

P048

Modified Focusing Inversion of Electrical and TEM Data

A.E. Kaminsky* (Geologorazvedka enterprise) & A.V. Tarasov (SOLITON-NTT)

SUMMARY

We have modified a focusing inversion for electrical and TEM data. The new inversion has been successfully tested on synthetic models. We have demonstrated that modified focusing inversion generates clearer and more focused images for complicated resistivity structures, which can contain inclined boundary.

Модифицированная фокусирующая инверсия данных наземной электроразведки

Каминский¹ А.Е, Тарасов² А.В.

¹ ФГУНПП «Геологоразведка», ул. Книпович., д. 11 корп.2, Санкт-Петербург, 193019, Россия

² «СОЛИТОН-НТТ» научно-производственный центр, ул. Краснобогатырская., д. 44, Москва, 107076, Россия

Введение

Основной задачей инверсии геофизической данных является получение устойчивого решения, которое отражает реальное распределение физического параметра в геологической среде. Как известно, регуляризация обратной задачи позволяет существенно повысить ее устойчивость. Регуляризация определяется наложением определенных условий на получаемое решение. В основном, используют условие максимальной гладкости решения и минимального расхождения с априорной моделью. В этом случае пространственное распределение параметра оказывается сильно размытым, только в общих чертах отражающим реальную структуру, что вызывает трудности при дальнейшей геологической интерпретации геофизических данных. В последнее время появилось несколько работ посвященной данной проблеме [Portniaguine and Zhdanov, 1999; Zhang et al, 2000]. В этих работах был предложен эффективный метод повышения контрастности и разрешения геофизических моделей, который получил название фокусирующей инверсии. Мы несколько модифицировали фокусирующую инверсию и опробовали модифицированный алгоритм на данных наземной электроразведки методами электрической томографии и переходных процессов (МПП).

Инверсия

В нашей фокусирующей инверсии мы использовали метод Гаусса-Ньютона для поиска минимума функционала обобщенной невязки, в котором на каждой итерации решается следующая система линейных уравнений:

$$\left(\mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \mathbf{J} + \mu \mathbf{C}^T \mathbf{R} \mathbf{C} \right) \Delta \mathbf{m} = \mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \Delta \mathbf{d} - \mu \mathbf{C}^T \mathbf{R} \mathbf{C} (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0), \quad (1)$$

где \mathbf{J} – якобиан по параметрам разреза, \mathbf{C} – сглаживающая матрица, минимизирующая первую или вторую пространственную производную по параметрам разреза, \mathbf{W}_d – матрица относительных погрешностей измерений, \mathbf{m} – вектор параметров разреза, \mathbf{m}_0 – вектор параметров референтной модели, $\Delta \mathbf{m}$ – вектор добавок к модели на предыдущей итерации, μ – регуляризирующий параметр, $\Delta \mathbf{d}$ – вектор невязок между наблюдаемыми и рассчитанными значениями и \mathbf{R} – фокусирующая матрица.

На каждой итерации инверсионного процесса фокусирующая матрица \mathbf{R} изменяется по следующей формуле:

$$R_{i,i} = \frac{\varepsilon^2}{x_i^2 + \varepsilon^2}, \quad \mathbf{x} = \mathbf{C} \cdot (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0), \quad (2)$$

где ε – параметр фокусировки, представляющий пороговое значение контрастности, по достижению которого, параметры соседних элементов модели перестают осредняться между собой.

Для 2D инверсии мы разделили оператор $\mathbf{C}^T \mathbf{R} \mathbf{C}$ на восемь компонент:

$$\mathbf{C}^T \mathbf{R} \mathbf{C} = \sum_{i=1}^8 \alpha_i \mathbf{C}_i^T \mathbf{R}_i \mathbf{C}_i, \quad (3)$$

где i – индекс направления осреднения элементов модели, 1 – горизонтальное направление справа налево, 2 – горизонтальное направление слева на право, 3 – вертикальное направление сверху вниз, 4 – вертикальное направление снизу вверх, 5-8 – две пары диагональных направлений, α_i – веса компонент осреднения.

Введение восьмикомпонентного фокусирующего оператора позволяет улучшить разрешающую способность алгоритма и получить сфокусированные модели с наклонными границами. Выбирая различные значения весов α_i , можно задать приоритетное направление фокусировки.

Результат инверсии сильно зависит от выбора референтной модели \mathbf{m}_0 . Для улучшения разрешения инверсии при итерационном процессе в качестве \mathbf{m}_0 обычно используют модель, полученную на предыдущей итерации или осредненную модель. В нашем алгоритме мы при задании \mathbf{m}_0 на каждой итерации использовали медианное осреднение в заданном окне, что стабилизирует решение, но не ухудшает разрешение.

Описанный алгоритм модифицированной фокусирующей инверсии был реализован в программах интерпретации данных электроразведки **ZONDRES2D** и **TEMIMAGE** и опробован на синтетических моделях и полевых примерах.

Тестирование

Первым шагом мы протестировали алгоритм модифицированной фокусировки на одномерной модели. Одномерная инверсия еще довольно широко используется при инверсии данных ЭМ методов и в частности МПП. Обычно используют алгоритмы многопараметрического подбора, в которых подбираются как удельное сопротивление слоев, так и мощности слоев. При этом результат инверсии сильно зависит от опыта интерпретатора и его априорных знаний о геологическом разрезе. Как минимум, необходимо знать количество слоев при задании начальной модели. Альтернативным подходом является разбиение разреза на большое количество слоев, от 50 до 100, фиксированной мощности и подбор только удельного сопротивления. Использование общепринятых подходов к регуляризации оптимизационной задачи приводит к гладкому распределению удельного сопротивления по глубине. Этого может быть достаточно для предварительной оценки структуры геоэлектрического разреза, но для окончательной геологической интерпретации требуются точные границы. Использование фокусирующего стабилизатора позволяет из гладкого распределения удельного сопротивления получить кусочно-постоянное распределение. Затем области постоянного удельного сопротивления могут быть объединены в один слой. Последовательное укрупнение модели приводит к ускорению поиска и позволяет получить более стабильное решение.

На рис. 1 приведено сравнение результатов гладкой инверсии и фокусирующей инверсии. Для инверсии были использованы на данные МПП с установкой совмещенных петель, рассчитанные над пятислойной моделью. В обоих случаях среда разбивалась 100 слоев, которые были распределены с равномерным логарифмическим шагом в интервале глубин от 1 м до 1000 м. Из рисунка видно, что модель, полученная с помощью фокусирующей инверсии, намного лучше отражает истинное распределение сопротивления.

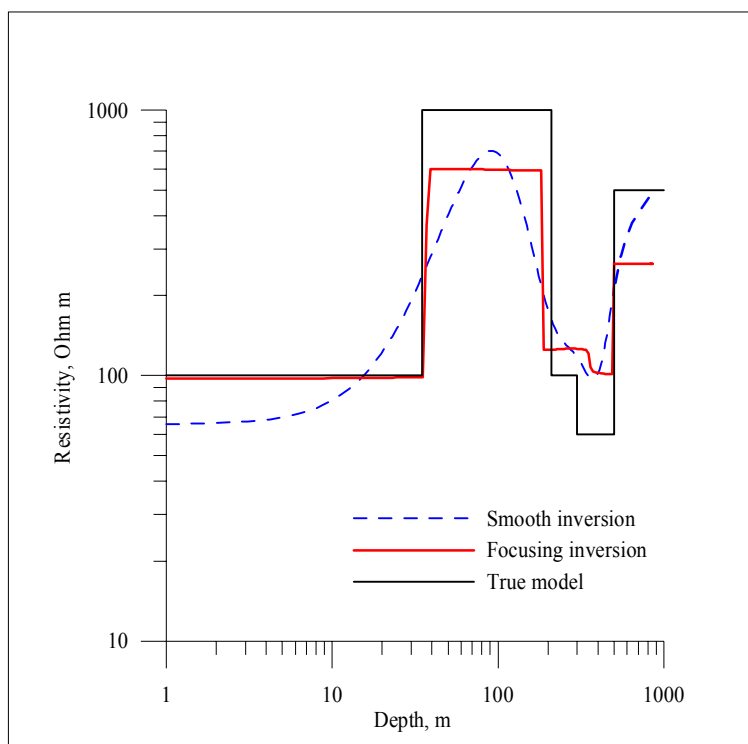


Рис. 1. Тестирование фокусирующей одномерной инверсии на синтетических данных МПП.

На втором этапе мы опробовали модифицированную фокусирующую инверсию на двухмерных моделях.

В качестве первого примера 2D фокусирующей инверсии приводится интерпретация профильных данных МПП.

Надо отметить, что до недавнего времени использование 2D и 3D моделей при интерпретации МПП было сильно ограничено сложностью и ресурсоемкостью прямой задачи, особенно во временной области. С появления быстрых и достаточно точных алгоритмов ЭМ моделирования, таких как расширенная борновская аппроксимация, квазилинейная и квазианалитическая аппроксимации решения интегральных уравнений [Zhdanov and Fang, 1996a,b; Zhdanov, and Fang, 2000], стало возможным создание быстрых алгоритмов 2D и 3D инверсии.

При создании нашего алгоритма 2D инверсии данных МПП мы использовали быстрое решение прямой задачи, квазианалитическую аппроксимацию решения интегральных уравнений, которая удовлетворительно работает в средах с контрастом удельного сопротивления менее 50.

На рис.2(с) приведен результат опробования алгоритма 2D модифицированной фокусирующей инверсии на синтетической модели. Модель, полученная при работе стандартной гладкой инверсии, изображена на рис.2(в).

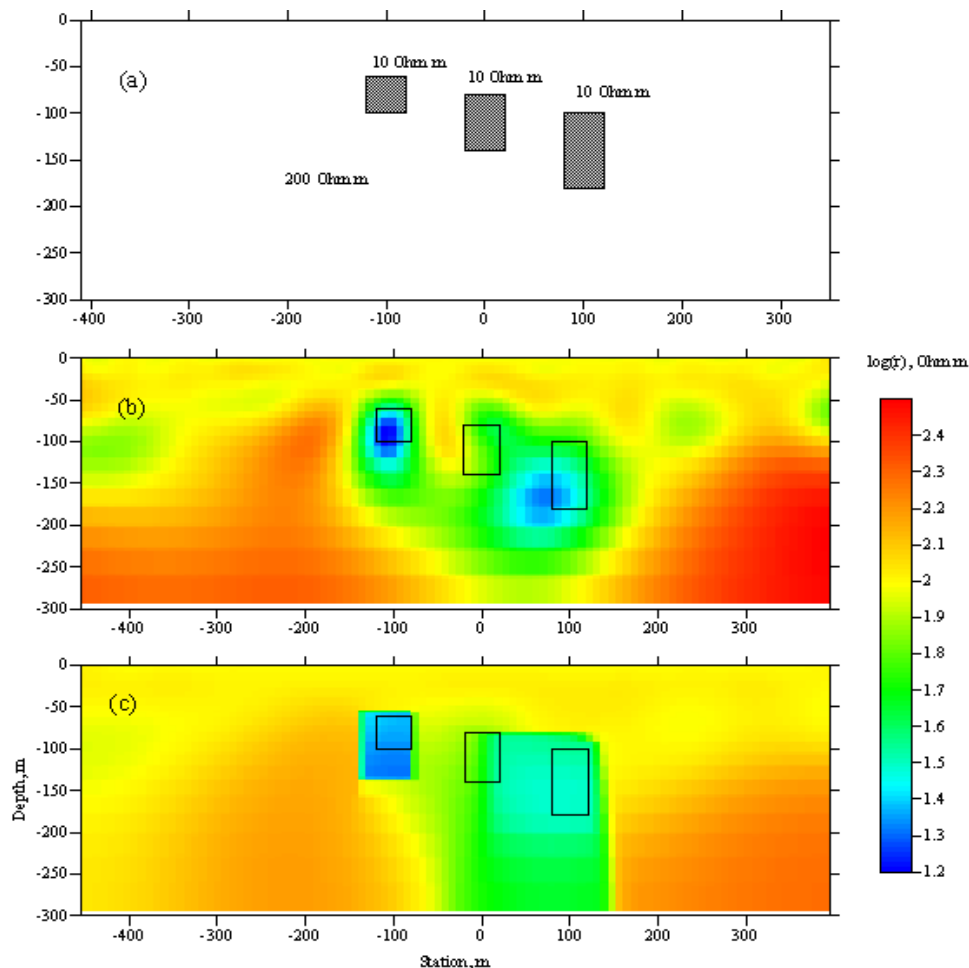


Рис. 2. Тестирование модифицированной фокусирующей 2D инверсии на синтетических данных МПП
(а) истинная модель; (б) – гладкая инверсия; (с) – фокусирующая инверсия.

Модель, полученная в результате 2D модифицированной фокусирующей инверсии, достаточно четко дает верхние кромки локальных объектов, но при этом падает разрешение с глубиной и соседние блоки сливаются в один.

Наиболее яркие результаты 2D модифицированной фокусирующей инверсии дала при опробовании на данных электрической томографии. Была задана сложная модель (рис.3(а)), для которой с помощью метода конечных элементов были рассчитаны данные диполь-дипольной установки. На данные был наложен пятипроцентный нормальный шум. Затем были выполнены стандартная гладкая инверсия и модифицированная фокусирующая инверсия. Модели, полученные с помощью двух алгоритмов, представлены на рис.3(б,с). Из рис.3(с) видно, что модель, полученная с помощью модифицированной фокусирующей инверсии с большой точностью совпадает с истинной моделью.

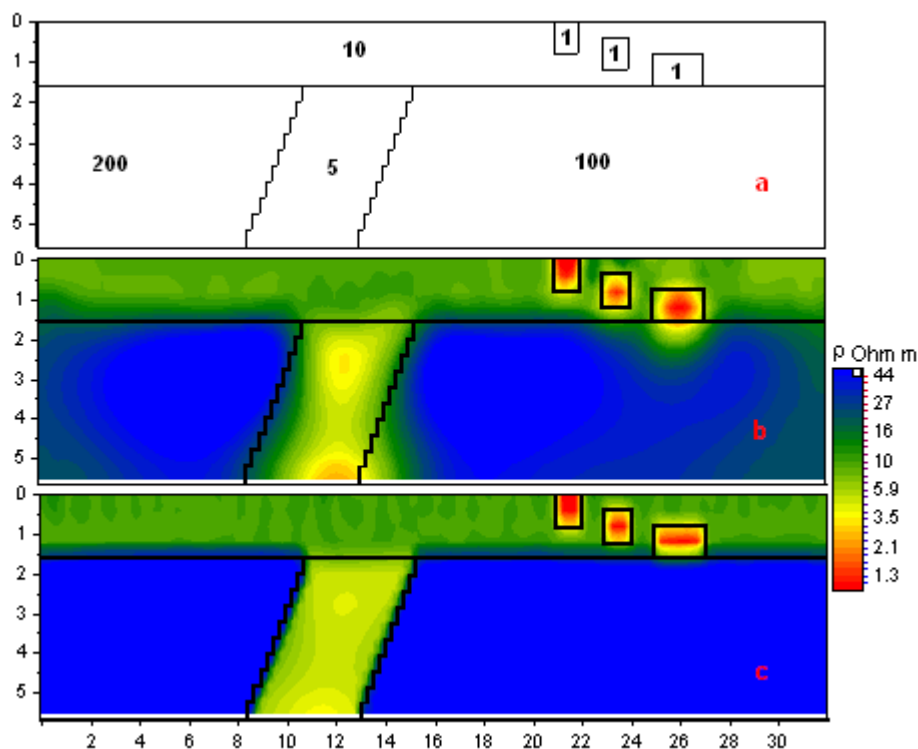


Рис. 3. Тестирование модифицированной фокусирующей 2D инверсии на синтетических данных электрической томографии.

(а) истинная модель; (b) – гладкая инверсия; (с) – фокусирующая инверсия.

Выводы

Результаты работы свидетельствуют, что модифицированная фокусирующая инверсия позволяет получить значительно более реалистичные геоэлектрические модели в сравнении с общепринятой гладкой инверсией. Модифицированная фокусирующая инверсия позволяет укрупнять области поиска, что приводит к дополнительной стабилизации решения без потери разрешения. Опробование алгоритма инверсии на данных электрической томографии и данных метода переходных процессов показало, что предложенная модифицированная фокусирующая инверсия может служить эффективным инструментом при интерпретации электроразведочных данных.

Литература

- Zhdanov, M. S., and Fang, S., 1996a, Quasi-linear approximation in 3-D EM modeling *Geophysics*, 61, p. 646–665.
- Zhdanov M.S, Dmitriev V.I., Fang, S, and Hursan G, 2000, Quasi-analytical approximations and series in electromagnetic modeling, *Geophysics*, vol. 65, no. 6, p. 1746–1757.
- Portniaguine, O., and Zhdanov, M.S., 1999, Focusing geophysical inversion images: *Geophysics*, 64, p. 874–887.
- Zhiyi Zhang, Raghu K. Chunduru, and Michael A. Jervis, 2000, Determining bed boundaries from inversion of EM logging data using general measures of model structure and data misfit, *Geophysics*, vol. 65, no.1, p. 76–82.