

УДК 550.831.015.072

© А.Е. Сеннер, Н.Н. Пиманова, М.С. Данилов

А.Е. Сеннер, Н.Н. Пиманова, М.С. Данилов

АЛГОРИТМ ПОИСКА ПОВЕРХНОСТЕЙ АНОМАЛИЙ НА ОСНОВАНИИ АНАЛИЗА ВЕКТОРА ГРАДИЕНТА ГРАВИТАЦИИ



Формулировка проблемы

Построение трехмерных моделей расположения аномалий в толще земной коры является важной задачей как с научной, так и практической точек зрения [1]. Один из подходов решения данной задачи – анализ векторных физических параметров.

Целью данной работы является разработка алгоритма поиска ограничивающих аномалии поверхностей на основании анализа измерений вектора градиента гравитации.

Ранее уже рассматривалось решение этой задачи с помощью алгоритма прослеживания вдоль линий, перпендикулярных вектору градиента гравитации [2]. Требования к алгоритму подробно сформулированы в этой публикации, поэтому нет необходимости их повторять. Алгоритм показал хорошие результаты распознавания. Но недостаток алгоритма видится в определенной перегруженности его вычислительной части, что приводит к увеличению времени получения результатов.

Процесс построения моделей обычно итерационный – необходимо подобрать значения параметров, ориентированных на конкретное исследование. Соответственно, фактор времени выполнения отдельной итерации является существенным, а иногда и критическим. Ввиду этого актуальной является задача разработки алгоритма, требующего меньшее количество вычислений и, таким образом, снижающего время получения результата.

Описание алгоритма

Исходными данными, как и для предыдущего алгоритма [2], являются значения вектора градиента гравитации в узлах равномерной трехмерной сетки. Вектор гравитации описывается тремя проекциями в декартовой системе координат.

Конечный результат работы алгоритма – нахождение множеств узлов, представляющих аппроксимацию ограничивающих аномалии поверхностей. «Толщина» поверхности не должна превышать одного узла.

Идея алгоритма состоит в выборе некоторого начального узла, принадлежащего строящейся поверхности. Далее реализуется итерационная

процедура определения наиболее вероятного узла из ближайшего окружения и включение его в подмножество узлов, образующих искомую поверхность.

Алгоритм состоит из нескольких этапов.

Первый этап: нахождение и нормализация модуля вектора градиента гравитации (ВГГ) в каждом узле. Исходные данные ВГГ для различных участков Земли имеют различные значения, которые могут отличаться на порядки. Для обеспечения единообразия работы с различными значениями данных производится нормализация исходных значений векторов градиента гравитации. Определяется наибольший модуль ВГГ, его значение принимается за 100. Остальные модули ВГГ пересчитываются относительно своих исходных значений. Это позволяет пользователю при определении параметров алгоритма оперировать не абсолютными, а относительными величинами – процентами максимальной величины модуля ВГГ. Величины проекций исходных значений ВГГ нормируются таким образом, чтобы представлять единичный вектор, что значительно ускоряет дальнейшие вычисления.

Второй этап: фильтрация по пороговому значению. Большая часть исходных данных в подавляющем количестве случаев является фоновой, т.е. не относящейся к искомым аномалиям. Исследователь на основании априорных профессиональных знаний и требований решаемой задачи определяет значения модуля ВГГ, ниже которого значения трактуются как фоновые (*пороговое значение*). Производится выборка подмножества узлов, имеющих модуль ВГГ выше порогового (*рабочее подмножество*). Дальнейшая работа алгоритма производится только с этим подмножеством. Это также обеспечивает сокращение общего времени работы алгоритма.

Третий этап: выбор первого наиболее вероятного узла поверхности. Из рабочего подмножества выбирается узел с максимальным значением модуля ВГГ. Априори предполагается, что такой узел принадлежит к одной из искомым поверхностей. Это предположение хотя, конечно, и вероятностно, но вероятность его истинности весьма высока. Исключение могут составлять случайные ошибки измерения в узлах. Определяется очередное пустое

результатирующее подмножество узлов, которое будет содержать узлы очередной искомой поверхности. В него помещается узел с максимальным значением модуля ВГГ.

Четвертый этап: построение поверхности аномалии. На этом этапе реализуется основная идея описываемого алгоритма.

Выбирается *опорный* узел. В качестве первого опорного узла принимается единственный имеющийся узел результирующего подмноества. В дальнейшем в качестве очередного опорного узла выбирается некоторый необработанный узел результирующего множества.

Фиксируется окрестность опорного узла – ближайшие узлы, расположенные в непосредственной близости от опорного (рис. 1). Эти узлы в общем случае представляют собой куб 3×3 , где опорный узел является центром куба. Если опорный узел принадлежит поверхности исследуемой сети, рассматривается часть куба, совпадающая с исследуемой сетью. Таким образом, выделяется не более 26 ближайших к опорному узлу узлов сетки.

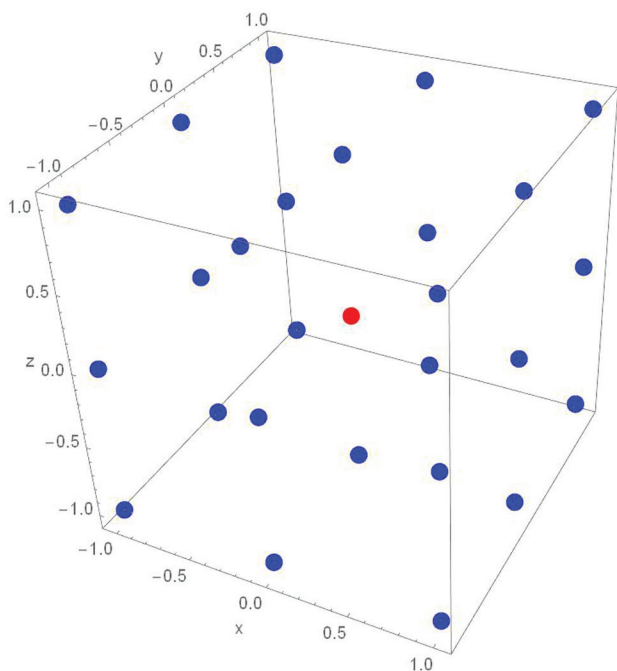


Рис. 1. Полученный куб с опорным узлом красного цвета в центре

Fig. 1. Cube with a red support node in the center

Для выбора из этого множества наиболее вероятных узлов, принадлежащих к строящейся поверхности, используется тот факт, что в каждой точке ВГГ перпендикулярен плоскости, касательной к искомой поверхности. Поэтому строится плоскость, проходящая через опорный узел и перпендикулярная вектору градиента гравитации опорного узла (рис. 2).

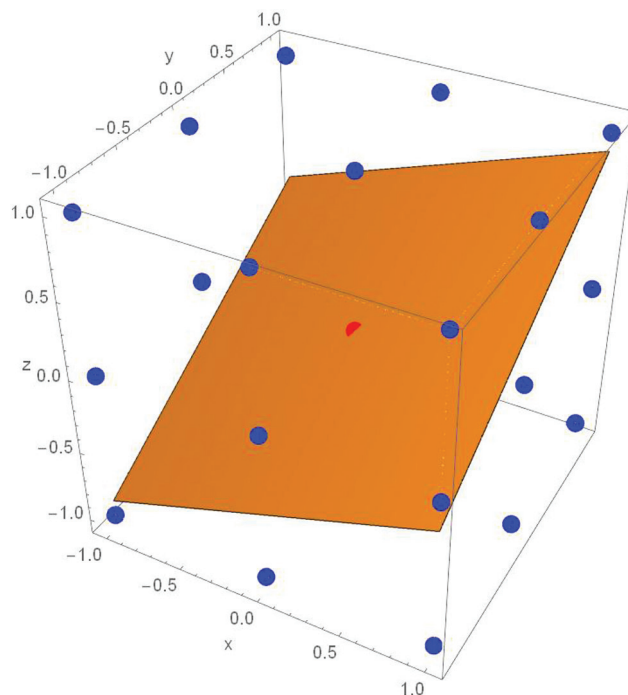


Рис. 2. Плоскость, проходящая через опорный узел и перпендикулярная вектору градиента гравитации опорного узла

Fig. 2. The plane passing through the support node and perpendicular to the gradient of the gravity gradient of the reference node

Определяются линии пересечения данной плоскости с гранями куба. Множество точек этих линий является точками, аппроксимирующими искомую поверхность на поверхности куба. Из этого множества выбираются точки, лежащие в плоскостях, перпендикулярных осям координат и проходящих через узлы исходной сети (точки пересечения) (рис. 3).

Конечным результатом построения поверхности аномалии является множество узлов *исходной* сети, ограничивающих аномалию. Поэтому необходимо аппроксимировать точки пересечения к узлам сети. Соответственно для каждой точки пересечения выбираются два наиболее близко расположенные *узла-претендента*. Рассматривалось несколько стратегий выбора наиболее вероятного узла-претендента. В итоге эффективной признана стратегия, учитывающая:

- геометрическую близость точки пересечения к узлу-претенденту;
- значение величины модуля ВГГ в узлах-претендентах.

Согласно этой стратегии, для каждого из узлов-претендентов (рис. 4) вычисляется его вес по следующим формулам:

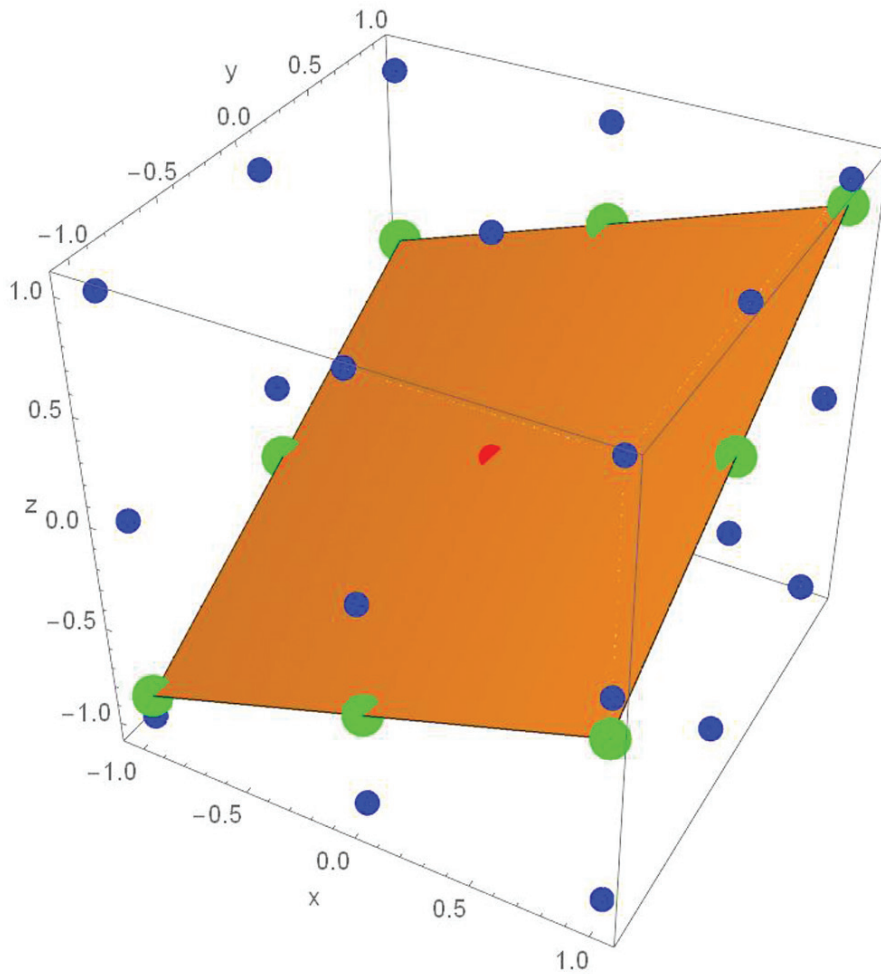


Рис. 3. Токи пересечения касательной плоскости на гранях куба

Fig. 3. Points of intersection of the tangent plane on the faces of the cube

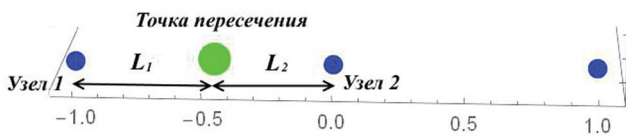


Рис. 4. Аппроксимация точки пересечения к узлу сети

Fig. 4. Approximation of the intersection point to the network node

$$W_1 = L_2 \times \text{ModGrad}_1,$$

$$W_2 = L_1 \times \text{ModGrad}_2,$$

где W_i – вес, присваиваемый узлу-претенденту; L_i – расстояние от точки пересечения до узла-претендента; ModGrad_i – значение модуля ВГГ в узле-претенденте.

В качестве узла аппроксимации искомой поверхности выбирается узел, имеющий наибольший вес.

Согласно описанной процедуре, для каждой точки пересечения оценивается ее близость к искомой поверхности и выбираются максимально вероятные узлы куба. Таких узлов будет не более восьми для выбранного опорного узла. Эти узлы являются кандидатами для внесения в результирующее множество.

Далее каждый узел-кандидат проверяется на условия:

- превышает ли значение его модуля ВГГ порогового значения;
- не принадлежит ли он к ранее найденным поверхностям;
- не является ли он уже членом результирующего множества.

Если все условия выполнены, то это узел-кандидат вносится в результирующее множество и удаляется из рабочего подмножества узлов.

Остальные узлы куба полностью исключаются из дальнейшего рассмотрения, т.е. удаляются

из рабочего подмножества. Это необходимо для того, чтобы искомая поверхность представляла собой поверхность «толщиной» не более одного узла. Иначе ввиду существования эквипотенциальных поверхностей образуются «утолщения» поверхности за счет узлов, обладающих значениями модуля ВГГ меньшими, чем найденное.

Опорный узел помечается как обработанный.

На этом завершается очередной шаг итерации.

Далее в результирующем множестве выбирается необработанный узел. Этот узел выбирается в качестве опорного, и повторяется четвертый этап описанного алгоритма. Критерий завершения данного итерационного процесса – отсутствие в результирующей выборке необработанных узлов.

Полученному множеству узлов присваивается уникальный идентификатор множества. На этом этапе считается, что отдельная поверхность построена.

Далее делается попытка нахождения следующей поверхности повторением алгоритма, начиная с третьего этапа. Критерием окончания третьего этапа является нахождение заданного количества поверхностей либо отсутствие узлов в рабочем подмножестве.

На *пятом этапе* производится попытка объединения найденных результирующих множеств в одно (слияние соприкасающихся поверхностей). Это обусловлено тем, что данный алгоритм в областях резкого изменения направления ВГГ может не успеть «среагировать» на это и распознать продолжение поверхности как новую независимую поверхность. Производится попарное сравнение результирующих множеств и подсчитывается количество соприкасающихся узлов сетки. Если это количество равно или превышает заранее заданное число, то считается, что эти множества относятся к одной поверхности и производится их объединение.

На этом работа алгоритма завершается.

Практическая реализация и параметрические настройки

Осуществлена программная реализация выше описанного алгоритма в виде *dll*-модуля для работы под управлением ОС Windows.

В рамках этой реализации алгоритм является параметрически настраиваемым, так как успешное решение задачи построения поверхностей аномалий в большой мере зависит от конкретных параметров самих аномалий: от их контрастности, размеров, форм и т.д. Например, если поставлена задача поиска ярко выраженных аномалий, то целесообразно порог отсеивания фоновых величин поставить большим, а количество регистрируемых поверхностей сделать

малым. В случае слабоконтрастной аномалии, наоборот, порог отсеивания фоновых величин сделать малым, а количество регистрируемых поверхностей – большим.

В рамках реализации алгоритма обеспечена возможность определения исследователем следующих параметров:

- Величина порога отсеивания фоновых величин модуля ВГГ. Задается в процентах по отношению к максимальному значению модуля ВГГ.
- Минимальное число узлов в найденной поверхности.
- Максимальное количество регистрируемых поверхностей.
- Минимальное количество соприкасающихся узлов для объединения поверхностей.

Величина порога отсеивания фоновых величин модуля ВГГ. Обеспечивает исключение узлов, в которых модуль вектора градиента гравитации меньше чем задаваемая величина. Значение данного параметра находится в диапазоне от 0 до 100, так как алгоритм для своей работы масштабирует исходные значения модуля градиента вектора гравитации в каждом узле так, что максимальное значение равно 100. Это позволяет задавать величину порогового значения в процентах вне зависимости от реального значения модуля градиента, которые значительно отличаются друг от друга в конкретных случаях поиска.

Минимальное число узлов в найденной поверхности. Алгоритм, обнаружив основные искомые поверхности, продолжает свою работу уже в областях, не содержащих реальных аномалий. Но флуктуации ВГГ естественно имеются, которые и могут трактоваться как найденные поверхности. Эти квазиповерхности имеют небольшое количество узлов (обычно не превышающие порядка десяти) и не несут никакого практического смысла. Но увеличивают, естественно, время обработки исходного материала и затрудняют в дальнейшем работу исследователя с полученным материалом. Параметр позволяет автоматически удалять данные квазиповерхности из конечного результата.

Максимальное количество регистрируемых поверхностей. Данный параметр функционально во многом тождественен предыдущему. Цель его – минимизировать количество получаемой исследователем не интересующей его информации. Является одним из критериев окончания поиска отдельных поверхностей. Но если объединение поверхностей на пятом этапе уменьшило общее их количество, то алгоритм возобновляет работу с третьего этапа, чтобы предоставить исследователю заказанное им количество поверхностей.

Минимальное количество соприкасающихся узлов для объединения поверхностей. Этот параметр важен не только с точки зрения объединения поверхностей, у которых ВГГ имеет резкое изменение направления, как было сказано выше. Зачастую требуется обрабатывать исходные данные, имеющие очень большие размеры. Здесь следует отметить, что созданная программная реализация алгоритма позволяет обрабатывать сети, объем которых больше, чем объем доступной оперативной памяти для приложения, работающего на IBMPC.

Для оптимизации использования ограниченного ресурса памяти ЭВМ алгоритм оперирует фиксированным количеством итераций при поиске отдельных поверхностей. Таким образом, искомая поверхность, если она имеет значительный размер, может быть искусственно разрезана на несколько частей. В этом случае данный режим в итоге обеспечивает восстановление истинной формы поверхности.

Найденные отдельные поверхности сравниваются попарно, и если количество узлов удовлетворяет указанному значению, производится их объединение.

Особенность интерпретации результатов работы алгоритма

При анализе полученных результатов необходимо учитывать тот факт, что данный алгоритм находит поверхности последовательно упорядоченно по мере убывания значения модуля градиента. В каждой последовательно найденной поверхности максимальное значение модуля ВГГ составляющих ее узлов не больше максимального значения модуля ВГГ в предыдущей поверхности.

С одной стороны, это удобно для исследователя – наиболее контрастные аномалии появляются первыми.

Но необходимо учитывать, что даже в случае существования единственной аномалии алгоритм может построить несколько поверхностей. Это связано с тем, что, обнаружив поверхность, алгоритм удаляет из дальнейшего рассмотрения как описывающие ее узлы исходной сети, так и соприкасающиеся с ними узлы. За счет этого «толщина» найденной поверхности равна одному узлу.

Но далее продолжая работу, алгоритм из оставшегося материала может найти эквипотенциальную(ые) поверхность(и) с меньшими модулем ВГГ. Своеобразные внутренние «тени» аномалии. И здесь уже задача исследователя – подключать могущество своего интеллекта и осмысленно избегать ошибок как первого, так и второго рода.

Ключевые слова: алгоритм, распознавание, реконструкция, геофизическая аномалия, градиент гравитации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитин А.А., Каплан С.А., Галуев В.И., Малинина С.С. Определение физико-геометрических свойств земной коры по данным геофизического комплекса // Геоинформатика. – 2003. – № 2. – С. 29-38.
2. Сеннер А.Е., Галуев В.И. Алгоритм распознавания поверхностей максимального градиента для трехмерных моделей распределенных физических параметров // Геоинформатика. – 2008. – № 2. – С. 32-36.

LITERATURE

1. Nikitin A.A., Kaplan S.A., Galuev V.I., Malinina S.S. Determination of physical and geometric properties of the earth's crust according to the data of geophysical complex // Geoinformatica. 2003. No. 2. P. 29-38.
2. Senner A.E., Galuev V.I. Algorithm for recognizing the surfaces of the maximum gradient for three-dimensional models of distributed physical parameters // Geoinformatica. 2008. No. 2. P. 32-36.