



УДК 625.711

- © А.Г. Батракова, канд. техн. наук,
- © С.Н. Урдзик,
- © И.Б. Галащук (ХНАДУ)

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГЕОРАДАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

**Анотація.** Розглянуто основні напрямки наукових досліджень при розробленні системи моніторингу дорожніх одягів методами георадіолокації. Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень, які спрямовані на розроблення методик товщинометрії та дефектоскопії дорожніх одягів методом підповерхневої радіолокації.

**Ключові слова:** підповерхнева радіолокація; електромагнітне випромінювання; дорожній одяг; моніторинг; товщинометрія; дефектоскопія.

**Аннотация.** Рассмотрены основные направления научных исследований при разработке системы мониторинга дорожных одежд методами георадиолокации. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку методик толщинометрии и дефектоскопии дорожных одежд методом подповерхностной радиолокации.

**Ключевые слова:** подповерхностная радиолокация; электромагнитное излучение; дорожная одежда; мониторинг; толщинометрия; дефектоскопия.

**Annotation.** The main trends of scientific researchers at the developments of monitoring system of road pavements by means of georadiolocation are considered. The results of theoretical and experimental investigations directed to the development of thickness measuring methods and road pavements flaw detection by means of subsurface radiolocation are presented.

**Key words:** subsurface radiolocation; electromagnetic radiation; pavements; monitoring; thickness measuring method; flaw detection.

Достаточно часто даже при высоком уровне проектирования, строительства и содержания автомобильных дорог происходит разрушение дорожных одежд и земляного полотна, что, в конечном итоге, приводит к увеличению финансирования на содержание автомобильных дорог, поддержание необходимого уровня эксплуатационного состояния дорожных одежд и земляного полотна. Зачастую первопричиной разрушения конструкций дорожных одежд является не только нарушения технологического регламента, превышение допустимых нагрузок, а и локальные нарушения свойств конструктивных слоев дорожной одежды или подстилающегося грунта, вызванные переувлажнением, наличием скрытых дефектов, инородных включений или другими причинами.

Поэтому одной из актуальных задач является разработка и внедрение в практику современной георадарной технологии проектно-испытательских работ и работ по контролю качества строительства, позволяющей оперативно определять состояние строительных конструкций без нарушения их целостности. Внедрение данной технологии

направлено на снижение материалоемкости, рациональное распределение материальных и финансовых ресурсов, а также обеспечения несущей способности дорожных конструкций

Основным прибором, используемым для георадиолокационного обследования автомобильных дорог является георадар. Принцип действия георадаров основан на излучении в исследуемую среду электромагнитных импульсов длительностью в единицы или доли наносекунды. Излученный импульс, распространяясь в среде, претерпевает отражения и преломления на границах сред с различными электрическими свойствами (электропроводность и диэлектрическая проницаемость). В итоге среда формирует над своей поверхностью электромагнитное поле, амплитудные и временные параметры которого непосредственно связаны со структурой среды, ее физико-механическими характеристиками (плотность, влажность). Основным способом отображения георадиолокационных данных является построение радарограмм – комплекса записей амплитуд сигналов по глубине, пришедших к приемной



антенне, отражающих время прохождения сигнала через исследуемую структуру. Интерпретация радарограмм основывается на количественном анализе формы и времени прихода волн, прошедших сквозь исследуемую структуру и отразившихся от имеющихся там неоднородностей или границы раздела сред.

Метод георадиолокационного зондирования в настоящее время широко применяется в России, США, Канаде для неразрушающего контроля состояния автомобильных дорог, необходимого для своевременного принятия мер по поддержанию их стабильной работы.

В последнее время в США и Австралии ведутся интенсивные работы по созданию нового типа георадаров с частотным сканированием. Шведской национальной дорожной администрацией применяются радары подповерхностного зондирования с целью определения толщины слоев дорожной одежды в заданных точках, а также для автоматического определения содержания влаги в дорожном полотне. В США с 2007 года проводятся исследования по определению степени разрушений арматуры мостов методами радиолокации и импедансной томографии.

При обследовании автомобильных дорог георадиолокационные исследования используются для решения двух основных задач: измерения мощности конструктивных слоев дорожной одежды; выявление дефектов и неоднородностей в грунтовом основании, влияющих на стабильность и продолжительность работы дорожных одежд.

Вместе с тем, при столь очевидных преимуществах, георадарные технологии не находят широкого применения в дорожном строительстве. Рассмотрим ряд основных причин, препятствующих повсеместному внедрению георадарных технологий.

Одной из основных причин является сложность интерпретации данных. По сути дела в настоящее время радиолокационный профиль, отображающий лишь время прохождения сигнала через исследуемую структуру, интерпретируется не как временной разрез, а как глубинный разрез. Это приводит к существенным ошибкам в определении толщины конструктивных слоев дорожной одежды, поскольку время прохождения сигнала связано не только с толщиной структуры, а и с ее электрофизическими характеристиками, которые существенным образом зависят от других параметров структуры. Поэтому точность, которую заявляют производители современного георадарного оборудования можно гарантировать лишь при правильной интерпретации данных.

Выходом из сложившейся ситуации является разработка математического аппарата решения обратной задачи радиолокационного зондирования, которая состоит в восстановлении физико-

механических характеристик материалов слоев дорожной одежды и грунтов земляного полотна по величине электрофизических характеристик материалов и позволит минимизировать участие оператора в получении конечного результата.

Второй достаточно существенной причиной является то, что дефектоскопия строительных конструкций находится в стадии становления. На вооружении дорожников фактически отсутствуют как приборная база, так и математический аппарат для точного позиционирования и идентификации дефектов в тонких, слабоконтрастных с электрофизической точки зрения слоях дорожной одежды и арматуре мостов. Отсутствует единый комплекс оборудования и математического обеспечения для обследования автомобильных дорог, который позволяет, гарантировано с высокой точностью, интерпретировать результаты георадарных обследований дорожных одежд, земляного полотна и мостов, поскольку на данный момент не решена обратная задача восстановления профиля электрофизических характеристик материалов конструктивных слоев дорожной одежды по значениям характеристик рассеянного поля.

Третьей причиной является отсутствие в Украине нормативной базы, которая регламентирует обследование автомобильных дорог с помощью георадаров. Единственным нормативным документом являются «Рекомендации из обследования конструкций существующих дорожных одежд автомобильных дорог для обоснования проектных решений» Р А.2.1-218-05416892-675, в которых обследованию автомобильных дорог с помощью георадара ОКО - М посвящен один параграф.

Исходя из изложенного, очевидно, что назрела необходимость в разработке качественно нового подхода к решению проблемы повышения долговечности строительных конструкций, а именно дорожной одежды и земляного полотна на автомобильных дорогах общего пользования, а также в создании высокоэффективной комплексной системы контроля текущего состояния и прогнозирования характеристик земляного полотна и дорожной одежды методами неразрушающего контроля. Суть данного подхода состоит:

- в разработке методики определения толщины конструктивных слоев дорожной одежды методами подповерхностной радиолокации;
- в разработке системы диагностики скрытых дефектов покрытия и основания дорожных одежд на основании изучения свойств кросс-поляризационной компоненты отраженного сигнала в плоскостойких средах;
- в решении обратной задачи восстановления профиля диэлектрической проницаемости конструктивных слоев дорожной одежды и земляного полотна по наборам значений рассеянного электромагнитного поля.



Научная и практическая реализация данного подхода возможна при решении целого ряда задач, а именно:

- разработка образца измерительного комплекса для георадарного исследования дорожных одежд и земляного полотна;
- разработка вычислительных алгоритмов и программ визуализации и интерпретации данных зондирования по определению толщины конструктивных слоев дорожной одежды, оценке физико-механических характеристик грунтов земляного полотна, идентификации и позиционированию подповерхностных дефектов;
- разработка методики определения электрофизических характеристик материалов слоев дорожных одежд для создания базы данных к измерительному комплексу и методики восстановления физико-механических характеристик материалов неразрушающим методом, основанной на восстановлении профиля диэлектрической проницаемости конструкции по результатам георадарного обследования;
- разработка методики толщинометрии конструктивных слоев дорожных одежд, основанной на адекватных математических моделях;
- разработка методики дефектоскопии слоев дорожных одежд методами подповерхностного зондирования, в основу которой положены математические модели обнаружения и идентификации подповерхностных дефектов слоев дорожных одежд (трещины, участки разрушений и повышенного увлажнения);
- исследование возможности использования методов дистанционного зондирования для определения участков расслоения асфальтобетонных слоев дорожных одежд.

Решение перечисленных задач позволит:

- разработать методику комплексного мониторинга автомобильных дорог методами дистанционного зондирования;
- разработать концепцию дорожной базы данных о состоянии дорожных одежд, земляного полотна по результатам обследования методами подповерхностной радиолокации;
- определить количественные показатели для оценки и прогнозирования состояния дорожных одежд и земляного полотна по результатам обследования.

Таким образом, потребности практики настоятельно стимулируют развитие научных исследований для решения перечисленных ранее задач.

Основными направлениями исследований, выполняемых в Харьковском национальном автомобильно-дорожном университете (ХНАДУ) совместно со специалистами Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина (ХНУ) и института радиофизики и электроники им. О.Я. Усикова Национальной академии наук Украины (ИРЭ НАНУ) являются:

- разработка комплекта георадиолокационной аппаратуры и соответствующего программного обеспечения для первичной обработки и интерпретации данных подповерхностного зондирования;
- разработка методики определения толщины конструктивных слоев дорожных одежд;
- разработка методики дефектоскопии асфальтобетонных слоев дорожных одежд;
- решение задачи поиска инородных включений и арматуры в конструктивных слоях дорожных одежд;
- проведение экспериментальных исследований по обследованию дорожных одежд с помощью георадаров.

Для проведения экспериментальных исследований, направленных на разработку методик толщинометрии и дефектоскопии конструктивных слоев дорожных одежд на кафедре изысканий и проектирования дорог ХНАДУ имеется комплект георадиолокационной аппаратуры, использующей сверхширокополосные сигналы (рис. 1) разработанный специалистами ИРЭ НАНУ.

В состав комплекта входят два основных приемно-передающих антенных блока, первый из которых предназначен для зондирования на глубину до 1,2 м и применяется при обследовании дорожных одежд, второй антенный блок реализует принцип кросс-поляризации и предназначен для обследования пакета асфальтобетонных слоев дорожных одежд и решения задач подповерхностных дефектов. Комплект георадиолокационной аппаратуры используется как при проведении экспериментальных лабораторных исследований дорожных одежд, так и при полевых обследованиях с целью разработки системы мониторинга автомобильных дорог методами подповерхностной радиолокации.

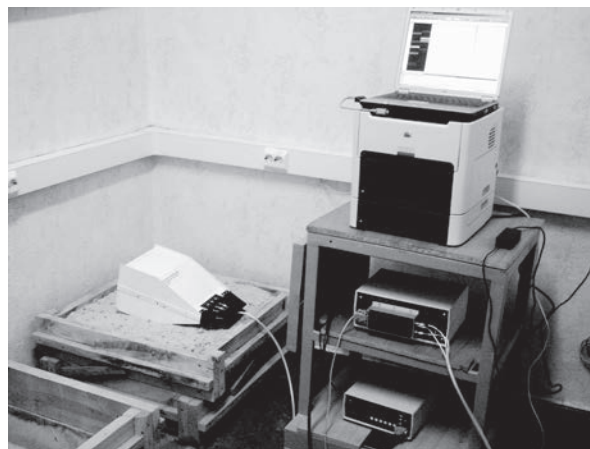
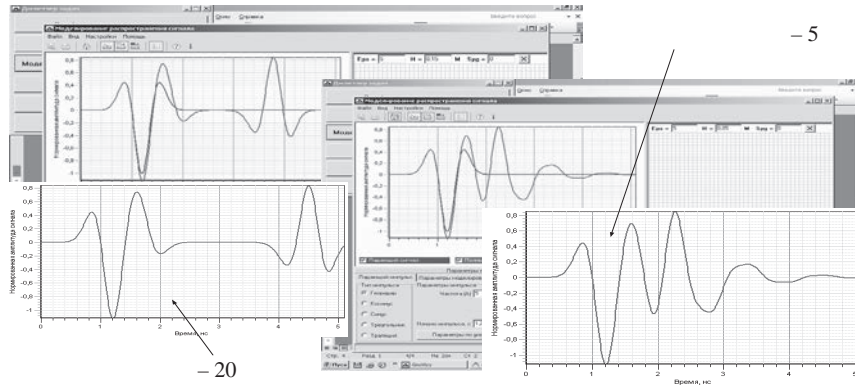


Рис. 1. Комплект георадиолокационной аппаратуры, предназначенной для определения электрофизических характеристик грунтов земляного полотна и дорожных одежд





- 5

Рис. 2. Моделирование распространения импульса при толщине конструктивного слоя 20 см и 5 см

Как было отмечено ранее, основной трудностью при использовании георадаров является сложность интерпретации радарограмм. Знание формы зондирующего, отраженного и суммарного импульса, регистрируемого антенным блоком, позволяет существенно упростить задачу интерпретации данных.

В связи с этим при разработке методики определения толщины конструктивных слоев дорожных одежд возникает необходимость в моделировании распространения сигнала, разработке соответствующих алгоритмов, позволяющих корректно интерпретировать результаты георадарных обследований дорожных одежд и практической проверке адекватности моделей, положенных в основу алгоритмов интерпретации.

Моделирование распространения сигнала в среде с известными электрофизическими характери-

стиками позволяет определить форму и амплитуду полного сигнала, давая возможность корректной интерпретации радарограмм с целью определения скорости распространения сигнала в исследуемых структурах, электрофизических характеристик материалов конструктивных слоев дорожных одежд, границы раздела сред (рис. 2).

Экспериментальные исследования, а также использование методов моделирования волнового поля показали, что наблюдаемые отраженные сигналы в средах с известными электрофизическими характеристиками зависят от большого числа факторов, а именно: количества слоев; толщины конструктивных слоев; наличия структурных помех в результате отражения сигнала от границы раздела "воздух – подстилающая среда" и других поверхностей; наложения прямого (падающего) и отраженного сигналов вследствие малой тол-

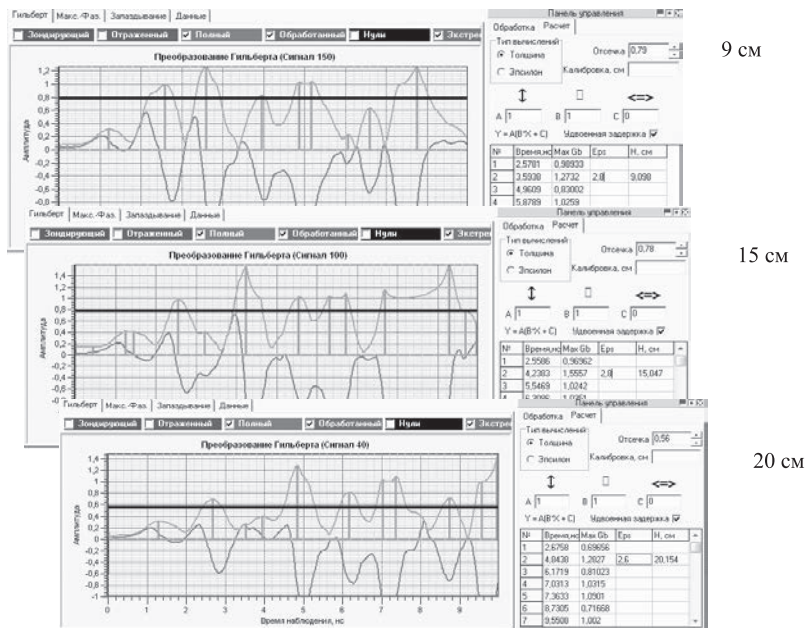


Рис. 3. Окно программы при обработке радарограмм, полученных при обследовании слоя песка соответственно толщиной 9 см, 15 см, 20 см

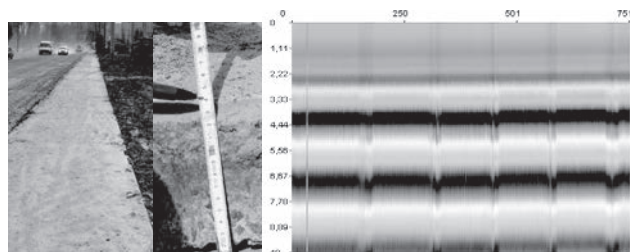


Рис. 4. Радарограмма, полученная при определении толщины тротуарной плиты

щины конструктивных слоев дорожных одежд, что вызывает трудности в определении границы раздела сред на радарограммах. Поэтому интерпретация радарограмм должна проводиться не только на основании анализа амплитуды прямого и отраженного сигналов, проходящих через исследуемую структуру, а также путем сопоставления результатов моделирования распространения сигнала в данной среде известной толщины с экспериментальными данными.

С другой стороны, первичная обработка экспериментальных данных 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. 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, в дорожном строительстве 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 затруднено. Поэтому были разработаны вычислительные алгоритмы для интерпретации данных зондирования многослойных объектов со слоями малой электрической толщины [3].

Для проверки и практического использования предложенной схемы определения временной задержки сигналов, позволяющей вычислять толщину исследуемой структуры, было разработано соответствующее программное обеспечение. С помощью этого программного продукта были проведены серии экспериментов с целью выяснения разрешающей способности метода, результаты которых представлены на рис. 3.

Как показали проведенные экспериментальные исследования, метод позволяет с достаточно высокой точностью восстанавливать толщину исследуемого слоя. Так, для слоев с истинной толщиной 9 см, 15 см и 20 см, восстановленные по радарограммам значения составили 9,100 см, 15,050 см, 20,154 см соответственно. Знание диэлектрической проницаемости исследуемой структуры делает алгоритм пригодным для практического применения.

Апробация предложенной схемы определения толщины конструктивных слоев дорожных одежд проводилась на строящихся участках.

Рассмотрим пример определения толщины тротуарных железобетонных плит. Реальная толщина железобетонной плиты составила 14,5 см. Движение по трассе осуществлялось с постоянной скоростью и выполнялось на различных развертках. На рис. 4 изображена радарограмма, полученная по профилю исследуемой структуры при развертке 10 нс. "Размытым участкам" радарограммы соответствуют стыки плит.

Диэлектрическая проницаемость бетона была принята равной 7. Обработка данной радарограммы с помощью алгоритма, основанного на преобразовании Гильберта, позволила определить толщину тротуарной плиты, которая составила 15 см, что свидетельствует о хорошей сходимости теоретических расчетов и результатов экспериментальных исследований. Результаты обработки радарограммы представлены на рис. 5.

Разработка методики дефектоскопии асфальтобетонных слоев дорожных одежд, а также решение задачи поиска инородных включений и арматуры в конструктивных слоях дорожных одежд требуют качественно иного подхода. В основу решения задачи поиска подповерхностных дефектов в конструктивных слоях дорожной одежды положены идеи регистрации кросс-поляризационной компоненты сигнала. Исследования проводятся с использованием антенного блока, регистрирующего кросс-поляризационную

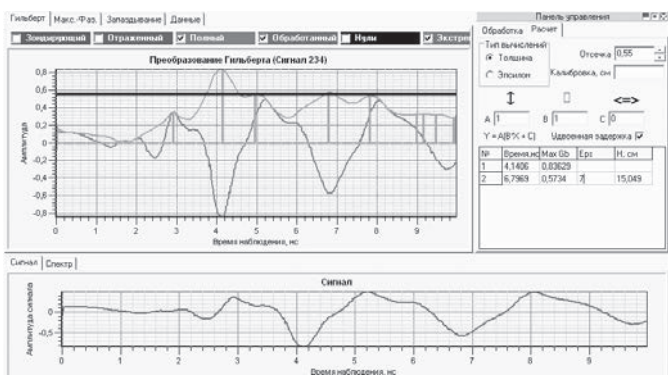


Рис. 5. Окно обработки радарограммы, полученной при обследовании тротуарных плит. Толщина плиты по результатам обработки составила 15 см

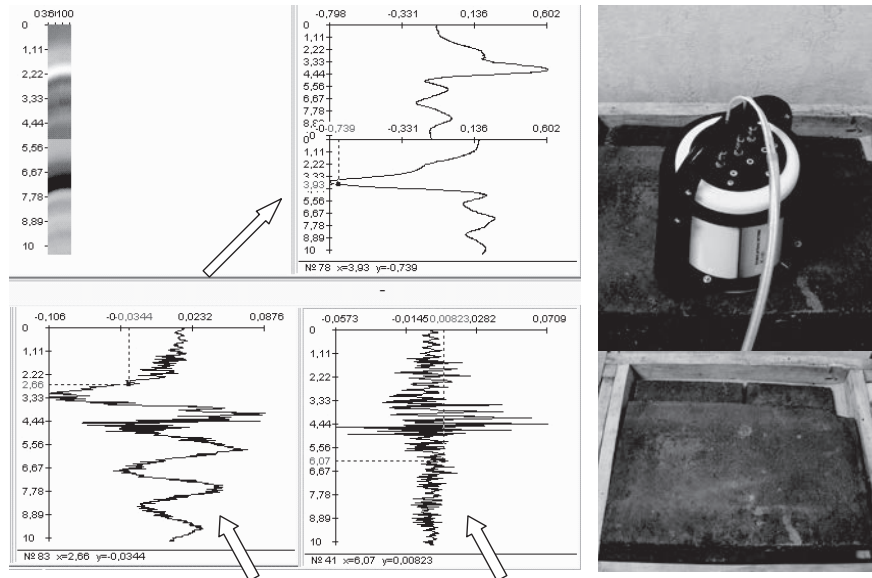


Рис. 6. Экспериментальное определение подповерхностных дефектов с помощью антенного блока, работающего в режиме кросс-поляризации

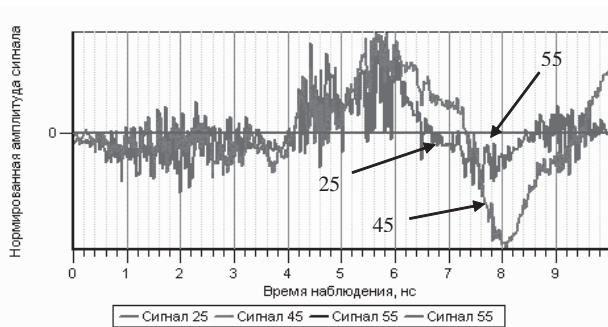


Рис. 7. Моделирование распространения сигнала в нижнем слое покрытия:

сигнал 55 – нормировочный – отсутствие дефектов;  
сигнал 45 – наличие трещины, заполненной водой;  
сигнал 25 – наличие трещины, заполненной воздухом

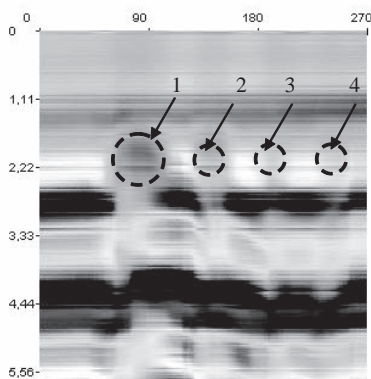


Рис. 8. Лабораторный эксперимент по обнаружению металлической арматуры различного диаметра в слое суглинки: 1 – полая металлическая труба  $d = 27$  мм; 2 – арматурный стержень  $d = 11$  мм; 3 – металлический стержень  $d = 4$  мм; 4 – алюминиевая фольга  $d = 45$  мм

компоненту отраженного сигнала. Обработка полученных радарограмм в данном случае сводится к вычитанию двух взаимно ортогональных компонент сигнала, что позволяет определить участки среды с анизотропными свойствами. В данном случае под изотропной понимается среда с одинаковыми электрофизическими характеристиками по всем направлениям и отсутствием дефектов (трещин, инородных включений).

В такой постановке задачи результирующий импульс при отсутствии дефектов будет иметь достаточно малую нормированную амплитуду, стремящуюся к "0" и может быть принят в качестве нормировочного или эталонного. При наличии дефектов в нижнем слое покрытия, характер импульса будет существенным образом отличаться от эталонного. Проведение серии модельных экспериментов позволило подтвердить эффективность предложенного алгоритма обнаружения подповерхностных дефектов (рис. 6).

Известно, что электрофизическая контрастность подповерхностных дефектов может существенно зависеть не только от характера дефекта, но и от влажности. Это связано с существенной разницей в величине диэлектрической проницаемости воздуха, материала слоя и воды. Так, диэлектрическая проницаемость (ее действительная часть) воздуха  $\epsilon = 1$ , асфальтобетона  $\epsilon = 7$ , воды  $\epsilon = 80$ . Различие в диэлектрической проницаемости сред асфальтобетон – вода – асфальтобетон приводит к существенному изменению амплитуды, формы и времени прохождения зондирующего импульса, что в конечном итоге дает





возможность выделения на радарограммах подповерхностных дефектов после соответствующей обработки (рис. 7).

Вместе с тем, решение задач дефектоскопии в дорожном строительстве не исчерпывается обнаружением и позиционированием подповерхностных дефектов в виде локальных нарушений целостности и участков расслоения асфальтобетонных слоев. Достаточно актуальной является задача обнаружения и позиционирования инородных включений, поиска коммуникаций, определения места положения арматуры в конструкциях дорожных одежд и мостов. Решение данных задач основано на изучении явления дифракции волн на инородных включениях в исследуемых средах. На радарограммах, полученных при проведении лабораторных исследований, достаточно четко позиционируются металлические включения различного диаметра (рис. 8).

Проведенные лабораторные исследования показали, что форма и характер гиперболы дифрагированной волны существенно зависят от глубины залегания, диаметра и материала объекта. Поэтому дальнейшие исследования в этом направлении должны быть направлены на изучение формы дифрагированной волны, что в конечном итоге позволяет судить о глубине залегания и диаметре локального инородного включения.

Следует отметить также, что при поиске и идентификации арматуры в конструктивных слоях дорожной одежды и элементах мостов возникают трудности, связанные с шагом арматурной сетки. При малом шаге арматурной сетки, в случае, когда длина волны больше шага арматурной сетки, отражения от соседних стержней арматуры сливаются в общую границу и делают практически неразличимыми нижележащие слои конструкции. Разрешение указанных трудностей возможно путем совершенствования как приборной базы, так и алгоритмов по обработке и интерпретации полученных радарограмм.

### Выводы

Проведенные теоретические исследования и вычислительные эксперименты позволяют утверждать, что разработка методик толщинометрии и дефектоскопии дорожных одежд станет основой системы мониторинга дорожных одежд с использованием метода подповерхностной георадиолокации. Для достижения поставленной цели были решены ряд научных и практических задач, а именно:

- проанализированы и адаптированы, применительно к задаче толщинометрии плоскостойких сред с малой толщиной слоев, модели взаимодействия электромагнитного излучения с плоскостойкими средами;
- разработан алгоритм обработки импульсных

сигналов, отраженных от плоскостойких сред, основанный на преобразовании Гильберта;

- отработана методика моделирования распространения электромагнитного импульса в конструктивных слоях дорожных одежд, в том числе с малой толщиной слоя;

- экспериментально подтверждена воспроизводимость результатов измерений и стабильность работы алгоритма определения толщины слоев дорожных одежд по результатам георадарного зондирования;

- предложен подход к позиционированию подповерхностных дефектов в конструктивных слоях дорожной одежды, основанный на анализе кросс-поляризационной компоненты сигнала;

- ведутся работы по идентификации подповерхностных дефектов;

- начаты исследования по формированию базы данных электрофизических характеристик материалов и грунтов с учетом их дисперсионных свойств, связанных с влажностью и плотностью (остаточной пористостью).

Перспективными направлениями исследований в этой области на наш взгляд являются:

- определение количественной оценки связи плотности и влажности материалов и грунтов земляного полотна с их электрофизическими характеристиками;

- решение обратной задачи восстановления профиля диэлектрической проницаемости плоскостойкой среды по набору значений рассеянного ею электромагнитного поля;

- разработка алгоритмов и программ автоматизированного расчета толщины конструктивных слоев дорожных одежд, идентификации и позиционирования подповерхностных дефектов по результатам георадарного зондирования.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Крылов В.В., Пономарев Д.М. Определение понятия задержки сигнала по гильберту и методы её измерения // Радиотехника и Электроника. – 1980. – Т. 25., № 1. – С. 204–206.
2. Копейкин В.В. Первичная обработка георадарных сигналов. 2005.
3. Головин Д.В., Греков С.В., Батракова А.Г. Алгоритм определения задержки импульсных сигналов, основанный на преобразовании Гильберта // Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна: Радіофізика та електроніка – 2009. – № 853, Вип. 14. – С. 68–73.
4. Кулижников А.М., Белозеров А.А. Неразрушающие георадарные методы в инженерных изысканиях // Геопрофи. – 2004. – № 5.
5. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию: Учебное пособие – М.: Изд. МГУ, 2005. – 153 с.
6. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А. Ю. Гринева. – М.: Радиотехника, 2005. – 416 с.
7. Подповерхностная радиолокация / М.И. Финкельштейн, В.И. Карпунин, В.А. Кутев и др. // Радио и связь. – 1994. – 216 с.