

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2018-29-01>

УДК 535.361:535.555:535.573+577.3.0

НЕЛИНЕЙНАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ КОРРЕКЦИЯ СИГНАЛОВ ИМПУЛЬСНЫХ ГЕОРАДАРОВ

Д.О. Батраков

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

E-mail: Dmitry.O.Batrkov@univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 18 сентября 2018 г.

Актуальность. Проблемы неразрушающего контроля промышленных конструкций и транспортных сооружений являются актуальными с точки зрения повышения эффективности систем управления ими и экономии финансовых ресурсов и материалов. Актуальность научных исследований в области дистанционного зондирования и методов решения обратных задач связана также с перспективами постановки и решения проблем биомедицины, связанных с компьютерными технологиями.

Цель работы - исследование возможностей виртуальной корректировки свойств зондирующих и отраженных сигналов для повышения надежности результатов обработки и повышении точности восстановления свойств объектов при решении задач толщинометрии.

Материалы и методы. Основу предложенного подхода составляет коррекция значений амплитуд импульсных сигналов с целью повышения точности получаемых в результате обработки значений, путем введения в алгоритм обработки нормирующего множителя, значение которого было бы функцией, полученной в результате калибровочных процедур георадара. Другим способом повышения надежности процедуры обработки данных может быть компьютерная корректировка формы сигнала для приближения его формы к форме идеализированного модельного импульса.

Результаты. В результате теоретического анализа предложены методы и алгоритмы реализации процедуры совершенствования обработки наборов первичных данных зондирования, полученных с помощью импульсных георадаров.

Выводы. Проведенный в работе анализ методов обработки и корректировки характеристик сигналов импульсных георадаров позволил с одной стороны глубже понять физические основы взаимодействия электромагнитных импульсов с плоскостойкими средами. С другой стороны, предложены практические способы повышения эффективности контроля качества различных инженерных и транспортных сооружений, а также строительных конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: неразрушающий контроль, дистанционное зондирование, импульсные сигналы.

НЕЛІНІЙНА СПЕКТРАЛЬНА КОРЕКЦІЯ СИГНАЛІВ ІМПУЛЬСНИХ ГЕОРАДАРІВ

Д.О. Батраков

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

Актуальність. Проблеми неруйнівного контролю промислових конструкцій і транспортних споруд є актуальними з точки зору підвищення ефективності систем управління ними та економії фінансових ресурсів і матеріалів. Актуальність наукових досліджень в галузі дистанційного зондування і методів розв'язання обернених задач пов'язана також з перспективами постановки і рішення проблем біомедицини, які пов'язані з комп'ютерними технологіями.

Мета роботи - дослідження можливостей віртуальної коригування властивостей зондуємих і відбитих сигналів для підвищення надійності результатів обробки і підвищенні точності відновлення властивостей об'єктів при вирішенні завдань товщинометрії.

Матеріали та методи. Основу запропонованого підходу становить корекція значень амплітуд імпульсних сигналів з метою підвищення точності одержуваних в результаті обробки значень шляхом введення в алгоритм обробки нормувального множника, значення якого було б функцією, що отримана в результаті калібрувальних процедур георадарів. Іншим способом підвищення надійності процедури обробки даних може бути комп'ютерне коригування форми сигналу для наближення його форми до форми ідеалізованого модельного імпульсу.

Результати. В результаті теоретичного аналізу запропоновано методи і алгоритми реалізації процедури вдосконалення обробки наборів первинних даних зондування, які отримані за допомогою імпульсних георадарів.

Висновки. Проведений в роботі аналіз методів обробки та коригування характеристик сигналів імпульсних георадарів дозволив з одного боку глибше зрозуміти фізичні основи взаємодії електромагнітних імпульсів з плоскошаруватими середовищами. З іншого боку запропоновані практичні способи підвищення ефективності контролю якості різних інженерних і транспортних споруд, а також будівельних конструкцій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: неруйнівний контроль, дистанційне зондування, імпульсні сигнали.

NONLINEAR SPECTRAL CORRECTION OF THE PULSE GPR SIGNALS

D.O. Batrakov

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

Background: The problems of non-destructive testing of industrial structures and transport structures are relevant from the point of view of increasing the efficiency of their control systems and saving financial resources and materials. The relevance of scientific research in the field of remote sensing and methods for solving inverse problems is also associated with the prospects for the formulation and solution of biomedicine problems associated with computer technology.

Objectives of the work is to study the possibilities of virtual adjustment of the properties of probing and reflected signals to increase the reliability of processing results and increase the accuracy of restoration of the properties of objects when solving thickness measurement problems.

Materials and methods: The basis of the proposed approach is the correction of the amplitudes of pulse signals in order to increase the accuracy of the values obtained as a result of processing by introducing a normalizing factor into the processing algorithm, the value of which would be a function obtained as a result of GPR calibration procedures. Another way to increase the reliability of the data processing procedure may be by computer correction of the waveform to approximate its shape to the shape of an idealized model pulse.

Results: As a result of theoretical analysis, methods and algorithms for implementing the procedure for improving the processing of sets of primary sensing data obtained using pulsed georadars were proposed.

Conclusion: The analysis of the methods for processing and adjusting the characteristics of pulsed ground-penetrating radar signals made it possible on the one hand to better understand the physical basis for the interaction of electromagnetic pulses with plane-layered media. On the other hand, practical methods of improving the quality control of various engineering and transport structures, as well as building structures, are proposed.

KEYWORDS: non-destructive testing, remote sensing, pulsed signals.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения обратных задач рассеяния были предложены различные подходы. Эти подходы базировались как на строгих аналитических методах решения с привлечением интегральных уравнений [1-3], так и различных приближенных методах [4-14]. Несмотря на актуальность этих задач, интерес к ним стал лавинообразно возрастать только после появления средств пространственной регистрации полей различной волновой природы. Это касается в первую очередь акустических и радиоволновых полей. В дополнение к ним, внимание ученых к этим задачам было обусловлено появлением и развитием математических методов и компьютерных средств решения соответствующих задач. К определению понятия обратной задачи или метода обратной задачи рассеяния существуют различные подходы. Например, сформулировать определение обратной задачи можно с точки зрения количественного определения (восстановления значений) физических величин, например, диэлектрической или магнитной проницаемости, проводимости в электродинамике [14], либо модуля упругости, плотности и вязкости в акустике [13]. С точки зрения математических алгоритмов и методов такие задачи определяют как задачи отыскания коэффициентов системы дифференциальных уравнений (уравнений Максвелла) по некоторому известному на заданной поверхности распределению электромагнитного поля. В других случаях о процедуре решения обратных задач говорят, как о восстановлении функциональных коэффициентов известного заранее дифференциального оператора. При этом подразумевается, что такой дифференциальный оператор характеризует в полной мере все основные особенности используемого для получения исходных данных волнового процесса. Также о методе обратной задачи рассеяния говорят как об аналитическом методе решения задачи Коши применительно к нелинейным эволюционным уравнениям. Метод решения в таком случае основан на известной связи нелинейного уравнения и данных рассеяния семейства вспомогательных операторов (подразумеваются линейные дифференциальные операторы). Важно, что в рамках такой постановки задачи имеется возможность по известной из экспериментальных наблюдений эволюции набора данных рассеяния восстановить функцию, описывающую процесс эволюции решения рассматриваемого нелинейного уравнения. Такой метод представляет в определенном смысле аналог известного метода Фурье, применяемого для решения линейных дифференциальных уравнений в частных производных.

Для ситуации, когда между наборами данных рассеяния и параметрами, которые подлежат определению, имеется достаточно простая связь, разработаны "точные" методы. В рамках таких методов решение обратной задачи оказалось возможным получить в аналитическом виде. В итоге, преимуществом таких методов, как отмечено в [2,3], является возможность контроля за влиянием используемых приближений. При численном решении соответствующих уравнений, теоретически может быть получена любая требуемая точность. Также, в рамках такой постановки задачи об объекте нужен набор только минимальной априорной информации. Естественно, что это обеспечивает преимущества таких методов для применения их результатов как хорошего начального приближения с последующим привлечением иных, например, вариационных методов и алгоритмов на их основе.

Проблемы распространения волн, а также и восстановления (реконструкции) распределения диэлектрической или магнитной проницаемости, а в некоторых случаях и проводимости плоскостной, среды, имеющей одно направление (ось) стратификации с точки зрения используемого математического аппарата и ключевых особенностей задачи имеют много общего с известными проблемами распространения электромагнитных волн в неоднородных линиях передачи. Основой для построения решений таких задач послужил аппарат Функции Грина (ФГ), которые бы соответствовали распространению электромагнитных волн в соответствующих длинных линиях передачи [15-17]. В итоге построены алгоритмы решения обратных задач в случае, когда источником поля является магнитный диполь, который размещен над поверхностью исследуемого неоднородного слоя. Показано, что соответствующая постановка задачи позволяет использовать методы и результаты, ранее разработанные для зондирования плоской электромагнитной волной. Однако практически все полученные решения обратных задач опираются на простейшие модели зондирующего поля – плоской волны или в некоторых случаях точечного источника – электрического либо магнитного диполя. Но, как показала практика, распределения полей реальных источников (в частности, антенных систем георадаров) могут значительно отличаться как от свойств плоской волны, так и от свойств точечного источника. Поэтому данная работа имеет цель - исследование возможностей виртуальной корректировки свойств зондирующих и отраженных сигналов для повышения надежности результатов обработки и корректировки результатов обработки при решении задач толщинометрии.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Геометрия задачи показана на Рис. 1. Антенный блок (AU), состоящий из двух антенн – передающей антенны (IA) и приемной антенны (RA) передвигается вдоль поверхности плоскостной среды со скоростью v . Передающая антенна излучает сверхширокополосный (СШП) импульс, который после серии отражений от внешних и внутренних структурных границ зондируемой среды принимается приемной антенной. Модель зондируемой среды D является совокупностью нескольких слоев из однородных немагнитных ($\mu \equiv 1$) непроводящих ($\sigma \equiv 1$) материалов конечной толщины, расположенных на полубесконечной подложке. Случай непрерывного распределения диэлектрической проницаемости в рамках такой модели может быть сведен к аппроксимации непрерывного распределения кусочно- постоянно функцией, что с физической точки зрения будет означать совокупность большого числа слоев малой толщины с постоянным значением диэлектрической проницаемости внутри каждого слоя ($\epsilon_n = const$, n – номер слоя). Предполагается, что полупространство $z > 0$ заполнено однородной средой со значениями относительной диэлектрической и магнитной проницаемостей $\epsilon = 1$, $\mu = 1$. Задача состоит в определении распределения диэлектрической проницаемости в направлении оси OZ. Также возможна и альтернативная формулировка: определение значений толщины слоев и их диэлектрической проницаемости. В таком случае, если предположить, что слой достаточно малой толщины, то имеем аппроксимацию непрерывно меняющегося профиля диэлектрической проницаемости с помощью ступенчатой функции и в итоге получаем приближенное решение обратной задачи. Такая постановка задачи обладает большей степенью универсальности, поскольку позволяет реализовать алгоритмы определения толщины слоев различных технических конструкций (в первую очередь, покрытий автомобильных дорог нежесткого типа). Для решения подобных задач популярностью пользуются георадары, иначе называемые радаром подповерхностного зондирования (Ground Penetrating Radar – GPR). Постановка задачи и методы ее решения для данного случая детально описана в [18-20]. Общая идея такого подхода заключается в поэтапном определении значений диэлектрической проницаемости верхнего слоя зондируемой среды и последующего определения его толщины с помощью измеренной величины задержки во времени сигнала, пришедшего от нижней границы верхнего слоя. Затем процедура повторяется для следующего слоя и так до нижнего слоя – который является полубесконечным основанием. Разумеется, для обработки данных о внутренних структурных границах раздела необходимо привлекать виртуальные (синтезированные с помощью компьютерных технологий) сигналы. В таком случае процедура восстановления значений диэлектрической проницаемости содержит следующие этапы [21]:

1. По данным зондирования вычисляются задержки во времени сигналов (Δt_n), которые пришли от нижних границ, а также их амплитуды. Это – входная информация для предложенного алгоритма.
2. По формуле

$$\sqrt{\epsilon_{n+1}} = \sqrt{\epsilon_j} \frac{A_{n,n+1} - A_{n+1,n}}{A_{n,n+1} + A_{n+1,n}} \quad (1)$$

вычисляется значение $\sqrt{\varepsilon_1}$ и далее - ε_1 , где $n-1, n, n+1$ - номера слоев, $A_{n-1,n}, A_{n,n-1}$ - амплитуды сигналов падающих на границу между средой с ε_{n-1} и средой с ε_n и, соответственно, отраженного в $n-1$ -ю среду,

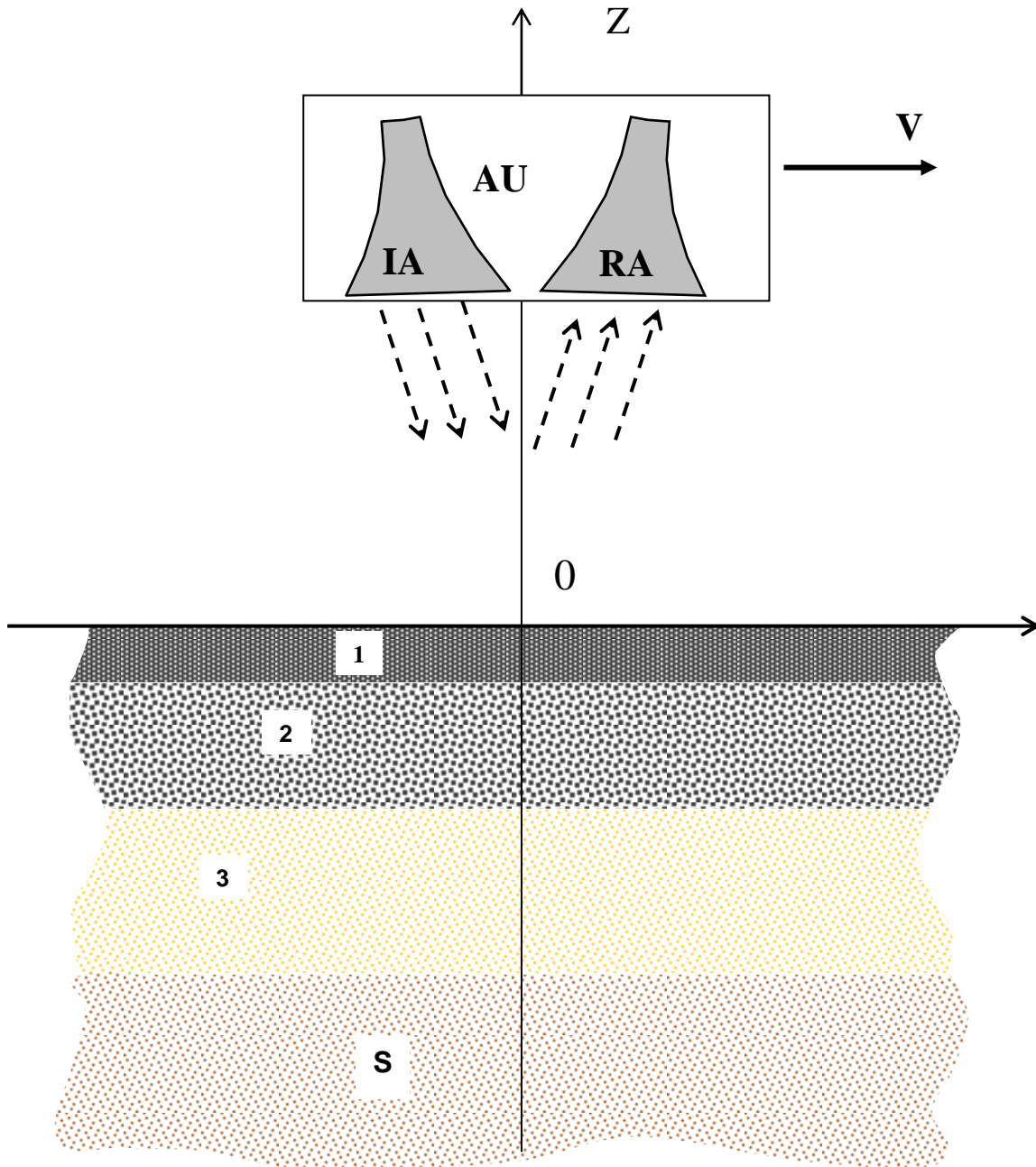


Рис. 1. Геометрия задачи зондирования. 1,2,3 – номера слоев, S – полубесконечная подложка, AU, IA, RA – антенный блок, перемещающийся со скоростью v , передающая и приемная антенны соответственно.

3. На следующем этапе по известным формулам (11-14) вычисляются $T_{0,1}, T_{1,0}, A_{0,1}$ и $A_{1,0}$:

$$P_1 = T_{0,1} \cdot T_{1,0} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_0} + \sqrt{\varepsilon_1}} \cdot \frac{2\sqrt{\varepsilon_0}}{\sqrt{\varepsilon_0} + \sqrt{\varepsilon_1}} = 4 \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cdot \sqrt{\varepsilon_0}}{(\sqrt{\varepsilon_0} + \sqrt{\varepsilon_1})^2} \quad (2)$$

$$C_1 = P_1 \cdot B_1 = (T_{0,1} \cdot T_{1,0}) \cdot A_0 \cdot R_{1,2} \quad (3)$$

C_n - амплитуды сигналов, которые пришли в приемную антенну от нижних границ.

$$R_{n,n+1} = A_0^{-1} \cdot C_n / (P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_n) = A_0^{-1} \cdot C_n / \prod_{n=1}^N P_n, \quad (4)$$

где: $P_n = T_{n-1,n} \cdot T_{n,n-1}$. $T_{n-1,n}$ - коэффициент прохождения сигнала из $n-1$ -го слоя в верхний n -й (верхняя строка), $T_{n+1,n}$ - коэффициент прохождения из $n+1$ -го слоя в n -й; $R_{n,n-1}$ - коэффициент отражения от границы $n-1$ -го и n -го слоев в $n-1$ -й слой; $B_{j,j+1}$ - промежуточные величины, которые введены для сокращения записи. Затем согласно (1) рассчитывается ε_2 .

4. Далее вычисления повторяются вплоть до нижней границы. Там определяется лишь диэлектрическая проницаемость подложки (грунта).
5. Координаты границ слоев вычисляются согласно:

$$Z_n = \sum_{n=1}^I \frac{(t_n - t_{n-1}) \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_n}} = \sum_{n=1}^I \frac{\Delta t_n \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_n}}. \quad (5)$$

где Z_n - координата n -й границы (индекс 0 имеет верхняя граница), а t_n, t_{n-1} - моменты времени прохождения сигналом n -й и $(n-1)$ -й границ. Они определены ранее на этапе 1, ε_n - значение диэлектрической проницаемости n -го слоя, c - скорость света в воздухе.

6. Вычисляются значения толщины слоев h_n согласно:

$$h_n = Z_n - Z_{n-1}; \quad Z_0 = 0, n = 1, 2 \dots I. \quad (6)$$

7. Полученные данные заносятся в файл для дальнейшего использования.

Как нетрудно заметить, данный алгоритм обработки опирается на формулы Френеля, справедливые для плоской монохроматической волны. Однако, как показывает практика и многочисленные лабораторные и натурные эксперименты, временные распределения сигналов реальных георадаров и диаграммы направленности их антенн могут весьма значительно отличаться от идеализированных моделей [22-24]. В связи с этим, возникает закономерный вопрос о пределах применимости модели плоской волны и возможных методах коррекции амплитуды поля при обработке радарограмм. Один из простейших способов корректировки амплитуды зондирующего сигнала состоит в аппроксимации поля линейной антенны полем электрического диполя с помощью известных теоретических представлений [25]:

$$\dot{\mathbf{E}}_\theta = k^2 \dot{\mathbf{P}}_\theta = \omega^2 \cdot \varepsilon_a \cdot \mu_a \cdot \dot{\mathbf{P}}_\theta = \frac{\omega \mu_a}{4 \pi j} \cdot \frac{\exp(-jk r_0)}{r_0} F(\theta), \quad (7)$$

где: $F(\theta)$ - диаграмма направленности такой антенны:

$$F(\theta) = - \sin \theta \left| \int_{z=-l}^{z=l} \dot{\mathbf{I}}(z) \exp(jk z \cos \theta) dz \right|. \quad (8)$$

Таким образом, линейная антенна создает осесимметричное поле с фазовым фронтом волны в виде сферы с центром, совпадающим с центром провода. Если длину антенны (ее линейный размер) принять равной $L = 2l$, то амплитуда напряженности поля излучения буде равна [25]:

$$E(\theta) = \frac{\omega \mu_a}{4\pi} \sin \theta \left| \int_{z=-l}^{z=l} \dot{I}(z) \exp(jkz \cos \theta) dz \right|, \quad (9)$$

где: $\dot{I}(z)$ — плотность тока в соответствующем сечении антенны.

Как отмечено в работе [26] пространственное распределение электромагнитного поля вблизи линейных либо апертурных излучающих антенн может отличаться существенно в зависимости как от электрических размеров, так и от формы излучающего раскрыва системы. В случае диполя Герца - короткой по сравнению с длиной волны и тонкой антенны симметричного (круглого сечения), в направлении главного максимума диаграммы направленности (ДН) амплитуда электрического поля непосредственно вблизи диполя уменьшается обратно пропорционально третьей степени расстояния в третьей степени, а магнитного поля – второй степени расстояния. Однако для резонансной проволочной антенны (полуволновой вибратор) амплитуда вектора электрического поля почти не изменяется до расстояния в $0,3 \times \lambda$, а далее уменьшается пропорционально первой степени расстояния (7). Амплитуда вектора напряженности магнитного поля уменьшается по закону $1/r$ начиная уже с расстояний порядка $0,01$ длины волны от излучателя. Для апертурных антенн с большими электрическими размерами вблизи раскрыва, а также и в ближней зоне создаётся «прожекторный луч». В этой области амплитуды векторов поля и его мощность изменяются по осциллирующим закономерностям вокруг некоторого значения, близкого к постоянному. При этом, возможно обеспечить распределение амплитуды и мощности поля достаточно близкое к однородному на некоторой конечной (ограниченной) площади или в пределах ограниченного объема в ближней зоне для антенны апертурного типа. Это можно реализовать с помощью выбора формы излучающего раскрыва, а также и выбора амплитудно–фазового распределения вектора поля на антенне. В апертурных антеннах, имеющих малые электрические размеры раскрыва такой прожекторный луч в ближней зоне уже не формируется. Таким образом разнообразие различных распределений волновых процессов в ближней и промежуточной зонах в зависимости от размеров либо формы раскрыва апертуры антенны в настоящее время изучено недостаточно [26]. Отсюда следует, что для успешного решения задач дистанционного зондирования и неразрушающего контроля необходимо искать дополнительные возможности корректировки значений амплитуд СШП сигналов с целью повышения точности получаемых в результате обработки значений. Одним из возможных способов такой коррекции может быть использование нормирующего множителя, значение которого было бы функцией, полученной в результате калибровочных процедур. Другим способом повышения надежности процедуры обработки может быть виртуальная корректировка формы сигнала (СШП импульса) с целью приближения его формы к форме идеализированного модельного импульса. Такая задача может быть решена с помощью привлечения стандартных табличных процессоров (Microsoft Excel, Libre Office Calc и др.). Также ее можно решить с использованием специализированного программного обеспечения. Например, программа GeoVizu, позволяет работать не только с временными распределениями СШП импульсных сигналов георадаров типа «TRF-1» или «Odyag», но и осуществлять визуальное отображение амплитудных и фазовых распределений спектральных гармоник, которые она вычисляет с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ). На Рис. 2. представлен вид ДПФ для зондирующего сигнала георадара TRF-1. К сожалению, объем данной работы не позволяет отразить все существующие методы обработки сверхширокополосных импульсных сигналов и продемонстрировать возможности предложенного подхода к повышению надежности обработки георадарных данных. Отдельного рассмотрения требуют и проблемы, связанные с оптимизацией параметров антенных систем как самостоятельных функциональных составляющих, так и как элементов объединённых в антенный блок георадара. Следует подчеркнуть, что между всеми элементами георадара существуют достаточно сложные связи и степень влияния одних параметров на другие и на эффективность всего прибора как единого целого и последующей обработки данных пока изучена недостаточно. Для решения этих задач необходимы как новые теоретические исследования, так и дополнительные лабораторные и полевые испытания с последующим внесением корректировок в алгоритмы обработки данных. Автор рассчитывает отразить результаты этих исследований в последующих публикациях.

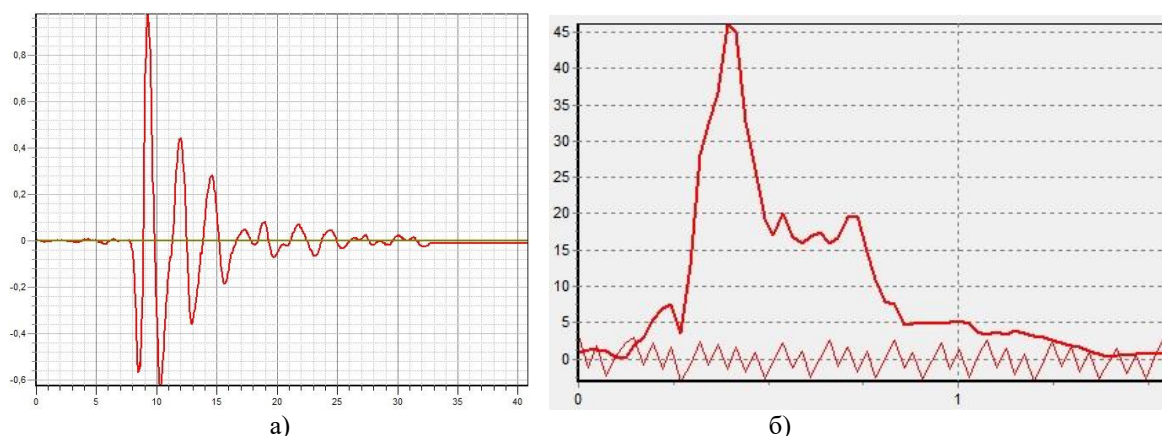


Рис. 2. Распределение зондирующего сигнала во времени(а) и его спектральные характеристики (б).

ВЫВОДЫ

Таким образом, проведённый анализ некоторых из предложенных ранее алгоритмов обработки первичной информации дистанционного зондирования с помощью импульсных георадаров позволил глубже понять физические основы и механизмы взаимодействия электромагнитных импульсных сигналов с плоскостойкими средами. Также рассмотренные возможности алгоритмов корректировки характеристик сигналов импульсных георадаров открывают новые перспективы развития технологий получения информации и повышения степени ее надежности. Кроме того, предложены практические способы повышения эффективности контроля качества различных инженерных и транспортных сооружений, а также строительных конструкций с помощью импульсных георадаров. Основу такого подхода составляют методы решения обратных задач рассеяния электромагнитных волн. Приведенный анализ продемонстрировал возможные пути дальнейшего развития ранее предложенных методов решения обратных задач. Указаны также пути дальнейшего совершенствования в первую очередь алгоритмов компьютерной обработки наборов первичных данных. Эти результаты составляют основу для последующих моделей и вычислительных алгоритмов интерпретации данных. В свою очередь, эти данные составляют фундамент для систем следующего уровня – так называемых систем компьютерно ориентированной инженерии (CAE – Computer Aided Engineering). Итогом применения предложенного подхода должны стать новые методы оценки остаточного ресурса технических сооружений и оптимизации затрат на содержание и ремонт таких сложных и дорогостоящих транспортных сооружений, как автомобильные дороги и мосты.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.

Authors' ORCID ID

D.O. Batrakov  <http://orcid.org/0000-0002-6726-8162>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаврентьев М.М. Многомерные обратные задачи для дифференциальных уравнений. / М.М. Лаврентьев, В.Г. Васильев., В.Г. Романов / Новосибирск, 1969. 66 с.
2. Newton R.G. Inversion of reflected data for layered media: a review of exact methods// Geophys. J. R. Astron. Soc. - 1981. - Vol.65. - P.191-215.
3. Khruslov E. Ya. and Shepelsky D.G. Inverse scattering method in electromagnetic sounding theory // Inverse Problems. - 1994.- Vol. 10.-N2. - P.1-37.
4. Tah-Hsiung Chu Wide-band microwave diffraction tomography under Born approximation / Tah-Hsiung Chu Ken -Yu Lee /IEEE Trans. on Antennas & Propagat.-1989.- Vol. AP-37. -No 4. -P.515-519.
5. Арсенин В.Я. Задачи вычислительной диагностики в медицине. В кн.: Некорректные задачи естествознания.-М.: Изд-во МГУ, 1987.- с.171-184.
6. Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии.- М.: Мир, 1990.-288с.

7. Huang Lin Thermoacoustic tomography: A novel method for early breast tumor detection. / Huang Lin, Qi Weizhi, Xu Jinyu, Zhao Yuan, Chi Zihui, Wu Dan, Rong Jian, and Lai Dakun / X Acoust. Imaging Sens. 2015; N1, PP. 36–47. DOI 10.1515/phto-2015-0004
8. Hassan Akhouayri Quantitative Thermoacoustic Tomography with microwaves sources ./ Hassan Akhouayri, Maïtine Bergounioux, Anabela Da Silva, Peter Elbau, Amélie Litman, et al.. / Journal of Inverse and Illposed Problems, De Gruyter, 2016. P.1-21. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01267412/document>.
9. Miaad Aliroteh Microwave-induced Thermoacoustic tomography for subcutaneous vascular imaging. / Miaad Aliroteh ; Hao Nan ; Amin Arbabian./ Ultrasonics Symposium (IUS), Tours, France, 2016 IEEE International, 18-21 Sept. 2016, P. 1-4, DOI: 10.1109/ULTSYM.2016.7728643.
10. Дмитриев В.И. Обратные задачи электромагнитных методов геофизики.- / В.И. Дмитриев / В кн.: Некорректные задачи естественного знания.-М.: Изд-во МГУ, 1987.- с.54-76.
11. Яковлев В.А. Прямые и обратные задачи в гидрооптике. / В.А. Яковлев / - СПб. РГТУ, 2004. - 127 с.
12. Hee Jung Shin Ultrawideband Noise Radar Tomography: Principles, Simulation, and Experimental Validation./ Hee Jung Shin, Ram M. Narayanan, Mark A. Asmuth, and Muralidhar Rangaswamy. / International Journal of Microwave Science and Technology, vol. 2016, Article ID 5787895, 21 pages, 2016. doi:10.1155/2016/5787895
13. Буров В. А., Глазков А.В., Прудникова И.П., Рунынцева О.Д., Тагунов Е.Я. Акустическая дифракционная топография граничных рассеивателей Вестник Моск. ун-ва. Сер.3: Физика. Астрономия. -1990.-Т.31. N 3.-С.57-62.
14. Численно-аналитический метод решения обратных задач дифракции волн на неоднородном слое / А.В. Бровенко, А.А. Вергий, Н.П. Мележик, П.Н. Мележик, А.Е. Поединчук // Радиофізика та електроніка. — 2015. — Т. 6(20), № 1. — С. 13-25. — Бібліогр.: 19 назв. — рос.
15. He S. and Strom S. The electromagnetic scattering problem in the time domain for a dissipative slab and a point source using invariant imbedding//J. Math. Phys.-1991.- Vol. 32-N 12 - P.3529-3539.
16. He S. and Strom S. Time-domain wave splitting approach to transmission along a nonuniform LCRG line // Journal of Electromagnetic waves and Applications.-1992.- Vol.6.- No. 8. - P.995-1014.
17. He S. and 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 // J. of Computational and Applied Math. - 1992.- Vol.42- P.137-155. (North-Holland).
18. Pochanin G. P. Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying, in: Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications. / G. P. Pochanin, S. A. Masalov, V. P. Ruban, P. V. Kholod, D. O. Batrakov, A. G. Batrakova, S. N. Urdzik, O. G. Pochanin. //CRC Press - Taylor & Francis Group, London, 2016. 20-65. ISBN 9781466586574.
19. 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: «Радиофізика та електроніка»)
20. Батраков Д.О. Спектральный анализ импульсных электромагнитных полей в дистанционном зондировании и биомедицине / Д.О. Батраков, М.С. Антюфеева, А.В. Антюфеев // Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна. – Х. : ХНУ, 2016. – вип. 25. – С. 21-25. – (Серія: «Радиофізика та електроніка»)
21. 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.
22. D. O. Batrakov, K. S. Beloshenko M. S. Antyufeyeva, A. G. Batrakova, S. N. Urdzik. Comparative Study of Signal Processing of Two UWB GPR Antenna Units. Electronic Systems, Micro- and Nanosystem Technique, and IoT Electronic Technology Symposium October10-12, 2018, Kiev, Ukraine, P. 1-5.
23. Batrakov D. O., UWB Signal Processing for the Solving Inverse Scattering Problem of Plane-Layered Media/ Dmitry O. Batrakov, Mariya S. Antyufeyeva, Angelika G. Batrakova, and Alexandr V. Antyufeyev // Proceedings of the 2018 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS-2018), 2018. – p. 140-143.
24. 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, <http://ieeexplore.ieee.org/document/7996072/>
25. Пудовкин, А.П. Основы теории антенн: учебное пособие / А.П. Пудовкин, Ю.Н. Панасюк, А.А. Иванков. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО, ТГТУ, 2011. – 92 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-0981-4.
26. Горобец Н.Н., Овсянникова Е.Е. Влияние размеров и формы излучающего раскрыва на характер пространственного распределения поля вблизи антенны. Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна. – Х. : ХНУ, 2013. – №1094, вип. 23. – С. 51-59. – (Серія: «Радиофізика та електроніка»)