

УДК 621.574.4

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ И БИМЕДИЦИНЕ

Д. О. Батраков, М. С. Антюфеева, А. В. Антюфеев

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, радиофизический факультет.
пл. Свободы 4, Харьков, 61077, Украина
e-mail: rff_bat5@yahoo.com*

Поступила в редакцию 21 мая 2016 г.

В работе предложено использовать сверхширокополосные (СШП) импульсы для получения частотных зависимостей коэффициентов отражения от плоскослоистых сред и последующего применения схемы Ньютона-Канторовича к решению обратных задач рассеяния. С учетом специфики таких задач разработаны алгоритмы и программное обеспечение для анализа амплитудных и фазовых характеристик импульсных сигналов, отраженных от плоскослоистых сред. Проведенные вычислительные эксперименты по моделированию отражения СШП импульсных сигналов от таких сред позволили обосновать выбор частотного диапазона отсчетов коэффициента отражения для решения обратной задачи. Полученные результаты могут быть использованы при неразрушающем контроле и в биомедицинских исследованиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: спектральные характеристики импульсных сигналов, подповерхностное зондирование, плоскослоистые среды

В роботі запропоновано використовувати надширококусові (НШС) імпульси для отримання частотних залежностей коефіцієнтів відбиття від плоскошаруватих середовищ і подальшого застосування схеми Ньютона-Канторовича до розв'язання обернених задач розсіяння. З урахуванням специфіки таких завдань розроблені алгоритми і програмне забезпечення для аналізу амплітудних і фазових характеристик імпульсних сигналів, які відбито від плоскошаруватих середовищ. Проведені обчислювальні експерименти з моделювання відбиття НШС імпульсних сигналів від таких середовищ дозволили обґрунтувати вибір частотного діапазону відліків коефіцієнта відбиття для розв'язання оберненої задачі. Отримані результати можуть бути використані при неруйнівному контролі і в біомедичних дослідженнях.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: спектральні характеристики імпульсних сигналів, підповерхневе зондування, плоскошаруваті середовища

Using the ultra-wideband (UWB) pulses for the frequency dependence of the reflection coefficient of the plane-layered media and the subsequent application of the Newton-Kantorovich scheme to solving inverse scattering problems is proposed in the paper. Taking into account the specificity of the tasks, algorithms and software for amplitude analysis and phase characteristics of the pulse signals reflected from the plane-layered media are developed. Provided computing experiments for modeling reflection of UWB pulse signals from such media allowed to justify the choice of frequency range of samples of the reflection coefficients for the solution of the inverse problem. The obtained results should be applied to nondestructive testing and in biomedical research.

KEYWORDS: spectral characteristics of pulse signals, subsurface sounding, plane layered medium

ВВЕДЕНИЕ

Использование электромагнитных волн при дистанционном зондировании, неразрушающем контроле и в биомедицинских исследованиях открывает новые возможности и перспективы, связанные со значительным объемом полезной информации, приносимой отраженными сигналами. Импульсные сигналы, иначе называемые видеоимпульсами, импульсами без несущей или сверхширокополосными сигналами, обладают рядом особенностей, отличающих их от других ранее широко применявшихся сигналов, например, с амплитудной модуляцией. К этим особенностям следует отнести, прежде всего, возможность концентрации энергии соответствующего поля (например, электромагнитного или акустического) во времени. С точки зрения технических задач это обеспечивает как повышение помехоустойчивости таких сигналов с одной стороны, так и их потенциал для радиолокационного обнаружения, и идентификации различных объектов. Задачи обнаружения, распознавания или идентификации различных объектов, начиная от плоскослоистых сред и заканчивая сложными неоднородными включениями в таких средах, требуют не только максимальной информативности зондирующих сигналов, но и разработки соответствующих методов обработки принимаемых сигналов. Наибольшее распространение при анализе работы линейных каузальных систем получили линейные преобразования Фурье и Лапласа [1]. Преобразование Лапласа имеет преимущества для определения характеристик переходных процессов, но, с другой стороны не обладает удобной физической интерпретацией. Соответственно, применение преобразования Лапласа к какому-либо соотношению сохраняет лишь его математический, а не физический смысл. Основным преимуществом преобразования Фурье является возможность его физической интерпретации в виде спектра и процессов, связанных с

взаимодействием парциальных монохроматических волн (гармоник). С одной стороны, преобразование Фурье наряду с другими преобразованиями можно рассматривать как чисто математическую операцию. Но с другой стороны, во многих отраслях науки преобразование Фурье имеет такой же глубокий физический смысл, как и сами функции, к которым оно применяется. Например, форма колебания в электротехнике и акустике, волны в оптике либо сигналы в радиолокации являются такими же физически измеримыми величинами, как и их спектр. Осциллограф позволяет нам увидеть форму электрического колебания, тогда как анализатор спектра позволяет визуализировать оптический или электрический спектры. Еще более физической является интерпретация акустического спектра, поскольку мы воспринимаем звук через его спектр. Это связано в первую очередь с тем, что преобразование Фурье, по сути, математически описывает соотношения между временными и спектральными характеристиками одного и того же физического процесса. Еще одним важным моментом применения спектрального анализа являются обратные задачи теории рассеяния в частотной области. К ним относятся и одномерные задачи восстановления профиля диэлектрической проницаемости плоскостойких сред [2–4]. Одним из возможных и наиболее распространенных информативных параметров при этом является частота [4]. Для решения задачи, например, с помощью схемы Ньютона-Канторовича, необходимо знание коэффициентов отражения на некотором дискретном множестве значений частоты, которая, в данном случае, является информативным параметром. Получить экспериментально набор значений таких коэффициентов можно с помощью панорамного измерителя коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) и ослабления [5]. Однако такие измерения невозможно провести в режиме мониторинга, например, при обследовании технического состояния строительных конструкций, это связано с необходимостью постоянной калибровки прибора и чувствительностью результатов к расположению излучателя по отношению к поверхности объекта. Поэтому целью настоящей работы является анализ возможностей применения СШП импульсных сигналов в качестве источника исходных данных для алгоритмов решения обратных задач рассеяния.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исходная задача выглядит следующим образом: исследуемая структура облучается СШП импульсом и необходимо исследовать возможность преобразования временной зависимости сигнала в частотную для дальнейшего решения обратной задачи. В плане математической реализации существуют два случая: непрерывное распределение профиля диэлектрической проницаемости и кусочно-постоянное (плоскостойкая среда). Непрерывное распределение в рамках, например, схемы Ньютона-Канторовича [2–4] может быть аппроксимировано кусочно-постоянной зависимостью. Поэтому сначала рассмотрим алгоритм решения обратной задачи в этом случае. Общая схема, предложенная в [2–4], заключается в измерении значений коэффициента отражения от исследуемой среды на некотором множестве значений частоты. Затем вводится в рассмотрение новая неизвестная функция η , представляющая собой разность между искомым профилем $\varepsilon_p(R')$ и профилем некоторой «пробной» структуры $\varepsilon_s(R')$, для которой возможно численное решение прямой задачи, $\eta \equiv \varepsilon_p(R') - \varepsilon_s(R')$. Затем ищем $\eta(\dot{R})$ как функцию, реализующую минимум сглаживающего функционала [4]:

$$F[\eta] \equiv \sum_{j=1}^N w_j \left| U^{(j)}(\dot{R}_H) - U_m^{(j)}(\dot{R}_H) - \int_{V_p} L^{(j)}(\dot{R}_H, \dot{R}') \eta(\dot{R}) dV' \right|^2 + \alpha \int_{V_p} w(\dot{R}) |\eta(\dot{R})|^2 dV. \quad (1)$$

Здесь w_j – весовые коэффициенты, $w(\dot{R})$ – весовая функция, α – параметр регуляризации (все – положительно определенные величины). Одной из главных особенностей такой постановки является тот факт, что решение задачи достигается на функции $\eta(\dot{R}) \equiv 0$. Иными словами, задача сводится к нахождению функции, наименее уклоняющейся от нуля в смысле среднеквадратичного значения (это обеспечивает второе слагаемое в (1) – стабилизатор). Первое слагаемое отвечает за минимизацию разности между экспериментально измеренными и смоделированными численно значениями полей, в рамках так называемого борновского приближения [4]. Приравнивание нулю первой вариации функционала приводит к уравнению Эйлера в форме:

$$-\int_{V_p} K(\dot{R}, \dot{R}') \eta(\dot{R}) dV' + \alpha w(\dot{R}) \eta(\dot{R}) = q(\dot{R}), \quad (\dot{R} \in V_p), \quad (2)$$

которое представляет собой интегральное уравнение Фредгольма II рода с вырожденным ядром:

$$K(\dot{R}, \dot{R}') = \sum_{j=1}^N w_j L^{(j)*}(\dot{R}_H, \dot{R}) L^{(j)}(\dot{R}_H, \dot{R}') \quad (3)$$

и правой частью:

$$q(\vec{R}) = \sum_{j=1}^N w_j L^{(j)*}(\vec{R}_H, \vec{R}) [U_{in}^{(j)}(\vec{R}_H) - U^{(j)}(\vec{R}_H)]. \quad (4)$$

Из уравнения Эйлера (2) с учетом вырожденности его ядра следует, что его решение может быть представлено как:

$$\eta(\vec{R}) = \frac{1}{\alpha w(\vec{R})} [q(\vec{R}) + \sum_{j=1}^N w_j L^{(j)*}(\vec{R}_H, \vec{R}) x_j], \quad (5)$$

где $x_j = const, j=1, 2, \dots, N$ – решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно $\{x_j\}$

$$x_j + \sum_{n=1}^N a_{jn} x_n = \psi_j, \quad (j=1, 2, \dots, N), \quad (6)$$

коэффициенты и правая часть которой следующие

$$a_{jn} = -w_n \int_{V_P} L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}) L^{(n)*}(\vec{R}_H, \vec{R}) \frac{dV}{\alpha w(\vec{R})}; \quad \psi_j = \int_{V_P} L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}) \frac{q(\vec{R})}{\alpha w(\vec{R})} dV.$$

Основная особенность такой схемы решения заключается в аппроксимации неизвестного профиля диэлектрической проницаемости набором функций $L^{(j)*}(\vec{R}_H, \vec{R})$ с неизвестными постоянными коэффициентами x_j и возможностью корректировки результатов измерений с помощью весовых коэффициентов w_j .

Этот метод хорошо себя зарекомендовал при восстановлении непрерывных распределений диэлектрической проницаемости. В то же время для плоскостойких сред с несколькими слоями значительной толщины (по сравнению с длинами волн зондирующих сигналов) и большим градиентом ϵ существуют определенные трудности его использования. Повысить эффективность такого подхода можно с помощью более полного учета спектральных характеристик отраженных сигналов. Это связано

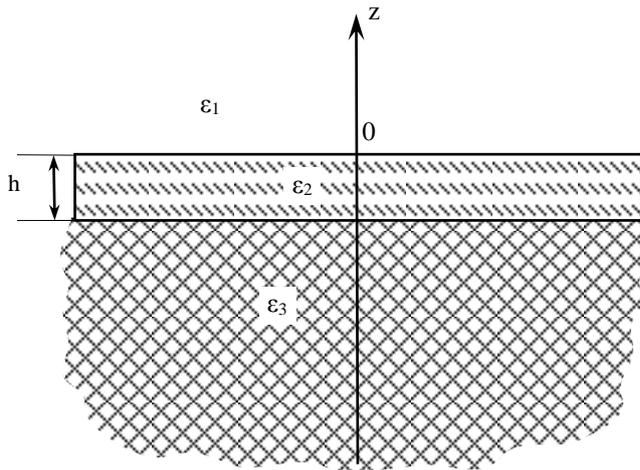


Рис. 1. Геометрия исследуемой структуры.

с возможным использованием эффекта просветляющих [5] или зеркальных покрытий. Физический смысл таких покрытий иллюстрирует рис. 1. Предполагается, что на поверхность подложки (полупространство) нанесен тонкий слой покрытия. Плоская монохроматическая волна падает нормально к поверхности, а значения диэлектрических проницаемостей верхнего полупространства, слоя и подложки равны $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ соответственно. При отражении волны от плоской границы фаза плоской волны может меняться на π либо не меняться, а при прохождении через границу фаза не изменяется [6–8]. При прохождении слоя толщиной h с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 набег фазы $\Delta\phi$ равен:

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{2h}{\lambda} = \frac{2h\sqrt{\epsilon_2}}{c} \omega, \quad (7)$$

где: ω, λ, c – частота, длина волны в материале слоя и скорость света в вакууме соответственно. Если $\Delta\phi = 2\pi m, m=0, 1, 2, \dots$ то набег фазы волны будет равен нулю, т.е. отраженные от верхней и нижней границ волны будут синфазными в верхнем полупространстве. Если же $\Delta\phi = \pi m, m=0, 3, 5, \dots$, то волны, наоборот, будут находиться в противофазе. Таким образом, спектр СШП сигнала будет содержать чередующиеся максимумы и минимумы, т.е. будет осциллирующим. При

$$\omega = \frac{\pi m c}{h\sqrt{\epsilon_2}}, \quad m=1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

отраженные волны будут складываться в фазе и будет иметь место максимум, а при

$$\omega = \frac{\pi m c}{2h\sqrt{\varepsilon_2}}, m = 1, 3, 5, \dots \quad (9)$$

волны будут складываться в противофазе, и будет наблюдаться минимум коэффициента отражения на соответствующей частоте спектра. Данный вывод иллюстрируется рис. 2. На этих графиках изображены временные распределения СШП импульсных сигналов и отраженные импульсы для слоя толщиной 0.05 м и с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_2 = 6$. Волна падает нормально к границе из свободного пространства $\varepsilon_1 = 1$. Диэлектрическая проницаемость подложки $\varepsilon_3 = 3$. Также на рис. 2 б изображены спектральные амплитуды и фазы зондирующего и отраженного сигналов. Вид графиков показывает наличие осцилляций распределения спектральных амплитуд отраженных сигналов (рис. 2 б, кривая 2). Как следует из анализа спектральных характеристик, основная информация о физико-геометрических свойствах плоскостной среды содержится в определенной части спектра. Для случая, который соответствует рис. 2 это частоты от 0.5 до 2.5 ГГц. Отсюда следует вывод, что именно частоты этого диапазона необходимо использовать для реализации схемы Ньютона-Канторовича, о которой говорилось выше. Для более тонкой настройки вычислительного алгоритма в нем предусмотрены весовые коэффициенты и функция, а также параметр регуляризации α . Интервал между частотами «пиковых» значений также несет информацию о параметрах слоя (или слоев), которую можно использовать при выборе точек отсчета коэффициентов отражения. Разумеется, спектральные характеристики являются функциями от длительности фронта и формы исходного зондирующего импульса. Результаты соответствующих исследований авторы надеются опубликовать в будущем.

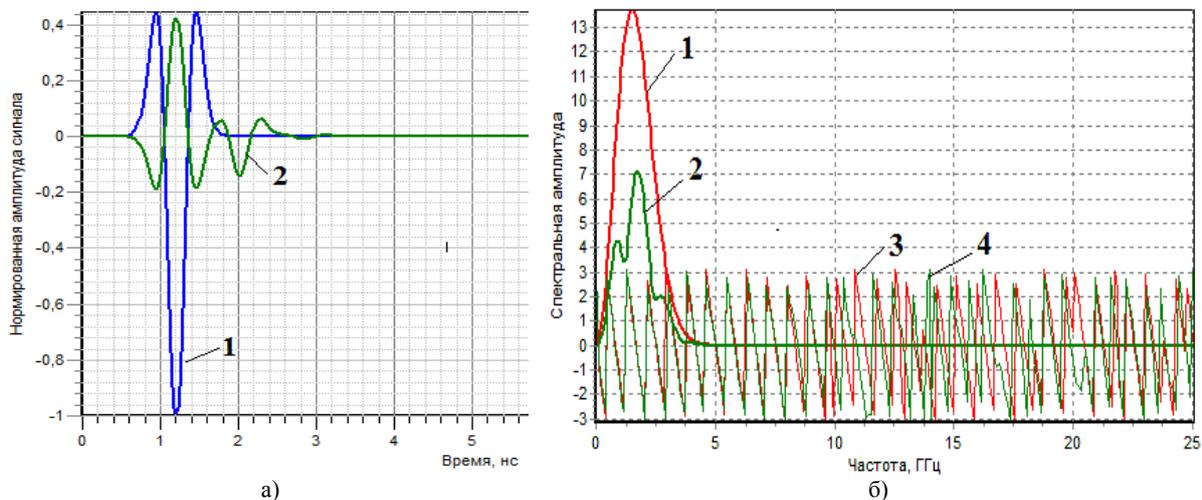


Рис. 2. Формы сигналов и их спектры. а) зондирующий (1) и отраженный (2) сигналы; б) спектральные амплитуды зондирующего (1) и отраженного (2) сигналов и их фазы (3, 4) соответственно.

ВЫВОДЫ

Разработанный ранее метод решения обратных задач (итерационная схема Ньютона-Канторовича) показал свою эффективность для сред с непрерывным распределением диэлектрической проницаемости. Предложено использовать СШП импульсы для получения исходной информации о частотных зависимостях коэффициента отражения плоскостной среды. Кроме того, обратные задачи для плоскостных сред (с кусочно-постоянным распределением) имеют свою специфику, связанную с наличием скачков диэлектрической проницаемости. В таком случае, повышение эффективности метода достигается за счет оптимизации частотного интервала и выбора набора частот, адаптированного под конкретные параметры зондирующего сигнала. Проведенные численные эксперименты подтвердили работоспособность использованных моделей, разработанных алгоритмов и программного обеспечения. Таким образом, эти результаты могут быть использованы при интерпретации данных дистанционного зондирования, а также в процессе биомедицинских исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Ю.В. Спектральный и временной анализ импульсных и периодических сигналов: Учебное пособие. / Ю.В. Кузнецов, А.Б. Баев // М.: Изд-во МАИ, 2007. – 95 с.
2. Batrakov D.O., Zhuck N.P. Inverse Scattering Problem in the Polarization Parameters Domain for Isotropic Layered Media: Solution via Newton-Kantorovich Iterative Technique. //Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – June 1994. – Vol.8, № 6. – P.759–779.

3. Zhuck N.P., Batrakov D.O. Determination of electrophysical properties of a layered structure with a statistically rough surface via an inversion method. *Physical Review B*. – 1995. – Vol.51, №23, June 15. – P.P. 17073–17080.
4. 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.
5. A.P. Ovcharenko, V.I. Bilozertseva, D.A. Gaman. Specificity of Antireflective Coatings at Oblique Incidence of Light // *Proceedings of the International Conference Nanomaterials: Applications And Properties*. Vol. 2 No 2, 02FNC23(4pp) (2013).
6. Борн М. Основы оптики. / М. Борн, Э. Вольф // М.: Наука, 1973г.– 720с.
7. 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.
8. Батраков Д.О. Сравнительный анализ спектральных характеристик георадарных сигналов / Д.О. Батраков, Д.В. Головин // *Вестник ХНУ – радиофизика и электроника*. – №1010, – Вып. 20, – 2012., С. 119–122.