

# Генетические алгоритмы решения обратных задач электромагнитного зондирования\*

В.В. Пересветов

Представлены результаты применения генетических алгоритмов для решения обратных задач электромагнитного зондирования в слоистых средах с двумерно-неоднородными включениями. Разработанные алгоритмы допускают решение с высокой степенью масштабируемости рассматриваемых задач на вычислительных кластерах и распределенных вычислительных системах.

## 1. Введение

В настоящее время актуальным направлением исследований является разработка численных алгоритмов, позволяющих эффективное решение поставленных задач на вычислительных кластерах и распределенных вычислительных системах, включая GRID.

В докладе рассматриваются коэффициентные обратные задачи электромагнитного зондирования, в которых ищутся значения электрических параметров среды распространения электромагнитных волн.

В большинстве случаев алгоритмы решения обратных задач могут иметь эффективные параллельные реализации. В настоящей работе для решения рассматриваемых задач применяются генетические алгоритмы (ГА), позволяющие находить глобальные экстремумы многоэкстремальных негладких функций. При создании параллельных вариантов ГА используется технология MPI.

## 2. Алгоритмы решения обратных задач

При выборе методов и алгоритмов решения обратных задач электромагнитного зондирования следует учитывать следующее.

1. Пространственная структура и физические параметры геологических пород под поверхностью земли могут быть описаны слоистой структурой или другой более сложной только приближенно.

2. Экспериментальные данные измерения электромагнитных полей, используемые при решении обратных задач, обычно имеют существенные погрешности, связанные с естественным электромагнитным фоном и погрешностями настраиваемой в полевых условиях измерительной аппаратуры.

Постановка прямых и обратных задач геофизики дана в [1]. Для решения обратных задач геофизики, связанных с исследованием электромагнитных полей, используются различные подходы, среди которых — ГА. Например, в работе [2] рассматривались ГА решения обратной задачи для магнитотеллурических полей — электромагнитных полей естественного происхождения, в которых источником поля является вертикально падающая плоская волна.

Обратная задача электромагнитного зондирования может быть сформулирована как поиск экстремума функции невязки:

$$\inf_{\kappa \in X_c} \|\mathbf{F} - \mathbf{F}_e\|, \quad (1)$$

где вектор-функция электромагнитного поля  $\mathbf{F} = (E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z)$  — решение прямой задачи,  $\mathbf{F}_e$  — экспериментальные значения электромагнитного поля,  $\kappa$  — решение обратной задачи (материальные и геометрические параметры среды),  $X_c$  — компактное множество возможных решений [1]. Теоремы единственности решения обратных задач доказываются для определенных классов моделей среды и источников [1].

Задачи численного моделирования трехмерных электромагнитных полей в двумерно-неоднородных средах возникают при интерпретации данных электромагнитных зондирований в геофизике.

\*Работа поддержана грантом ДВО РАН 06-III-A-01-002.

В таких задачах существует направление в пространстве, вдоль которого характеристики среды не меняются.

Электромагнитное поле в плоскостой среде с неоднородностями можно представить в виде суммы первичного (нормального) и вторичного (аномального) полей:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^p + \mathbf{E}^s, \quad \mathbf{H} = \mathbf{H}^p + \mathbf{H}^s, \quad (2)$$

где  $\mathbf{E}^p, \mathbf{H}^p$  — первичное поле заданных источников в плоскостой среде;  $\mathbf{E}^s, \mathbf{H}^s$  — вторичное поле, обусловленное присутствием 2-D включения. Источниками электромагнитного поля в рассматриваемых задачах являются магнитный или электрический диполь.

Прямая задача нахождения электромагнитного поля разбивается на две задачи. Первая прямая задача — найти первичное поле  $\mathbf{E}^p, \mathbf{H}^p$  заданных источников в плоскостой среде. Алгоритмы ее решения осуществляются методом интегральных преобразований и основаны на фундаментальных решениях системы Максвелла для горизонтально-слоистых сред (описание алгоритмов дано в [4]).

Вторая прямая задача — задача нахождения вторичного трехмерного электромагнитного поля  $\mathbf{E}^s, \mathbf{H}^s$  в двумерно-неоднородной среде. Преобразованием Фурье исходные пространственные задачи сводятся к наборам двумерных задач со спектральным параметром, которые решаются методом конечных элементов (описание численного решения второй задачи дано в [3]).

Здесь рассматриваются ГА решения обратных задач, основанных на решении описанных выше прямых задач: обратной задачи для плоскостой среды и обратной задачи для полного поля (2) в двумерно-неоднородных средах.

Условия единственности обратных задач в докладе не рассматриваются. Однако заметим, что доказательство единственности решения второй обратной задачи может быть сведено к доказательству единственности обратной двумерной задачи со спектральным параметром. Это следует из того, что решение второй задачи сводится к сумме решений двумерных задач со спектральным параметром [3].

Задача глобальной оптимизации с использованием ГА позволяет находить несколько экстремумов для заданного уровня погрешности, что иногда является необходимым при решении обратных задач, которые являются некорректными задачами.

ГА имеют высокий потенциал распараллеливания. Поэтому большие вычислительные затраты при их реализации могут быть скомпенсированы разработкой и настройкой специальных параллельных вариантов алгоритмов, допускающих эффективное решение не только на вычислительных кластерах, но и на распределенных вычислительных системах, реализованных в GRID-сетях.

### 3. Программная реализация алгоритмов

При создании программы решения обратной задачи электромагнитного зондирования использована программа РИКАИА [5] поиска глобального экстремума с помощью ГА. Так как данная программа предназначена для работы на компьютерах с последовательной архитектурой, был создан параллельный вариант этой программы с использованием технологии MPI для режима работы программы: reproduction plan=1 (Full generational replacement).

В программе РИКАИА реализован классический вариант ГА. В ней используются стандартные генетические операции: одноточечные скрещивания, одноточечные мутации (зависящие или независящие от функции соответствия). Может использоваться элитизм (сохранение части лучших особей). При отборе особей применяется широко используемый алгоритм колеса рулетки (roulette wheel). Хромосома состоит из генов, для каждой неизвестной переменной может быть выделено до 6 генов. Максимальное количество неизвестных переменных: 32. Для построения генов используется не двоичный код, а десятичный. При мутации выбранная случайным образом цифра заменяется другой со случайным значением в диапазоне от 0 до 9.

Возможность распараллеливания алгоритмов решения обратной задачи основана на том,

что вычисление функции соответствия, включающей вычисление невязки результатов решения прямой задачи и заданных значений электромагнитного поля, может быть выполнено независимо для особей (хромосом) в популяции на каждом шаге эволюционного процесса (поколении).

Разработанный параллельный алгоритм решения зависит от количества доступных процессов. При запуске программы на выполнение указывается число процессов  $N_{pr}$ , которое должно быть выделено.

Операции межпроцессорных сообщений выполняются с помощью стандартных двухточечных обменов по следующему алгоритму:

1. При выполнении программы в начале определяется значение  $N_{pr}$  — доступное число процессов.

2. Если  $N_{pr} > N_{pop}$  (где  $N_{pop}$  — заданный размер популяции), то размер популяции увеличивается:  $N_{pop} := N_{pr}$ .

3. Если  $N_{pr} = N_{pop}$ , то все подзадачи вычисления функции соответствия сразу распределяются по всем процессам.

4. Если  $N_{pr} < N_{pop}$ , то подзадачи вычисления функции соответствия последовательно распределяются по выделенным процессам: как только какой-либо процесс завершает решение прямой задачи с вычислением функции соответствия, ему отправляется новый вариант.

В рассматриваемых задачах объем данных в межпроцессорных обменах незначителен: несколько вещественных чисел (значения неизвестных параметров среды) и одно вещественное число — результат вычисления функции соответствия.

В описанном алгоритме в случае  $N_{pr} < N_{pop}$ , который является типичным, более производительные процессоры с небольшими задержками на передачу данных будут рассчитывать функции соответствия для большего числа хромосом. Предложенный алгоритм позволяет решать поставленную задачу не только на вычислительном кластере с однородной структурой узлов, но и реализовать в некоторой степени сбалансированную нагрузку на имеющиеся процессы при выполнении программы в распределенных гетерогенных вычислительных системах, включая GRID-сети.

## 4. Результаты вычислительных экспериментов

На рис. 1 показаны: параметры слоистой среды, двумерно-неоднородное включение прямоугольного сечения, вертикальный магнитный диполь  $M$ . Значения удельных сопротивлений  $\rho$  и расстояний даны в Ом·м и м, диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = 9\varepsilon_0$ . Рассматриваемая модель типична для веерного варианта межскважинного метода радиоволнового просвечивания.

Часто задачу зондирования, которая относится к основным задачам структурной геофизики, используют в модели слоистых сред [1]. Этот тип среды достаточно часто встречается на практике, потому алгоритмы решения обратной задачи (1) для слоистых сред представляют значительный интерес. Приведем результаты решения тестовой обратной задачи зондирования для модели трехслойной среды. Первичное поле находилось с помощью программы вычисления электромагнитного поля произвольно ориентированного дипольного источника в слоистой среде, алгоритмы которой описаны в [4].

При решении тестовой обратной коэффициентной задачи неизвестными величинами являются 5 параметров среды:

$P_1 = \rho_1$  (удельное сопротивление верхнего полупространства),

$P_2 = \rho_2$  (удельное сопротивление промежуточного слоя),

$P_3 = \rho_3$  (удельное сопротивление нижнего полупространства),

$P_4 = z_1$  (граница раздела между верхним полупространством и промежуточным слоем),

$P_5 = z_2$  (граница раздела между промежуточным слоем и нижним полупространством).

Значения поля сравнивались на вертикальном профиле  $x = 0, y = 40, z = -50, -40, \dots, 140$ . Для данного варианта обратной задачи достаточно одной частоты излучения диполя, в рас-

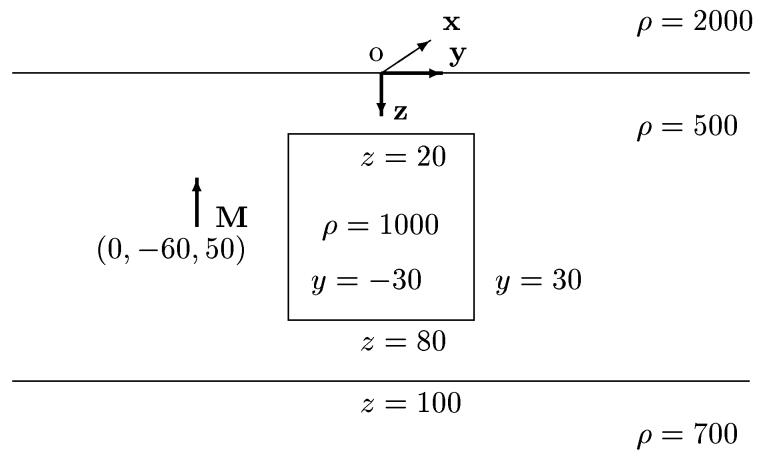


Рис. 1. Включение в трехслойной среде

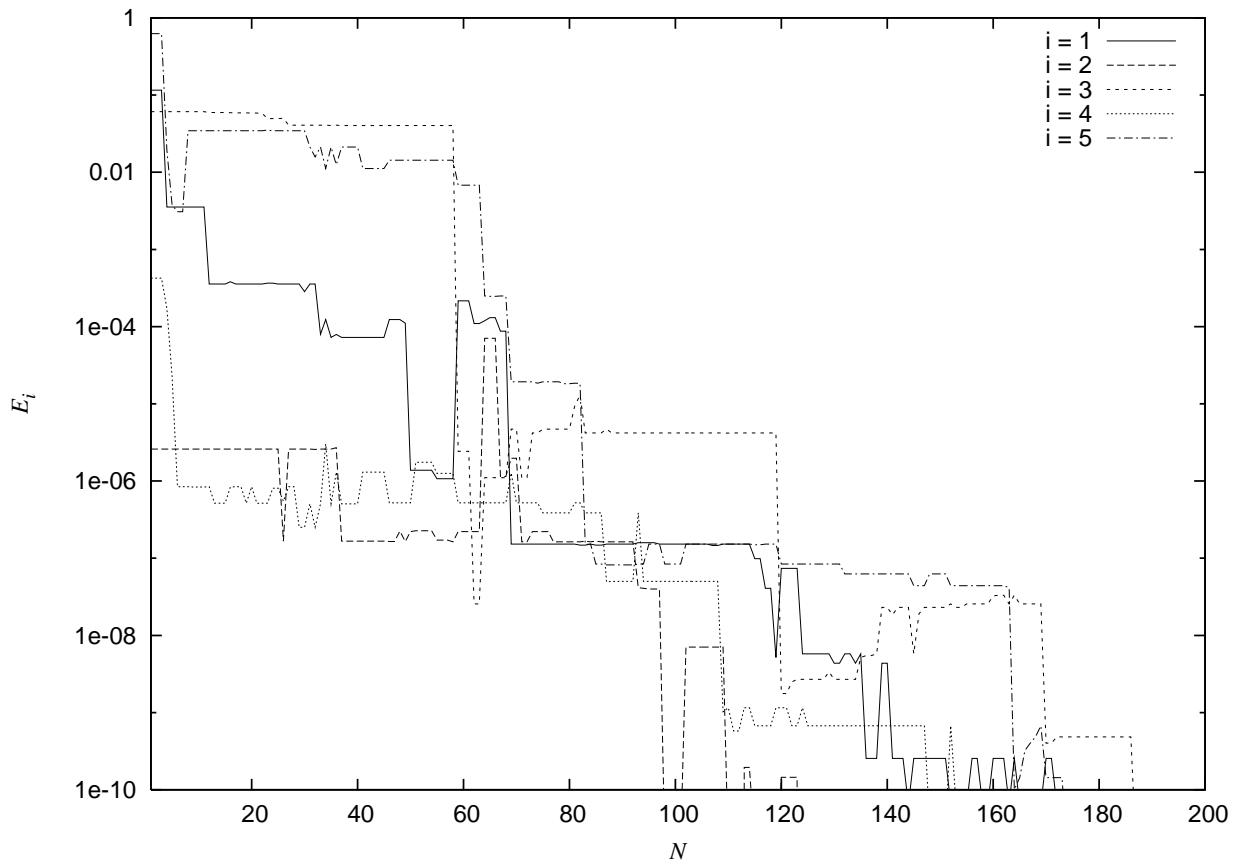


Рис. 2. Погрешности  $E_i$  решения тестовой обратной задачи в зависимости от номера поколения  $N$ .

четах использовалось значение 0.2 МГц.

На рис. 2 показаны результаты сходимости решения к точным значениям  $P_{ie}$ , которые даны на рис. 1. Для сопоставления результатов на одном графике по оси ординат отложены величины относительной ошибки  $E_i$ :

$$E_i = \frac{(P_i - P_{ie})^2}{P_{ie}^2}, i = 1, 2, 3, 5; \quad E_4 = \frac{(P_4 - P_{4e})^2}{P_{5e}^2}.$$

Для приведенных на рис. 2 результатов расчетов сходимости параметры ГА были следующими.

Число особей в популяции: 100.

Число значащих цифр (число генов): 6.

Вероятность скрещивания (crossover probability): 0.85.

Способ применения генетической операции мутации: одноточечный, регулируемый функцией соответствия (mutation mode = 2, one-point, adjustable rate based on fitness).

Начальный уровень мутаций (initial mutation rate), минимальный и максимальный уровни мутаций были заданы значениями 0.01, 0.001, 0.5.

Элитизм: не использовался (elitism flag = 0).

Были также проведены численные эксперименты с 2-D включением (модель показана на рис. 1). Данная обратная задача может быть отнесена к виду обратных задач поиска объекта с оценкой его параметров [1]. Число неизвестных параметров было уже 10 (еще четыре границы и одно значение удельного сопротивления включения  $\rho$ ). Для данного варианта обратной задачи использовался набор частот излучения магнитного диполя. Скорость сходимости решения обратной задачи к точному была значительно ниже, чем в случае слоистой среды. Также выявлено, что сходимость становится более чувствительной к параметрам ГА и иногда процесс решения надолго задерживается в точках локальных экстремумов.

## 5. Заключение

ГА позволяют находить решение обратных задач электромагнитного зондирования с приемлемой точностью. Численные эксперименты показали, что скорость сходимости решения обратных задач существенно зависит от заданных параметров ГА.

Разработана параллельная реализация алгоритмов решения обратных задач электромагнитного зондирования с использованием ГА для GRID-сетей.

## Литература

1. Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике: Справочник геофизика/ Под. ред. В. И. Дмитриева., -М.: Недра, 1990. 498с.
2. Jinlian Wang, Yongji Tan. 2-D MT Inversion Using Genetic Algorithm// Second International Conference on Inverse Problems. Institute of Physics Publishing. Journal of Physics. Conference Series. N 12. -2005. -P. 165-170.
3. Пересветов В.В., Смагин С.И. Моделирование трехмерных электромагнитных полей в двумерно-неоднородных средах // Математическое моделирование. т. 16, N 8, 2004. -С. 39-49.
4. Мазалов В.Н., Пересветов В.В., Смагин С.И. Моделирование электромагнитных полей в слоистых средах с включениями. -Владивосток: Дальнаука, 2000. 292с.
5. PIKAIA. A genetic algorithm-based optimization subroutine: [<http://download.hao.ucar.edu/archive/pikaia/>], 2002.