БЫСТРАЯ ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ РАЗНОВЫСОТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С БПЛА НА ПРИМЕРЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ С УЧЕТОМ РЕЛЬЕФА

М.А. Максимов^{1,3}, И.В. Суролина^{1,2}, В.Н. Глинских^{1,3}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 6, Россия,

³Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия,
e-mail: MaksimovMA@ipgg.sbras.ru

Реализован высокопроизводительный алгоритм инверсии данных для беспилотного магнитометрического комплекса. Приведены результаты тестирования разработанного алгоритма томографической инверсии данных разнорысотной магнитной съемки. Показаны результаты расчетов для тестовой модели с магнитным объектом в виде цилиндра конечной высоты. Сформулированы рекомендации по применению метода для инверсии реально наблюдаемых данных.

БПЛА, магниторазведка, инверсия, томография

FAST INVERSION OF UAV MAGNETIC FIELD DATA ON THE EXAMPLE OF SYNTHETIC MODELS WITH THE TOPOGRAPHY

M.A. Maksimov^{1,3}, I.V. Surodina^{1,2}, V.N. Glinskikh^{1,3}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Koptug Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Lavrentiev Avenue, 6, Novosibirsk, 630090, Russia,

³Novosibirsk State University, Pirogova Str., 2, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: MaksimovMA@ipgg.sbras.ru

High-performance algorithm for an unmanned magnetometer complex data inversion is proposed. We provide numerical tests for tomographic inversion of data for the different-height magnetic surveying. We show the results of calculations for a test model with a magnetic object in the form of a cylinder of finite height. We propose the recommendations for the method application for the inversion of the observed data.

UAV, magnetic survey, inversion, tomography

ВВЕДЕНИЕ

Магниторазведка – один из наиболее распространенных методов разведочной геофизики. При необходимости выполнения магнитной съемки в удаленных районах со сложным рельефом оптимальной является многоуровневая съемка с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Это оборудование позволяет проводить быстрые высокоточные измерения магнитного поля на различных высотах, что дает возможность с приемлемой достоверностью определять параметры геологических объектов, таких как рудные тела, кимберлитовые трубки, а также решать задачи археологии [Эпов и др., 2016].

При разведочных работах, когда нет возможности полноценной связи с компьютерными центрами, встает вопрос необходимости расчетов предварительных результатов инверсии данных с целью определения перспективных участков для более детального исследования, выделения основных аномалий магнитной восприимчивости и оценки их уровня. Для этого необходим быстрый алгоритм инверсии магнитометрических данных с БПЛА, работающий на мобильных платформах, учитывающий рельеф и априорные данные.

Непосредственно вопросами использования различных математических методов для решения интерпретационных задач магниторазведки занимались, в частности, Ю.И. Блох [Блох, 2009] и М.С. Жданов [Жданов, 2007]. Ими проведены широкие обзоры большинства методов инверсии и интерпретации. Также широко освещены подходы к регуляризации решений и выбору параметризации задачи.

Использование параллельных вычислений при решении СЛАУ для геофизических задач широко освещены в работах В.Н. Страхова. Им предложен метод линейных интегральных представлений, который является одним из эффективных подходов к интерпретации данных. Особенно стоит отметить его вклад в развитие методики нахождения устойчивых приближенных решений СЛАУ в задачах гравиметрии и магнитометрии [Страхов, 1991; Страхов, Страхов, 2002].

Нами был разработан и программно реализован быстрый высокопроизводительный алгоритм решения прямой задачи разновысотной магнитометрии, основанный на классическом магнитостатическом подходе к уравнениям Максвелла, который описан, в частности, в работе [Блох, 2009], путем дискретизации основного уравнения конечно-разностным методом на неравномерной сетке с использованием однородной консервативной схемы [Самарский, 1979] и последующей его симметризацией. Этот алгоритм позволяет предсказывать характер поведения магнитного поля во всем моделируемом пространстве и выбирать любые необходимые данные с заданными координатами, что обеспечивает возможность для реализации быстрой инверсии данных беспилотной разновысотной съемки в режиме реального времени. Подход интегральных уравнений дает возможность учета остаточной намагниченности и эффектов перемангничивания (для сильномагнитных тел), подкрепленный растущей производительностью современных расчетных устройств.

Стоит также отметить, что в теории интерпретации геофизических полей особую роль играет теория некорректно поставленных задач, классические методы решения которых были предложены в работах [Лаврентьев, 1962; Тихонов, 1963]. Как известно, обратные задачи геофизики и магнитометрии в

частности являются некорректно поставленными, поэтому теории, развитые М.А. Лаврентьевым и А.Н. Тихоновым, успешно применялись для интерпретации потенциальных полей. Значит при реализации алгоритма инверсии особое внимание необходимо уделить вопросам единственности и эквивалентности.

В данной работе представлен комбинированный алгоритм инверсии магнитных данных. За основу взяты два подхода: минимизация с использованием градиентов функционала невязки [Fletcher, 1987] и инверсия линейной системы уравнений путем обратной подстановки сингулярного разложения (SVD) [Стренг, 1980].

Разработанный алгоритм протестирован на синтетической модели, состоящей из цилиндрического тела конечной высоты во вмещающей среде с пологим трехмерным рельефом земной поверхности.

АЛГОРИТМ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ И ИНВЕРСИИ

В постановке магнитостатики уравнения Максвелла сводятся к решению уравнения Пуассона:

$$\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} U) = \operatorname{div} \vec{I}_n,$$

где U – скалярный магнитный потенциал, $\mu = (1 + \kappa)$ – относительная магнитная проницаемость, κ – магнитная восприимчивость, $\vec{I}_n$ – вектор естественной остаточной намагниченности. Таким образом, прямой задачей является нахождение распределения магнитного потенциала и его производных в пространстве по известной магнитной восприимчивости и внешнему полю; а обратная задача – восстановление магнитной восприимчивости по измеренным разновысотным данным.

Проведем дискретизацию данного уравнения на неравномерной сетке. Использование неравномерной сетки позволит более точно описать мелкие объекты и учесть большую область при моделировании. Используем однородную консервативную схему. В результате дискретизации уравнения получим систему линейных алгебраических уравнений с несимметричной, вещественной, положительно определенной, семидиагональной матрицей. Используя обобщенный на трехмерный случай алгоритм симметризации с помощью диагонального преобразования подобия [Кузнецов, Агапитова, 2003], приведем к системе вида

$$Ax = F,$$

с симметричной матрицей A . Полученная система уравнений наиболее эффективно решается итерационным методом сопряженных градиентов (CG). Все операции в формулах для метода CG являются матрично-векторными и хорошо распараллеливаются на GPU. Но без эффективного предобуславливателя скорость сходимости данного метода будет очень низкой.

Специально для данного типа матриц был предложен алгоритм построения целого класса предобуславливателей [Labutin, Surodina, 2013], требующий минимальных временных ресурсов и ресурсов глобальной памяти на GPU. Такой предобуславливатель, построенный нами на основе алгоритма Хотеллинга-Шульца, имеет несколько преимуществ перед предобуславливателем, содержащимся в стандартной библиотеке CUSPARSE CUDA NVIDIA.

Во-первых, предобуславливатель, использующий только первый шаг алгоритма Хотеллинга, не требует никаких затрат на построение (при предварительном масштабировании системы уравнений). Во-вторых, все операции в предобусловленном методе сопряженных градиентов (PCG) (в том числе в алгоритме, использующем несколько шагов метода Хотеллинга) остаются матрично-векторными. В-третьих, и это немаловажно, данный алгоритм очень прост в реализации на GPU.

Как было отмечено выше, все операции в предложенном алгоритме PCG являются матрично-векторными и легко распараллеливаются на GPU с помощью библиотеки CUBLAS. Время решения прямой задачи (на видеокарте TESLA M2090) в данном случае составляет от 5 до 20 секунд для сеток порядка 5-10 млн узлов. Для дополнительного ускорения расчета умножения матрицы на вектор использован алгоритм, позволяющий хранить значения элементов матрицы в отдельных массивах, опираясь на то, что мы знаем структуру матрицы. Для реализации параллельной программы и ее компиляции использовались инструменты NVIDIA CUDA и компилятор pgfortran.

Одним из наиболее желаемых результатов полевых работы является интерпретация полученных данных непосредственно при нахождении на объекте, что позволяет построить предварительный результат инверсии, уточнить характер и форму аномальных тел, проложить дополнительные разведочные профили и т. п. Но при отсутствии мощных источников питания или качественной связи обращение к кластерным системам невозможно. К тому же высокопроизводительные компьютерные системы являются дорогостоящим оборудованием, требующим качественного обслуживания и своевременной модернизации. Решением этих проблем являются получившие на сегодняшний день большое развитие высокопроизводительные мобильные устройства с возможностью производить расчеты, используя различные ускорители. Использование данных устройств позволяет выполнять параллельные вычисления с приемлемым уровнем быстродействия при максимальной энергоэффективности. Так, современное аппаратно-программное обеспечение от компании NVIDIA, при условии эффективного распараллеливания задачи, позволяет добиться значительных результатов в быстродействии, во много раз превосходящих вычисления на CPU.

Традиционно инверсия является крайне ресурсоемкой задачей и перед ее реализацией необходимо максимально оптимизировать алгоритм решения прямой задачи, что и позволяет решение большой СЛАУ на GPU. Чем быстрее работает непосредственно прямая задача, тем более детальную инверсию можно получить за конечное время при прочих равных условиях, так как время решения обратной задачи напрямую зависит от числа определяемых модельных параметров и от времени решения прямой задачи.

Большинство алгоритмов инверсии базируются на минимизации целевой функции невязки с использованием градиентного метода. Примерами таких алгоритмов является метод сопряженных градиентов с предобусловлением или квазиньютоновский подход. В этих случаях эффективность существенно повышается, если имеется возможность быстро и достаточно точно вычислить градиент функционала невязки. Такой возможностью обладает, например, метод сопряжения [Fichtner, 2011].

Пусть $\vec{d}_o$ – вектор наблюдаемых данных магниторазведки с БПЛА (аномальное магнитное поле), $\vec{d}_i$ – вектор сгенерированных синтетических (тестовых) данных путем решения прямой задачи для

некоторой модели $\vec{m}_t$ (распределение магнитной восприимчивости в среде), $\vec{w}_o$ – вектор относительной погрешности наблюдаемых данных. При решении задачи минимизации одним из часто используемых является функционал невязки следующего вида:

$$F = 1/n \sum_i (d_{o,i} - d_{t,i})^2 / (w_{o,i} d_{o,i})^2,$$

где n – число измерений, $d_{o,i}$ – компоненты вектора наблюдаемых данных, $d_{t,i}$ – компоненты вектора текущих тестовых данных, $w_{o,i}$ – компоненты соответствующих погрешностей измерений. Задача минимизации состоит в нахождении такого набора модельных параметров $\vec{m}_t$, который позволит максимально приблизить данные $\vec{d}_t$ к наблюдаемым $\vec{d}_o$. Если наблюдаемые и синтетические данные в среднем различаются меньше, чем на погрешность измерений, то целевая функция F будет меньше 1.

Техника квазиньютоновской минимизации позволяет быстро и с высокой точностью решить обратную задачу с небольшим числом модельных параметров независимо от априорной информации. Это обстоятельство можно использовать для построения референтной модели среды. Мы используем подход Бройдена-Флетчера-Голдфарба-Шанно в условиях ограниченной памяти (L-BFGS) [Fletcher, 1987].

В качестве основного метода инверсии было выбрано псевдообращение, основанное на сингулярном (SVD) разложении матрицы чувствительностей данных к модельным параметрам. Такой подход позволяет быстро и качественно разрешить СЛАУ, исключив линейно-зависимые данные и выделив неразрешимые модельные параметры. Однако для его применения необходимо, чтобы стартовая модель несущественно отличалась от искомой.

Совместив вместе два подхода к инверсии, мы создали комбинированный алгоритм, который основан на построении первичной модели низкого разрешения на основе градиентного метода и последующего ее уточнения через псевдообращение матрицы чувствительности.

Нами был реализован данный комбинированный алгоритм в среде Fortran90 с использованием библиотек Intel MKL.

ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА

В качестве тестовой модели была выбрана упрощенная модель кимберлитовой трубки (рис. 1) – магнитный цилиндр конечной высоты во вмещающей слабромагнитной среде под пологим рельефом амплитудой 5 м.

Диаметр цилиндра $D=40$ м, глубина верхней кромки $H_0=5$ м, высота цилиндра $H_T=40$ м; магнитные восприимчивости цилиндра $K_T=0.005$ СИ и вмещающих пород $K_0=0.00005$ СИ.

Рис. 1. Модель «кимберлитовая трубка» (а) и карта дневной поверхности (б)

Для тестовой модели были рассчитаны модули вектора магнитной индукции (далее сигналы) на трех высотах: 2 м с огибанием рельефа (наземная съемка или съемка с БВС по огибающему рельеф маршруту), 5 м и 10 м по абсолютной высоте. Распределение сигналов в поверхностях полетов показаны на рис. 2. Как видно, рельеф сильно влияет на характер сигнала при огибающем маршруте, поскольку он существенно зависит от расстояния до объекта. При полете на фиксированной высоте влияние рельефа на сигнал значительно ниже. Таким образом полеты по абсолютной высоте позволяют более наглядно представить расположение реальных магнитных аномалий и интересных объектов.

Для оценки точности приближения модельного поля к измеренному использовалась целевая функция

$$C = \sum_i \frac{(d_{t,i} - d_{o,i})^2}{d_{o,i}^2} * 100\%,$$

определяющая поточечное относительное расхождение между сигналом в текущей тестовой модели и наблюдаемыми данным. Пример такой функции для конечной итерации инверсии показан на рис. 2, г.

Для томографической инверсии тестировался ряд разбиений нижнего полупространства на блоки равного размера и предварительно оценивался референтный уровень магнитной восприимчивости для «наблюдаемых» сигналов.

Поскольку резких перепадов значений магнитной восприимчивости в полученном решении не должно быть (условие регуляризации решения через псевдообращение), исследуемая «трубка» несколько размывается на томографической модели и ее реальную границу можно выбирать по

положению среднего значения между относительными максимумами и минимумами на градиентных границах. Из рис. 3 видно, что в такой постановке положение цилиндра четко определяется в горизонтальной плоскости, начиная с разбиения на блоки размером 6 м x 6 м при общей сетке наблюдений 120 м x 120 м.

Рис. 2. Синтетические данные для модели «Кимберлитовая трубка». Съемка с огибанием рельефа: *а* – относительная высота 2 м, *б* – съемка на абсолютной высоте 5 м, *в* – съемка на абсолютной высоте 15 м, *г* – целевая функция для разбиения 3 x 3 м и высоты полета 5 м

Рис. 3. Инверсия данных с использованием различных размеров тестовых блоков. Протестированы разбиения на блоки размерами: а – 12 м х 12 м, б – 6 м х 6 м, в – 3 м х 3 м и г – 2.4 м х 2.4 м

ВЫВОДЫ

Задача инверсии равновысотных магнитных данных быстро и качественно разрешается для классических моделей геологических тел и, в частности, для модели «кимберлитовая трубка», разработанным алгоритмом инверсии на GPU, что позволит применять его на мобильных устройствах в полевых условиях.

Имеется неоднозначность решения по оси Z, обусловленная эквивалентностью распределения источников, присущей всем обратным задачам для потенциальных полей, и для ее устранения

необходимы априорные данные о характере залегающих тел или магнитных восприимчивостей объектов исследования.

При изучении характера затухания сигналов использование разновысотных данных позволяет уточнить получаемые результаты за счет более высокой точности измерения интерпретируемого поля, а также корректно учесть влияние рельефа. Необходимо дополнительное развитие технологии и включение их в разработанное программное обеспечение.

ЛИТЕРАТУРА

- Блох Ю.И.** Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий: Уч. пособ. – М., 2009. – 231 с.
- Жданов М.С.** Теория обратных задач и регуляризации в геофизики. – М.: Научный мир, 2007. – 712 с.
- Кузнецов Ю.И., Агапитова Н.С.** Математические основы моделирования на ЭВМ. – Ю.-Сахалинск: ЮСИЭПИ, 2003. – 214 с.
- Лаврентьев М.А.** О некоторых некорректных задачах математической физики. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1962. – 92 с.
- Самарский А.А.** Теория разностных схем. – М.: Наука, 1979. – 655 с.
- Страхов В.Н.** Решение линейных задач гравиметрии и магнитометрии вариационным и структурно-параметрическими методами при мультипликативно-аддитивных помехах в экспериментальной информации // Докл. АН СССР. – 1991. – Т. 319, № 6. – С. 1361–1365.
- Страхов В.Н., Страхов А.В.** Методы нахождения устойчивых приближенных решений систем линейных алгебраических уравнений с приближенно заданной правой частью, допускающие глубокое распараллеливание вычислений // Вычислительные методы программирования. – 2001. – Т. 2. – С. 34–55.
- Стренг Г.** Линейная алгебра и ее применения. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
- Тихонов А.Н.** О регуляризации некорректно поставленных задач // Докл. АН СССР. – 1963. – Т. 153, № 1. – С. 49–52.
- Эпов М.И., Фирсов А.П., Савлук А.В., Злыгостев И.Н.** Магниторазведчик: нам сверху видно все // Наука из первых рук. – 2016. – Т. 71–72. – № 5–6. – С. 104–109.
- Fichtner A.** Full seismic waveform modelling and inversion. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. – 343 p.
- Fletcher R.** Practical methods of optimization. – New York: John Wiley & Sons, 1987. – 436 p.
- Labutin I.B., Surodina I.V.** Algorithm for sparse approximate inverse preconditioners in conjugate gradient method // Reliable computing. – 2013. – Vol. 19. – P. 120–126.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

МАКСИМОВ Михаил Андреевич – аспирант, научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: обратные задачи и математическое моделирование.

СУРОДИНА Ирина Владимировна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: математические методы, параллельные вычисления, численное моделирование.

ГЛИНСКИХ Вячеслав Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: численные методы решений прямых и обратных задач электродинамики.