

УДК 621.574.4

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТОЛЩИНОМЕТРИИ ПЛОСКОСЛОИСТЫХ СРЕД

Д.О. Батраков

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

пл. Свободы 4, Харьков, 61077, Украина

Поступила в редакцию 21 апреля 2014 г.

В работе исследованы процессы распространения электромагнитных импульсных сигналов в плоскостойких средах. Представлены результаты решения модельной задачи о распространении сверхширокополосного импульсного сигнала в плоскостойкой среде. Один или несколько слоев при этом имеют малую электрическую толщину и слабый электрический контраст. Практическая значимость таких задач, в частности, обусловлена необходимостью разработки эффективных и надежных методов мониторинга технического состояния дорожных одежд нежесткого типа. Поэтому в работе помимо результатов численного моделирования представлены и данные обработки реальных импульсных сигналов от антенных систем современных импульсных георадаров. Предложенные алгоритмы моделирования и обработки сигналов могут найти применение также в биомедицинских исследованиях и дистанционном зондировании.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: импульсные сигналы, тонкие слои, подповерхностное зондирование, плоскостойкие среды

У роботі досліджені процеси поширення електромагнітних імпульсних сигналів у плоскошаруватих середовищах. Представлено результати рішення модельного завдання про поширення надширококуткового імпульсного сигналу в плоскошаруватому середовищі. Один або кілька шарів при цьому мають малу електричну товщину й слабкий електричний контраст. Практична значимість таких завдань, зокрема, обумовлена необхідністю розробки ефективних і надійних методів моніторингу технічного стану дорожніх одягів нежорсткого типу. Тому в роботі крім результатів чисельного моделювання представлені й дані обробки реальних імпульсних сигналів від антенних систем сучасних імпульсних георадарів. Запропоновані алгоритми моделювання й обробки сигналів можуть знайти застосування також у біомедичних дослідженнях і дистанційному зондуванні.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: імпульсні сигнали, тонкі шари, підповерхневе зондування, плоскошаруваті середовища

In the present paper processes of electromagnetic pulse signals propagation in plane-layered media are investigated. Results of the solution of a modelling problem of propagation of an ultra wideband pulse signal in plane-layered media are presented. One or several layers thus have a small electric thickness and weak electric contrast. The practical importance of such problems, in particular, is caused by necessity of working out of effective and reliable methods of monitoring of a technical condition of road pavements of nonrigid type. Therefore in work besides of results of numerical modelling are presented also data sets of processing of real pulse signals from antenna systems of a modern pulse georadar. The offered algorithms of modelling and processing of signals can find application also in biomedical researches and remote sounding.

KEYWORDS: pulse signals, thin layers, subsurface sounding, plane-layered media

ВВЕДЕНИЕ

В процессе обследования автомобильных дорог и инженерных сооружений (например, мостов) с помощью технологий подповерхностного зондирования одним из ключевых этапов является отображение и обработка информации о регистрируемых георадарных сигналах. В настоящее время в мировой практике обработку информации осуществляет в основном оператор георадара. Далее, на основании его выводов принимаются технические решения назначения мероприятий по обслуживанию и ремонту. Таким образом, от удобства восприятия и информативности отображения радарограмм во многом зависит и качество итоговых управленческих решений. Для отображения информации в основном применяются черно-белые или цветные изображения так называемых эхо-профилей. Типичные примеры таких профилей приведены в [1-4]. Однако, такая форма отображения сигналов затрудняет количественные оценки параметров конструкций. Еще одна существенная сложность в обработке сигналов от дорожных одежд связана с наличием электрически тонких слоев со слабо контрастными границами. Под термином электрический контраст далее будем подразумевать корень квадратный из отношения диэлектрических проницаемостей материалов слоев (отношение большей проницаемости к меньшей). Еще один термин – электрическая толщина означает произведение реальной толщины слоя на корень квадратный из значения диэлектрической проницаемости его материала. Задачи повышения надежности и достоверности обработки радиолокационных профилей являются актуальными и важными для практических приложений. Основными направлениями исследований в данной области является как совершенствование аппаратуры дистанционного зондирования, так и разработка новых моделей и программного обеспечения для интерпретации данных. Поэтому целью данной работы

является усовершенствование математического и программного обеспечения для первичной обработки и интерпретации результатов подповерхностного зондирования дорожных одежд в части, которая касается обеспечения точности определения толщины конструктивных слоев дорожной одежды по результатам обследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для усовершенствования программного обеспечения были в первую очередь исследованы возможности используемых моделей для достоверного определения толщины верхних слоев дорожного покрытия (асфальтобетона разной зернистости). Основная цель проведенных исследований - установление минимально возможной (для каждого теоретического подхода – метода обработки сигнала) толщины и функции электрического контраста, позволяющих с высокой степенью достоверности восстановить параметры обследуемой конструкции (толщину слоев). Для проведения вычислительных экспериментов на данном этапе использовалась программа Geovizu, реализующая предложенные ранее алгоритмы численного моделирования [5]. Некоторые результаты приведены ниже на рис. 1-5.

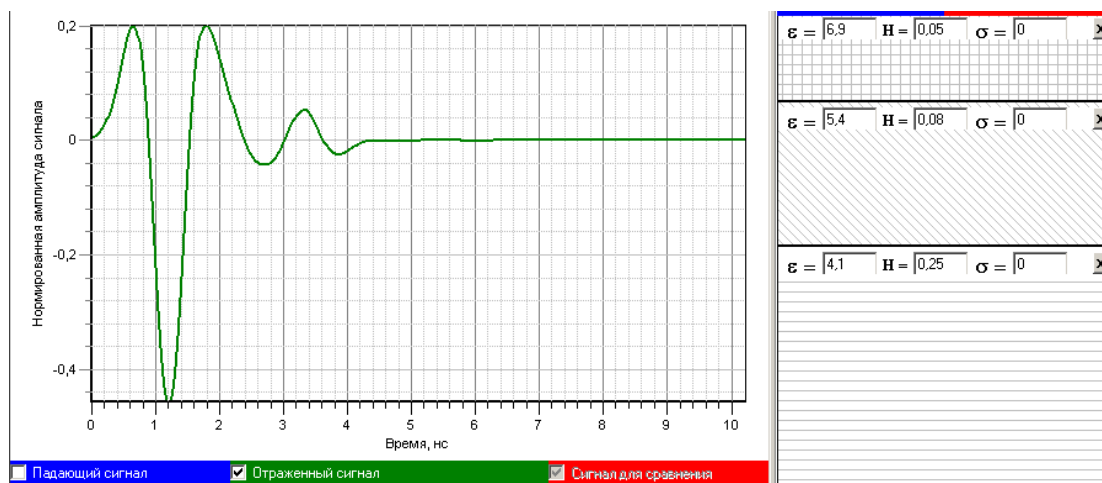


Рис. 1. Импульс, отраженный от трехслойной структуры с низким электрическим контрастом между материалами верхних слоев и малой электрической толщиной (H_{el}) этих слоев (видны лишь отражения от крайних границ)

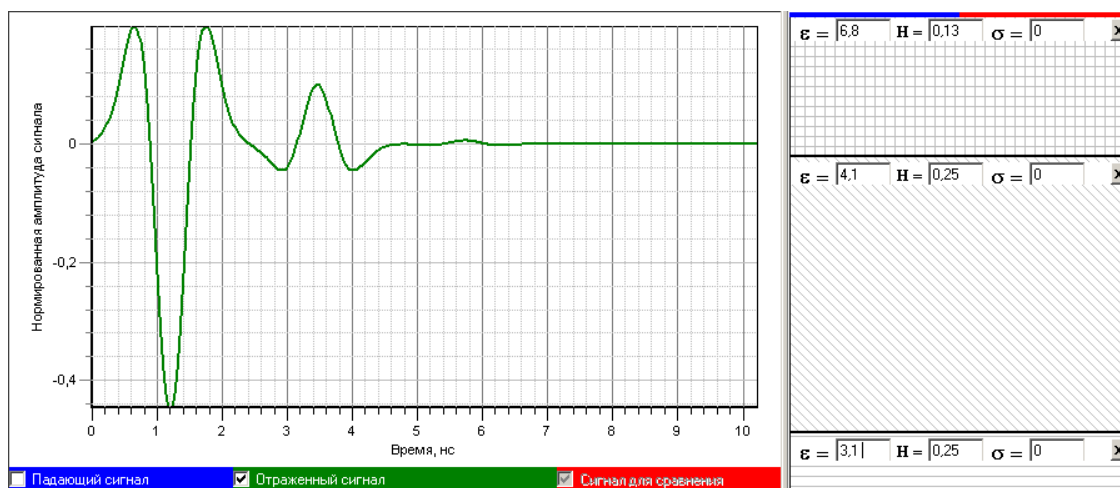


Рис. 2. Импульс, отраженный от двухслойной структуры с такой же общей толщиной верхних слоев (кроме того, добавлен еще один слой снизу, $\varepsilon = 3,1$; $h = 25\text{см}$)

Данные схемы отражают лишь ограниченные возможности оператора при обработке получаемых от таких конструкций данных. Однако, и более точные методы обработки сигналов (преобразование Гильберта, интегральное преобразование) в данной ситуации не позволяют получать точные достоверные результаты. В частности на рис. 3 показан результат обработки с помощью преобразования Гильберта сигнала от трехслойной структуры (изображена справа на рис.1) с низким электрическим

контрастом верхних слоев - мелкозернистый асфальтобетон и крупнозернистый асфальтобетон) и малой электрической толщиной верхних слоев.

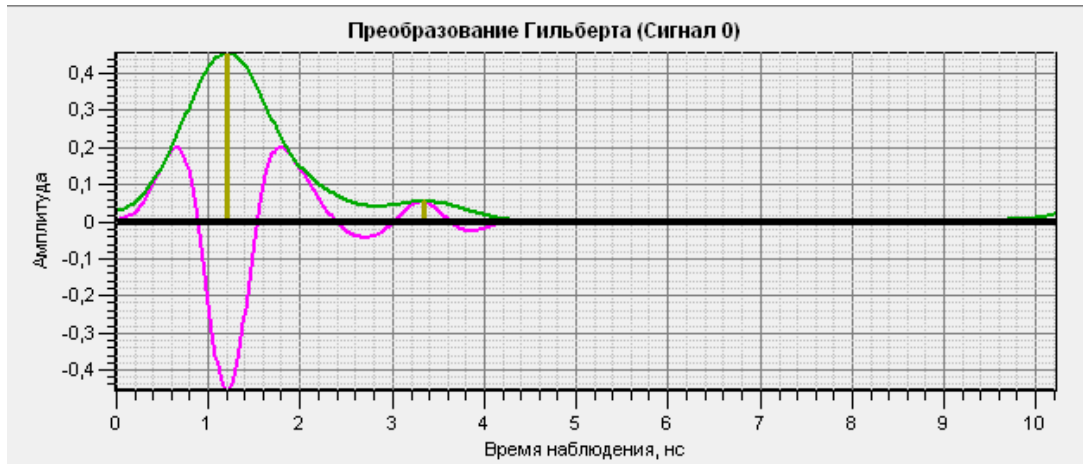


Рис. 3. Результат обработки с помощью преобразования Гильберта сигнала от трехслойной структуры (рис. 1) с низким электрическим контрастом верхних слоев и их малой электрической толщиной.

Из приведенного графика видно, что алгоритм преобразования Гильберта не обработал среднюю границу, т.е. границу между слабоконтрастными слоями небольшой электрической толщины. Границы слоев указаны вертикальными линиями. (Более подробно алгоритм обработки сигналов на основе преобразования Гильберта изложен в [5,6].) Другой возможный способ определения толщины слоев конструкции автомобильной дороги состоит в использовании процедуры численного интегрирования. Этот способ предложен в [7], а его реализация рассмотрена в [8].



Рис. 4. Результат обработки с помощью интегрального преобразования [8] сигнала от трехслойной структуры (рис. 1) с низким электрическим контрастом верхних слоев и малой электрической толщиной.

Как видно из рис. 4, этот способ обработки отраженного сигнала позволяет определить границу между верхними слоями конструкции – вторая (слева направо) вертикальная отметка. Однако, помимо определения истинных границ слоев, этот алгоритм обработки дает также и координаты несуществующих («ложных») поверхностей раздела слоев – третья (слева направо) вертикальная отметка.

Кроме того, существует и способ определения толщины слоев конструкции дорожной одежды, предполагающий автоматическое определение параметров слоев при условии выполнения перед началом измерений процедуры калибровки. Этот способ и соответствующий общий алгоритм рассмотрены в работах [9,10].

Суть процедуры обработки состоит в определении координаты первой границы (рис. 5) с помощью

наведения курсора на отметку от верхней границы конструкции (показано стрелками). При этом программно (автоматически) определяется значение диэлектрической проницаемости верхнего слоя конструкции (показано в окне формы – обведено сплошной рамкой - Изм. ДП1 7,14).

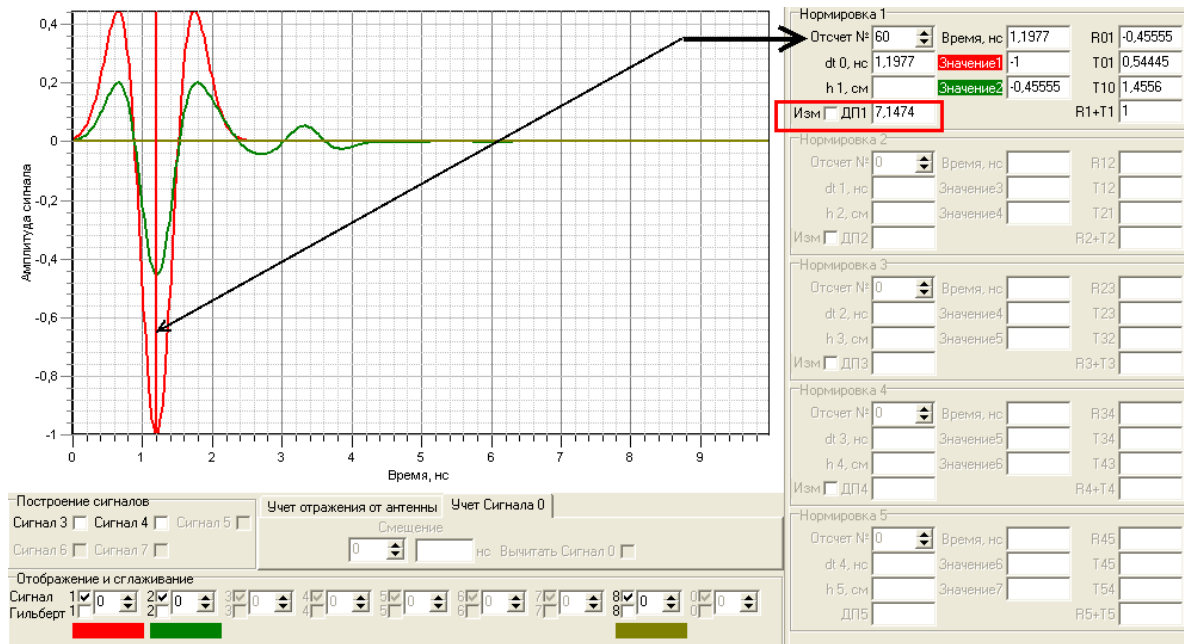


Рис. 5. Первая стадия обработки сигнала с помощью автоматизированного алгоритма и процедуры начальной калибровки данных

Далее для определения толщины верхнего слоя (координаты нижней границы верхнего слоя конструкции) необходимо установить следующий курсор (он появляется после генерации сигнала 3 и 4) на первый максимум сигнала 3 (рис. 6).

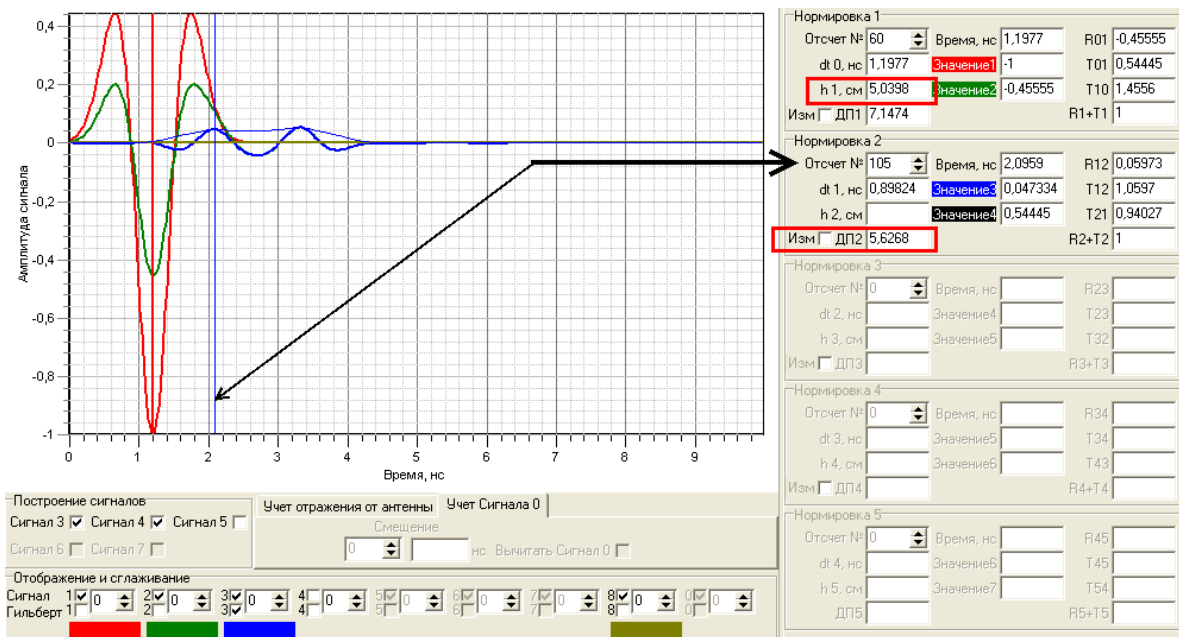


Рис. 6. Определение толщины верхнего слоя

При этом, помимо значения толщины верхнего слоя (обведено рамкой сверху – h1 см = 5,04) также программно определяется значение диэлектрической проницаемости следующего слоя (Изм. ДП2 5,62). Наконец, для определения толщины второго слоя, необходимо сгенерировать (в автоматическом режиме нажатием кнопки Сигнал 5) сигнал, соответствующий импульсу, отраженному от нижней

границы второго слоя, и навести курсор на первый максимум этого сигнала (рис. 7).

Значение диэлектрической проницаемости третьего (нижнего слоя) будет автоматически вычислено и отображено в соответствующем окне (Изм. ДПЗ 4,27).

Далее, если в конструкции есть еще слои, процедура повторяется вплоть до определения значения диэлектрической проницаемости основания конструкции. Для контроля получаемых данных в окне интерфейса программы высвечивается также некоторая дополнительная служебная информация о параметрах импульсных сигналов и значениях парциальных коэффициентов отражения и прохождения волн между границами слоев конструкции.

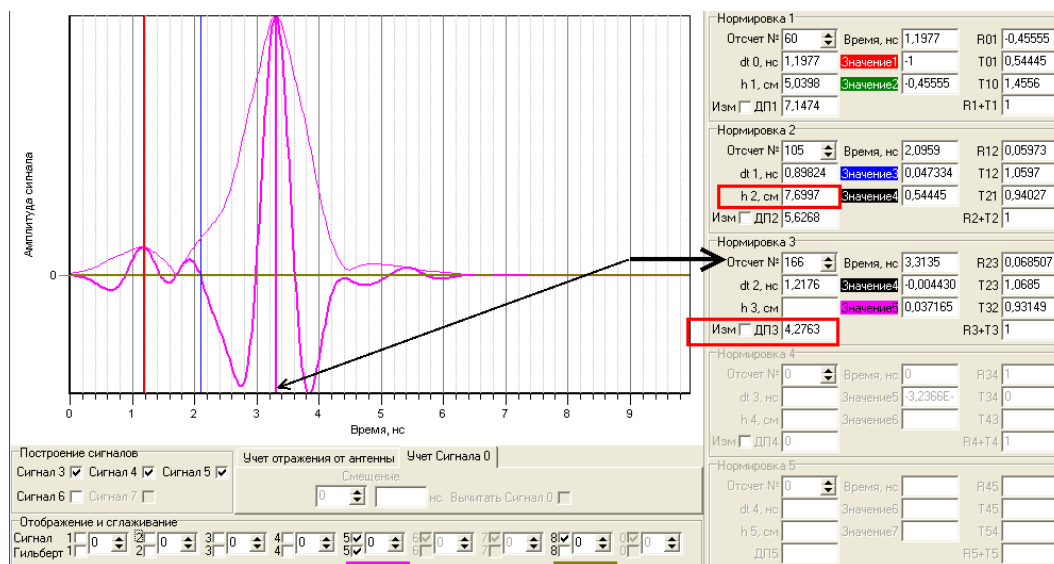


Рис. 7. Определение толщины второго слоя и значения диэлектрической проницаемости третьего слоя

С другой стороны, при наличии сильного контраста (например, границы между сухим слоем и увлажненным) отражение от такой границы может превосходить по амплитуде сигнал, отраженный от верхней (наружной) границы (рис.8). Этот случай представляет практический интерес для решения задач обнаружения и оценки состояния переувлажненных слоев конструкции дорожной одежды.

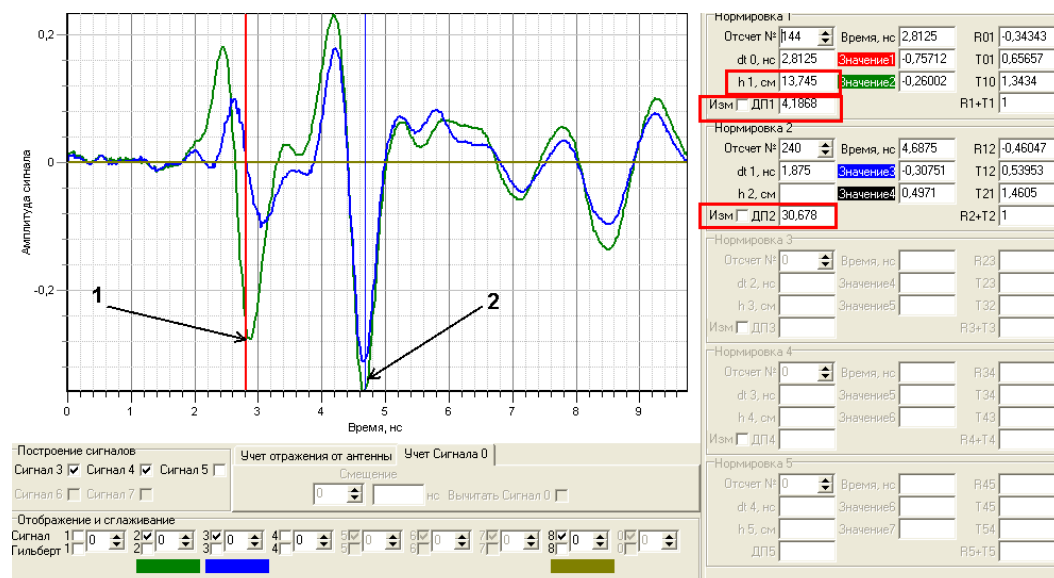


Рис. 8. Результаты обработки сигнала георадара «Одяг-1», отраженного от конструкции с повышенным контрастом нижней границы (песок – влажный суглинок)

Для проверки работоспособности такого подхода и внесения необходимых дополнений в алгоритмы были также проведены эксперименты по интерпретации данных от конструкций с контрастными нижними границами (повышенная влажность слоев основания). Результаты экспериментов по обработке таких данных, представленные на рис. 8, свидетельствуют о возможности достаточно точного определения координат границ слоев повышенной влажности (с большими значениями диэлектрической проницаемости и, как следствие – функции электрического контраста). На рис. 8 отображены реальные данные (профили) при калибровке - отражении от листа металла (кривая 1) и при отражении от двухслойной конструкции (кривая 2). Общее количество отсчетов в каждом профиле принято равным 512, развертка 10 нс. В итоге, как видно из рис. 8, корректно восстановлена не только величина диэлектрической проницаемости верхнего слоя ($\varepsilon_1 = 4,1$) и его толщина ($h_1 = 13,7\text{см.}$), но и диэлектрическая проницаемость основания ($\varepsilon_2 = 30,6$).

ВЫВОДЫ

Таким образом, на основании разработанных математических моделей, программного обеспечения и проведенного численного моделирования общую схему обработки и интерпретации данных дистанционного зондирования предлагается дополнить методом калибровки алгоритма путем вычитания сигнала прямого прохождения и замены при дальнейшей интерпретации результирующих сигналов (отражение от металла и от конструкции). Следует также дополнить алгоритм обработки ограничениями по величине электрического контраста - не менее 1.4 при электрической толщине менее $0,7T$, где T – главный период зондирующего импульса.

Дальнейшее усовершенствование алгоритмов обработки данных импульсных георадаров при обследовании плоскостойких сред целесообразно проводить в комплексе с мерами по совершенствованию формы зондирующего импульса (устранение паразитных внутренних переотражений в антенном тракте).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yuejian Cao. Implementation of Ground Penetrating Radar / Yuejian Cao, J. F. Labuz, Shongtao Dai, J. Pantelis // Final Report, Minnesota Department of Transportation, August 2007, 29P.
2. Sussmann, T.R. Development of ground penetrating radar infrastructure condition detection/ T.R. Sussmann, K.R. Maser, D.L. Kutrubes, F. Heyns, E. Selig // Symposium for the Applications of Geophysics to Environmental and Engineering Problems, 5-8 March, 2001, Denver, CO.
3. Uzarowski L. Practical Application of GPR to Supplement Data from FWD for Quick Pavement Performance Prediction. / L.Uzarowski, M. Maher, A. Balasundaram // The 2005 Annual Conference of the Transportation Association of Canada Calgary, Alberta, P.P. 1-16.
4. Evans R. D. Optimising Ground Penetrating Radar (GPR) to Assess Pavements. / R. D. Evans// A dissertation thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the award of the degree Doctor of Engineering (EngD), at Loughborough University, Loughborough, August 2009, 195P.
5. Батраков Д.О. Численное моделирование распространения электромагнитных импульсных сигналов в плоскостойких средах/ Д.О. Батраков, Д.В. Головин, А.Г. Батракова, Г.П. Почанин // Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. – 2012 – №1038, вип. 21. – С. 54-58.
6. Головин Д.В. Алгоритм определения задержки импульсных сигналов, основанный на преобразовании Гильберта / Д.В. Головин, С.В. Греков, Д.О. Батраков, А.Г. Батракова // Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. – 2009. – № 853, вип. 14. – С. 68-73.
7. Astanin L. Yu. The structural features of ultrawideband signals / L. Yu. Astanin, M. V. Kipke, V. V.Kostyleva // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 15-19 September, 2008, Sevastopol, Ukraine, pp.1-8.
8. Batrakov D. O. Hilbert transform application to the impulse signal processing / D. O. Batrakov, A.G. Batrakov, D.V. Golovin, A.A. Simachev // «UWBUSIS'2010» : 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 6-10 September, 2010, Sevastopol, Ukraine : Proceedings. – Sevastopol, 2010. – P. 113–115.
9. Батраков Д.О. Влияние формы зондирующих импульсов на эффективность восстановления параметров технических и биомедицинских объектов. / Д. О. Батраков, Д. В. Головин, Г. П. Почанин // Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. – 2013. – № 1067, вип. 22. – С. 93-98.
10. 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.