

# Об обратной задаче волновой диагностики дорожных покрытий

С.Л. Овчинников, С.Ю. Романов

Работа посвящена разработке методов и алгоритмов решения обратной задачи диагностики дорог электромагнитным зондированием. Для этой задачи представляет интерес получать обработанные изображения в реальном времени (on-line диагностика). Особенности алгоритмического подхода в этом случае определяются тем, что необходимо обрабатывать до нескольких десятков трасс за секунду. Подобная on-line диагностика накладывает требования к вычислительной платформе, которая должна совмещать мобильность и высокую производительность. В предложенных алгоритмах выделены наиболее вычислительно трудоемкие типовые структуры, которые допускают эффективное распараллеливание на реконфигурируемых вычислительных системах (РВС).

## 1. Введение

Работа посвящена разработке методов и алгоритмов решения обратной задачи диагностики слоистых структур дорожных покрытий электромагнитными волнами. Рассматриваемый подход относится к классу методов неразрушающего контроля состояния дорожного полотна. Основное функциональное назначение метода состоит в исследовании и измерении толщины слоев дороги (асфальта, бетона, песка, глины и т.п.), обнаружении пустот, переувлажненных участков, в том числе при строительстве новых дорог. С помощью электромагнитного зондирования удастся оперативно получать структуру дорожного покрытия с различным разрешением и глубиной в зависимости от используемой частоты антенны.

Для зондирования дорожного полотна предполагается использовать серийно выпускаемые георадары со сменным набором антенн. В настоящее время исследования по использованию георадаров для диагностики дорожного полотна ведутся как в нашей стране (НПЦ ГЕОТЕХ, Россия) [1], так и зарубежом (Geophysical Survey Systems, Inc, США, Sensors & Software, Канада, MALA GeoScience AB, Швеция) [2]. Эффективность диагностики в значительной степени зависит от используемых подходов, методов и алгоритмов обработки данных. В настоящей работе предлагается использовать подходы, базирующиеся на математических методах решения обратных задач, распознавания образов. Использование сложных вычислительных алгоритмов приводит к необходимости проведения огромного объема вычислений. Представляет интерес получать обработанные изображения в реальном времени (on-line диагностика). В этом плане предполагается использование в рассматриваемой задаче спецвычислителей на основе реконфигурируемых вычислительных систем (РВС) на базе ПЛИС [3].

Комплекс должен успевать обрабатывать установленную скорость потока трасс (несколько десятков трасс в секунду), поступающих из георадара. Объемы обрабатываемых данных огромны: георадар записывает трассы длиной по глубине 512 отсчетов с шагом по горизонтали вдоль дороги несколько сантиметров, длина дороги измеряется километрами. Подобная on-line диагностика накладывает определенные требования к алгоритмическому подходу, а вычислительная платформа должна совмещать мобильность и достаточно высокую производительность. Многопроцессорные системы с программируемой архитектурой, позволяют перестраивать архитектуру системы под структуру решаемой прикладной задачи без изменения конфигурации используемого оборудования и, как следствие, обеспечивают высокую реальную производительность и практически линейный рост производительности пропорционально задействованным аппаратным ресурсам.

В работе ставится задача разработки алгоритмов в рассматриваемой задаче, которые обладают большими возможностями для распараллеливания на РВС. В предложенных алгоритмах должны быть выделены типовые структуры, которые являются наиболее вычислительно трудоемкими и которые необходимо многократно выполнять при обработке. Реализация на РВС этих процедур позволит существенно ускорить процесс реконструкции радиолокационных данных.

## 2. Теоретическая часть

### 2.1. Постановка задачи

Принцип георадарного зондирования, в общих чертах, состоит в следующем. По поверхности дороги перемещается георадарный комплекс. Электромагнитная волна, излученная георадаром вниз, отражается вверх от границы раздела сред и регистрируется приемной антенной георадара (Рис.1.). Амплитуда отраженного сигнала определяется коэффициентом отражения. Наиболее хорошими отражателями электромагнитных волн являются проводники (металлы). Для диэлектриков и полупроводников, какими являются большинство слоев и объектов в Земле, отражение от границы раздела двух сред будет тем выше (и заметнее в записи), чем сильнее объекты отличаются по диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ .

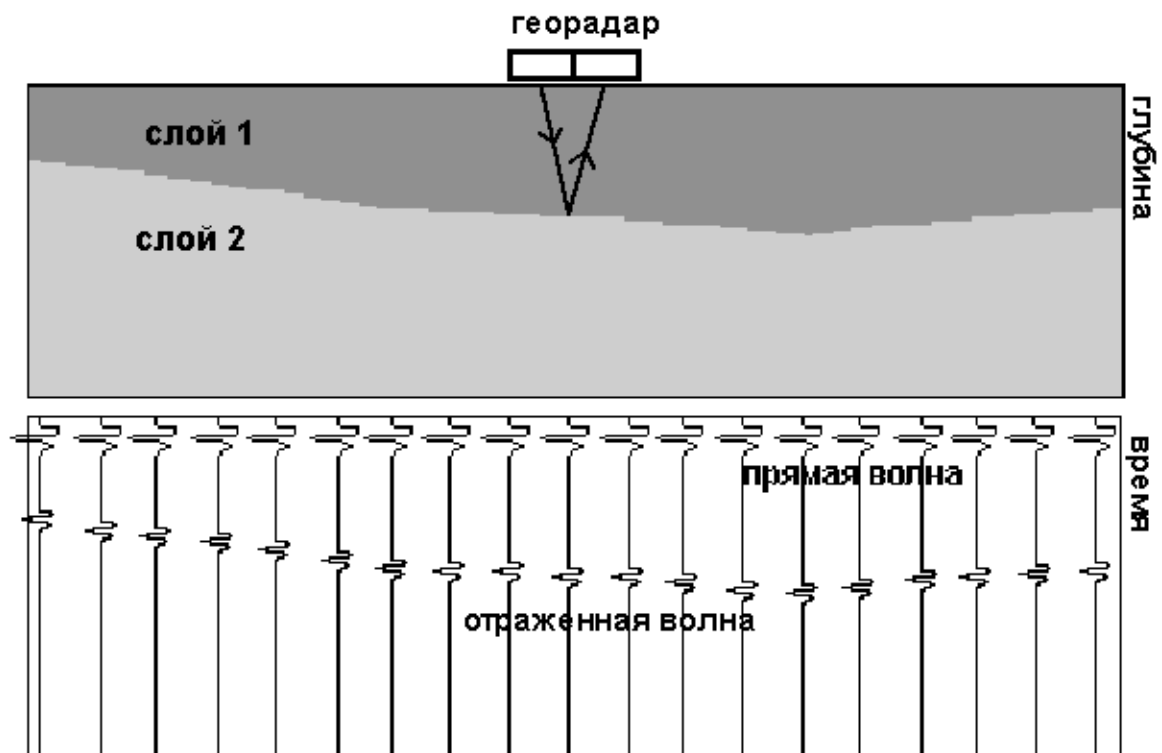


Рис.1. Схема работы георадара по зондированию дорог и схема записи радарограммы.

Зарегистрированный георадаром отраженный сигнал (радарограмма) может быть интерпретирован как функция  $u(t, x)$  реальной части электромагнитной волны в зависимости от времени  $t$  и горизонтальной координаты вдоль дороги  $x$ . Рассмотрим кусочно-постоянную слоистую модель среды, т.е. среда представляется из нескольких слоев с постоянной в пределах каждого слоя диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Тогда коэффициента отражения  $k(z, x)$ , как функция от глубины  $z$ , имеет вид набора дельта – функций с разными коэффициентами. Положение (глубина) каждой дельта – функции соответствует границе раздела сред. Будем исходить из линейной модели отражения, когда радарограмма  $u(t, x)$  и функция коэффициента отражения  $k(z, x)$  связаны линейным интегральным уравнением:

$$u(t, x) = K \cdot f(t, p_1) + \int_0^{\infty} A\left(t - \frac{2z}{c_0}, p_2\right) \cdot k(z, x) dz, \quad (1)$$

где  $f(t, p_1)$  – прямая волна,  $A\left(t - \frac{2z}{c_0}, p_2\right)$  – функция отражения от границы (ядро оператора),  $K, p_1, p_2$  – неизвестные параметры задачи.

Как видно из формулы (1), зарегистрированный георадаром сигнал (радарограмма) представляет собой сумму прямой волны (первое слагаемое правой части) и отраженный сигнал (второе слагаемое правой части). Как правило, функция отражения от границы  $A(t - \frac{2z}{c_0}, p_2)$  и прямая волна  $f(t, p_1)$  – известны с точностью до параметров (например, из экспериментальных данных). Тогда обратная задача диагностики дорожных покрытий ставится следующим образом. По известным радарограмме  $u(t, x)$ , ядру  $A(t - \frac{2z}{c_0}, p_2)$  и прямой волне  $f(t, p_1)$  при неизвестных параметрах  $K, p_1, p_2$  требуется найти функцию коэффициента отражения  $k(z, x)$ .

## 2.2. Некоторые проблемы в задаче диагностики дорог

1. Как показали результаты экспериментов, хотя импульс источника является широкополосным сигналом, однако функция отражения от границы  $A(t)$  - нельзя считать дельта-функцией в рамках рассматриваемой задачи. Протяженность импульса у используемых источников сравнима с толщиной слоев дорожных покрытий. Более того, с увеличением глубины залегания слоя (а следовательно с увеличением длины пути прохождения отраженной волны) высокие частоты поглощаются больше, чем низкие, что приводит к дополнительному размыванию импульса. Таким образом, оператор в формуле (1) не является единичным. Это означает, что зарегистрированные отраженные данные, как правило, не могут быть интерпретированы как структура дорожного полотна и требуется решать обратную задачу (1), которая является некорректно поставленной [4].

2. Как было сказано выше, в действительности, по мере распространения в среде, высокочастотная часть импульса затухает быстрее, что приводит к изменению формы импульса. Поэтому, если требуется провести диагностику среды для большого диапазона глубин, то пользоваться уравнением типа свертки (1) нельзя. В этом случае, более адекватно зондирование описывается линейным интегральным уравнением

$$u(t, x) = K \cdot f(t, p_1) + \int_0^{\infty} A(t, z) \cdot k(z, x) dz, \quad (2)$$

где  $A(t, z)$  - ядро оператора, т.е. при заданном положении  $z_0$  границы, отражение от нее описывается функцией  $A(t, z_0)$ .

3. Как видно из формул (1), в левую часть уравнения входит функция  $f(t, p_1)$  – прямая волна идущая от источника. Как правило, при зондировании пытаются создать импульс источника имеющим вид дельта-функции (широкополосный сигнал). Проблема состоит в том, что реальный импульс имеет довольно большую длительность и часть отраженного сигнала пересекается по времени с прямым сигналом. Кроме того, амплитуда прямого сигнала гораздо больше, чем отраженного, поэтому если мы, зная прямой сигнал с некоторой погрешностью, вычитаем его из левой части уравнения (1), то получаем большую относительную погрешность в измерении отраженного сигнала. Это приводит к значительным искажениям в реконструкции мелко залегающих слоев дорожного покрытия.

4. По мере прохождения в среде и отражения от границ электромагнитный импульс ослабевает значительно быстрее, чем в воздухе. Это значительно ограничивает глубину зондирования, поэтому в георадарах используют усилители, позволяющие регистрировать сигнал, ослабленный в несколько сот раз. Это приводит к значительным проблемам при решении обратной задачи, в которой полезный сигнал меняется в сотни раз.

## 2.3. Алгоритм решения

Цикл обработки радарограммы состоит из нескольких последовательных этапов, которые проходит каждая трасса, поступающая из георадара. На выходе программа выдает вертикальное сечение дороги (под линией зондирования) в виде обработанного полутонового изображения, а также выделенные в процессе обработки слои и их толщины.

Условно можно выделить четыре основных этапа обработки радиолокационных данных: вычитание прямого сигнала, усиление трассы, обращение интегрального уравнения, выделение границ.

На первом этапе проводится вычитание прямого сигнала  $f(t, p_1)$  из трассы радарограммы. В силу некоторой нестабильности работы георадара, излучаемый сигнал варьирует по амплитуде и по временной задержке (параметры  $K, p_1$  – неизвестны). Выбор значений параметров выполняется на основе минимума невязки на начальном интервале по времени:  $\|u(t, x) - K \cdot f(t, p_1)\|^2$ . Параметр амплитуды  $K$  – линейный параметр, минимум по нему находим из явной формулы  $K = \frac{(u, u)}{(u, f)}$ , где  $\|\cdot\|^2$  – квадрат нормы в  $L^2$ , а  $(\cdot, \cdot)$  – скалярное произведение. Параметр сдвига  $p_1$  является нелинейным, поэтому минимум по нему находим перебором значений из заданного диапазона. Поскольку сдвиг функции  $f(t, p_1)$  может выполняться на величину меньшую, чем шаг сетки дискретизации функции  $f(t, p_1)$ , то для нахождения значений функции в промежуточных точках используется сплайн интерполяция функции  $f(t, p_1)$ .

На втором этапе выполняется усиление трассы, путем умножения на нелинейную функцию, так чтобы амплитуда отклика с больших глубин приблизилась к амплитуде с мелких глубин. Эту нелинейную функцию выбирают заранее, оставляя возможность варьировать параметр усиления  $\theta$ . На втором этапе трасса радарограммы приводится к виду

$$\bar{u}(t, x) = \begin{cases} u(t, x), & \text{при } t \leq t_0 \\ u(t, x) \cdot (1 + |t - t_0|^\theta), & \text{при } t \geq t_0 \end{cases},$$

где  $t_0$  – момент прихода отраженного сигнала от поверхности дороги,  $\theta$  – параметр усиления.

На третьем этапе проводится решение интегрального уравнения (1). Из общей теории решения обратных задач известно, что при условии достаточной гладкости входящих в уравнение функций интегральный оператор является компактным, а обратная задача некорректно поставленной. Это означает, что даже при малой погрешности входных данных, решение обратной задачи может сколь угодно сильно отличаться от точного решения. Для решения обратных некорректно поставленных задач следует использовать регуляризирующие алгоритмы [4,5].

Как видно, ядро интегрального уравнения зависит от разности аргументов, поэтому для его решения, как известно, особенно эффективно применение процедуры преобразования Фурье, которое позволяет логарифмически уменьшить объем вычислений. Использовался следующий регуляризованный метод, описываемый аналитически формулой:

$$k^\alpha(z, x) = \frac{1}{2\pi} \int \frac{\tilde{A}(-w)\tilde{u}(w, x)e^{-iwz}}{\tilde{A}(-w)\tilde{A}(w) + \alpha(w^2 + 1)} dw,$$

где  $\tilde{A}^*(w) = \tilde{A}(-w)$ ,  $L(w) = \tilde{A}^*(w)\tilde{A}(w)$  и  $\tilde{A}(w)$ ,  $\tilde{u}_s(w)$  – преобразования Фурье функций  $A(w)$ ,  $u_s(w)$  соответственно; параметр  $\alpha$  выбирается из принципа обобщенной невязки.

Ядро уравнения зависит от неизвестного параметра – частоты, которая меняется в зависимости от глубины зондирования и свойств среды. Для того, чтобы найти параметр, по нему выполняется перебор (многократно решается уравнение для выбранного диапазона значений параметра  $p_2$ ). Наилучшим значением параметра  $p_2$  считается то, при котором достигается наибольший максимум функции  $k(z, x)$ . Для выполнения преобразования Фурье будем использовать алгоритм быстрого дискретного преобразования Фурье [6].

На четвертом этапе обработки проводится выделение границ в отраженном сигнале. На выходе предыдущих этапов обработки программа выдает вертикальное сечение дороги в виде

обработанного полутонового изображения. Поскольку дорожное покрытие имеет горизонтально слоистую структуру, то представляется очевидным воспользоваться этой априорной информацией и выделить слои. С одной стороны эта обработка позволяет убрать лишний шум в изображении (изолированные яркие точки, небольшие области), с другой стороны позволяет упростить изображение, оставив только существенные детали, слои.

Для решения поставленной задачи используются методы математической обработки изображений и распознавания образов. Сначала на каждой трассе выбираются наиболее яркие точки с координатами  $(x, y)$  в количестве, определяемом параметром числа искоемых слоев,  $x$  - номер трассы,  $y$  - номер отсчета. Далее для этих точек вычисляется весовая функция

$$W(x, y) = \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m k(x+i, y(i)+j),$$

где  $k(x+i, y(i)+j)$  - значение интенсивности точки трассы  $x+i$  и отсчета  $y(i)+j$ . Суммирование выполняется в узкой криволинейной полосе ширины  $m$  и длины  $n$ ;  $y(i)$  - центр тяжести для данного сечения полосы. Далее по полученным весовым функциям проверяется гипотеза о принадлежности точки  $(x, y)$  к границе некоторого слоя. Критерием принятия гипотезы является выполнение соотношения  $W(x, y) \geq W_0(x) \cdot \delta$ , где  $W_0(x)$  - нормировочная весовая функция,  $\delta$  - множитель, задающий уровень достоверности гипотезы.

## 2.4. Структура комплекса георадарного зондирования

В минимальный состав комплекса диагностики дорожных покрытий входят антенный блок (одна или две приемо-передающие антенны), блок управления и управляющий компьютер, вместе составляющие георадар. Данная конфигурация позволяет осуществлять проведение измерений, визуализацию профилей и минимальную обработку данных. Для задачи диагностики дорожных покрытий в on-line режиме подобная конфигурация недостаточна. Полная обработка данных зондирования может быть осуществлена только при помощи вычислительного комплекса, который представляет собой мобильный специализированный комплекс. В качестве вычислителя предполагается использовать представитель семейства РВС. Общая структура разрабатываемого комплекса радарного зондирования приведена на Рис.2.

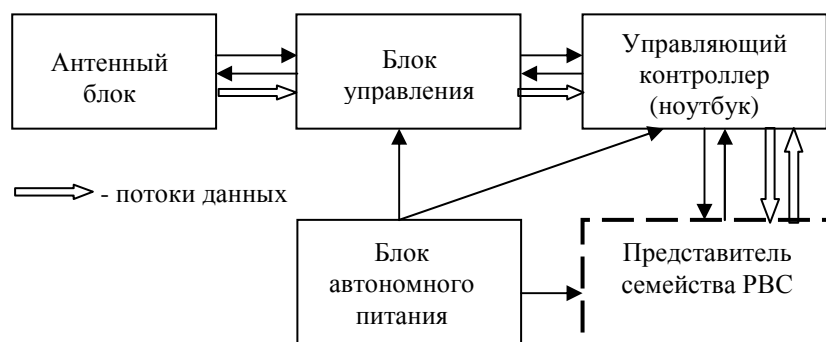


Рис. 2. Общая структура комплекса радарного зондирования.

Проведенные исследования позволяют выделить следующие вычислительно сложные фрагменты, которые необходимо многократно, до нескольких десятков раз в секунду, выполнять при обработке георадиолокационных данных:

- вычитание сигнала прямой волны, экранирующего полезный сигнал. При этом неизвестны два параметра вычитаемого сигнала - амплитуда и сдвиг, которые находим методом минимизации невязки.

- решение интегрального уравнения типа свертки с использованием алгоритма быстрого дискретного преобразования Фурье. Поскольку ядро уравнения известно с точностью до частоты волны, то необходимо решать для некоторого набора параметров ядра, выбирая оптимальное значение параметра из условия максимума решения. Использование ПЛИС технологий по-

звolyет очень эффективно распараллеливать сам процесс преобразования Фурье примерно на 4 потока при используемых параметрах задачи.

Создание библиотеки реализаций на PBC этих процедур позволит существенно ускорить процесс обработки георадиолокационных данных.

Предполагаются следующие подходы в реализации специализированного радарного комплекса диагностики дорожных покрытий.

1. Вся процедура регистрации и обработки управляется ноутбуком.
2. В потоковом режиме данные принимаются и проходят все стадии обработки.
3. Ноутбук соединяется со спецвычислителем - представителем семейства PBC.
4. На PBC реализуются наиболее трудоемкие процедуры.
5. Данные построчно сбрасываются из ноутбука на PBC и результаты обработки принимаются обратно.
6. Для гибкости обработки блоки, вычисляемые на PBC, содержат наборы основных входных параметров, считываемых из управляющей программы на ноутбуке.

### 3. Экспериментальная часть

На Рис.3 изображены результат решения задачи диагностики дорог для участка длиной 50 м. Результаты получены на персональном компьютере в режиме обработки предварительно записанных данных. На Рис.3а - исходная радарограмма, на Рис.3б – после вычитания прямого сигнала, на Рис.3в – выделенные границы. По горизонтали отложены номера трасс, которые следуют примерно через 5 см вдоль дороги. По вертикали – время в нсек, которое нетрудно перевести в глубину, зная скорость волны в среде. На Рис 3а виден маскирующий эффект прямой волны, после вычитания которой на Рис. 3б проявились приповерхностные слои. На Рис. 3в верхняя горизонтальная прямая – поверхность дороги, ниже идут слои асфальта и бетона. Поскольку дорога не новая, то этих слоев несколько. Более светлые участки линий соответствуют границам, выделенным с меньшим уровнем достоверности. Разрыв в слоях связан с участками с низким качеством данных. Глубина зондирования примерно 40 см.

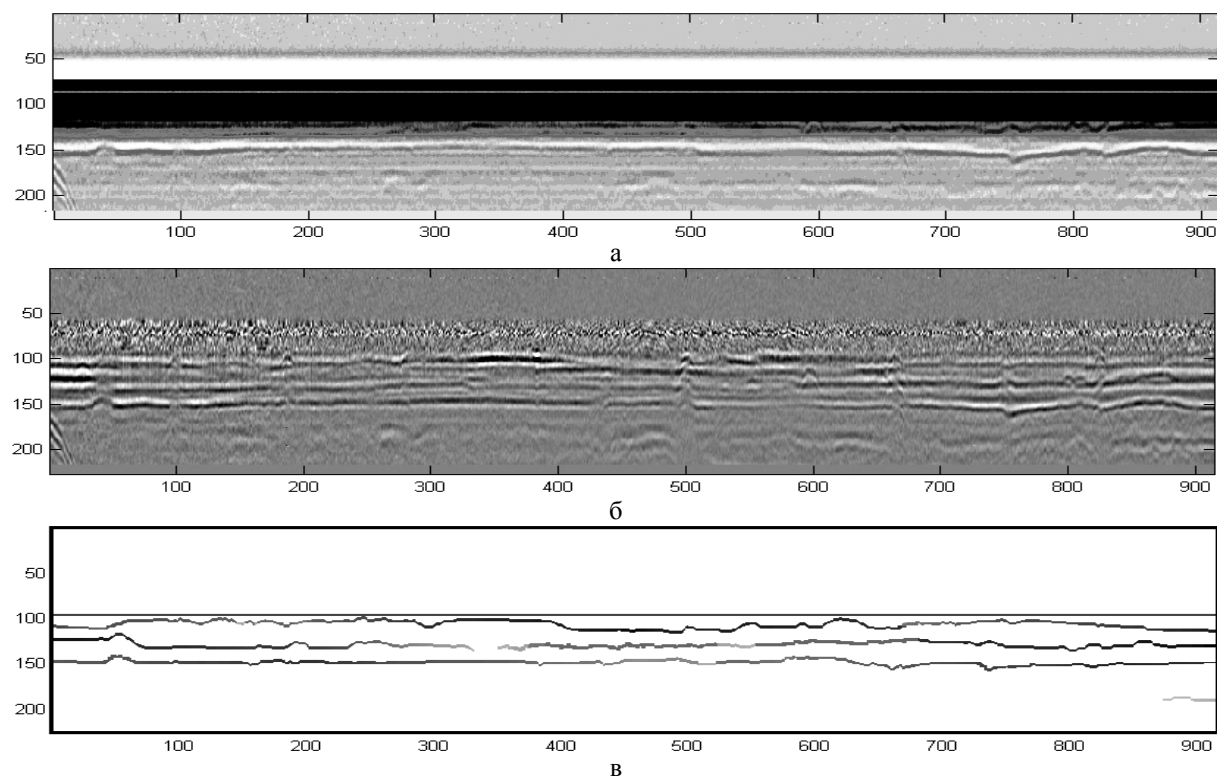


Рис.3. Результат решения задачи диагностики дорог для участка длиной 50 м. а- исходная радарограмма, б – после вычитания прямого сигнала, в – выделенные границы.

## 4. Заключение

Для задачи диагностики дорожных покрытий, имеющих слоистую структуру, был разработан специализированный алгоритм основанный на линейной постановке, который условно можно разбить на четыре последовательно повторяющихся этапа. Предлагается проводить обработку двух этапов на представителях семейства РВС, что позволит существенно ускорить процесс обработки данных, поэтому дальнейшие исследования предполагается проводить в этом направлении.

Были получен предварительный результат решения задачи диагностики дорожных покрытий для участка дороги длиной 50 м. Показано, что частота антенны 1.5 ГГц обеспечивает достаточное разрешение около 10 см и разумную глубину около 0.5 -1 м, что приемлемо для диагностики, например, новых дорог. В случае сложной структуры дорожного полотна для полной достоверности результатов может потребоваться вмешательство оператора для интерпретации изображения.

## Литература

1. Обследование автомобильных дорог при помощи метода георадиолокации. -Санкт-Петербург: "Мир дорог", 2004.
2. Mapping Asphalt Thickness with High-frequency GPR. MALA GeoScience, Application Notes, Printed Matter № 2888. [<http://www.malags.se/Downloads/Application-Notes.aspx>].
3. Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры. -Ростов-на-Дону: издательство ЮНЦ РАН, 2008. -320 с.
4. Tikhonov A., Goncharsky A., Stepanov V., Yagola. A. Numerical methods for the solution of ill-posed problems. -Dordrecht /Boston/, London: Kluwer Academic Publ., 1995.
5. Bakushinsky A.B., Goncharsky A.V. Ill-posed Problems. Theory and Applications. -Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 1994.
6. Введение в цифровую фильтрацию Под ред. Богнера Р., Константинодиса А. –Москва: «Мир», 1976.