

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ ДОРОГ НА РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЯЗЫКА COLAMO

А.Г. Коваленко, С.Л. Овчинников, С.Ю. Романов

1. Введение. Расширение сети автомобильных дорог привело к ужесточению нормативных требований предъявляемых к их безопасности, к необходимости проведения качественного и информативного обследования дорожного полотна. Настоящая работа посвящена разработке методов и алгоритмов решения задачи диагностики структуры дороги с помощью георадиолокационного зондирования, рассматривается решение задачи на реконфигурируемой вычислительной системе с применением языка COLAMO. В статье подробно рассмотрены особенности реализации вычислительно трудоемких частей задачи, представлены граф-схемы, приведены примеры текста программы на языке COLAMO.

Георадиолокация (в англоязычной литературе "Ground Penetrating Radar" или GPR) является одним из наиболее молодых и быстро развивающихся методов неразрушающего контроля, способных наиболее полно отобразить картину дороги. Исследования по использованию георадаров для диагностики дорожного полотна ведутся как в нашей стране [1-3], так и зарубежом (Geophysical Survey Systems, Inc, США; Sensors & Software, Канада; MALA GeoScience AB, Швеция) [4-6]. Георадиолокация является бесконтактным высокочастотным электромагнитным методом, обладающим рядом преимуществ перед другими геофизическими методами. Основными преимуществами являются большая производительность метода и быстрота получения достоверной качественной информации.

Георадиолокация основана на свойстве радиоволн отражаться от границ раздела сред с различной электропроводностью и диэлектрической проницаемостью. 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. Набор сменных антенных модулей обеспечивает возможность зондирования в большом диапазоне частот. Повышение частоты зондирования приводит к улучшению разрешающей способности; но при этом увеличивается затухание электромагнитной волны в среде, что приводит к уменьшению глубины зондирования. В настоящей работе ставится задача обнаружения конструктивных слоёв дорожной одежды и определения их толщин. При георадиолокационном обследовании дорожного полотна антенный блок георадара перемещается вдоль дороги, излучая и принимая отражённые сигналы через определённое расстояние, называемое шагом зондирования (Рис1.). В результате из упорядоченного набора отражённых 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, представляет интерес обрабатывать в реальном времени (см. [7]) достаточно интенсивный поток поступающих данных (до нескольких десятков трасс за секунду). Это накладывает жесткие требования на эффективность используемых алгоритмов, программ и вычислительных систем. В рассматриваемой задаче используются реконфигурируемые вычислительные системы (PBC) на базе ПЛИС [8] для проведения расчетов наиболее вычислительно трудоемких этапов. Все остальные этапы могут быть выполнены на обычном персональном компьютере.

Вычислительно трудоемкие этапы реализованы в виде отдельных программ на языке COLAMO. Язык программирования COLAMO представляет собой высокоуровневый язык, предназначенный для программирования многопроцессорной вычислительной системы с реконфигурированной архитектурой. Язык COLAMO позволяет описывать вычислительные алгоритмы для реализации на реконфигурируемых вычислительных системах в пределах одной архитектуры различных конфигураций и дает возможность программисту максимально просто описывать различные виды параллелизма в достаточно сжатом виде.

2. *Математическая постановка задачи.* Рассмотрим уравнение, описывающее процесс зондирования слоистой структуры дорожного покрытия георадаром. Будем исходить из линейной модели, описываемой интегральным уравнением 1 рода

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

где зарегистрированный георадаром сигнал $u(x, t)$ (радарограмма) зависимости от времени t и горизонтальной координаты вдоль дороги x и представляет собой сумму прямой волны $f(t)$ и отраженного от границ слоев сигнала (второе слагаемое правой части). $A(t)$ - функция отражения от границы, коэффициент отражения $k(x, z)$, как функция от глубины z , имеет вид суммы дельта - функций. Положение (глубина) каждой дельта - функции соответствует границе раздела сред. Таким образом, в рассматриваемом приближении модель отражения описывается интегральным уравнением, где ядро зависит от разности аргументов $t-z$.

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

$$u(x, t) = K \cdot f(t, p) + \int_0^{\infty} A(t-z, q) \cdot k(x, z) dz \quad (1)$$

где p, q - нелинейные параметры, а K - линейный.

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

3. *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 следующие этапы обработки радиолокационных данных: вычитание прямого сигнала, обращение интегрального уравнения, выделение границ.

На первом этапе проводится вычитание прямого сигнала $f(t, p)$ из трассы радарограммы. В силу некоторой нестабильности работы георадара, излучаемый сигнал варьирует по амплитуде и по временной задержке (параметры K, p в (1) – неизвестны). Выбор значений параметров выполняется на основе минимума невязки на начальном интервале по времени: $\| u(x, t) - K f(t, p) \|$. Параметр амплитуды K – линейный параметр, минимум по нему находим из явной формулы $K = (u, u) / (u, f)$, где $\| \cdot \|$ - норма вектора, а (\cdot, \cdot) – скалярное произведение. Параметр сдвига p является нелинейным, поэтому минимум по нему находим перебором значений из некоторого диапазона. Поскольку сдвиг функции $f(t, p)$ может выполняться на величину меньшую, чем шаг сетки дискретизации функции $f(t, p)$, то для нахождения значений функции в промежуточных точках используется сплайн интерполяция функции $f(t, p)$.

Рассмотрим этап 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 [9,10].

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. Нами использовался следующий регуляризованный метод, описываемый аналитически формулой [9,10]

$$k^{\alpha}(x, z) = \frac{1}{2\pi} \int \frac{B(-w, q)v(x, w) \exp(-iwz)}{B(-w, q)B(w, q) + \alpha(w^2 + 1)} dw$$

где $B(w, q)$, $v(x, w)$ – преобразования Фурье соответственно функций $A(t, q)$ и $u(x, t) - Kf(t, p)$; параметр α выбирается из принципа обобщенной невязки.

Ядро уравнения зависит от неизвестного параметра q – 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 q). Наилучшим значением параметра q считается то, при котором достигается наибольший максимум функции $k(x, z)$. Для выполнения преобразования Фурье будем использовать алгоритм быстрого дискретного преобразования Фурье [11].

Далее рассмотрим этап 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, 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 ширины m и длины n ; $z(i)$ – 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 $W(x, z) > d*V(x)$, где $V(x)$ нормировочная весовая функция, d – множитель, задающий уровень достоверности гипотезы.

4. *Реализация на реконфигурируемой вычислительной системе с использованием языка COLAMO.* Анализ алгоритма задачи показал, что наибольшей вычислительной трудоемкостью обладают этапы вычитания прямого сигнала и обращения интегрального уравнения. Все остальные этапы и другие вычислительные блоки могут быть выполнены на обычном персональном компьютере. Таким образом, схема реализации задачи диагностики дорожных покрытий для реконфигурируемых вычислительных систем (РВС) состоит из двух вычислительно трудоемких модулей, каждый из которых представляет собой отдельную программу на языке COLAMO.

Рассмотрим реализацию модуля, вычитающего прямой сигнал, на РВС. Каждая трасса предварительно нормируется с помощью умножения каждого отсчета трассы на нормировочный коэффициент. После этого осуществляется поиск оптимальных значений сдвига и коэффициента вычитания методом перебора сдвига в заданном диапазоне с помощью вычисления кубического сплайна, интерполирующего заданные значения табличной функции в предварительно рассчитанных точках. В конце поиска на основе найденных оптимальных значений сдвига и коэффициента вычитания вычисляется прямой сигнал, который, в свою очередь, вычитается из нормированной трассы.

На Рис. 2 представлена граф-схема, осуществляющая перебор сдвига в диапазоне для нахождения оптимального значения сдвига и коэффициента для вычитания прямого сигнала. Граф-схема вычислений – это структура, отображающая информационную зависимость вычислений для каждого элементного узла. Каждая вершина этой структуры является элементарным процессором (функциональным устройством), участвующим в решении задачи.

На рисунке 2 приняты следующие обозначения:

- Г – генератор;
- $P1_i$ – исходные параметры для текущего шага перебора для текущей трассы;
- s – блок вычисления суммы элементов потока в заданном диапазоне;
- БВСИ – блок вычисления сплайн-интерполяции;
- 2 – блок возведения в квадрат;
- z – блок задержки данных;
- C_i – константы;
- БВЗ – блок выборки значений;
- К – значение коэффициента для вычитания прямого сигнала для текущей трассы;
- N – значение невязки для текущей трассы;
- $P2_i$ – выходные параметры для текущего шага перебора для текущей трассы.

На каждой шаге перебора для каждой трассы вычисляется невязка N. Если это первый проход (изначально минимальная невязка отрицательна) или вычисленная невязка меньше минимальной, то (при условии, что еще не выполнены все шаги перебора) в выходные параметры записываются текущее значение сдвига, вычисленный коэффициент вычитания K, вычисленная невязка N, иначе записываются данные с предыдущего шага. Коммутацию выходных значений обеспечивает блок выборки значений, который представляет собой набор мультиплексоров, управляемых сигналом sel.

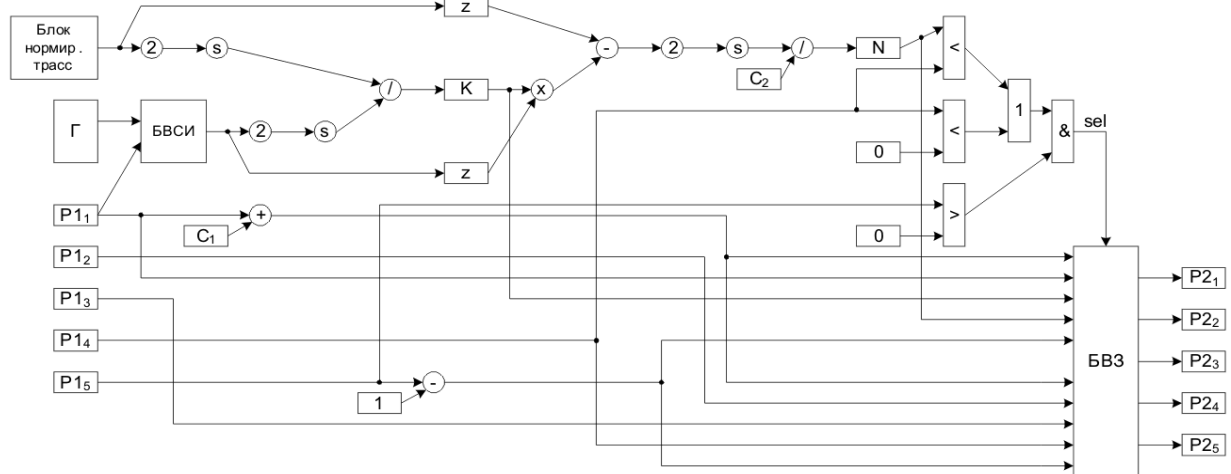


Рис. 2. Граф-схема поиска оптимального сдвига и коэффициента для вычитания прямого сигнала методом перебора сдвига

В задаче диагностики дорожных покрытий область оптимизации включает в себя 60 отсчетов трассы. Дополнение области нулями до 64-х элементов позволяет находить сумму этих элементов, используя схему, представленную на Рис. 3. Блоки z_i задерживают данные на i тактов. На первом сумматоре происходит попарное сложение 64-х значений с получением 32-х частичных сумм. Эти частичные суммы идут через такт, поэтому перед вторым сумматором необходимо увеличить задержку данных до двух. В результате получается 16 частичных сумм, но уже идущих каждый четвертый такт. Таким образом, увеличивая каждый раз задержку данных перед последующим сумматором вдвое, мы на выходе последнего сумматора получим сумму 64-х значений на 64-м такте.

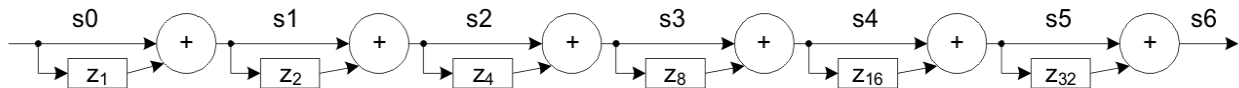


Рис. 3. Граф-схема сложения 64-х значений

Блок вычисления сплайн-интерполяции позволяет находить значения кубического сплайна, используя табличную функцию в узлах сетки. Данный блок естественным образом реализуется на языке COLAMO. Отметим, что сетка, табличная функция и коэффициенты кубического сплайна реализованы в виде блоков ПЗУ, так как в пределах обрабатываемых трасс остаются неизменными.

Для организации плотного потока данных через вычислительную схему предлагается осуществлять перебор не для каждой трассы в отдельности, а для всех трасс. То есть один кадр работы схемы будет представлять собой один шаг перебора для каждой трассы. Однако в данном случае количество кадров будет определяться относительно той трассы, которая имеет наибольшее количество повторений для перебора.

Теперь рассмотрим реализацию модуля, решающего задачу обращения интегрального уравнения, на РВС. Данный этап обработки представляет собой операцию свертки – над исходной трассой выполняется операция быстрого преобразования Фурье (БПФ), результат которого комплексно умножается на ядра

интегрального уравнения, после чего производится операция обратного БПФ с нормировкой результата. Степень БПФ представлена на Рис. 4.

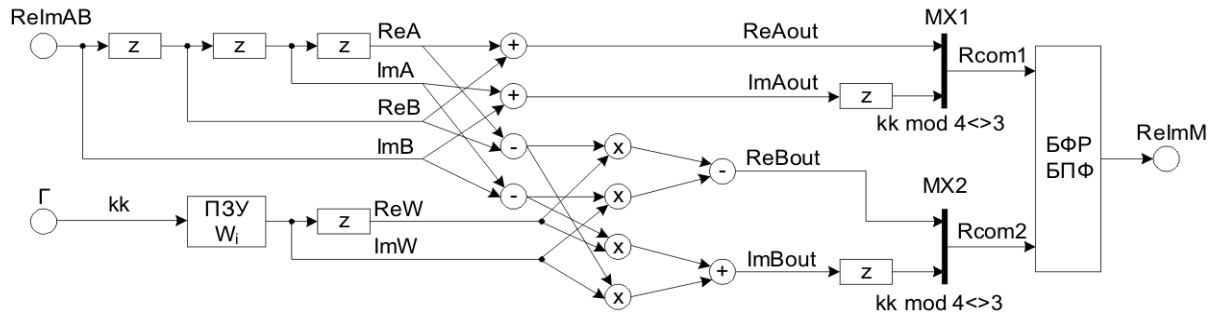


Рис. 4 . Граф-схема одной ступени БПФ

Комплексные данные для БПФ ReImAB поступают из одного канала. При помощи элементов задержки на один операнд z раз в четыре такта формируются истинные значения ReA, ImA, ReB, ImB. Аналогичным образом получаем коэффициенты для текущей ступени БПФ ReW и ImW из ПЗУ, которое запускается генератором Γ . Результаты операции БПФ формируются каждый четвертый такт. На этом такте в коммутации Rcom1 и Rcom2 запишутся реальные части, на первом такте – мнимые части, которые специально будут задержаны на один операнд, на втором и третьем тактах – некорректные данные. Для объединения двух потоков данных и вырезки из потока некорректных данных каждые 2 такта используется блок формирования результата ступени БПФ (БФР БПФ), представляющий собой библиотечный элемент.

Напомним, что при структурно-процедурной организации вычислений выполняются все ветви условных операторов. Выбор той или иной ветви осуществляется с помощью мультиплексоров (MX). В частности, мультиплексоры MX1 и MX2 выбирают ветви с реальными частями только в четвертом такте. В остальные такты коммутируются ветви с мнимыми частями. Такая реализация позволяет каскадно подключать ступени БПФ, образуя конвейер.

Ниже приведен текст программы на языке COLAMO, описывающий структуру, представленную на Рис. 4:

```

VAR ReImAB, ReImW, ReImM, Rcom1, Rcom2, ReA, ImA, ReB, ImB, ReW, ImW, ReAout, ImAout,
ReBout,
ImBout : real com;
VAR ABbuf1, ABbuf2, ABbuf3, ABbuf4, Wbuf1, Wbuf2, ImAbuf, ImBbuf : array real [2:stream] com;
VAR kk : number;
VAR kk4 : integer com;

```

```

ABbuf1[kk]:=ReImAB;
ABbuf2[kk]:=ABbuf1[kk-1];
ABbuf3[kk]:=ABbuf2[kk-1];
ABbuf4[kk]:=ABbuf3[kk-1];
ReA:=ABbuf4[kk]; ImA:=ABbuf3[kk];
ReB:=ABbuf2[kk]; ImB:=ABbuf1[kk];
Wbuf1[kk]:=ReImW;
Wbuf2[kk]:=Wbuf1[kk-1];
ReW:=Wbuf2[kk]; ImW:=Wbuf1[kk];
ButFFT(ReA, ImA, ReB, ImB, ReW, ImW, ReAout, ImAout, ReBout, ImBout);
ImAbuf[kk]:=ImAout; ImBbuf[kk]:=ImBout;
for kk:=0 to 512 do begin
  kk4:=kk and 3;
  if kk4=3 then begin
    Rcom1:=ReAout; Rcom2:=ReBout;
  end;
  else begin
    Rcom1:=ImAbuf[kk-1]; Rcom2:=ImBbuf[kk-1];
  end;
end;
ReImM:=MakeOneStream(Rcom1,Rcom2,512); //БФР БПФ

```

Подкадр ButFFT описывает вычислительную часть структуры БПФ (см. Рис. 4).

Операция БПФ над трассой выполняется один раз. Поэтому в первом кадре все трассы проходят блок вычисления БПФ. После этого результат БПФ каждой трассы комплексно умножается на каждое ядро интегрального уравнения, обрабатывается в блоке обратного БПФ и нормируется. Количество этих кадров будет определяться числом ядер. Следует отметить, что обратное БПФ можно выполнить на том же аппаратном ресурсе, который вычисляет БПФ, просто подав на схему другие коэффициенты.

5. *Экспериментальная часть.* На Рис.5 и 6 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 на персональном компьютере в режиме обработки предварительно записанных данных. На Рис.5а, 6а - исходные радарограммы, на Рис.5б, 6б – 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 нсек и скорость волны в среде. На Рис 5а, 6а виден маскирующий эффект прямой волны в начале трасс, визуально выделить слои не удается. На Рис 5б, 6б выделены приповерхностные слои асфальта и бетона, полученные в результате решения обратной задачи и обработки изображений, верхняя горизонтальная прямая – поверхность дороги. На Рис.5 дорога не новая, которая неоднократно ремонтировалась, поэтому найдено несколько слоев. На Рис.6 - 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.

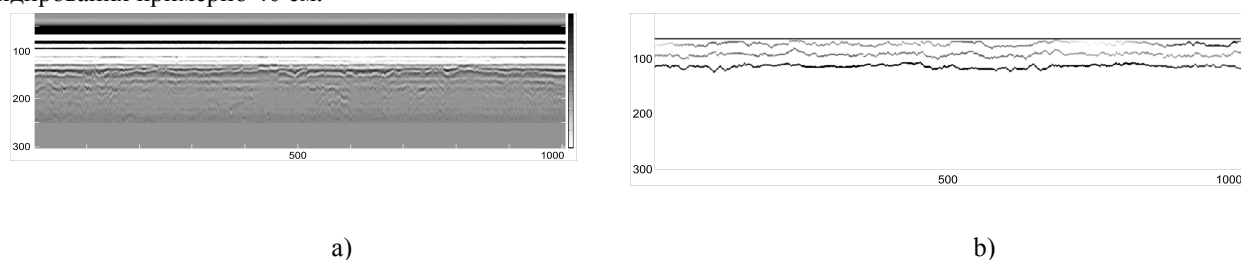


Рис.5. Исходные данные и результат решения задачи диагностики для участка старой дороги в городе длиной 50 м. а- исходная радарограмма, б – выделенные слои асфальта и бетона.

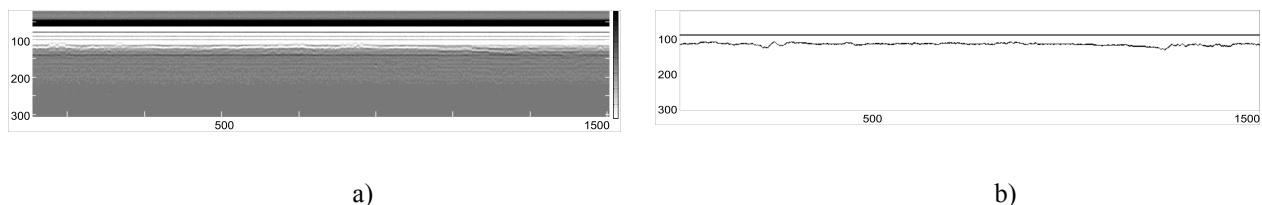


Рис.6. Исходные данные и результат решения задачи диагностики для участка новой загородной дороги длиной 75 м. а- исходная радарограмма, б – выделенный слой асфальта.

6. *Заключение.* Для задачи диагностики дорожных покрытий, имеющих слоистую структуру, был разработан методы и алгоритмы, основанные на линейной модели. Вычислительно трудоемкие модули выполнены в виде отдельных программ на языке COLAMO. Их реализация на PBC показала достаточно высокую производительность PBC, которая составила порядка 50 ГФлопс. Выигрыш по времени решения этих модулей по сравнению с обычным персональным компьютером составил около 100 раз.

Реализованные подходы использовались при зондировании электромагнитным импульсом как новых дорог, так и дорог с большим 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.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во МГУ, 2004.
2. Обследование автомобильных дорог при помощи метода георадиолокации. СПб: Мир дорог. 2004.
3. Кулижников А.М., Шабашева М.А. Георадары в дорожном строительстве. - М., 2000. - 52 с. - (Автомобильные дороги: Обзор. информ. / Информавтодор; Вып.2).
4. Liu, J., Zollinger D.G., Lytton R.L. Detection of Delamination in Concrete Pavements Using Ground-Coupled Ground-Penetrating Radar Technique, Journal of the Transportation Research Board. Transportation Research Board of the National Academies Volume 2087 / 2008, p. 68-77.
5. Cao Y., Guzina B.B., Labuz J. Pavement Evaluation Using Ground Penetrating Radar, University of Minnesota Final Report MN/RC 2008-10, 2008.

6. Mapping Asphalt Thickness with High-frequency GPR // MALA GeoScience, Application Notes. 2007. Printed Matter № 2888. [<http://www.malags.se/Downloads/Application-Notes.aspx>].
7. Овчинников С.Л., Романов С.Ю. Об обратной задаче волновой диагностики дорожных покрытий // Труды международной научной конференции “ Параллельные вычислительные технологии” (ПаВТ’2009). Нижний Новгород, 30.03.09 – 3.04.09. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. с.624-630.
8. Каляев А.В., Левин И.И. Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений. – М.: Янус-К, 2003. – 380с.
9. Tikhonov A., Goncharky A., Stepanov V., Yagola. A. Numerical methods for the solution of ill-posed problems. Dordrecht /Boston/, London: Kluwer Academic Publ., 1995.
10. Bakushinsky A.B., Goncharky A.V. Ill-posed Problems. Theory and Applications. Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 1994.
11. Введение в цифровую фильтрацию Под ред. Богнера Р., Константинодиса А. М.: Мир. 1976.