

УДК 519.6

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ВОЛНОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА

А. В. Гончарский¹, С. Л. Овчинников¹, С. Ю. Романов¹

Рассматривается обратная задача диагностики дорог электромагнитным зондированием. Приведена линейная постановка задачи, разработаны методы и алгоритмы ее решения в предположении локально горизонтально-слоистой структуры дорожного полотна. Реализованные подходы использовались при зондировании как новых дорог, так и дорог с длительным историческим прошлым. Показано, что предлагаемые методы обеспечивают разрешение и глубину зондирования, приемлемые для диагностики дорог.

Ключевые слова: математическое моделирование, линейные волновые модели, обратные задачи, обработка изображений, диагностика дорог, георадар, короткоимпульсное широкополосное зондирование.

1. Введение. Расширение сети автомобильных дорог привело к ужесточению нормативных требований, предъявляемых к их безопасности, и к необходимости проведения качественного и информативного обследования дорожного полотна. Настоящая статья посвящена разработке методов и алгоритмов решения задачи диагностики структуры дороги с помощью георадиолокационного зондирования. Георадиолокация (в англоязычной литературе “Ground Penetrating Radar”, или GPR) является одним из наиболее новых и быстро развивающихся методов неразрушающего контроля, способных достаточно полно отобразить картину дороги. Исследования по использованию георадаров для диагностики дорожного полотна ведутся как в нашей стране [1–4], так и за рубежом (Geophysical Survey Systems, Inc., США; Sensors & Software, Канада; MALA GeoScience AB, Швеция) [5–7]. Георадиолокация является бесконтактным высокочастотным электромагнитным методом, обладающим рядом преимуществ перед другими геофизическими методами. Основными преимуществами являются большая производительность метода и быстрота получения достоверной и качественной информации.

Георадиолокация основана на использовании классических физических принципов радиолокации: на свойстве радиоволн отражаться от границ раздела сред с различной электропроводностью и диэлектрической проницаемостью.

Амплитуда отраженного сигнала определяется коэффициентом отражения. Передающей антенной прибора излучаются сверхкороткие электромагнитные импульсы длительностью в единицы и доли наносекунды, имеющие 1.0–1.5 периода квазигармонического сигнала и достаточно широкий спектр излучения. Центральная частота сигнала определяется типом антенны. Для формирования зондирующих импульсов используется возбуждение антенны перепадом напряжения (ударный метод возбуждения), принятый сигнал запоминается для последующей обработки.

Набор сменных антенных модулей обеспечивает возможность зондирования в большом диапазоне частот (16–2000 МГц). Применение той или иной антенной системы определяется решаемой при зондировании задачей. Повышение частоты зондирования приводит к улучшению разрешающей способности;

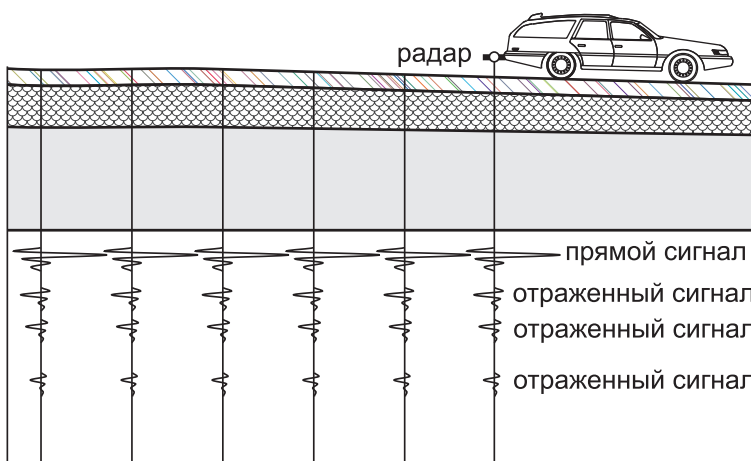


Рис. 1. Схема работы георадара по зондированию дорог и схема записи радарограммы

¹ Научно-исследовательский вычислительный центр, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991, Ленинские горы, Москва; Гончарский А. В., профессор, зав. лаб., e-mail: gonchar@srcc.msu.ru; Овчинников С. Л., электроник, e-mail: osl@starnet.ru; Романов С. Ю., ст. науч. сотр., e-mail: romanov@srcc.msu.ru

однако при этом увеличивается затухание электромагнитной волны в среде, что приводит к уменьшению глубины зондирования. Кроме того, со снижением частоты увеличивается зона начальной нечувствительности (так называемая мертвая зона) георадара. Для используемых антенн с центральными частотами 1.5 ГГц, 900 МГц и 500 МГц для сухих грунтов максимальная глубина зондирования составляет соответственно 1.5–2 м, 3–4 м и 8–10 м.

В настоящей статье формулируется задача обнаружения конструктивных слоев дорожной одежды и определения их толщин. При георадиолокационном обследовании дорожного полотна антенный блок георадара перемещается вдоль дороги, излучая и принимая отраженные сигналы через определенное расстояние, называемое шагом зондирования (рис. 1). В результате из упорядоченного набора отраженных сигналов складывается изображение, именуемое радарограммой. Радарограммы хранятся в компьютерных файлах для последующего анализа и интерпретации.

Как правило, по сохраненным радарограммам только специалист лишь очень приблизительно может понять структуру исследуемого дорожного покрытия. Радарограммы являются лишь исходными данными для дальнейшей математической обработки и интерпретации. Объемы обрабатываемых данных огромны: в простейшей постановке георадар записывает трассы длиной по глубине 512 отсчетов с шагом по горизонтали вдоль дороги около 1–5 см, длина дороги измеряется километрами. Кроме того, необходимо обрабатывать в реальном времени [8] достаточно интенсивный поток поступающих данных (до нескольких десятков трасс за секунду). Это накладывает жесткие требования на эффективность используемых алгоритмов и программ. В рассматриваемой задаче перспективно применение реконфигурируемых вычислительных систем (РВС) на базе ПЛИС [8].

Эффективность диагностики в значительной степени зависит от используемых моделей, методов и алгоритмов обработки данных. Мы предлагаем использовать подходы, базирующиеся на математических методах решения обратных задач и распознавания образов. В рамках волновой модели записываются соотношения между искомой структурой дорожного полотна и входными данными (радарограммой). Как правило, это операторное уравнение Фредгольма первого рода.

2. Математическая постановка задачи. Перейдем к выводу уравнения, описывающего процесс зондирования слоистой структуры дорожного покрытия георадаром. Рассмотрим распространение электромагнитной волны в среде, ограничиваясь следующей скалярной волновой моделью гиперболического типа:

$$\Delta u(r, q, t) - \frac{1}{c^2(r)} u_{tt}(r, q, t) = \delta(r - q) f(t). \quad (1)$$

Здесь $u(r, q, t)$ — скалярная функция излучения в среде, зависящая от пространственных переменных $r, q \in \mathbb{R}^3$ и времени $t \geq 0$, Δ — оператор Лапласа, $c(r)$ — скорость распространения излучения, которая в области расположения георадара равна c_0 , $\delta(r - q) f(t)$ описывает возмущение среды точечным источником, располагающимся в точке $q \in \mathbb{R}^3$ и $\delta(\cdot)$ — дельта-функция Дирака. Начальные условия имеют вид $u(r, q, t)|_{t=0} = 0$ и $u_t(r, q, t)|_{t=0} = 0$.

Остановимся на методах решения обратной задачи. Вводя обозначение $\xi(r) = c_0^{-2} - c^{-2}(r)$, уравнение (1) можно записать в виде

$$\Delta u(r, q, t) - \frac{1}{c_0^2(r)} u_{tt}(r, q, t) = \delta(r - q) f(t) - u_{tt}(r, q, t) \xi(r). \quad (2)$$

Пусть $G(r, t, q, \tau) = \frac{1}{4\pi|r - q|} \delta\left(t - \tau - \frac{|r - q|}{c_0}\right)$ — функция Грина для волнового уравнения (2), где $|\cdot|$ — расстояние в пространстве \mathbb{R}^3 .

Предположим, что рассматриваемые ниже интегралы существуют; легко видеть, что уравнение (2) может быть переписано в форме

$$u(r, q, t) - \frac{1}{4\pi|r - q|} f\left(t - \frac{|r - q|}{c_0}\right) = - \int_H \left(\int_{\tau \geq 0} u_{\tau\tau}(r', q, \tau) \xi(r') G(r, t, r', \tau) d\tau \right) dr'. \quad (3)$$

Рассмотрим борновское приближение, т.е. будем считать, что функция $u(r', q, t)$, стоящая под интегралом в правой части уравнения (3), имеет вид

$$u(r', q, t) = \frac{1}{4\pi|r' - q|} f\left(\tau - \frac{|r' - q|}{c_0}\right). \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3) и беря интеграл по τ в (3), получим

$$u(r, q, t) - \frac{1}{4\pi|r-q|} f\left(t - \frac{|r-q|}{c_0}\right) = \int_H \frac{1}{16\pi^2|r'-r||r'-q|} f''\left(t - \frac{|r'-r|+|r'-q|}{c_0}\right) \xi(r') dr'. \quad (5)$$

Объектом нашего исследования является дорожное покрытие, которое в основном имеет горизонтально-слоистую структуру. Поэтому рассмотрим кусочно-постоянную по вертикали и медленно меняющуюся по горизонтали модель среды, т.е. среда представляется из нескольких слоев с постоянными в пределах каждого слоя электропроводностью и диэлектрической проницаемостью. Это означает, что искомая функция $\xi(r)$ медленно меняется по горизонтальным координатам и является кусочно-постоянной функцией по координате глубины z . Из общей теории в приближении Френеля известно, что в отражении волны от плоскости основной вклад вносит область Френеля вблизи точки отражения волны в геометрическом приближении. Таким образом, в нашей задаче в некотором приближении можно перейти от трехмерного интеграла (5) к одномерному интегралу вдоль вертикальной оси z . Учтем, что взаимное геометрическое положение источника q и приемника r для георадара постоянно, т.е. $r - q = a = \text{const}$, и $|r - q|$ значительно меньше, чем расстояние от георадара до искомым отражающих слоев. Положим, что георадар перемещается на постоянной высоте $z \equiv 0$, а ось x направим по направлению движения георадара ($y \equiv 0$), т.е. $r = (x, 0, 0)$. Тогда формула (5) преобразуется к виду

$$\bar{u}(x, t) - \bar{f}(t) = \int_Z \alpha(z) f''\left(t - \frac{2z}{c_0}\right) \xi(x, z) dz, \quad (6)$$

где $\bar{u}(x, t) = u(r, r - a, t)$, $r = (x, 0, 0)$, $\bar{f}(t) = \frac{1}{4\pi|a|} f\left(t - \frac{|a|}{c_0}\right)$, z — координата глубины, Z — область залегания искомым слоев по оси z , $\alpha(z)$ — некоторый убывающий, стремящийся к нулю при $z \rightarrow +\infty$ множитель, т.е. на нижней границе области Z можно считать, что $\alpha(z) = 0$. На верхней границе области Z можно считать, что $\xi(x, z) = 0$, так как георадар располагается в среде, характеризуемой скоростью c_0 . Тогда, интегрируя (6) по частям, с точностью до множителя получим формулу

$$\bar{u}(x, t) - \bar{f}(t) = \int_Z f'\left(t - \frac{2z}{c_0}\right) (\xi'_Z(x, z)\alpha(z) + \xi(x, z)\alpha'(z)) dz. \quad (7)$$

Поскольку $\xi(x, z)$ — кусочно-постоянная функция, то $\xi'_Z(x, z)$ — есть сумма дельта-функций, расположенных на границах между слоями среды. Функция $\alpha(z)$ — медленно меняющаяся, поэтому вторым слагаемым в правой части в (7) можно пренебречь по сравнению с первым. Делая замену переменной интегрирования, а также вводя обозначения $A(t - \zeta) = f'\left(t - \frac{2z}{c_0}\right)$ и $k(x, \zeta) = \xi'(x, z)\alpha(z)$, получим одномерное выражение для отраженного импульса:

$$u(x, t) = f(t) + \int_0^\infty A(t - \zeta) k(x, \zeta) d\zeta, \quad (8)$$

где для простоты обозначений убраны штрихи сверху. Таким образом, в рассматриваемом приближении модель отражения описывается интегральным уравнением, в котором ядро зависит от разности аргументов $t - \zeta$. Как можно видеть из формулы (8), зарегистрированный георадаром сигнал $u(x, t)$ (радарограмма) зависимости от времени t и горизонтальной координаты x вдоль дороги представляет собой сумму прямой волны (первое слагаемое правой части) и отраженного от границ слоев сигнала (второе слагаемое правой части). Коэффициент отражения $k(x, \zeta)$ как функция от глубины ζ имеет вид суммы дельта-функций. Положение (глубина) каждой дельта-функции соответствует границе раздела сред.

Как правило, функция отражения от границы $A(t - \zeta)$ и прямая волна $f(t)$ известны (например, из экспериментальных данных) лишь с точностью до параметров. Вводя неизвестные параметры и обозначая переменную интегрирования через z , получим уравнение

$$u(x, t) = K f(t, p_1) + \int_0^\infty A(t - z, p_2) k(x, z) dz, \quad (9)$$

где p_1, p_2 — нелинейные параметры, а K — линейный.

Тогда обратная задача диагностики дорожных покрытий ставится следующим образом: по известным радарограмме $u(x, t)$, ядру $A(t - z, p_2)$ и прямой волне $f(t, p_1)$ при неизвестных параметрах K, p_1 и p_2 требуется найти функцию коэффициента отражения $k(x, z)$.

3. Некоторые проблемы в задаче диагностики дорог.

1. Как показали результаты экспериментов, хотя импульс источника является широкополосным сигналом, однако функцию отражения от границы $A(t - z, p_2)$ нельзя считать дельта-функцией в рамках рассматриваемой задачи. Протяженность импульса используемых источников сравнима с толщиной слоев дорожных покрытий. Таким образом, оператор в (9) не является единичным. Это означает, что зарегистрированные отраженные данные, как правило, не могут быть интерпретированы как структура дорожного полотна (рис. 2) и требуется решать обратную задачу (9), которая является некорректно поставленной [9, 10].

2. В действительности, по мере распространения в среде импульс претерпевает дисперсию. Поэтому если требуется провести диагностику среды для большого диапазона глубин, то пользоваться уравнением типа свертки (9) нельзя. В этом случае более адекватно зондирование описывается линейным интегральным уравнением

$$u(x, t) = Kf(t, p_1) + \int_0^{\infty} A(t, z)k(x, z) dz,$$

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

3. Правая часть уравнения (9) содержит функцию $f(t, p_1)$ — прямую волну, идущую от источника. Трудность 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 (9), 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 сильно ограничивает глубину зондирования, поэтому в георадарах используют приемники высокой чувствительности, позволяющие регистрировать сигнал, ослабленный в несколько сотен раз. Большие различия в амплитуде отраженных сигналов приводят к серьезным проблемам при решении обратной задачи.

4. Алгоритмы 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 и выделение границ.

На первом этапе проводится вычитание прямого сигнала $f(t, p_1)$ из трассы радарограммы. В силу некоторой нестабильности работы георадара, излучаемый сигнал варьируется по амплитуде и по временной задержке (параметры K и p_1 в (9) не известны). Выбор значений параметров выполняется на основе минимума невязки на начальном интервале по времени: $\|u(x, t) - Kf(t, p_1)\|^2$. Параметр амплитуды K — линейный параметр, минимум по нему находим из явной формулы $K = \frac{(u, u)}{(u, f)}$, где $\|\cdot\|^2$ — квадрат нормы

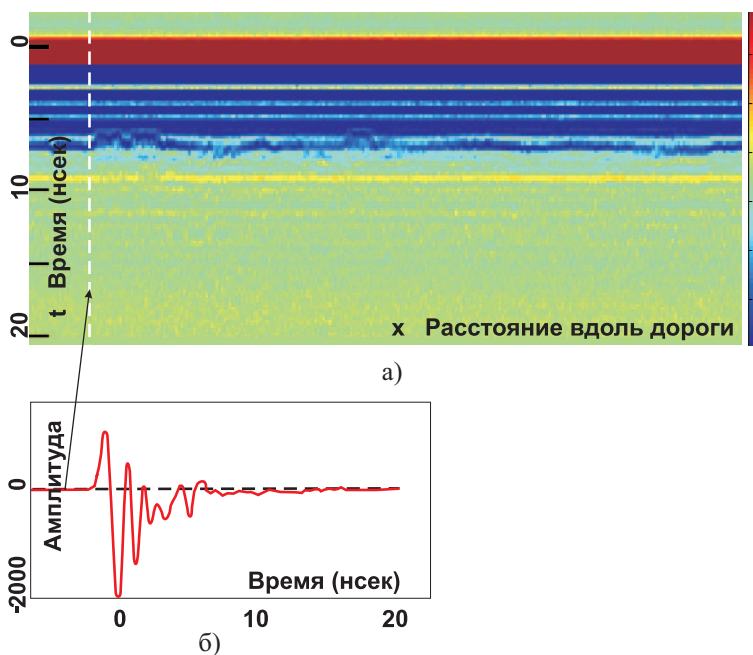


Рис. 2. Пример реальной радарограммы (а) и график отдельной трассы (б)

в \mathbb{L}^2 , а (\cdot, \cdot) — скалярное произведение. Параметр сдвига p_1 является нелинейным, поэтому минимум по нему находим перебором значений из некоторого 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 θ . Пусть t_0 — момент прихода отраженного сигнала от поверхности дороги. Тогда на втором этапе трасса радарограммы приводится к виду $\bar{u}(x, t) = \begin{cases} u(x, t), & \text{при } t \leq t_0, \\ u(x, t) \left(1 + |t - t_0|^\theta\right), & \text{при } t \geq t_0. \end{cases}$

На третьем этапе решается интегральное уравнение (9). 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 [9, 10].

Как можно видеть, ядро этого интегрального уравнения зависит от разности аргументов, поэтому для его решения, как известно, особенно эффективно применение процедуры преобразования Фурье, которое позволяет логарифмически уменьшить объем вычислений. Нами использовался регуляризованный метод, описываемый аналитически формулой $k^\alpha(x, z) = \frac{1}{2\pi} \int \frac{\tilde{A}(-w, p_2) \tilde{u}(x, w) e^{-iwz}}{\tilde{A}(-w, p_2) \tilde{A}(w, p_2) + \alpha(w^2 + 1)} dw$, где $\tilde{A}(w, p_2)$, $\tilde{u}(x, w)$ — преобразования Фурье функций $A(t, p_2)$ и $u(x, y) - Kf(t, p_1)$ соответственно, а параметр α выбирается из принципа обобщенной невязки [9, 10].

Ядро уравнения зависит от неизвестного параметра p_2 — частоты, которая меняется в зависимости от глубины зондирования и свойств среды. Для того чтобы найти этот 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 $k(x, z)$. Для выполнения преобразования Фурье будем использовать алгоритм быстрого дискретного преобразования Фурье [11].

На четвертом этапе обработки проводится выделение границ в отраженном сигнале. На предыдущих этапах обработки программа выдает вертикальное сечение дороги в виде обработанного полутонного 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), а с другой стороны, позволяет упростить изображение, оставив только существенные детали, т.е. слои.

Для решения поставленной задачи используются методы математической обработки изображений и распознавания образов. Сначала на каждой трассе выбираются наиболее яркие точки с координатами (x, z) в количестве, определяемом параметром числа искоемых слоев, x — номер трассы, z — номер отсчета.

Далее для этих точек вычисляется весовая функция $W(x, z) = \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m k(x+i, z(i)+j)$, где

$z = z(0)$, $k(x+i, z(i)+j)$ — значение интенсивности точки с координатами $(x+i, z(i)+j)$. Суммирование выполняется в узкой криволинейной полосе шириной m и длиной n ; значения $z(i)$ находятся из условия локального максимума для трассы $x+i$. Далее по полученным весовым функциям проверяется гипотеза о принадлежности точки (x, z) к границе некоторого слоя. Критерием принятия гипотезы является выполнение соотношения $W(x, z) \geq W_0(x)\delta$, где $W_0(x)$ — нормировочная весовая функция и δ — множитель, задающий уровень достоверности гипотезы.

5. Экспериментальная часть. На рис. 3 и 4 изображены исходные данные (радарограммы), полученные в ходе зондирования двух участков дорожного полотна длиной 50 м и 75 м антенным блоком с центральной частотой 1.5 МГц, и результаты решения задачи диагностики дорог. Результаты получены в режиме обработки предварительно записанных данных. На рис. 3а и 4а — исходные радарограммы, на рис. 3б и 4б — выделенные границы. По горизонтали отложены номера трасс, которые следуют примерно через 5 см вдоль дороги. По вертикали — номер отсчета, который нетрудно перевести в глубину, зная количество принимаемых отсчетов в одну наносекунду и скорость волны в среде. На рис. 3а и 4а виден

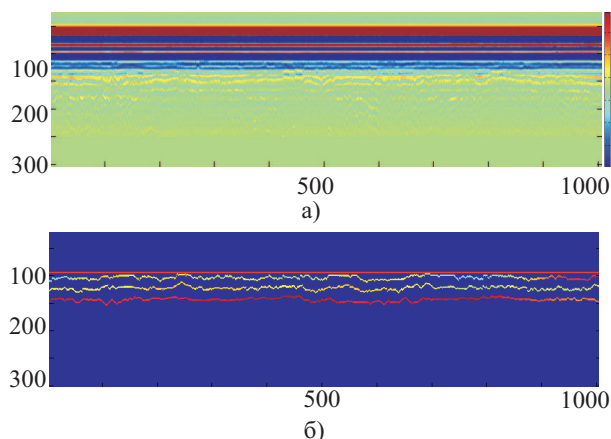


Рис. 3. Исходные данные и результат решения задачи диагностики для участка старой дороги в городе длиной 50 м: а) исходная радарограмма, б) выделенные слои асфальта и бетона

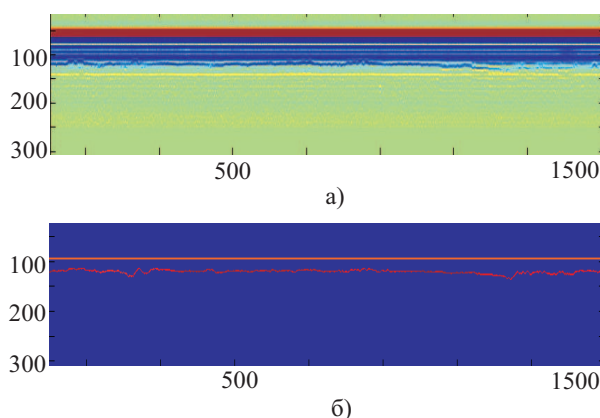


Рис. 4. Исходные данные и результат решения задачи диагностики для участка новой загородной дороги длиной 75 м: а) исходная радарограмма, б) выделенный слой асфальта

маскирующий эффект прямой волны в начале трасс, визуально выделить слои не удастся. На рис. 3б и 4б выделены приповерхностные слои асфальта и бетона, полученные в результате решения обратной задачи и обработки изображений, верхняя горизонтальная прямая — поверхность дороги. На рис. 3 дорога не новая, которая неоднократно ремонтировалась, поэтому найдено несколько слоев. На рис. 4 — новая загородная дорога, состоящая из слоя асфальта, лежащего на слое щебня. Обнаружен только один слой асфальта толщиной около 12–15 см. Более светлые участки линий соответствуют границам, выделенным с меньшим уровнем достоверности. Глубина зондирования примерно 40 см.

6. Заключение. Для задачи диагностики дорожных покрытий, имеющих слоистую структуру, были разработаны методы и алгоритмы, основанные на линейной модели. Реализованные подходы использовались при зондировании электромагнитным импульсом как новых дорог, так и дорог с длительным историческим прошлым. Проведенные исследования показали, что предлагаемые методы обеспечивают разрешение около 10 см и разумную глубину около 0.5–1 м, что вполне приемлемо для диагностики дорог.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004.
2. Гринев А.Ю., Темченко В.С., Ильин Е.В. Два подхода к восстановлению параметров плоскостойких сред при короткоимпульсном сверхширокополосном зондировании // Успехи соврем. радиоэлектроники. 2009. № 1. 39–50.
3. Обследование автомобильных дорог при помощи метода георадиолокации. СПб: Мир дорог, 2004.
4. Кулижников А.М., Шабашева М.А. Георадары в дорожном строительстве. М.: Информавтодор, 2000.
5. Liu J., Zollinger D.G., Lytton R.L. Detection of delamination in concrete pavements using ground-coupled ground-penetrating radar technique // J. Transportation Research Board. 2008. 2087. 68–77.
6. Cao Y., Guzina B.B., Labuz J. Pavement evaluation using ground penetrating radar // Univ. of Minnesota Final Report MN/RC 2008-10, 2008.
7. Mapping Asphalt Thickness with High-Frequency GPR // MALA GeoScience, Application Notes. 2007. Printed Matter N 2888 (<http://www.malags.se/Downloads/ApplicationNotes.aspx>).
8. Обвинников С.Л., Романов С.Ю. Об обратной задаче волновой диагностики дорожных покрытий // Тр. международной научной конференции “Параллельные вычислительные технологии” (ПаВТ’2009). Нижний Новгород, 30.03.09–3.04.09. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. 624–630.
9. Tikhonov A., Goncharsky A., Stepanov V., Yagola A. Numerical methods for the solution of ill-posed problems. Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 1995.
10. Bakushinsky A.B., Goncharsky A.V. Ill-posed problems. Theory and applications. Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 1994.
11. Введение в цифровую фильтрацию / Под ред. Р. Богнера и А. Константинодиса. М.: Мир. 1976.

Поступила в редакцию
18.05.2009