ , текущие значения в точках отсчетов при регистрации сигналов и максимальное число отсчетов за время развертки соответственно.



Рис. 1. Георадар «TRF-1» во время регистрации сигнала прямого прохождения (а) и записи сигнала, отраженного от листа металла (b).

Следующий шаг – регистрация зондирующего сигнала. Поскольку для проведения корректной обработки нужно именно распределение сигнала, который бы попал в приемный тракт от передающей антенны, то наиболее распространенным способом регистрации такого сигнала является запись сигнала, отраженного от листа металла, при условии, что антенный блок находится на том же расстоянии от листа, что и наружная поверхность исследуемой среды при дальнейшем зондировании. Эту операцию иногда называют калибровкой [5], несмотря на то, что в некоторых случаях такое название может привести к недоразумениям. Следующие две распространенные операции – фильтрация и коррекция амплитуд. Фильтрация может представлять как стандартную процедуру оконной фильтрации, так и более специализированные и сложные методы коррекции свойств (характеристик) сигналов. Коррекция – как правило, специфическое изменение амплитуды сигнала. В [5] авторы под термином коррекция подразумевают изменение амплитуды для компенсации эффекта отклонения реальной формы фронта импульса от плоской и другие эффекты, связанные с отличием значений амплитуды сигналов от теоретических моделей. В качестве функции, описывающей изменение энергии зондирующей электромагнитной волны в [5] предложено использовать амплитудную функцию следующего вида:

$$A(R) = G(R)A_0 \exp(-\alpha R) \quad (2)$$

где:  $A_0$ ,  $\alpha$ ,  $G(R)$  – начальная амплитуда сигнала в апертуре антенны, множитель, отвечающий за ослабление сигнала и функция, описывающая ослабление амплитуды при распространении сигнала. В качестве такого множителя авторы в [5] принимают функцию вида:

$$G(R) = \frac{1}{R} \quad (3)$$

и предлагают по сути домножать измеренные в процессе эксперимента значения амплитуды сигналов на величину  $1/G(R)$ . Затем авторы применяют так называемый метод локализации границы слоя (*Layer Localization Method*), основанный на обработке нескольких подобных сигналов и последующем выделении отметки о границе. Это возможно благодаря высокой частоте повторения зондирующих импульсов, что приводит в конечном итоге к наличию нескольких идентичных сигналов, отраженных от

одного участка поверхности. Далее эти сигналы используются для повышения надежности работы алгоритма определения места расположения сигналов от внутренних границ на временной оси. На следующем шаге производится обработка зарегистрированных сигналов на основе формул Френеля для коэффициентов отражения и прохождения плоской волны через границу раздела слоев плоскостойкой среды. Для расчетов амплитуд поля на внутренних границах авторы используют итоговую формулу следующего вида:

$$A_n = A_m \frac{\sqrt{\varepsilon_{r,n}} - \sqrt{\varepsilon_{r,n+1}}}{\sqrt{\varepsilon_{r,n}} + \sqrt{\varepsilon_{r,n+1}}} \cdot \left[ \prod_{i=0}^{n-1} (1 - \gamma_i^2) \right]. \quad (4)$$

где  $A_m$  – амплитуда падающего сигнала. Таким образом для диэлектрической проницаемости слоя с номером  $n$  следует соотношение:

$$\varepsilon_{r,n} = \varepsilon_{r,n-1} \left( \frac{1 - \left(\frac{A_0}{A_m}\right)^2 - \sum_{i=1}^{n-2} \gamma_i \frac{A_0}{A_m} - \frac{A_{n-1}}{A_m}}{1 - \left(\frac{A_0}{A_m}\right)^2 - \sum_{i=1}^{n-2} \gamma_i \frac{A_0}{A_m} + \frac{A_{n-1}}{A_m}} \right)^2, \quad \forall n = 2, \dots, N. \quad (5)$$

После определения диэлектрической проницаемости среды за соответствующей границей можно вычислить толщину слоя за ней. Для этого используется стандартное уравнение радиолокации, которое в данном случае удобно записать в виде:

$$d_n = \frac{v \cdot \Delta t_n}{2} = \frac{c \cdot \Delta t_n}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_n}}, \quad (6)$$

где:  $c$ ,  $\Delta t_n$ ,  $\varepsilon_n$ ,  $d_n$  – скорость света в свободном пространстве, задержка, т.е. время прохождения сигнала от наружной границы к внутренней и обратно, диэлектрическая проницаемость материала слоя с номером  $n$ , и значение толщины этого слоя.

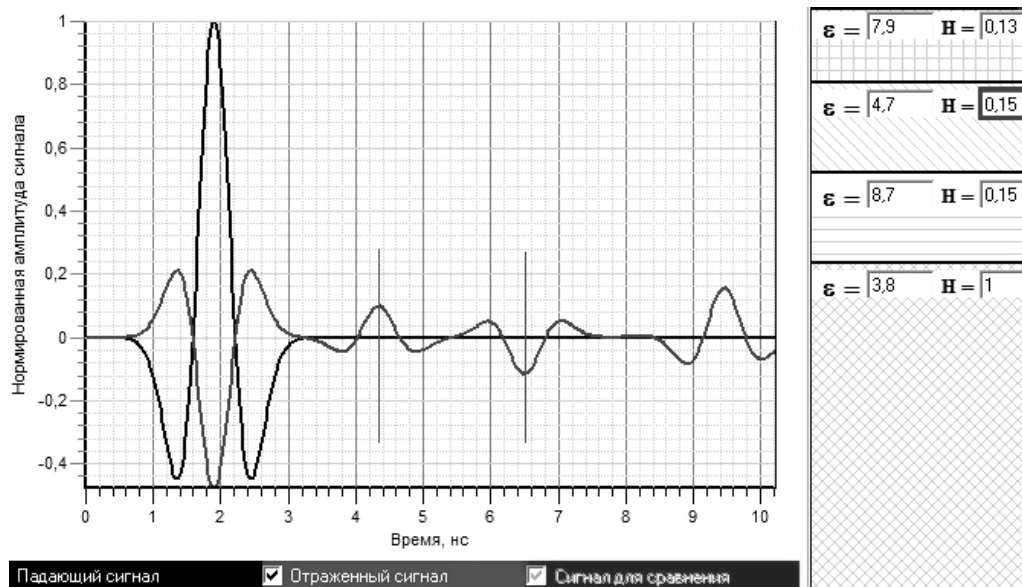
Однако использованные антенные блоки не позволяют исключить влияние переменных источников посторонних сигналов, например, сигналов операторов сотовой связи. Трудность заключается именно в изменяющемся характере этих сигналов. Поэтому если даже вычесть такой сигнал в процессе калибровки, то затем его изменение уже не будет учтено корректно, что может привести к серьезным ошибкам в результатах интерпретации полученных данных. Поэтому на кафедре теоретической радиофизики ХНУ имени В.Н. Каразина был изготовлен георадар «TRF-1» со специализированным антенным блоком (рис.1). В следующем разделе кратко рассмотрены его основные особенности.

### ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО АНТЕННОГО БЛОКА ГЕОРАДАРА «TRF-1» ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

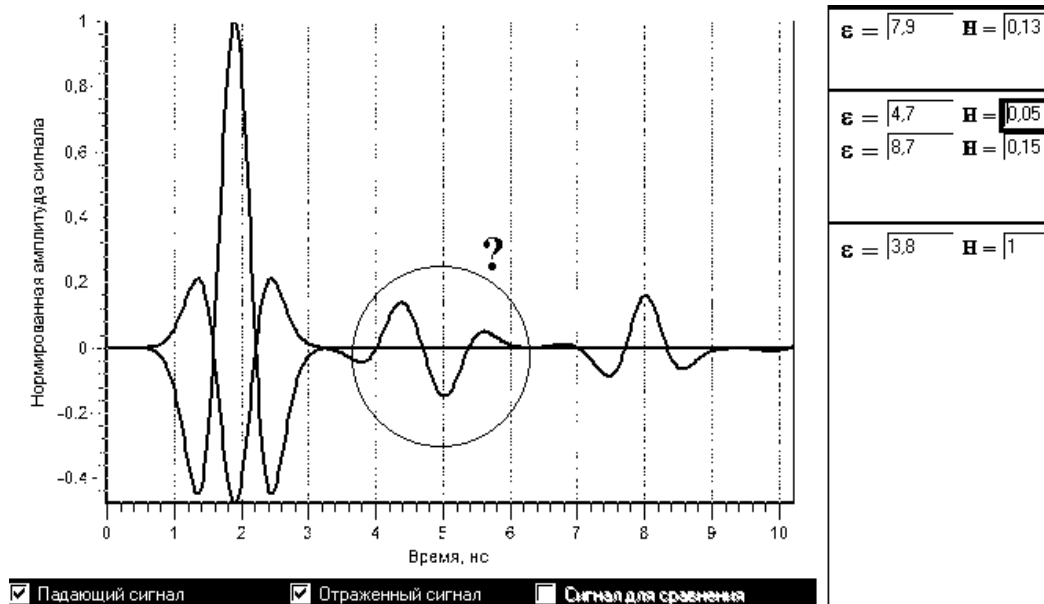
Детальное обсуждение основных физических принципов, положенных в основу работы антенного блока георадара «TRF-1», приведено в [7]. Поэтому теперь мы лишь кратко остановимся на основных отличиях и преимуществах такой системы. Антенный блок георадара «TRF-1» состоит из одной передающей и двух приемных дипольных антенн типа бабочка. Основная особенность такой конструкции в том, что приемные антенны расположены симметрично по отношению к передающей антенне и подключены таким образом, чтобы обеспечить автоматическое вычитание мощного сигнала прямого прохождения от передающей антенны. Кроме того, наличие двух антенн, включенных «навстречу» друг другу, обеспечивает и автоматическое вычитание сигналов, пришедших из направлений, близких к плоскости симметрии антенны. Иными словами, при зондировании дорожных покрытий сигналы, приходящие от источников, расположенных поблизости и на небольшой высоте от поверхности земли, также будут автоматически вычитаться из полезных сигналов, которые приходят в направлении нормали к плоскости антенн. Еще одна особенность состоит в привлечении для обработки данных двух дополнительных преобразований – преобразования Гильберта и специального интегрального преобразования [12]. Возможности обработки сигналов с привлечением преобразования Гильберта изложены в работе [11], а особенности второго интегрального преобразования – в [12]. Эти преобразования играют полезную роль в ситуациях, когда результирующий импульсный сигнал представляет собой суперпозицию нескольких сигналов, отраженных от среды из электрически тонких слоев. В таком случае сигнал будет иметь несколько локальных экстремумов. Результаты моделирования и обработки сигналов показаны на рис. 2, 3. Введем в рассмотрение параметр «электрическая толщина

слоя»  $L_e$  и параметр «пространственный размер импульса»  $D_l$ , связанные с геометрической толщиной слоя  $d$ , его диэлектрической постоянной  $\epsilon$  и длительностью импульса  $T_i$  соотношениями:

$$L_e = d \cdot \sqrt{\epsilon}; \quad D_l = c T_i \cdot \sqrt{\epsilon} . \quad (7)$$



а)



б)

Рис. 2. Результаты моделирования отражения импульсных сигналов от «электрически толстых» слоев (а) и при наличии одного «электрически тонкого» слоя (б).

При условии, что электрическая толщина слоев больше, чем пространственный размер импульса, на временном разрезе отраженного сигнала наблюдаются отдельные отметки от сигналов, отраженных от разных внутренних неоднородностей (границ) – рис. 2 а. Эти отметки можно легко различить и идентифицировать. Для удобства справа отображены значения толщины ( $H$ ) и диэлектрической постоянной  $\epsilon$  слоев. Всего в конструкции три слоя на полубесконечной подложке. Однако ситуация существенно изменяется, когда электрическая толщина хотя бы одного слоя становится меньше пространственного размера импульса. В таком случае на экране происходит взаимное перекрытие различных импульсов, и картина выглядит, как на рис. 2 б.

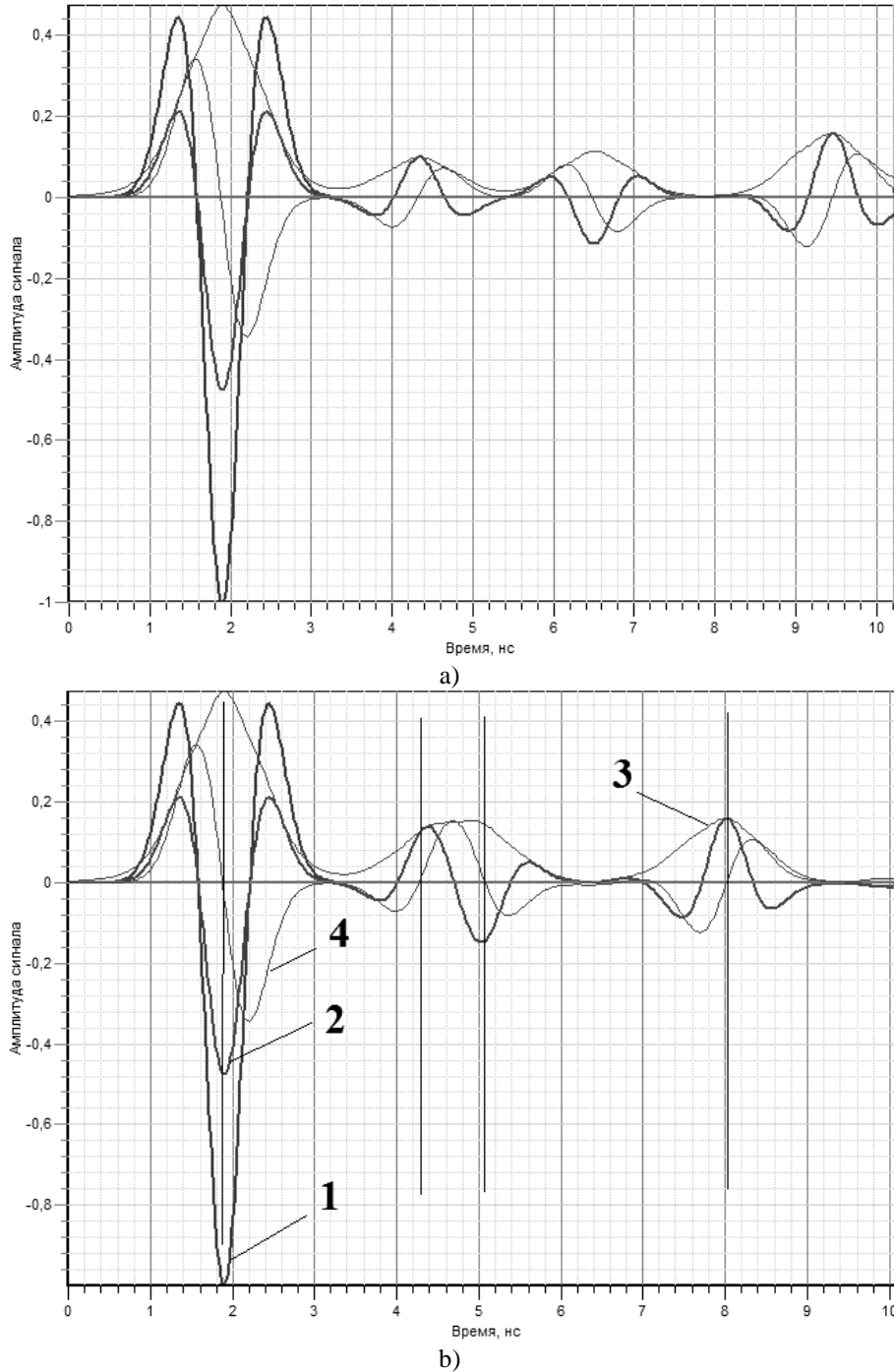


Рис. 3. Зондирующий импульс (1) и отраженный сигнал (2), а также результаты применения к отраженному сигналу преобразования Гильберта (3) и интегрального преобразования (4) для структуры с «электрически толстыми» слоями (а) и «электрически тонкими слоями» (б).

Очевидно, что даже визуальный анализ оператором такого распределения является существенно более сложной задачей, не говоря уже о получении количественных оценок. В то же время, обработка сигналов с применением преобразования Гильберта позволяет легко определить положение максимумов однополярной кривой 3 на рис. 2 а. Однако, как видно на рис. 3 б, при наличии электрически тонкого слоя (второй слой в конструкции толщиной 5 см. и с  $\epsilon = 4.7$  (рис. 2 б) на графике имеются два близко расположенных максимума, идентификация которых теперь затруднена. В таком случае помогает применение интегрального преобразования, суть которого, в отличие от предложенного в [12], где применяется двукратное интегрирование, заключается в однократном интегрировании отраженного сигнала по времени [9]. Смысл такой обработки состоит в вычислении интеграла с переменным верхним

пределом от функции  $f(t)$  распределения импульсного сигнала по времени:

$$F(t_i) - F(t_0) = \int_{t_0}^{t_i} f(t) dt = h \times \sum_{n=1}^{N-1} \frac{(f(t_i) + f(t_{i+1}))}{2}, \quad (8)$$

где целочисленная величина  $N$  – количество разбиений интервала интегрирования, а  $h$  – шаг интегрирования – вычисляется по формуле:

$$h = \frac{t_i - t_0}{N}. \quad (9)$$

Результирующие данные операций интегрирования получались также в виде массива  $F(t)$ , причем для каждого последующего элемента массива интеграл методом трапеций вычислялся с увеличенным значением верхнего предела, нижний предел оставался равным нулю. В итоге на рис. 3 в слева от главного максимума на отметке 1.85 нс четко видно три отметки пересечения кривой 4 с осью абсцисс (эти отметки на 4.15, 5.05 и 8.01 нс.). Наличие таких объективных результатов обработки позволяет реализовать процесс обработки данных неразрушающего контроля дорожных покрытий автоматически в режиме реального времени. Авторы надеются в ближайшем будущем опубликовать соответствующие результаты. Более детально с уже имеющимися результатами в данном направлении заинтересованный читатель может ознакомиться в работах [13-18].

### ВЫВОДЫ

Проведенный сравнительный анализ двух методов обработки сверхширокополосных сигналов импульсных георадаров в процессе мониторинга текущего состояния нежестких дорожных одежд показал:

- высокую эффективность обследований автомобильных дорог общего пользования с помощью георадарных комплексов, установленных на автомобиле-лаборатории;
- низкую себестоимость мониторинга за счет, с одной стороны, возможности получения первичных данных при движении автомобиля-лаборатории со скоростью транспортного потока, а с другой стороны – за счет исключения таких дорогостоящих операций контроля как отбор кернов и вырубки покрытия;
- возможность построения алгоритмов интерпретации данных в режиме реального времени и включения получаемых результатов в базы данных, для обслуживания современных геоинформационных технологий.

Также установлены преимущества применения преобразования Гильберта и специального интегрального преобразования для обеспечения надежного и удобного разделения парциальных импульсов в сложных сигналах, отраженных от плоскостойких сред с близко расположенными внутренними границами (тонкими слоями). Указаны практические критерии пределов применения визуальной обработки сигналов и практические рекомендации по дальнейшему усовершенствованию алгоритмов интерпретации массивов георадарных данных.

При обработке и численном моделировании использованы модули «Моделирование распространения сигнала» и «Анализ сигналов» программы «GeoVizu», разработанной на кафедре теоретической радиофизики Харьковского Национального университета имени В.Н. Каразина факультета радиофизики биомедицинской электроники и компьютерных систем.

[http://www.univer.kharkov.ua/ru/departments/radiophysics/radiophysics\\_about](http://www.univer.kharkov.ua/ru/departments/radiophysics/radiophysics_about)

Собственный сайт : <http://rbees.karazin.ua/>

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Batrakov D.O., Zhuck N.P. Solution of a General Inverse Scattering Problem Using the Distorted Born Approximation and Iterative Technique. *Inverse Problems*. - Feb., 1994. - vol.10, № 1. - P.39-54.
2. Батраков Д.О. Качество и эффективность обработки информации при радиоволновом контроле слоистонеоднородных диэлектриков многочастотным методом. *Дефектоскопия РАН*. – 1998. – N8. – С.68-76.
3. 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.
4. 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.
5. 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>
6. Solla M. Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: Preliminary findings. / Solla, M.; Lagüela, S.; González-Jorge, H.; Arias, P./ NDT E Int. 2014, 62, 55–65.
  7. 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.
  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. Батраков Д.О. Обработка импульсных сигналов при толщинометрии биологических тканей и неразрушающем контроле / Д.О. Батраков // Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна. – Х. : ХНУ, 2016. – вип. 25. – С. 48-52. – (Серія: «Радіофізика та електроніка»)
  10. Pérez-Gracia V. GPR evaluation of the damage found in the reinforced concrete base of a block of flats: A case study. / Pérez-Gracia, V.; García, F.G.; Abad, I.R./ NDT E Int. 2008, 41, 341–353.
  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. Astanin L. Yu. The structural features of ultrawideband signals / L. Yu. Astanin, M. V. Kipke, V. V. Kostyleva // Proceedings of UWBUSIS'2008 – Sevastopol, Ukraine. – 2008. – 15-19 September, P. 180-182.
  13. Ground penetrating radar, theory and applications / [Jol Harry M. (Editor)]. – Amsterdam : Elsevier B.V., 2009. – 508 p.
  14. Saarenketo T. Road evaluation with ground penetrating radar / T. Saarenketo, T. Scullion // Journal of Applied Geophysics. – 2000. – Vol. 43. – P. 119–138.
  15. Владов М.Л. Введение в георадиолокацию : учеб. пособие [для студ. высш. уч. завед.] / Владов М.Л., Старовойтов А.В. – М. : МГУ, 2004. – 153 с.
  16. Батраков Д.О. Сравнительный анализ итерационного и генетического алгоритмов решения обратных задач рассеяния / Д.О. Батраков, Д.В. Головин, О.Д. Батраков // Вестник ХНУ - радиофизика и электроника, 2013, № 1067, вып. 22, с. 82-85.
  17. Batrakov D.O. GPR data processing for evaluation of the subsurface cracks in road pavements / Dmitry O. Batrakov; Mariya S. Antyufeyeva; Alexandr V. Antyufeyev; Angelika G. Batrakova // 2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), Year: 2017, Pages: 1 – 6, Edinbourg, Scotland, IEEE Conference Publications DOI: [10.1109/IWAGPR.2017.7996072](https://doi.org/10.1109/IWAGPR.2017.7996072)
  18. 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. – а201511191; заявл. 13.11.2015; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6/2017 <http://base.ukrpatent.org/searchINV/search.php?action=search>