

Инженерная и экологическая геофизика

Применение данных тензорной градиентометрии магнитного поля при поиске неразорвавшихся боеприпасов

Reducing tensor magnetic gradiometer data for unexploded ordnance detection

Роберт Е. Брекен (Robert E. Bracken) и Филип Дж. Браун (Philip J. Brown) из Геологической службы США рассказывают о проводимых в настоящее время работах по внедрению системы тензорной градиентометрии магнитного поля при поиске неразорвавшихся боеприпасов.

Aвторами проведены опытные работы с тензорным магнитометром-градиентометром (ТМГ; tensor magnetic gradiometer system – TMGS) с целью продемонстрировать эффективность этого средства при поисках неразорвавшихся боеприпасов (НРБП, UXO).

Чтобы получить полезный результат, авторы создали процедуру обработки, на выходе которой получается фактический тензор градиента магнитного поля, а также простой способ визуализации сложных тензорных данных, который позволяет не только оценить достоверность полученного тензора, но и просматривать данные на промежуточных этапах.

В результате получается карта изучаемой территории, на которой НРБП отмечаются резкими пиками аномалий, расположенныхми практически над объектами поиска. Карта хорошо согласуется с результатами моделирования поля дипольных источников в известных положениях. Из этого следует, что процедура обработки верна, и на основе опытного образца ТМГ можно создать новое оборудование и системы обработки.

Введение

Данные полевых измерений магнитного поля часто используются для определения параметров различных объектов и вмещающего разреза. Обычно данные получаются в виде скалярных величин, которые с помощью соответствующих процедур можно преобразовать в векторные. Расчет компонент вектора возможен, если скалярные данные получены на большой территории и с достаточным разрешением. При поисках НРБП источники находятся близко к точке измерения, что, по мнению Д. В. Смита (D.V. Smith), ограничивает применение такого подхода. Поэтому следует рассмотреть способы получения векторных данных.

Прямое измерение аномального вектора на фоне огромных значений компонент вектора поля Земли затруднено; чувствительность векторного датчика должна быть недостижимо высокой. Лучшие системы с векторными магнитометрами дают точность измерения компонент поля Земли около 5 нТл. Проблему можно обойти с помощью тензорной градиентометрии, в которой требования к точности данных векторных датчиков не столь высоки.

При исследовании близкорасположенных источников и разрезов градиенты более полезны, чем скалярные или векторные величины сами по себе. Поскольку с удалением от объекта градиент убывает быстрее, чем само поле, близкие объекты проявляются четче, а влияние далеких не оказывается. При работе с тензором градиента можно применять различные способы, недоступные при работе только с самим полем.

В одном из таких методов – картировании диполей (dipole mapping; см. Wynn et al., 1975) – по тензору определяются положение, глубина и момент диполя. Есть методы, основанные на использовании инвариант тензора (Pedersen and Rasmussen, 1990), которые мы вкратце обсудим.

При измерении градиента определяется разность показаний двух магнитометров. Эта разность, деленная на расстояние между датчиками, дает градиент в направлении линии, проведенной через положения датчиков. Для данного направления линии имеется три значения градиентов, соответствующих трем компонентам вектора; линейно независимых направлений тоже три; таким образом, получается девять значений градиента. Их можно представить в виде матрицы, называемой тензором градиента магнитного поля:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{\partial b}{\partial x} & \frac{\partial b}{\partial x} & \frac{\partial b}{\partial x} \\ \frac{\partial b}{\partial y} & \frac{\partial b}{\partial y} & \frac{\partial b}{\partial y} \\ \frac{\partial b}{\partial z} & \frac{\partial b}{\partial z} & \frac{\partial b}{\partial z} \end{bmatrix}$$

Поскольку дивергенция и ротор магнитостатического поля в области, свободной от источников, тензор оказывается симметричным, а след его равен нулю; независимых компонент всего пять. Тензор градиента магнитного поля и три компоненты самого поля полностью описывают магнитное поле первого порядка; эти величины и являются результатами измерений с TMGS.

Аппаратура

Аппаратура TMGS состоит из двух основных блоков. На рис. 1 показан блок датчиков TESSA (tetrahedral em/mag sensor suspension apparatus – тетраэдрический подвес электромагнитных датчиков), представляющий собой тетраэдр высотой 1 м, в вершинах которого расположены четыре трехкомпонентных датчика магнитного поля. Во втором блоке имеется термостатический контейнер для схем магнитометра. Там же находятся схемы для измерения температуры каждого датчика и оцифровки показаний датчиков. Данные измерений записываются на переносной компьютер через интерфейс RS-232. В качестве датчиков используются трехкомпонентные феррозонды производства компании Narod Geophysics (Narod, 1987), применяемые в магнитных обсерваториях Геологической службы США.

Изначально TMGS конструировался для обнаружения магнитных явлений в вулканах при стационарных наблюдениях (Bracken and others, 1998).

Инженерная и экологическая геофизика

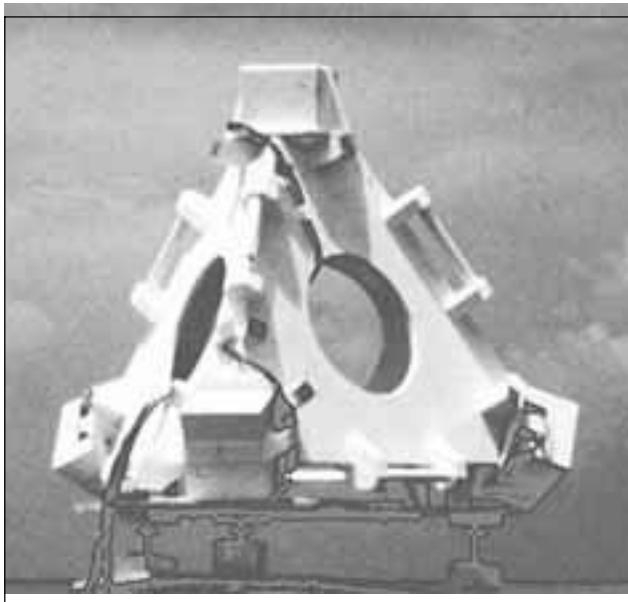


Рис. 1.Блок датчиков системы TMGS (TESSA).

Поэтому размещение датчиков на транспортном средстве, что требуется при поисках НРБП, не предусмотрено. Из-за этого данный эксперимент проведен как серия стационарных наблюдений по некоторой сети. В системе обработки, тем не менее, предусмотрена работа с данными, полученными в движении. Кроме того, геометрия датчиков и расстояние между ними не подходит для работы с резко меняющимся полем, порожденным НРБП на малых глубинах. Для работы в таких условиях в обработку (рис. 2) включен этап «увязки градиентов» («gradient collocation»).



Рис. 3 Карта определителя по полевым данным

Методика работ

12 марта 2003 г. Геологическая служба США использовала TMGS в опытных работах по поиску НРБП на специализированном Испытательном полигоне Юма (США, шт. Аризона). Объектом поиска была минометная мина калибром 60 мм на глубине 0.25 м. Выполнено 10 стационарных измерений с частотой 5 отсчетов в секунду на участке размером 3 x 3 м по квадратной сети 0.25 x 0.25 м (Smith and Bracken, 2004). Получены данные трех видов: (а) исходные данные по магнитному полю и координаты точек; (б) калибровочные измерения; и (с) опорные измерения температуры. Некоторые калибровочные измерения проведены в лаборатории.

Идея метода

В ходе обработки данные наблюдений преобразованы в тензоры по сети 13 x 13 узлов. Далее для удобства представления результатов по тензорам были рассчитаны определители; карты этих скалярных величин приведены на рис. 3-6. Любой тензор градиента можно представить в такой системе координат (называемых главными осями), что все внедиагональные компоненты будут равны нулю. Произведение этих компонент можно рассматривать как объем параллелепипеда, построенного на главных осях; чем больше объем, тем сильнее градиент. Эта скалярная величина называется инвариантом тензора и рассчитывается путем вычисления его определителя; приведение к диагональному виду как таковое необязательно (Pedersen and Rasmussen, 1990). Вблизи источника такой определитель будет максимальным. На карте определителя прямо над объектом будет, как правило, резкий экстремум (минимум или максимум), а иногда резкий переход через ноль.

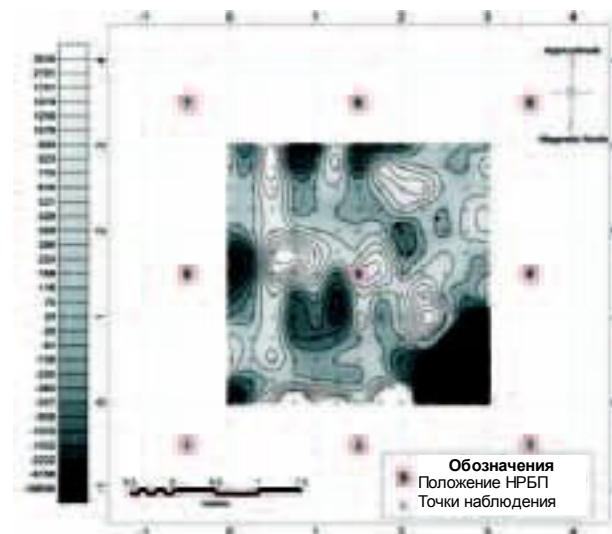


Рис. 2 Алгоритм ввода поправок системы TMGS.

Инженерная и экологическая геофизика

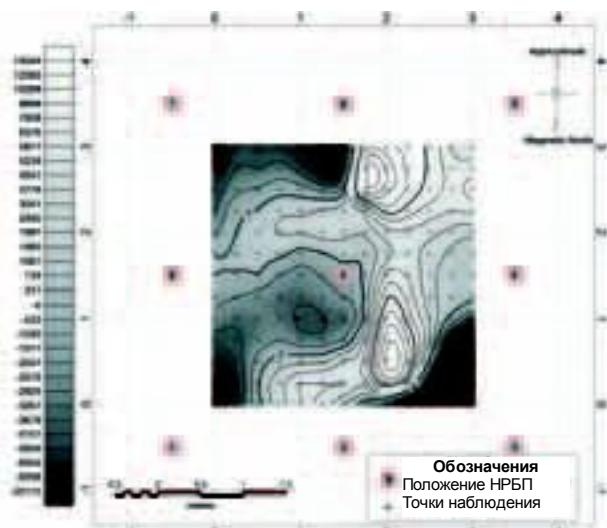


Рис. 4. Карта определителя по данным после калибровки

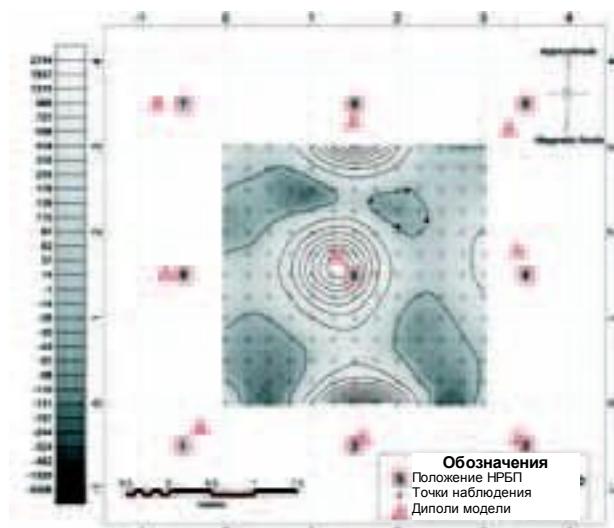


Рис. 6. Карта определителя по результатам моделирования с положениями диполей модели

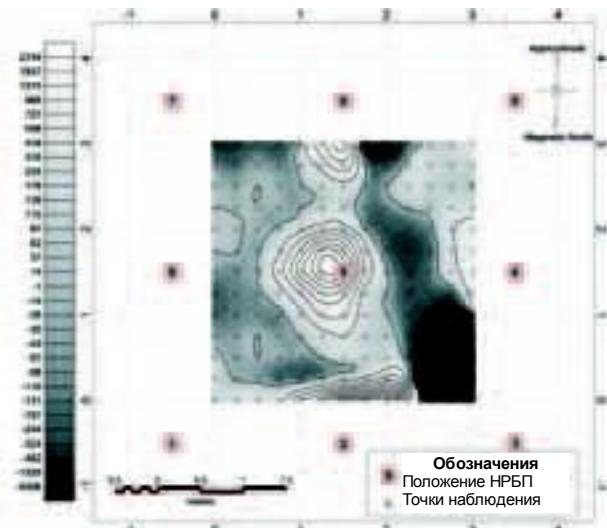


Рис. 5. Карта определителя по обработанным данным

В этом состоит отличие этой величины от скалярного поля, дающего размытую аномалию, заметную на значительном расстоянии от объекта.

Обработка данных

Процедура детально описана в статье (Bracken and Brown, в печати). Проводится ввод поправок за три важных фактора: сползание нуля, постоянную составляющую и девиацию. Сползание нуля – это изменение калибровки цены деления прибора с течением времени и при изменении температуры. Постоянную составляющую, общую для всех датчиков (например, поле Земли) не всегда можно подавить полностью. Система, устойчивая к девиации, способна давать точные значения градиента и подавлять постоянную составляющую по ходу положения системы

Поправка за девиацию вводится на соответствующем этапе обработки (рис. 2). В данном случае поправки за девиацию не вводились, поскольку блок датчиков в ходе измерения был неподвижен. На рис. 3 представлена карта определителя, рассчитанного по данным, исправленным за девиацию, то есть, в нашем случае – просто по полевым данным. Поскольку магнитометры не калиброваны, в данных присутствует мощная постоянная составляющая, связанная с изменениями характеристик датчиков.

Постоянная составляющая устраняется процедурами преобразования и ввода калибровочных коэффициентов (рис. 2). Если в одном и том же поле два датчика дают разные показания, эта ошибка войдет в измеренное значение градиента, причем ее нельзя будет отличить от истинного градиента. Обычно такие ошибки возникают при измерении малых градиентов. Поэтому очень важно иметь полный набор точных калибровочных коэффициентов для применяемых датчиков. В процедуре преобразования, созданной специально для датчиков, которые мы применяли, используются данные лабораторных измерений. Процедуру ввода калибровочных коэффициентов можно применять для любого векторного магнитометра, в ней используются результаты определения диаграммы направленности, которую проводят, медленно поворачивая блок датчиков в поле Земли. Калибровочные коэффициенты рассчитываются с помощью нелинейной регрессии и приводят показания каждого датчика к истинной величине магнитного поля Земли, измеряемого опорным магнитометром. Детали см. (Bracken and Smith, 2005).

На рис. 4 показана карта определителя, рассчитанного по данным, исправленным за постоянную составляющую. Постоянный фон удален, но эффекты,



Инженерная и экологическая геофизика

связанные с изменением температуры столь сильны, что не видно даже намека на аномалию, связанную с объектом поиска. Температурный ход учитывается на соответствующем этапе обработки (рис. 2). Данные для расчета поправки получены путем троекратного захода на опорную точку – в начале, в середине и в конце работы. Поправка рассчитана путем линейной интерполяции в предположении постоянного градиента на опорной точке.

Результаты и выводы

По исправленным тензорам были рассчитаны определители, карта которых представлена на рис. 5. В центре участка видна четкая круговая аномалия, центр которой практически совпадает с положением объекта. Отметим величину и резкость аномалии. Она не пропадает в море шумов, а позволяет практически безошибочно выявить наличие объекта и установить его положение.

Чтобы подтвердить осмысленность итоговой карты, авторами создана модель магнитных диполей в известных местах расположения НРБП, по которой рассчитаны теоретические значения тензоров для точек наблюдения и построена карта определителя, показанная на рис. 6. Магнитные поля рассчитаны для объекта поиска нашего эксперимента и еще для восьми объектов, сведения о которых были предоставлены полигоном «Юма». Положения диполей выбраны так, что они давали одинаковые аномалии. Значения магнитных моментов, обеспечивающих равенство амплитуд теоретической и экспериментальной аномалии вполне осмыслены.

В заключение скажем, что тождество экспериментальных и теоретических результатов показывает, что после ввода поправок получаются истинные тензорные данные. Этот предварительный вывод подтверждается двумя соображениями. Во-первых, при расчете определителя используются все девять компонент тензора, поэтому определитель представляет тензор в целом. Во-вторых, карты теоретического и экспериментального инварианта совпадают, а значит, система дает осмысленные значения величин в различных полевых условиях.

Некоторые этапы ввода поправок особенно важны. Если пропустить какой-то этап или использовать неточные коэффициенты, итоговая карта будет нечитаемой. В этом состоит отличие от обычных скалярных измерений магнитного поля, где аномалия обычно видна уже в полевых данных и при вводе поправок просто улучшается. Прохождение Этапов обработки данных тензорной градиометрии похоже на открывание кодового замка – если одна кнопка не нажата, замок не откроется. Это хорошо видно на рис. 4, на котором показана карта, при построении которой выполнены все этапы ввода поправок, кроме двух последних.

На карте нет и намека на приближение к осмысленному результату.

В будущем предполагается изменить расположение датчиков и уменьшить размеры блока, чтобы работать с резкими изменениями поля и приспособить систему для работы на борту летательного аппарата. Авторы рассчитывают, что дальнейшее исследование алгоритма ввода поправок улучшит качество поправок за девиацию и сократит время на съемку диаграммы направленности. Ведутся также работы по использованию тензоров и их инвариантов при поиске, картировании и создании моделей объектов.

Благодарности

Это исследование проведено при поддержке Министерства обороны США в рамках Стратегической научно-исследовательской экологической программы (Strategic Environmental Research and Development Program - SERDP). Авторы благодарят персонал испытательного полигона «Юма» за помощь в работе на площадке с тестовыми НРБП, и профессора Colorado School of Mines Яогу Ли (Yaoguo Li) за консультации.

Литература

- Bracken, R.E., and Brown, P.J. [2005, in press] Concepts and procedures required for successful reduction of tensor magnetic gradiometer data obtained from a UXO detection demonstration at Yuma Proving Ground, Arizona. US Geological Survey Open-File Report.
- Bracken, R.E., Grover, T.P., and Punihai, G. [1998] Development and testing of a tensor magnetic gradiometer system with trial monitoring near the Kilauea Volcano, Hawaii. US Geological Survey Open-File Report, 98-773, 163.
- Bracken, R.E. and Smith, D.V. [2005] Calibrating a tensor magnetic gradiometer using spin data. US Geological Survey Scientific Investigations Report, 2005-5045, 5, available online at <http://pubs.usgs.gov/sir/2005/5045/>. Narod, B.B. [1987] Ring core fluxgate magnetometers for use as observatory variometers [abs.]: International Union of Geodesy and Geophysics 19th General Assembly, 2, GA5.3-3, 673.
- Pedersen, L.B. and Rasmussen, T.M. [1990] The gradient tensor of potential field anomalies: Some implications on data collection and data processing of maps. *Geophysics*, 55, 12, 1558-1566.
- Smith, D.V. and Bracken, R.E. [2004] Field experiments with the magnetic gradiometer system at Yuma Proving Ground, Arizona. In Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP), February 2004.
- Wynn, W.M., Frahm, C.P., Carroll, P.J., Clark, R.H., Wellhoner, J., and Wynn, M.J. [1975] Advanced superconducting gradiometer/magnetometer arrays and a novel signal processing technique. *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-11, 2, 701-707.