

# Решение задачи волновой диагностики дорог на суперкомпьютере



## 28 Решение задачи волновой диагностики дорог на суперкомпьютере

Работа посвящена обратной задаче диагностики дорог электромагнитным зондированием. Приведена линейная постановка задачи, разработаны методы и алгоритмы решения, в предположении слоистой структуры дорожного полотна. Показано, что предлагаемые методы обеспечивают разрешение и глубину зондирования, приемлемые для диагностики дорог. На наиболее трудоемких этапах использованы реконфигурируемые вычислительные системы на базе ПЛИС.

### АВТОРЫ:

А.В. Гончарский — зав. лабораторией, докт. физ.-мат. наук, профессор, НИВЦ МГУ им. М.В. Ломоносова, [e-mail: gonchar@srcc.msu.ru](mailto:gonchar@srcc.msu.ru)  
С.Л. Овчинников — электроник, НИВЦ МГУ им.М.В.Ломоносова, [e-mail: os@starnet.ru](mailto:os@starnet.ru)  
С.Ю. Романов — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук, НИВЦ МГУ им. М.В. Ломоносова, [e-mail: romanov@srcc.msu.ru](mailto:romanov@srcc.msu.ru)

### Введение

Расширение сети автомобильных дорог привело к ужесточению нормативных требований, предъявляемых к их безопасности, к необходимости проведения качественного и информативного обследования, совершенствованию комплексной системы мониторинга дорожного полотна. Настоящая работа посвящена разработке методов и алгоритмов решения задачи диагностики структуры дороги с помощью георадиолокационного зондирования. Для проведения расчетов на наиболее вычислительно трудоемких этапах используются реконфигурируемые вычислительные системы (PBC) на базе ПЛИС.

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. GPR является бесконтактным высокочастотным электромагнитным методом, обладающим рядом преимуществ перед другими методами. Основными преимуществами являются быстрота получения достоверной качественной информации, высокое разрешение, повсеместность применения, экологическая безопасность.

GPR основана на использовании классических физических принципов радиолокации: на свойстве радиоволн отражаться от границ раздела сред с различными диэлектрическими свойствами. При GPR обследовании дорожного полотна антенный блок георадара перемещается вдоль дороги, излучая и принимая отраженные сигналы (рис.1). Набор сменных антенных модулей обеспечивает возможность зондирования в большом диапазоне частот (16 – 2000 МГц). Повышение частоты зондирования приводит к улучшению разрешающей способности, но к уменьшению глубины зондирования. Для используемых антенн с центральными частотами 1,5 ГГц, 900 МГц и 500 МГц максимальная глубина зондирования составляет до нескольких метров, максимальное разрешение до 10 см.

Исследования по использованию георадаров для диагностики дорожного полотна ведутся как в нашей стране, так и за рубежом (Geophysical Survey Systems, Inc, США; Sensors & Software, Канада; MALA GeoScience AB, Швеция). Как правило, сохраненные радарограммы дают лишь качественную картину плохого разрешения состояния дороги, и только специалист, причем лишь очень приблизительно, может понять структуру исследуемого дорожного покрытия. В настоящем проекте радарограммы являются лишь исходными данными для дальнейшей математической обработки и интерпретации собранных данных на суперкомпьютерах, что позволит оперативно получать количественную диагностическую информацию с изображением высокого разрешения. Объемы обрабатываемых данных огромны, кроме того, представляет интерес обрабатывать в реальном времени (в on-line

режиме) интенсивный поток поступающих данных. Это накладывает жесткие требования на эффективность используемых алгоритмов, программ и вычислительных систем. В рассматриваемой задаче реализация вычислительно трудоемких частей выполнена на реконфигурируемой вычислительной системе с применением языка COLAMO.

По результатам обработки ставится задача обнаружения конструктивных слоев дорожной одежды и определения их толщин, обнаружение скрытых крупных дорожных разрушений, потенциально приводящих к крупным автомобильным авариям.

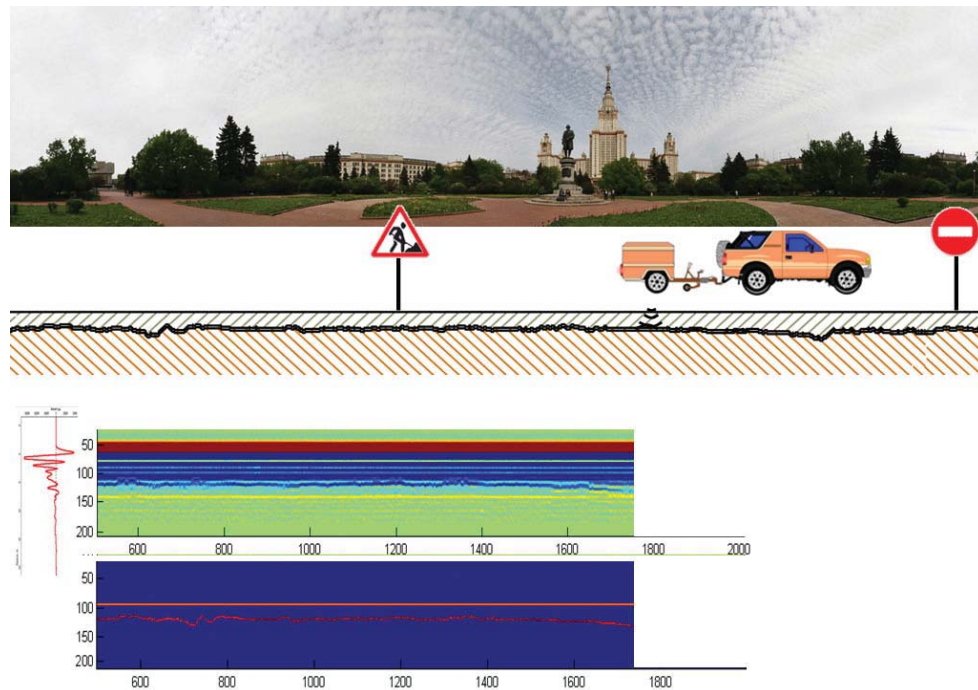


Рис. 1. Георадиолокация и контроль качества дорожного полотна

### Математическая постановка и методы решения

В рамках волновой модели соотношение между искомой слоистой структурой дорожного полотна и входными данными (радарограммой) имеет вид уравнения Фредгольма 1-го рода:

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

где  $u(x,t)$  — радарограмма,  $A(t-z)$  — функция отражения от границы и  $f(t)$  — прямая волна,  $p_1, p_2$  — нелинейные параметры, а  $K$  — линейный,  $k(x,z)$  — описывает структуру дороги.

В обратной задаче диагностики дорожных покрытий требуется найти функцию коэффициента отражения  $k(x,z)$  при неизвестных параметрах  $K, p_1, p_2$ . Как показали результаты экспериментов, зарегистрированные отраженные данные не могут быть явно интерпретированы как структура дорожного полотна (что видно из рис.2). Поэтому требуется решать обратную некорректно поставленную задачу (1), используя регуляризующие алгоритмы [1]. Такие факторы, как: 1) большая длительность и амплитуда прямого сигнала; 2) дисперсия импульса в среде; 3) сильное затухание импульса при прохождении в среде и отражении от границ — приводят к дополнительным серьезным проблемам при решении обратной задачи.

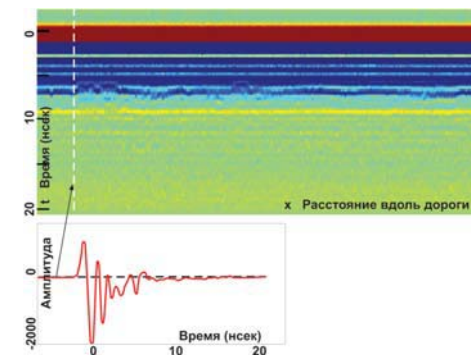


Рис. 2. Первичные зарегистрированные данные зондирования дорожного покрытия

Условно можно выделить несколько основных этапов обработки GPR данных [2]. Наиболее вычислительно трудоемкими (до 80—90% времени) являются этапы вычитания прямого сигнала и обращения интегрального уравнения, что связано с перебором по нелинейным параметрам. Эти этапы реализованы на многопроцессорной вычислительной системе с реконфигурируемой архитектурой (PBC) в виде отдельных программ на языке COLAMO [3]. COLAMO представляет собой высокоуровневый язык для PBC, который дает возможность максимально просто описывать различные виды параллелизма в сжатом виде. PBC включала в себя два базовых модуля «Алькор» (по 16 ПЛИС Virtex-5).

При реализации программы на PBC было проведено глубокое распараллеливание, в том числе за счет конвейеризации. При этом использовался комбинированный вариант: несколько порций данных обрабатываются параллельно, причем для каждой делается сразу несколько шагов по перебору параметра.

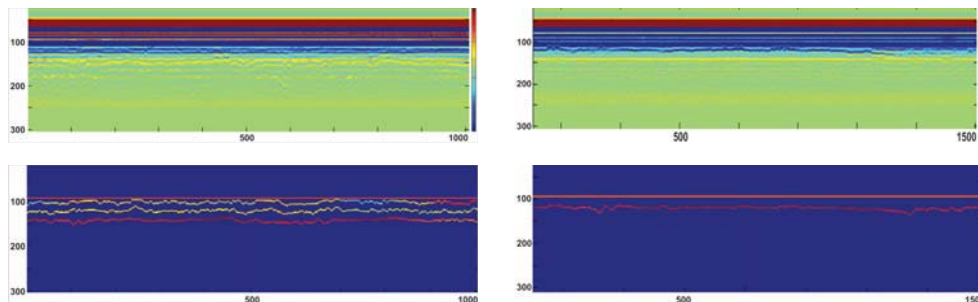
### Экспериментальная часть

Был разработан мобильный комплекс по зондированию дорог (рис.3) на базе серийно выпускаемых георадаров.



**Рис. 3.**  
Экспериментальный мобильный комплекс для зондирования дорог

На рис. 4а, 5а изображены исходные данные (радарограммы), полученные в ходе зондирования двух участков дорожного полотна длиной 50 м и 75 м на частоте 1,5 Мгц, на рис. 4б, 5б — результаты выделения границы. По горизонтали отложены номера трасс вдоль дороги. По вертикали — номер отсчета (в глубину). На рис. 4а, 5а виден маскирующий эффект прямой волны, визуально выделить слои не удастся. На Рис 4б, 5б выделены приповерхностные слои асфальта и бетона, верхняя горизонтальная прямая — поверхность дороги. На рис.4 дорога не новая, которая неоднократно ремонтировалась, поэтому найдено несколько слоев. На рис.5 — новая загородная дорога, состоящая из одного слоя асфальта толщиной 12—15 см. Более светлые участки линий соответствуют границам, выделенным с меньшим уровнем достоверности.



**Рис. 4.**  
Рис. 5.  
Результаты исследования старой (4а, б) и новой (5а, б) дорог с помощью разработанной технологии

### Заключение

Для диагностики дорог со слоистой структурой были разработаны методы и алгоритмы, основанные на линейной модели. Предлагаемые методы обеспечивают разрешение 8—10 см, точность ~2 см и глубину около 0,5—1 м. Использование РВС на трудоемких этапах вычислений позволяет получить выигрыш на этих этапах от 100 до 200 раз, достигнута производительность РВС до 90 ГФлопс, что составляет около 75% от пиковой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tikhonov A., Goncharsky A., Stepanov V., Yagola. A.* Numerical methods for the solution of ill-posed problems. Dordrecht /Boston/, London: Kluwer Academic Publ., 1995.
2. *Гончарский А.В., Овчинников С.Л., Романов С.Ю.* Обратные задачи волновой диагностики дорожного полотна // Вычислительные методы и программирование. Т.10, 2009. С. 275—280.
3. *Коваленко А.Г., Овчинников С.Л., Романов С.Ю.* Решение обратной задачи диагностики дорог на реконфигурируемой вычислительной системе с применением языка COLAMO — Труды Всероссийской Суперкомпьютерной конференции «Научный сервис в сети ИНТЕРНЕТ: масштабируемость, параллельность, эффективность. М.: Изд-во МГУ. 2009. С. 217—223.