

УДК 537.87

АНАЛИЗ ИМПУЛЬСНЫХ ПОЛЕЙ, ОТРАЖЕННЫХ ОТ СЛОИСТОЙ СРЕДЫ С ПОТЕРЯМИ, С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Д. В. Широкоград¹, А.Н. Думин², О.А. Думина³, В.А. Катрич²

¹Запорожский национальный технический университет, 69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64

²Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, 61077, г. Харьков, пл. Свободы, 4

³Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, 61050, г. Харьков, пл. Фейербаха, 7
e-mail: hoveringphoenix@gmail.com

Поступила в редакцию 3 ноября 2009 г.

Решена задача определения толщины слоя слоистой среды с использованием импульсного электромагнитного поля. С помощью искусственной нейронной сети во временной области анализируется импульсное поле, отраженное от слоистой среды с электрическими характеристиками, близкими к характеристикам кожного покрова человека. Рассматривается нормальное падение плоской волны с временной формой в виде гауссиана. Отраженное электромагнитное поле рассчитывается методом конечных разностей во временной области. В качестве входных данных для нейронной сети используются значения амплитуды электрической компоненты отраженного поля. Как пример, сеть тренируется на определение толщины одного из слоев. Исследуется стабильность такого определения в присутствии помех, экспериментальных погрешностей и небольших отклонений электрических параметров среды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: временная область, искусственная нейронная сеть, импульсные поля, слоистая среда

Вирішена задача визначення товщини шару шаруватого середовища з використанням імпульсного електромагнітного поля. За допомогою штучної нейронної мережі в часовому просторі аналізується імпульсне поле, відбите від шаруватого середовища з електричними характеристиками, близькими до характеристик шкіряного покриву людини. Розглядається нормальне падіння плоскої хвилі з часовою формою у вигляді гаусіана. Відбите електромагнітне поле розраховується методом кінцевих різниць у часовому просторі. В якості вхідних даних для нейронної мережі використовуються значення амплітуди електричної компоненти відбитого поля. Як приклад, мережа тренується на визначення товщини одного з шарів. Досліджується стабільність такого визначення за наявності завад, експериментальних похибок і невеликих відхилень електричних параметрів середовища.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: часовий простір, штучна нейронна мережа, імпульсні поля, шарувате середовище

The problem of determination of thickness a layer of layered medium by impulse irradiation is solved. The impulse fields reflected from the layered medium with electrical characteristics close to the characteristics of human skin are analyzed by artificial neural network in time domain directly. The normal incidence of plane wave with Gaussian time form is considered. The reflected electromagnetic field is calculated by FDTD method. Initial data for the neural network analysis are the values of amplitude of electrical component of reflected field. As an example, the network is trained to determine the thickness of one of the layers of the medium. The stability of the determination in presence of interferences, experimental errors and instabilities of medium parameters is investigated.

KEYWORDS: time domain, artificial neural network, impulse fields, layered medium

Одной из наиболее важных сфер применения импульсных сигналов является их использование для радиоинтроскопии различных сред с потерями. Благодаря большой ширине частотного спектра его низкочастотная часть позволяет проникнуть в глубину среды, а высокочастотная – обеспечивает высокую точность определения положения объектов [1]. Но анализ во временной области импульсного сигнала, отраженного от среды, с целью определения её параметров, осложняется, когда длительность используемого сигнала сравнима или много больше размеров слоев изучаемой слоистой структуры. Нелинейная зависимость амплитуды отраженного поля от электрических параметров и других характеристик среды наводят на мысль о применении искусственной нейронной сети для его анализа для определения характеристик слоистой среды [2]. Трансформация и анализ пространственного распространения электромагнитного поля с помощью нейронной сети в узком частотном диапазоне позволяет определить местоположение объекта в некотором объеме [3]. Несмотря на то, что частотный спектр отраженного сигнала способен предоставить необходимую информацию о слоистой среде, предлагается использовать для анализа исключительно временные параметры, т.е. амплитуду сигнала в различные моменты времени. Предположение о возможности такого анализа основывается на структуре

и принципах работы нейронной сети [4]. Предполагается, что нейронная сеть сможет произвести необходимый временной и частотный анализ сигнала, основываясь на тренировке на заведомо известных результатах [5]. В [6] показано, что анализ с помощью нейронной сети обеспечивает стабильность в случаях вариации параметров среды и присутствия шумов.

В статье рассматривается нормальное падение импульсной плоской волны на слоистую среду с потерями, но разрабатываемый подход применим для целого ряда подобных задач ввиду универсальности принципов работы нейронной сети. Например, тренировка на экспериментальных данных используется в [7], но исследовалась приблизительно такая же слоистая структура на частотах в десять раз больше, чем в нашей работе [6]. В работе [7] подчеркиваются преимущества данного метода определения параметров структуры в сравнении с корреляционным.

Целью данной статьи является изучение самой возможности определения размеров слоистой структуры с известными электрическими параметрами посредством искусственной нейронной сети и исследование стабильности такого определения при наличии помех, экспериментальных ошибок и небольших изменений параметров исследуемой среды.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Плоская электромагнитная волна с временной зависимостью в форме гауссового импульса длительностью 0,5 нс падает нормально на слоисто-неоднородную среду (рис. 1). Слоистая структура состоит из трех слоев с разной диэлектрической проницаемостью и проводимостью. Данная структура является моделью поверхности человеческого тела. Первый слой имеет электрические параметры кожи; второй – жировой ткани; третий – мышечной ткани, причем учитываются как потери, так и частотная дисперсия параметров среды. Начальная толщина слоев – 2, 20, 30 мм соответственно. Волна, проходящая через последний слой, поглощается. Благодаря существенным потерям и толщине третьего слоя такое поглощение не может существенно повлиять на временную форму отраженных сигналов.

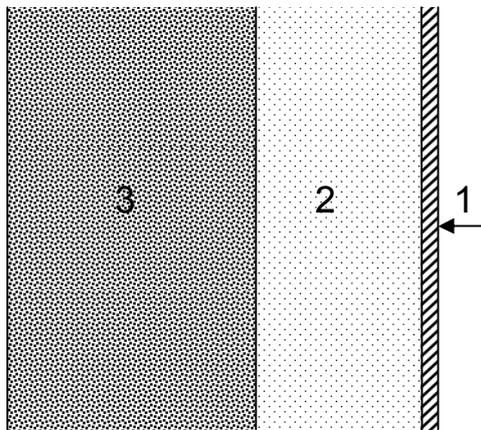


Рис. 1. Физическая модель исследуемого объекта: 1 – кожа, 2 – жировая ткань, 3 – мышечная ткань

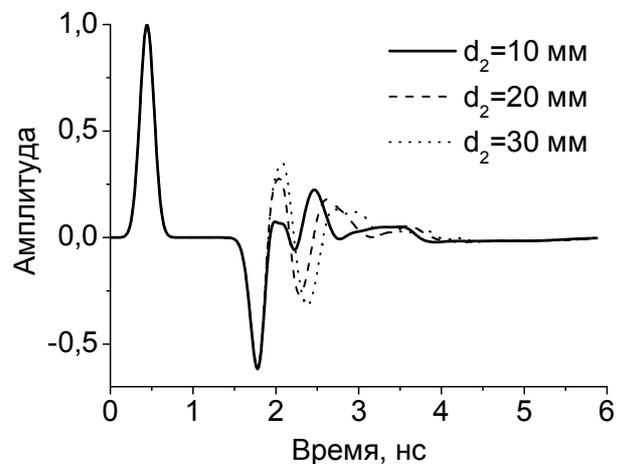


Рис. 2. Временная зависимость амплитуды электрического поля для различных толщин второго слоя d_2

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Исходными значениями для нейронной сети служит временная зависимость амплитуды электрического поля вблизи слоистой среды, включающая в себя и падающую, и отраженную волну. Данные для тренировки и тестирования получены с помощью численного расчета данной электродинамической задачи методом конечных разностей во временной области. Примеры временных зависимостей амплитуды напряженности электрического поля представлен на рис. 2.

Первый импульс на рис. 2 есть временная зависимость падающего поля. Эта часть графика одинакова для всех кривых. На остальной части графика кривые различаются, но мы не можем, опираясь на эти кривые, с легкостью определить толщину второго слоя, именно это и побудило попробовать решить эту задачу при помощи искусственной нейронной сети. Выбранный случай параметров слоистой

среды и длительности зондирующего импульса интересен тем, что пики сигнала, отраженного от разных слоев, визуально не разделяются, так как пространственная длительность зондирующего импульса в 10 раз больше толщины первого и в 4 раза больше толщины второго слоя. В [8] подтверждено, что аналитический метод Ньютона-Канторовича в этом случае не работает из-за жесткой зависимости определения параметров среды от времени прихода отраженного импульса.

Начиная с момента, когда кривые начинают различаться, до момента, когда они приближаются к нулю, мы рассчитали значения амплитуды с шагом 15 пс. Это дает набор из 200 значений амплитуды для определенной слоистой среды. Всего для тренировки на начальном этапе было получено 11 наборов значений для сред с вариацией толщины второго слоя d_2 с шагом 2 мм. Другие параметры задачи не изменялись.

Исходя из этого, построим нейронную сеть, которая должна определять толщину второго слоя d_2 с точностью до 2 мм. Данная искусственная нейронная сеть реализована на базе сети с одним скрытым слоем (рис. 3) и сигмоидной функцией возбуждения (рис. 4).

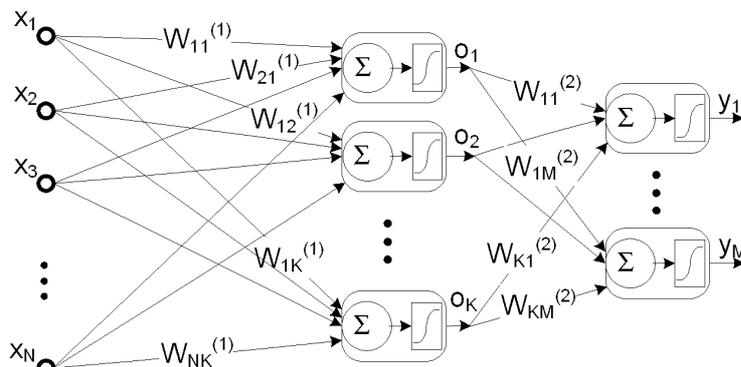


Рис. 3. Структура искусственной нейронной сети

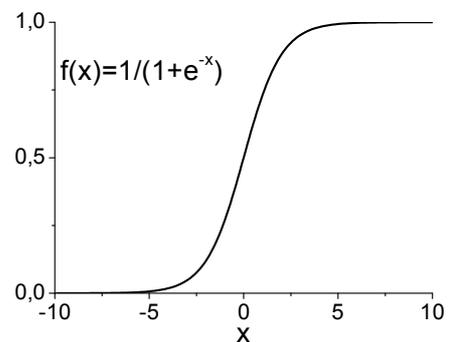


Рис. 4. Сигмоидная функция возбуждения искусственного нейрона

Входными данными для сети x_i (рис. 3) служат значения амплитуды электрической компоненты падающей плоской волны (рис. 2). Весовые коэффициенты W определяются в течении обучения методом Видроу-Хоффа ($W^{(1)}$) и методом распространения обратной ошибки ($W^{(2)}$) [4]. Каждая выходная функция y_i в результате обучения должна принимать значения из промежутка 0,99-1 для соответствующего значения толщины второго слоя d_2 , а для остальных значений d_2 должна принимать значения из промежутка 0-0,01. Нейронная сеть состоит из 200 нейронов в первом слое, 20 нейронов в скрытом слое и 11 нейронов в третьем слое.

Алгоритм тренировки реализован на языке C++. Процесс тренировки для всех образцов длится не более нескольких минут. Относительная часть правильных выходных значений y (рис. 5) и их средняя ошибка (рис. 6) наблюдаются в процессе тренировки. Отметим, что эти две характеристики тренировки не изменяют свое поведение одновременно в зависимости от количества эпох обучения.

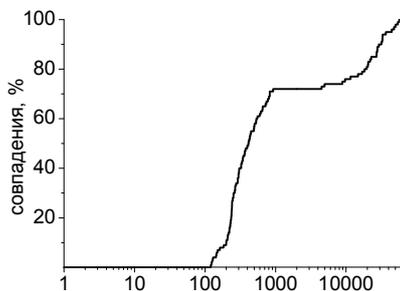


Рис. 5. Относительная часть совпадающих значений выходной функции

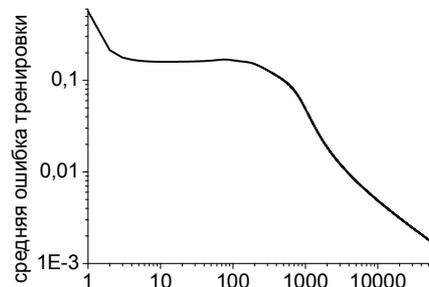


Рис. 6. Средняя ошибка всех выходных значений по эпохам

ТЕСТИРОВАНИЕ СЕТИ

После определения весовых коэффициентов проверим сеть на новых входных данных. Для начала, протестируем нейронную сеть на промежуточных значениях второго слоя d_2 . Стандартная реакция сети на

промежуточные входные данные ввиду хороших интерполяционных свойств нейронной сети [4] вполне закономерна. Результаты тестирования на промежуточные значения второго слоя показаны на рис. 7. Однако следует отметить, что, как видно из данных примеров, изменения выходных сигналов непропорциональны изменениям входных, то есть интерполяция нейронной сети явно нелинейная.

Влияние изменения толщин других слоев d_1 и d_3 показано на рис. 8. Это изменение можно трактовать как шум или как тестирование экстраполяционных свойств сети, т. к. обучение на эти параметры не проводилось. Вполне ожидаемо минимальное влияние d_3 ввиду высокого уровня поглощения поля в третьем слое, что и показано на рис. 8. В то же время, сеть дает ошибочные ответы при изменении толщины d_1 , однако величина ошибки минимальна, а направление – предсказуемо. Объяснением этому служит высокая диэлектрическая проницаемость первого слоя. Ошибку можно устранить дополнительной тренировкой на параметр d_1 .

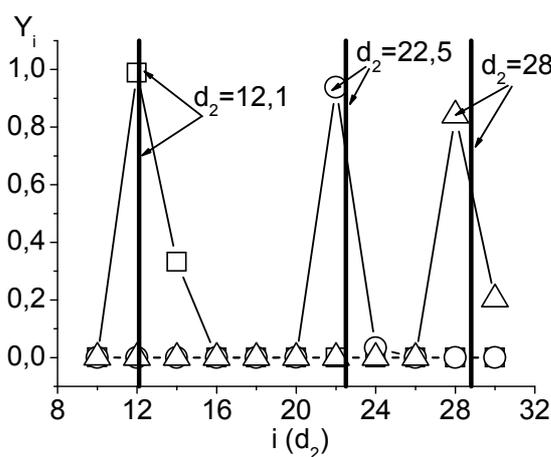


Рис. 7. Выходные значения для случая импульсного сигнала, полученного для промежуточных значений d_2

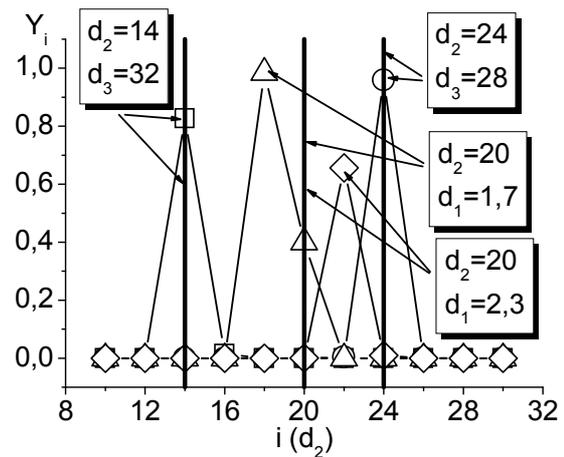


Рис. 8. Выходные значения для случая импульсного сигнала, полученного для различных значений d_1 и d_2

Для устранения вышеуказанных недостатков анализа, проводимого искусственной нейронной сетью, была проведена новая тренировка той же сети. Поведение сети относительно параметра d_1 улучшилось после обучения на новых данных, где параметр d_1 принимал пять различных значений. В результате была достигнута стабильность определения толщины второго слоя не только в случае вариации d_1 , но и в случае вариации действительной составляющей диэлектрической проницаемости (рис. 9) и проводимости (рис. 10) первого слоя d_1 . Из этого следует сделать вывод, что новая тренировка позволила нейронной сети получить параметры слоистой среды, опираясь не на время прихода импульса, как это происходило в предыдущем случае, что и проиллюстрировано на рис. 8, а на другие характеристики отраженного импульса, малочувствительные даже к изменениям электрических параметров слоев.

Результаты тестирования сети на стабильность к изменениям тех же параметров уже второго слоя приводятся на рис. 11 и 12.

Наиболее неожиданные результаты наблюдаются при исследовании влияния шумов во входном сигнале. Нейронная сеть точно определяет толщину второго слоя в присутствии белого шума, когда соотношение средних мощностей сигнала и шума $P_{\text{signal}}/P_{\text{noise}}$ равно 1 (0 dB), где P_{signal} берется средней на анализируемом интервале времени, в течении которого мы получаем сигнал, отраженный от различных слоев (см. рис. 2). При этом повышение уровня шума дает небольшую ошибку при определении толщины второго слоя (2 мм), которая не увеличивается вплоть до значения отношения сигнал/шум -30 dB (рис. 13). Временная форма сигналов для этих двух граничных случаев показана на рис. 14.

Также была исследована устойчивость к отклонениям положения точки наблюдения $s = 200$ мм (рис. 15) и ошибочным смещениям времени наблюдения Δt [нс] (рис. 16). Видно, что нейронная сеть определяет толщину слоя в различных случаях как точно, так и с ошибкой, но значение и направление ошибки не соответствует направлению сдвига времени и расстояния. Возможно, что обеспечить устойчивость к такого рода ошибкам можно дополнительной тренировкой или приближением точки наблюдения к слоистой среде, так как используемая точка $s = 200$ мм выбиралась так, чтобы падающее и отраженное поле в точке наблюдения не накладывались, но данное требование, очевидно, не является необходимым для правильной работы нейронной сети.

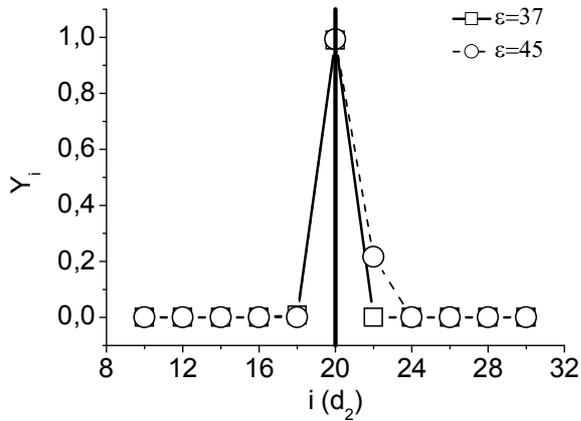


Рис. 9. Выходные значения для случая импульсного сигнала, отраженного от среды с различными значениями действительной части диэлектрической проницаемости первого слоя

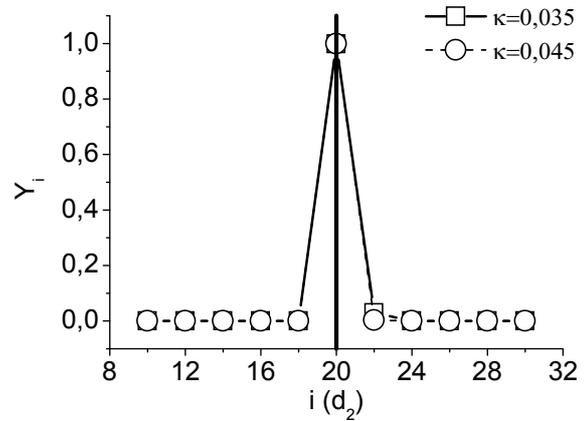


Рис. 10. Выходные значения для случая импульсного сигнала, отраженного от среды с различными значениями проводимости первого слоя

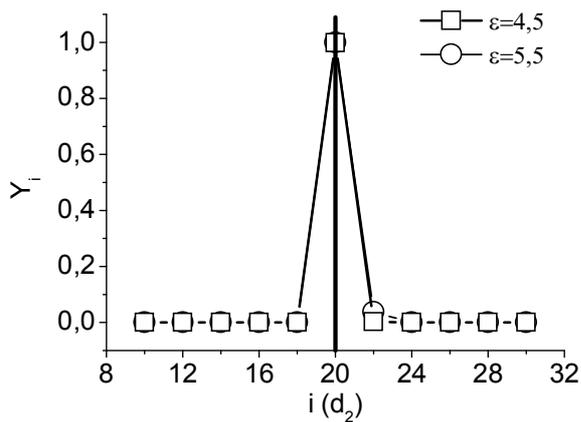


Рис. 11. Выходные значения для случая импульсного сигнала, отраженного от среды с различными значениями действительной части диэлектрической проницаемости второго слоя

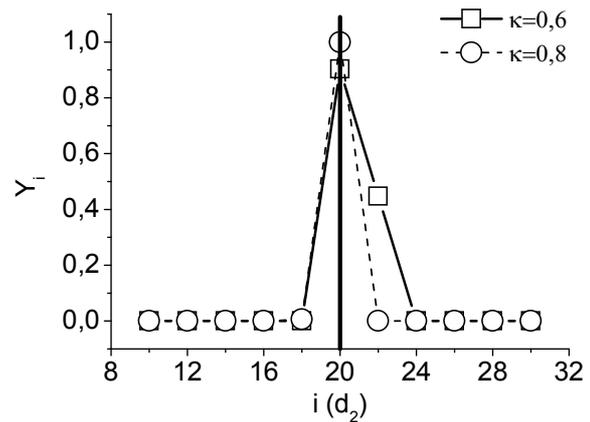


Рис. 12. Выходные значения для случая импульсного сигнала, отраженного от среды с различными значениями проводимости второго слоя

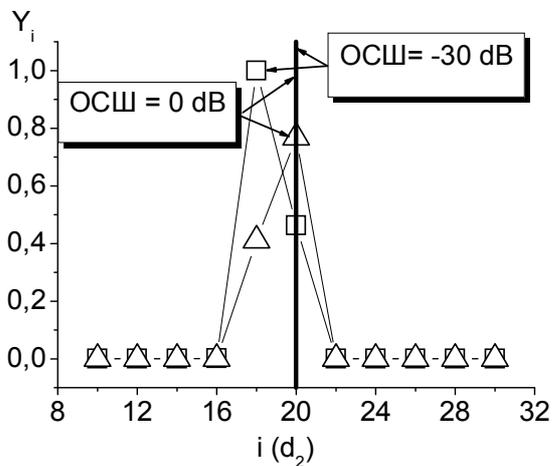


Рис. 13. Выходные значения для случая присутствия белого шума с различными значениями ОСШ

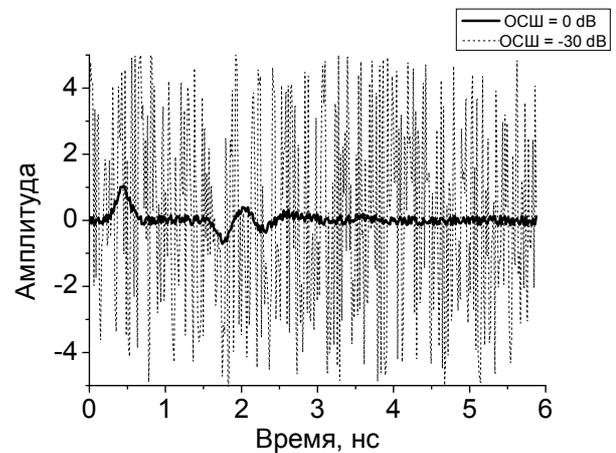


Рис. 14. Временная зависимость амплитуды в присутствии белого шума с различными значениями ОСШ

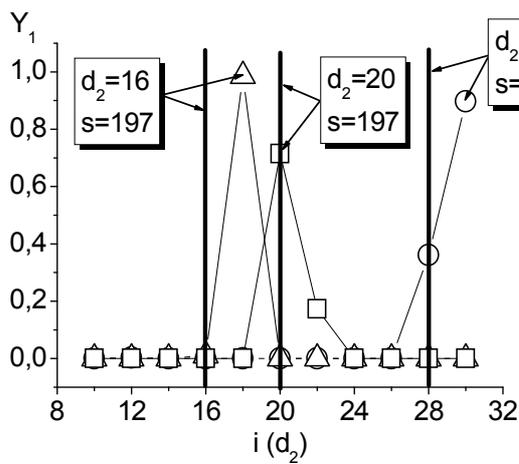


Рис. 15. Выходные значения для случая моделирования экспериментальной погрешности положения точки наблюдения $s=200$ мм

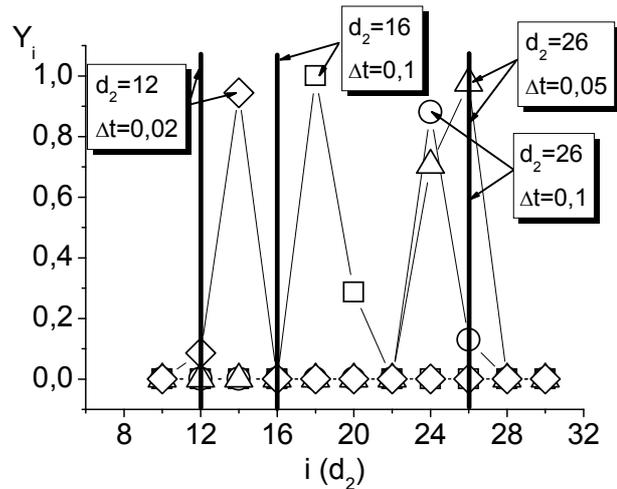


Рис. 16. Выходные значения для случая моделирования экспериментальной погрешности за счет смещения времени наблюдения Δt (нс)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрирована возможность определения параметров слоистой структуры из отраженного импульсного электромагнитного поля с помощью нейронной сети во временной области. Доказано, что использованный метод обеспечивает достаточно хорошую точность определения в присутствии шума, а также вариации толщин других слоев, электрических параметров всех слоев и удовлетворительная точность при наличии экспериментальных погрешностей в положении точки наблюдения и времени наблюдения отраженного сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хармут Х. Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи. – М.: Радио и связь, 1985. – 376 с.
2. Драница Ю.П. Принципы нейроподобного моделирования геофизических объектов и процессов // Вестник МГТУ. – 2002. – Т. 5, №2. – С. 241-252.
3. Головачев Д.А., Умнов А.Л., Яшнов В.А. Использование нейронных сетей для интерпретации данных интерференционной локации // Шестая научная конференция по радиофизике. – Нижний Новгород (Россия). – 2002. – С.54–55.
4. Калан Р. Основные концепции нейронных сетей. – М.: Вильямс, 2001. – 287 с.
5. Shyrokord D., Dumin O., Dumina O. Time domain analysis of reflected impulse fields by artificial neural network // Proc. 4th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS-2008). –Sevastopol (Ukraine). – 2008. – P.124-126.
6. Dumin O., Dumina O., Shyrokord D. Time domain analysis of fields reflected from model of human body surface using artificial neural network // Proc. III European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP-2009). – Berlin (Germany). – 2009. – P.235-238.
7. Drobakhin O., Doronin A. Estimation of thickness of subsurface air layer by neuron network technology application to reflected microwave signal // Proc. XII International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET-2008). – Odesa (Ukraine). – 2008. – P.150-152.
8. Alexin S., Drobakhin O., Tkachenko V. Reconstruction of permittivity profile for stratified dielectric material: Gel'fand-Levitan and Newton-Kantorovich methods // Proc. XII International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET-2008). – Odesa (Ukraine). – 2008. – P.141-143.