

УДК 621.574.4

## ОБРАБОТКА ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ТОЛЩИНОМЕТРИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ И В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

**Д.О. Батраков**

*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, радиофизический факультет,  
пл.Свободы 4, Харьков, 61077, Украина  
e-mail: rff\_bat5@yahoo.com*

Поступила в редакцию 21 мая 2016 г.

Предложен метод нормировки отраженных сигналов с последующей обработкой согласно ранее разработанным алгоритмам для повышения точности измерений. Основная идея метода состоит в послойном восстановлении физико-геометрических параметров плоскостратифицированных сред. В итоге, на основе проведенных вычислительных экспериментов, установлена работоспособность и эффективность предложенного метода. Также указаны возможные пути практического применения предложенного метода при обработке данных зондирования конструкций дорожных одежд с помощью георадара «Одяг-1». Использование процедуры дополнительной калибровки по данным, полученным с помощью отбора кернов, также повышает надежность и точность оценки текущего состояния дорожных покрытий.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** импульсные сигналы, подповерхностное зондирование, плоскостратифицированные среды.

Запропоновано метод нормування відбитих сигналів з наступною обробкою згідно раніше розробленим алгоритмам для підвищення точності вимірювань. Основна ідея методу полягає в пошаровому відновленні фізико-геометричних параметрів плоскостратифіцированих середовищ. У підсумку, на основі проведених обчислювальних експериментів, встановлена працездатність і ефективність запропонованого методу. Також вказані можливі шляхи практичного застосування запропонованого методу при обробці даних зондування конструкцій дорожніх одягів за допомогою георадара «Одяг-1». Використання процедури додаткового калібрування за даними, отриманими за допомогою відбору кернів, також підвищує надійність і точність оцінки поточного стану дорожніх покриттів.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** імпульсні сигнали, підповерхнєве зондування, плоскошаруваті середовища

A method for normalizing scattered by plane layered media signals with further processing according to prior developed algorithms to improve accuracy is proposed. The main idea of the method consists in the restoration of physical and geometrical parameters of the plane layered stratified medium. As a result, on the basis of computational experiments, was proved efficiency and effectiveness of the proposed method. Also discussed the possible ways of practical application of the proposed method in the treatment of road pavements sensing data with GPR "Odyag-1." Using the optional calibration procedure according to the data obtained by coring, also increases the reliability and accuracy of the assessment of the current state of road pavements.

**KEYWORDS:** pulse signals, subsurface sounding, stratified medium

### ВВЕДЕНИЕ

Во многих прикладных областях современного естествознания возникают задачи определения физико-геометрических характеристик слоисто-неоднородных сред при условии большой пространственной длительности зондирующего сигнала относительно электрической толщины слоев [1-3]. С чисто математической точки зрения повышение разрешающей способности импульсной локализации возможно при уменьшении длительности (центральной частоты) импульса. Однако при этом, как правило, возникают трудности, связанные с ростом затухания сигнала. Кроме того, низкий электрический контраст материалов слоев (что характерно для задач диагностики дорожных одежд) порождает наличие слабых отраженных сигналов с незначительной задержкой по отношению к первому импульсу, т.е. импульсу, отраженному от внешней границы. Ранее в [4] был предложен алгоритм послойного определения диэлектрической проницаемости и толщины слоев с помощью зондирования сверхширокополосными (СШП) импульсными сигналами. Основу алгоритма составила последовательность шагов по определению: фактической амплитуды падающего сигнала, амплитуды сигнала, отраженного от наружной поверхности покрытия, вычисления по формулам Френеля диэлектрической проницаемости первого слоя, вычисления временной задержки сигнала, прошедшего от следующей границы, вычисления толщины верхнего слоя и повторения четырех последних шагов для определения значений толщины и диэлектрической проницаемости нижних слоев. Очевидно, что при неточном определении диэлектрической проницаемости верхнего слоя, точность результатов всех последующих шагов будет значительно снижена независимо от качества последующей обработки. Эта точность определяется корректностью определения коэффициента отражения от наружной границы

(амплитуд падающего и отраженного сигналов). В свою очередь, на определенное по результатам измерений значение амплитуды отраженного сигнала могут оказывать влияние сигналы, отраженные от следующей границы. Для ответа на вопрос о степени такого влияния и методах учета возникающих искажений сигнала необходимо провести соответствующие численные эксперименты. Поэтому в настоящей работе изложены результаты вычислительных экспериментов, проведенных с помощью разработанной ранее программы «GeoVizy».

### ПОСТАНОВКА И МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Общая задача по определению толщины слоев и значений их диэлектрической проницаемости согласно [4] выглядит следующим образом: исследуемая плоскостойкая среда облучается импульсным зондирующим сигналом. По результатам обработки временного профиля отраженного сигнала необходимо определить внутреннюю структуру плоскостойкой среды и значения диэлектрической проницаемости слоев. Решение задачи удобно разбить на несколько этапов:

- после первичной обработки георадиолокационных данных (с помощью преобразования Гильберта) определяются временные задержки сигналов ( $\Delta t_i$ ), отраженных от границ слоев и амплитуды этих сигналов;
- по формуле, следующей из формул Френеля [4,5]:

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

определяется  $\sqrt{\varepsilon_1}$  и далее  $\varepsilon_1$  - диэлектрическая проницаемость верхнего слоя ( $R_{j,j+1}$  - коэффициент отражения от нижней среды в верхнюю);

- затем с помощью формул для коэффициентов прохождения [4,5]

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

вычисляются коэффициенты прохождения через верхнюю границу в первый слой и обратно  $T_{0,1}$ ,  $T_{1,0}$ , а также коэффициент отражения от нижней границы верхнего слоя  $R_{1,2}$ , а затем согласно (1)

вычисляется  $\varepsilon_2$ ;

- далее повторяются вышеуказанные шаги вплоть до последней границы, где определяется лишь диэлектрическая проницаемость бесконечной подложки;
- определяются координаты границ как следствие основного уравнения радиолокации:

$$Z_i = \sum_{i=1}^I \frac{(t_i - t_{i-1}) \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_i}} = \sum_{i=1}^I \frac{\Delta t_i \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_i}}, \quad (3)$$

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

$t_i, t_{i-1}$  - моменты прохождения сигналом  $i$ -й ( $i-1$ )-й границ соответственно, определенные на этапе 1,

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

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

- рассчитываются значения толщины слоев  $h_i$  по формуле:

$$h_i = Z_i - Z_{i-1}; \quad Z_0 = 0, i = 1, 2 \dots I. \quad (4)$$

Таким образом, данная схема, основанная на поэтапном восстановлении толщины слоев и их диэлектрической проницаемости, предполагает достаточно точное определение диэлектрической проницаемости верхнего слоя. Как показали результаты многочисленных экспериментов, проведенных с помощью георадара «Одяг-1», при толщине верхнего слоя более 10 см и значении  $\varepsilon_1 = 6.5$  и более определить значение  $\varepsilon_1$  удастся достаточно точно. В то же время, при толщине верхнего слоя 5 см. ( $\varepsilon_1 = 6.5$ ) предложенный алгоритм дает неточное значение диэлектрической проницаемости. Для решения данной проблемы были проведены вычислительные эксперименты с модельными импульсами, представляющими собой вторую производную от гауссоиды, благодаря своей форме, часто называемую «мексиканской шляпой» (сомбреро):

$$S''(t) = \frac{d^2}{dt^2} \left( \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \right) = (t^2 - 1) \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right). \quad (5)$$

При моделировании использовалась программа «GeoVizy», позволяющая не только создавать виртуальные сигналы, но и производить их обработку согласно предложенным алгоритмам. На рис.1. приведены результаты виртуального зондирования конструкции дорожной одежды. Для наглядности представлены результаты двух конструкций, отличающихся геометрической толщиной верхнего слоя. В первом случае она равна 5 см., а во втором случае - 12 см. Соответственно толщина второго слоя в первом случае равна 27 см, а во втором -19.5 см. Остальные параметры одинаковы:  $\varepsilon_1 = 6$ ,  $\varepsilon_2 = 5$  и  $\varepsilon_3 = 1.6$ .

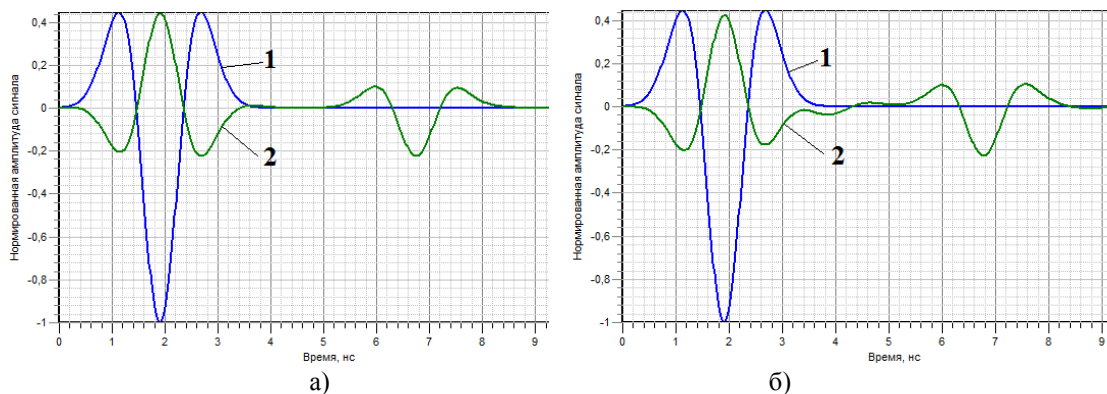


Рис.1. Падающий -1 и отраженный от конструкции - 2 импульсы при толщине первого слоя 5 см (а) и 12 см (б).

На рис. 2-5 представлены результаты обработки этих сигналов с помощью алгоритма, предложенного в [4]. Как следует из вида сигналов, их отличия весьма незначительные и при наличии паразитных

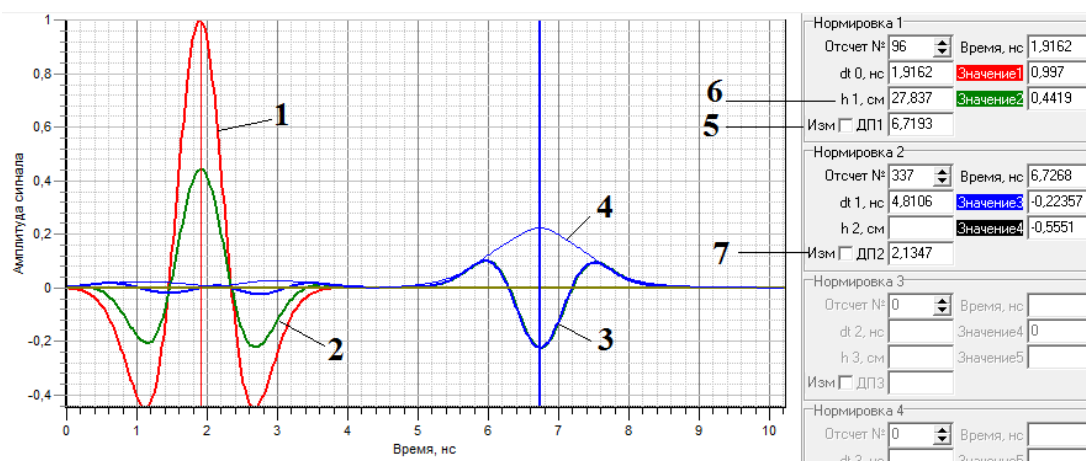


Рис.2. Падающий - 1, отраженный от конструкции -2 и синтезированный (отражение от нижней границы) - 3 сигналы, а также преобразование Гильберта от отраженного сигнала - 4. 5,7 восстановленные

значения диэлектрической проницаемости и толщины слоя - 6.

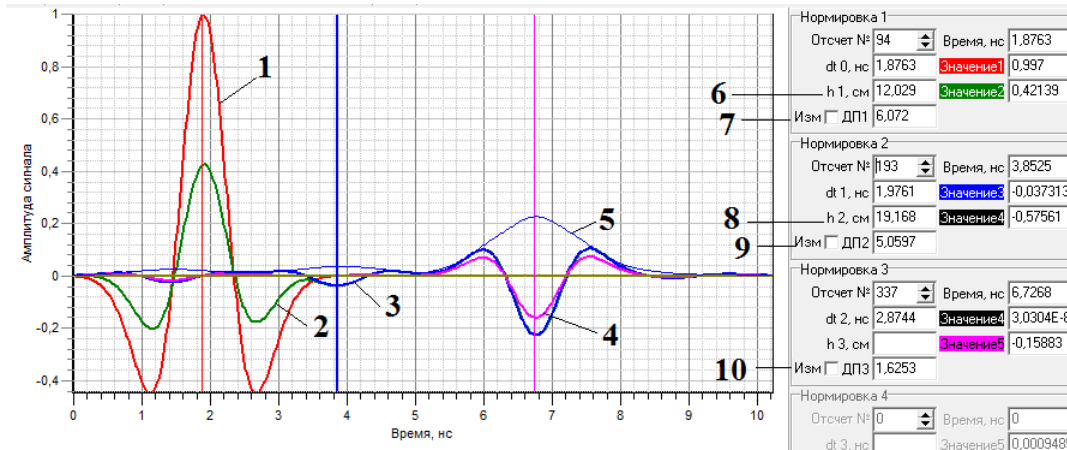


Рис.3. Падающий - 1, отраженный от конструкции -2 и синтезированные (отражение от нижних границ) – 3,4 сигналы, а также преобразование Гильберта от отраженного сигнала – 5. 7,9,10 восстановленные значения диэлектрической проницаемости и толщины слоев – 7,9.

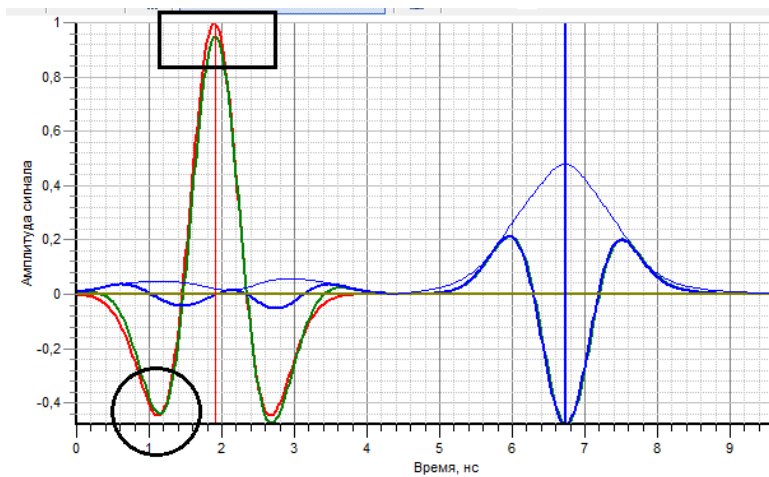


Рис.4. Калибровка отраженного импульса по падающему сигналу.

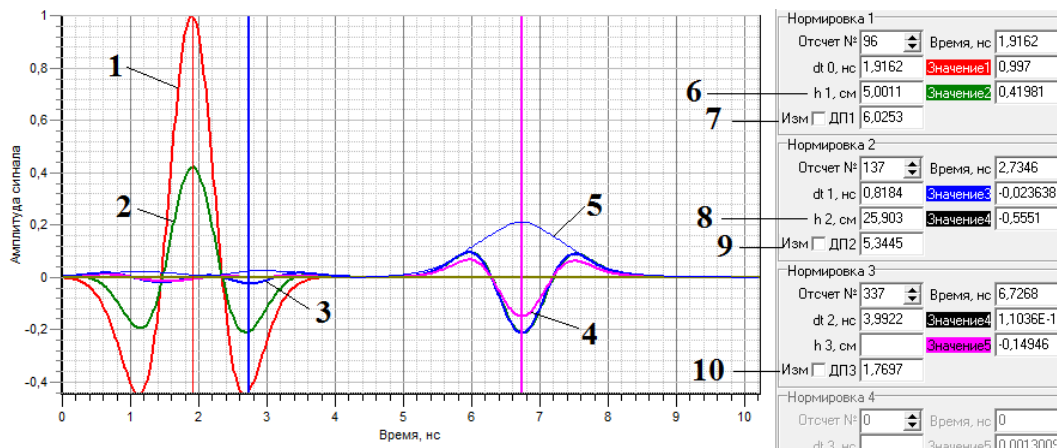


Рис.5. Падающий - 1, отраженный от конструкции -2 и синтезированные (отражение от нижних границ) – 3,4 сигналы, а также преобразование Гильберта от отраженного сигнала – 5; 7,9,10 восстановленные значения диэлектрической проницаемости и толщины слоев – 7,9.

колебаний в системе оператор георадара, вероятно, не сможет сделать правильное заключение даже о количестве слоев. Более того, даже при обработке таких «идеальных» сигналов (без помех и паразитных переотражений, присутствующих в реальных антенных блоках) возникают сложности с определением диэлектрической проницаемости верхнего слоя.

Подчеркнем, что сигнал, отраженный от верхней границы имеет, как правило, максимальную амплитуду. Поэтому главная идея, лежащая в основе предлагаемого метода – калибровка сигнала по первичному максимуму. Смысл такой калибровки иллюстрирует рис.4. Квадратом обведена область калибровки по стандартному методу, а кругом – по предлагаемому алгоритму. Результаты обработки откалиброванных по предлагаемому алгоритму сигналов приведены на рис. 5. Они демонстрируют достаточно точное восстановление толщины и диэлектрической проницаемости первого слоя, в то же время параметры нижних слоев определяются с меньшей точностью, что вызвано накоплением погрешности, связанной с необходимостью анализа слабых возмущений (скачка диэлектрической проницаемости) на фоне относительно большого отражения от верхней границы. В этой связи также следует отметить, что нормативные документы [6] в дорожной отрасли предусматривают проведение предварительной калибровки георадарного оборудования с помощью отбора кернов и при необходимости корректировки алгоритма обработки для повышения точности и достоверности оценки текущего состояния конструкций дорожных одежд.

### ВЫВОДЫ

Решение задач диагностики состояния различных строительных конструкций, неразрушающего контроля промышленных изделий и дистанционного зондирования может быть получено на основе использования СШП сигналов и соответствующих методов обработки полученной информации. Для плоскостойких сред с малой электрической толщиной (особенно верхнего слоя) предложенные ранее процедуры калибровки оборудования и алгоритмы обработки не позволяют полностью реализовать потенциал имеющихся георадаров. Эффективным инструментом повышения точности измерений является предложенный метод нормировки отраженных сигналов с последующей обработкой согласно ранее разработанным алгоритмам. Ключевая особенность предлагаемого метода – корректный выбор области нормировки на временной шкале СШП сигнала и введение корректирующего множителя при вычислении коэффициента отражения от наружной и внутренних границ плоскостойкой среды. В итоге, на основе проведенных вычислительных экспериментов, установлена работоспособность и эффективность предложенного метода. Также указаны возможные пути практического применения предложенного метода при обработке данных зондирования конструкций дорожных одежд с помощью георадара «Одыг-1». Использование процедуры дополнительной калибровки по данным, полученным с помощью отбора кернов, также повышает надежность и точность оценки текущего состояния дорожных покрытий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wissel T. Estimating soft tissue thickness from light-tissue interactions--a simulation study. Biomed / T Wissel, R Bruder, A Schweikard, F E. //Opt Express. - 2013 Jun 14;4(7):1176-87. doi: 10.1364/BOE.4.001176. Print 2013 Jul 1.
2. Батраков Д.О. Численное моделирование распространения электромагнитных импульсных сигналов в плоскостойких средах/ Д.О. Батраков, Д.В. Головин, А.Г. Батракова, Г.П. Почанин // Вестник ХНУ. - Радиофизика и электроника. – 2012. – №1038, вып. 21. – С.54-58.
3. Батраков Д.О. Влияние формы зондирующих импульсов на эффективность восстановления параметров технических и биомедицинских объектов. / Д. О. Батраков, Д. В. Головин, Г. П. Почанин. //Вестник ХНУ. Радиофизика и электроника. – 2013. – № 1067, вып. 22. –С. 93-98.
4. 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.
5. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М. : Наука. – 1973. – 720 с.
6. Методика комплексного моніторингу автомобільних доріг методами підповерхневого зондування : М 02071168-725:2013 – [Чинний від 2014-01- 01]. – К. : Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2013. – 52 с. – (Методика).