

УДК 621.574.4

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДЕРЖКИ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ, ОСНОВАННЫЙ НА ПРЕОБРАЗОВАНИИ ГИЛЬБЕРТА.

Д.О. Батраков, Д.В. Головин, С.В. Греков, А.Г. Батракова*

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Радиофизический факультет.

** Харьковский национальный автомобильно – дорожный университет, дорожно-строительный факультет*

Поступила в редакцию 12 марта 2009 г.

В работе предложен алгоритм обработки импульсных сигналов, отраженных от плоскостойких сред. Предполагается, что эффективная толщина слоев меньше пространственного размера импульса. Эта особенность задачи затрудняет использование предложенных ранее методов определения временной задержки сигналов. Поэтому в работе проведен теоретический анализ возможностей различных подходов к обработке сигналов и предложен алгоритм и соответствующее программное обеспечение для определения не только временной задержки, но и физико-геометрических характеристик исследуемых объектов. Приведены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований с целью определения чувствительности и разрешающей способности метода, а также возможности его практического использования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: импульсные сигналы, определение задержки сигналов, преобразование Гильберта, плоскостойкие среды, толщинометрия.

У роботі запропонований алгоритм обробки імпульсних сигналів, відбитих від плоскошаруватих середовищ. Передбачається, що ефективна товщина шарів менше просторового розміру імпульсу. Ця особливість завдання утрудняє використання запропонованих раніше методів визначення часової затримки сигналів. Тому в роботі проведений теоретичний аналіз можливостей різних підходів до обробки сигналів і запропоновані алгоритм і відповідне програмне забезпечення для визначення не тільки часової затримки, але й фізико-геометричних характеристик досліджуваних об'єктів. Наведено результати чисельного моделювання й експериментальних досліджень із метою визначення чутливості й роздільної здатності методу, а також можливості його практичного використання.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: імпульсні сигнали, визначення затримки сигналів, перетворення Гільберта, плоскошаруваті середовища, товщинометрія.

In the present paper the algorithm of processing of the pulse signals reflected from plane-layered media is offered. It is supposed, that an effective thickness of layers less than spatial size of an impulse. This feature of a problem complicates use earlier proposed methods of signals time delay evaluating. Therefore in paper the theoretical analysis of possibilities of various approaches for processing of signals is carried out and the algorithm and the corresponding software for definition not only a time delay, but also physical and geometrical characteristics of investigated objects are offered. Results of numerical modelling and experimental researches for the purpose of definition of sensitivity and resolution of a method, and also possibility of its practical use are given.

KEYWORDS: pulse signals, definition of a delay of signals, Hilbert's transformation, plane-layered media, thickness measurements.

Развитие элементной базы современных радиоэлектронных устройств с одной стороны открывает новые возможности их практического использования, а с другой – диктует новые требования к методам обработки получаемой информации. Это в полной мере относится и к проблеме интерпретации георадарных данных при подповерхностном зондировании. Ключевую роль при использовании видеоимпульсов играет задача определения их задержки, которая затем служит основой для построения методов определения физико-геометрических параметров исследуемых объектов. Ранее были предложены подходы к ее решению [1,2], основанные на применении преобразования Гильберта и пригодные для зондирования слоев диэлектрика, имеющих эффективную толщину большую, чем пространственный размер зондирующего импульса. С другой стороны, во многих практических приложениях (дорожное строительство, биомедицина) возникает необходимость анализа свойств многослойных структур, состоящих из тонких по сравнению с характерным пространственным размером зондирующего импульса слоев. Непосредственное применение известных методов обработки сигналов в этом случае невозможно. Поэтому целью настоящей работы является разработка методов и вычислительных алгоритмов для интерпретации данных зондирования многослойных объектов со слоями малой электрической толщины.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ЕЕ РЕШЕНИЮ

Как отмечено выше, при решении многих практических задач необходимо оперативно получать данные о физических параметрах (толщине, плотности, влагонасыщенности) неоднородных слоистых конструкций. Первичная обработка экспериментальных данных в этих задачах, как правило, сводится к проблеме определения временной задержки отраженного от внутренних неоднородностей импульса. Основная проблема в этом случае состоит в необходимости разделения накладывающихся друг на друга сигналов и в определении соответствующих, например начальных, моментов времени в каждом из сигналов. Эффективным инструментом решения таких задач являются алгоритмы, использующие преобразование Гильберта. Из общей теории сигналов известно, что для любого произвольного каузального сигнала преобразование Гильберта представляет собой идеальный широкополосный фазовращатель, который осуществляет поворот начальных фаз всех частотных составляющих сигнала на угол, равный 90° (сдвиг на $\pi/2$). Применение преобразования Гильберта позволяет выполнять квадратурную модуляцию сигналов, в каждой текущей координате модулированных сигналов производить определение огибающей и мгновенной фазы и частоты сигналов, выполнять анализ каузальных систем обработки сигналов. Прямое преобразование Гильберта:

$$\tilde{x}(t) = TH[x(t)] = x(t) * (1/\pi t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau,$$

(1)

произвольной действительной функции $x(t)$, $-\infty < t < \infty$, задается сверткой $x(t)$ с функцией $hb(t) = 1/(\pi t)$. Функция $1/(t - \tau)$ называется ядром преобразования Гильберта. Интегралы преобразования имеет особую точку $a = t - \tau \Rightarrow 0$, в которой при вычислении используется их главное

значение по Коши: $\lim_{a \rightarrow 0} \left[\int_{-\infty}^{t-a} \dots + \int_{t+a}^{\infty} \dots \right]$. В литературе по теории сигналов преобразование Гильберта

аналоговых сигналов предлагается выполнять не по формулам линейной свертки с оператором $1/\pi t$, который стремится к ∞ при $t \Rightarrow 0$, а через спектр аналитической функции

$$z(t) = x(t) + i\tilde{x}(t) \Leftrightarrow X(\nu) + i\tilde{X}(\nu) = Z(\nu); \quad i = \sqrt{-1}.$$

(2)

Заменив в (2) функцию $\tilde{X}(\nu) = -i \operatorname{sgn}(\nu) X(\nu)$, получаем:

$$Z(\nu) = [1 + \operatorname{sgn}(\nu)] X(\nu),$$

(3)

где функция $1 + \operatorname{sgn}(\nu)$ равна 0 при $\nu < 0$, 1 при $\nu = 0$ и 2 при $\nu > 0$, при этом:

$$Z(\nu) = \begin{cases} 2X(\nu), & \nu > 0 \\ X(0), & \nu = 0 \\ 0, & \nu < 0 \end{cases}$$

(4)

т.е. спектр функции $z(t)$ является односторонним и устанавливается непосредственно по спектру функции $x(t)$ при $\nu \geq 0$. Обратное преобразование Фурье функции $Z(\nu)$ должно давать комплексную функцию $z(t)$, при этом из (4) следует:

$$x(t) = \operatorname{Re} \left[2 \int_0^{\infty} X(\nu) \exp(i2\pi \nu t) d\nu \right],$$

(5)

$$\tilde{x}(t) = \operatorname{Im} \left[2 \int_0^{\infty} X(\nu) \exp(i2\pi \nu t) d\nu \right].$$

(6)

В дискретной форме, при общем числе N отсчетов функции $x(t)$ с шагом по времени Δt и с шагом по частоте $\Delta \nu = 1/(N\Delta t)$:

$$X(n\Delta t) = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta t) \exp(-i2\pi kn / N), n = 0, 1, \dots, N/2, \quad (7)$$

$$x(k\Delta t) = \Delta f \operatorname{Re} \left[X_0 + 2 \sum_{n=1}^{N/2} X(n\Delta \nu) \exp(i2\pi kn / N) \right], \quad (8)$$

$$\tilde{x}(k\Delta t) = 2\Delta \nu \operatorname{Im} \left[\sum_{n=1}^{N/2} X(n\Delta \nu) \exp(i2\pi kn / N) \right]. \quad (9)$$

Основываясь на изложенных выше свойствах преобразований Фурье и Гильберта, авторы работы [1] предприняли попытку корректной формулировки понятия задержки, назвав введенное определение задержкой по Гильберту. Смысл такой схемы основывается на выделении из общего сигнала, принятого антенной, так называемой минимально фазовой части [3]. Такое выделение проводится по следующей схеме: для зарегистрированного сигнала $U(t)$ строится фазовая часть спектральной составляющей по формуле:

$$\varphi(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\ln|U(\theta)|}{\omega - \theta} d\theta. \quad (10)$$

где $|U(\theta)|$ - модуль Фурье-спектра исходного сигнала $U(i\omega) = |U(\omega)| \cdot \exp[i \cdot \psi(\omega)]$. Если фазовую часть представить в виде: $\psi(\omega) = \varphi(\omega) + \gamma(\omega)$, то будет иметь место следующая факторизация любого сигнала:

$$V(i\omega) = |V(\omega)| \cdot \exp[i \cdot \varphi(\omega)] \cdot \exp[i \cdot \gamma(\omega)] = V_{\text{мф}}(i\omega) \cdot M(i\omega), \quad (11)$$

где $V_{\text{мф}} = |V(\omega)| \cdot \exp[i \cdot \varphi(\omega)]$ - спектр Фурье минимально-фазовой части сигнала, $M(i\omega) = \exp[i \cdot \gamma(\omega)]$ - спектр максимально-фазовой компоненты $m(t)$. При этом модуль спектра минимально-фазовой части сигнала совпадает с модулем спектра исходного сигнала, а модуль спектра максимально-фазовой части равен единице. В качестве функции неопределенности задержки сигнала по Гильберту принимают максимально-фазовую компоненту $m(t)$ сигнала $U(t)$, т.е. величину

$$m(t) = \frac{1}{2} \pi \int_{-\infty}^{\infty} M(i\omega) \cdot \exp(i\omega t) d\omega. \quad (12)$$

Задержкой по Гильберту сигнала относительно момента $t=0$ называют положение максимума функции неопределенности задержки. Анализ свойств преобразования Гильберта показывает, что максимум его модуль будет иметь в точках нарушения гладкости сигнала, где первая производная терпит разрыв. Этими точками, очевидно, являются точки начала сигнала, что делает такое определение задержки интуитивно понятным. Однако такой подход имеет существенный недостаток, связанный с необходимостью вычисления фазовой части спектра минимально фазовой компоненты по формуле (10). Очевидно, что если в спектре исходного сигнала присутствуют гармоники с малыми амплитудами, то модуль подынтегральной функция $\ln|U(\theta)|$ сильно растет, а если спектральные амплитуды каких либо гармоник равны нулю, то эта функция вообще обращается в минус бесконечность. Как показало численное моделирование, этот алгоритм хорошо работает только для определенных видов сигналов, близких по форме к δ -функции. Это понятно, поскольку в спектре δ -функции присутствуют все спектральные составляющие с равными амплитудами.

В рамках другого подхода, предложенного в [2] в основу алгоритма обнаружения сверхширокополосных георадарных сигналов и определения их характеристик предложено использовать анализ модуля преобразование Гильберта. Точнее говоря, модулем преобразования Гильберта будет модуль функции $\tilde{x}(t)$, определяемой формулой (1), а оценивать авторы, на самом деле, предлагают модуль комплексного аналитического сигнала, сконструированного из исходного сигнала с помощью преобразования Гильберта. Такая функция является гладкой и однополярной. Она имеет только один максимум, поэтому обнаружение сигнала на временной оси сводится к поиску максимумов ее модуля.

Полярность импульса определяется по значениям волновой функции в момент времени, соответствующий максимуму модуля.

Функцию преобразования обычно представляют в комплексной форме $h(t) = x(t) + i\tilde{x}(t)$. В теории аналитических сигналов через ее модуль $|h(t)|$ определяют огибающую импульса $A(t)$

$$A(t) = |h(t)| = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)} \quad (13)$$

В таком случае дополнительная функция $\tilde{x}(t)$ имеет вполне определенный физический смысл – это «восстановленная» магнитная компонента электромагнитного импульса. Хотя антенна и не регистрирует магнитную компоненту зондирующего импульса, по законам электродинамики она в радиоволне обязательно существует, причем ее спектральные компоненты, действительно, повернуты по фазе на 90° по отношению к электрической компоненте. Таким образом, квадрат модуля преобразования (13) соответствует нормированной функции плотности полной электромагнитной энергии зондирующего и отраженных импульсов.

Для определения задержки сигналов автор работы [2] предлагает с помощью дискретного преобразования Фурье вычислять преобразование Гильберта по формулам (7-9), затем строить аналитический сигнал (13) и находить задержку как расстояние на временной оси между максимумами положительной функции $A(t)$.

Полярность отраженных импульсов определяется на основании одного из свойств преобразования: максимум модуля $|h(t)|$ соответствует максимуму модуля $|x(t)|$ действительной знакопеременной функции. Для максимума модуля преобразования анализируется знак функции $x(t)$ в соответствующий момент времени. Этот знак совпадает с полярностью импульса.

Обладая определенными преимуществами перед первым подходом, такой алгоритм имеет и недостатки. Они связаны с необходимостью вычисления преобразования Гильберта с помощью дискретного преобразования Фурье. Дело в том, что, как отмечено в [4], при перекрытии спектров для положительных и отрицательных частот, аналитический сигнал, восстановленный по такой схеме, будет отличаться от сигнала, синтезированного с помощью интегрального преобразования Гильберта (1).

Поэтому, на основе анализа, приведенного выше, предлагается следующая схема определения временной задержки сигналов, отраженных от внутренних границ плоскостойких структур:

1. С помощью преобразования исходного сигнала, представленного отсчетами во временной области согласно (1) вычисляется его преобразование Гильберта;
2. Формируется комплексный аналитический сигнал;
3. Синтезируется функция временного распределения модуля сигнала $A(t)$ по формуле (13);
4. Отыскиваются максимумы этой функции;
5. Определяется полярность отраженных импульсов на основе анализа знака функции $x(t)$ в соответствующие моменты времени.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Для проверки и практического использования предложенной схемы определения временной задержки сигналов было разработано соответствующее программное обеспечение. Этот пакет прикладных программ представляет собой вычислительное ядро, написанное на языке FORTRAN с пользовательским интерфейсом, выполненным в среде программирования Delphi. Вид окна программы при обработке синтезированных радарограмм показан на Рис. 1:

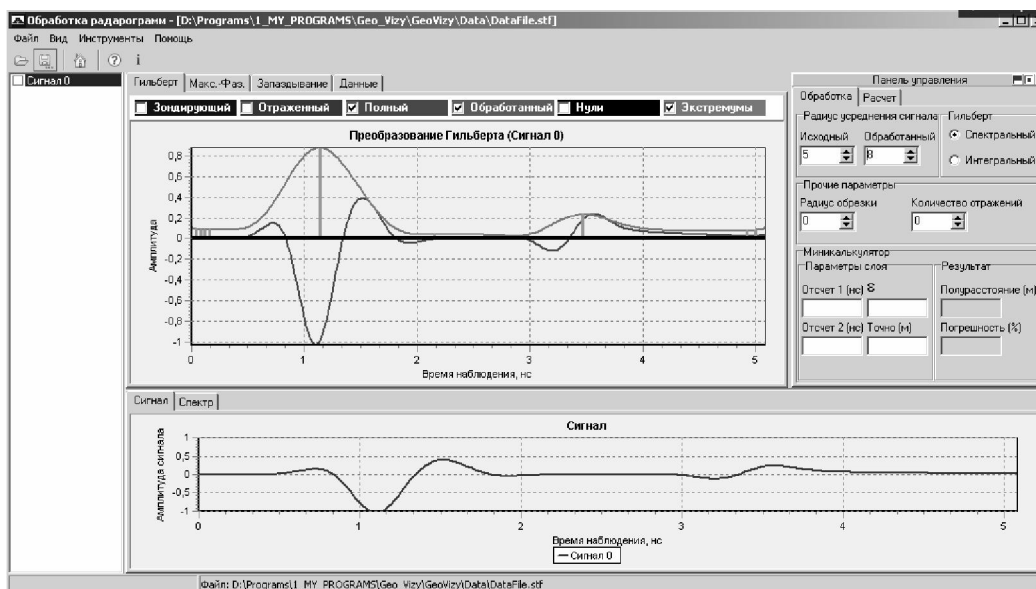


Рис. 1. Окно программы при обработке синтезированных радарограмм

С помощью этого программного продукта были проведены серии вычислительных экспериментов с целью выяснения чувствительности и разрешающей способности метода, результаты которых представлены на Рис.2-4. Под термином чувствительность мы понимаем минимальную электрическую толщину однослойной структуры, которую можно обнаружить, а под термином разрешающая способность – минимальную разницу в электрической толщине двух однослойных структур, которая может быть обнаружена данной программой.

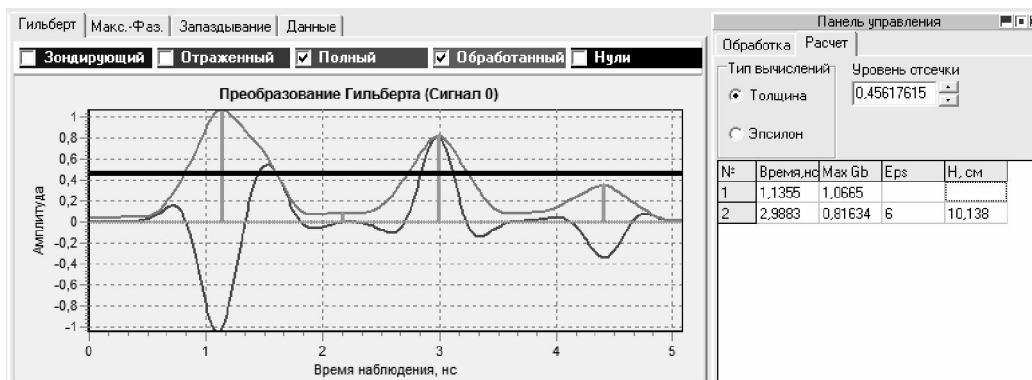


Рис. 2. Окно программы при обработке синтезированных радарограмм. Разрешающая способность. Истинная толщина слоя – 10 см. Определенная толщина слоя – 10.14 см.

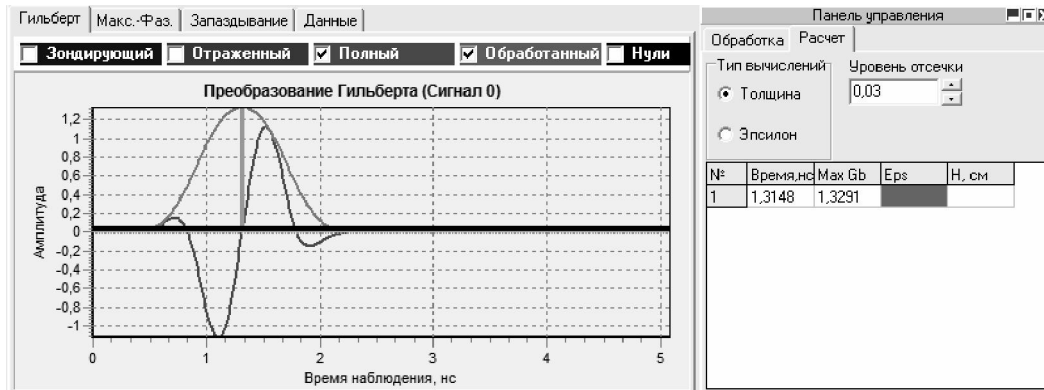


Рис. 3а. Окно программы при обработке синтезированных радарограмм (преобразование Гильберта выполняется через дискретное преобразование Фурье в спектральной области). Толщина моделируемого слоя – 1.0 см.

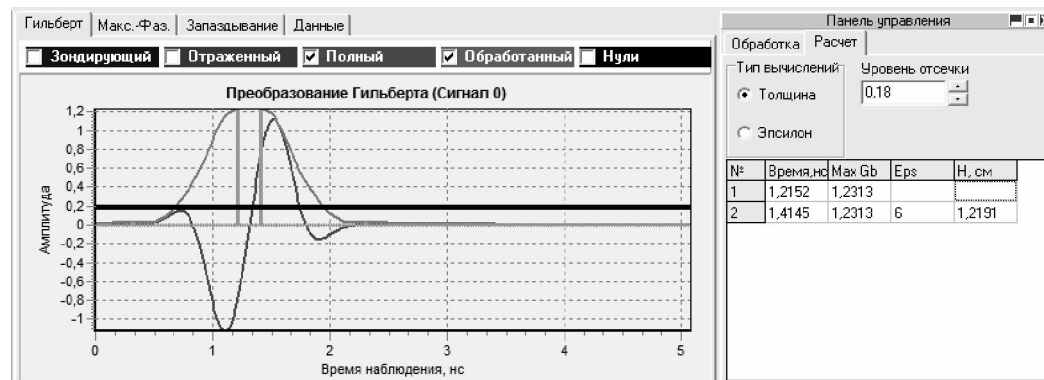


Рис. 3б. Окно программы при обработке синтезированных радарограмм (преобразование Гильберта вычисляется по квадратурной формуле (1)). Толщина моделируемого слоя – 1.0 см. Определенная программой толщина слоя – 1.21 см

Естественно, что эти параметры зависят от характеристик зондирующего импульса. Поэтому в качестве зондирующего был выбран импульс георадара «Одыг», используемый кафедрой изыскания и проектирования дорог Харьковского национального автомобильно-дорожного университета при оценке состояния покрытий автомобильных дорог и дорожных одежд. Длительность импульса составляет приблизительно 1 нс., частота повторения 20 кГц, амплитуда – 200В. Некоторые результаты численного моделирования показанные на Рис.2. и Рис.3 иллюстрируют возможности такой аппаратуры. В частности, из Рис.2. следует, что разрешающая способность указанного георадара для однослойной структуры (песок, $\varepsilon = 6$) равна ~ 0.15 см. Рис.3 демонстрирует, что чувствительность комплекса для типичных в строительстве и дорожном деле материалов равна приблизительно $1 \div 2$ см., что вполне приемлемо. Как видно из рисунка для слоя толщиной в 1 см. применение спектрального преобразования Гильберта не позволяет определить толщину, поскольку в обработанном сигнале присутствует единственный максимум (Рис. 3а). При этом тот же исходный сигнал, обработанный с применением интегрального преобразования Гильберта по квадратурной формуле (1), имеет 2 максимума, расстояние между которыми примерно соответствует толщине слоя.

Следует также отметить, что отраженный импульс несет в себе достаточно большое количество информации об исследуемой структуре. Однако эта информация находится, образно говоря, в «связанном состоянии». Это означает, что форма, длительность и полярность отраженного импульса (при условии, что он достаточно широкополосный) однозначно связаны с физико-геометрическими параметрами структуры конечной толщины (диэлектрической проницаемостью, проводимостью, глубиной слоев). Однако не существует формул прямого пересчета параметров отраженного импульса в характеристики структуры, поскольку, например, наличие проводимости, как правило, связано с возникновением дисперсии, а задержка сигнала даже для однослойной структуры определяется не только пространственной толщиной слоя, но и его диэлектрической проницаемостью. Комплексное определение полного набора характеристик для плоскостойких (или неоднородных) сред без дисперсии либо с известным законом ее изменения возможно лишь на основе теории обратных задач рассеяния [5-8]. Их можно формулировать во временной [6] или в частотной [7,8] области. С математической точки зрения такие задачи являются некорректными, а их решение представляет довольно сложную теоретическую и вычислительную проблему. Однако, во многих практически важных случаях полная информация является избыточной и для оценки требуемых свойств объекта достаточно знать лишь отдельные

параметры, например толщину слоев или их диэлектрические проницаемости. Кроме того, для повышения надежности и достоверности полученных результатов в дорожном строительстве, например, принято делать так называемые вырубki контрольных образцов конструкции и по ним калибровать аппаратуру. В таком случае задача сводится к определению одного или нескольких однотипных параметров, что делает предложенный алгоритм и программное обеспечение эффективным инструментом достижения цели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы, которые можно сделать на основании полученных результатов численного моделирования заключаются в том, что предложенный алгоритм и разработанное программное обеспечение являются эффективным инструментом контроля состояния промышленных объектов и дорожных конструкций. С помощью предложенной схемы вычисления временной задержки сигналов можно с успехом решать основные задачи георадиолокационного зондирования: для выявления подповерхностных структурно-вещественных неоднородностей различной природы, обусловленных неравномерным увлажнением отложений, различным составом исследуемых пород, особенностями структуры и текстуры пород (пористостью, слоистостью), неоднородностью отложений или материалов, трещиноватостью и деформированностью среды и включением инородных объектов.

Кроме того, предложенный алгоритм обработки импульсных сигналов может в дальнейшем стать основой для построения более сложных методов комплексного определения физико-геометрических характеристик промышленных сооружений и естественных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.В. Крылов, Д.М. Пономарев. Определение понятия задержки сигнала по гильберту и методы её измерения. Радиотехника и Электроника, 1980, т.25., №1, с.204-206.
2. В.В. Копейкин Первичная обработка георадарных сигналов. 2005
3. Оппенгейм А.В., Шафер Р.В. Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ./М.:Связь, 1979, 416 с.
4. Васильев В.Н., Гуров И.П. Компьютерная обработка сигналов в приложении интерферометрическим системам. СПб.: БХВ, Санкт-Петербург, 1998, 240с
5. Khruslov E.Y., Shepelsky D. G. Inversr scattering method in electromagnetic sounding theory. Inverse problems, 1994, V.10, N2, PP. 1-37.
6. He S., Strom S. The electromagnetic inverse problem in the time domain for a dissipative slab and a point source using invariant imbedding: Reconstruction of the permittivity and conductivity. Journal of Computational and Applied Math., -1992, Vol. 42, PP. 137-155.
7. Zhuck N.P., Batrakov D.O. 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.
8. Батраков Д.О., Тарасов М.М.. Алгоритм решения обратных задач рассеяния на основе принципа максимума Понтрягина. Радиотехника и электроника РАН. – 1999. – Т.44, №2. - С.137-142.