

Совместное использование нового алгоритма роста фрактальных структур и стохастической фрактальной интерполяции для детального моделирования трещинной среды.

Масюков Владимир Вадимович

ООО «Славнефть – Научно-производственный центр», г. Тверь

Предложен новый метод моделирования развития (роста) фрактальных структур, заданных в виде полутонового или бинарного изображения. Обсуждаются технические аспекты компьютерной реализации нового метода, его возможности и ограничения, а также различные применения в нефтегазовом комплексе, в частности, для детального моделирования трещинной среды. Показана эффективность комплексирования нового подхода со стохастической фрактальной интерполяцией. Более подробно геологические аспекты применения нового алгоритма изложены в докладе на секции «Сейсмические технологии».

1. Постановка задачи

На протяжении последних лет коллектив авторов из ООО "Славнефть-НПЦ" развивает технологии, связанные с выявлением особенностей сейсмического поля и направленные на адекватное отображение трещинной среды [1-8]. Несмотря на определенные успехи, имеет место объективная неопределенность на масштабах между разрешенностью современной сейсморазведки 3D и разрешенностью сканеров микротрещиноватости [5,7]. Оказывается, что использование интерполяции (даже стохастической и фрактальной) и переход к сеткам с шагом менее одного метра не приводит к удовлетворительным результатам. Поэтому был разработан новый метод развития (роста) фрактальных структур.

Рассмотрим основные идеи нового подхода в 2D случае. На вход алгоритму подается бинарное или полутоновое изображение (грид). Это может быть как синтетический пример (некоторая «затравка» или «зародыш» фрактальной структуры), так и реальный срез куба антикогерентности или «синергетических сингулярностей» [1], полученных на основе данных сейсморазведки 3D. Затем итерационно (параметры пока задаются на каждом шаге) изображение меняется, происходит развитие (рост) фрактальных структур.

2. Базовые основы алгоритма

1) фрактал «стремится» максимально быстро и равномерно заполнить весь имеющийся объем;

2) фрактал растет из максимума «пустоты» к ближайшему максимуму структуры (фрактала);

3) закономерности роста сохраняются на разных масштабах.

Природа устроена так, что она «стремится» к минимуму энергии и максимуму энтропии. Причем, она «старается» уменьшить энергию системы и увеличить ее энтропию максимально быстро, самыми эффективными способами (можно сказать, что это расширенный принцип наименьшего времени) [9, 10]. Аналогичные идеи используются достаточно давно [11]. При формировании трещины происходит разрядка напряжений, увеличение энтропии. И при этом разрядка (разрешение) напряжений снимается наиболее «эффективным образом» - из точки максимального напряжения к ближайшей точке наибольшей разгрузки. Трещина растет в «пустоту» (или «из» нее) и, в конечном счете, распространяется на весь объем. При этом

закономерности роста (например, фрактальная размерность) часто сохраняются на разных масштабах, т.к. природа фрактальна. Заметим, что автором ранее предпринимались попытки моделирования роста фрактальных структур на основе алгоритмов типа «клеточных автоматов» [9], когда задавались законы взаимодействия для нескольких типов частиц, и система развивалась, на каждом шага выбирая вариант, максимальным образом уменьшающий общую энергию системы. Но вычислительно эти подходы оказались очень неэффективны. Поэтому в новом алгоритме не требуется вычислять все возможные варианты роста и минимизировать некоторый функционал, а основная вычислительная задача сводится к нахождению экстремумов. Уместно ли использовать такие термины как «максимум пустоты»? Нам показалось, что этот термин точно и наглядно характеризует место (точку) наименьшей плотности фрактальной структуры (сети трещин), которое мы ассоциируем с максимально напряженным состоянием. Но как говорить про плотность, если фрактальная структура, например, бинарна – на карте есть только значения либо нуль, либо один? Если нуль, то плотность тоже нулевая? Конечно нет, так как плотность это макроскопическая характеристика. В этом случае для оценки плотности (трещин) надо использовать сглаженное (усредненное) изображение. Поэтому алгоритмически «максимум пустоты» определяется, как минимум, на сглаженном изображении фрактальной структуры. База сглаживания в этом случае является пользовательским параметром и определяет «уровень генерализации», влияющий на количество и размер новых «веток» фрактальной структуры.

3. Программная реализация и верификация результатов

Заметим, что в понятие «ближайшая» точка (во втором сформулированном базовом принципе (см. выше) с помощью специальной метрики могут быть учтены направления и выраженность существующих напряжений, то есть, другими словами, мы можем управлять розой-диаграммой фрактальной структуры, определять направления доминантного распространения новых веток (трещин). Пользователь может задавать два направления, соотношение между их амплитудами на розе-диаграмме а также их «размазанность» (пока эти параметры работают для всего изображения в целом).

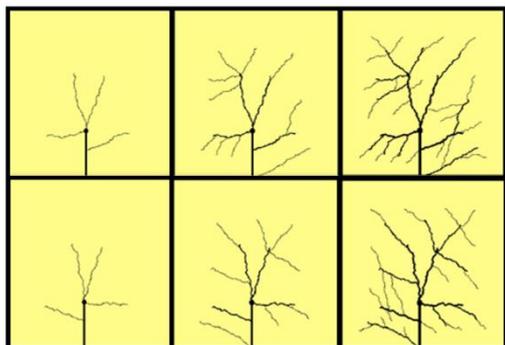


Рис. 1. Пример моделирования роста фрактальных структур в виде деревьев новым алгоритмом. «Зародыш» структуры это вертикальный отрезок с утолщением на конце. Верхний ряд и нижний ряд представляют собой три первых итерации алгоритма (без интерполяции) из одного и того же «зародыша», но при различных параметрах алгоритма. Наблюдаемые различия обусловлены различным заданием доминирующих направлений распространения новых «веток».

Кроме того, в программной реализации алгоритма заложена возможность управления «прямолинейностью» новых «побегов» фрактального дерева и связностью получающейся

структуры (регулировка возможности образования замкнутых структур). Важно отметить, что развитие структуры из некоторого «зародыша» зависит от формы и размеров исходного изображения. Границу мы считаем частью «фрактальной структуры», поэтому развитие (рост) структуры приводит к постепенному заполнению «пустот» на каждой итерации все более тонкими (или амплитудно слабыми) линеаментами.

Пока в качестве критерия адекватности мы рассматриваем воспроизведение при моделировании наблюдаемых в природе явлений, характерных естественных структур. На рисунке 1 показан рост фрактальной структуры в виде деревьев из «зародыша» в виде вертикального отрезка, а на рис.2 – из «зародыша» в виде точки.

На рисунке 1 проиллюстрировано влияние параметров алгоритма. Так задание направления приводит к возникновению «деревьев», которые реально наблюдаются в природе (при определенной розе ветров или ориентации по частям света и т.п.). Заметим, что моделируя рост структуры из одного и того же «зародыша» для разных размеров и формы исходного изображения, мы получаем разные результаты, что соответствует наблюдаемым закономерностям роста в природе (сравните деревья в густом лесу и в открытом поле).

Рисунок 2 хорошо иллюстрирует реализацию первого базового принципа нового алгоритма.

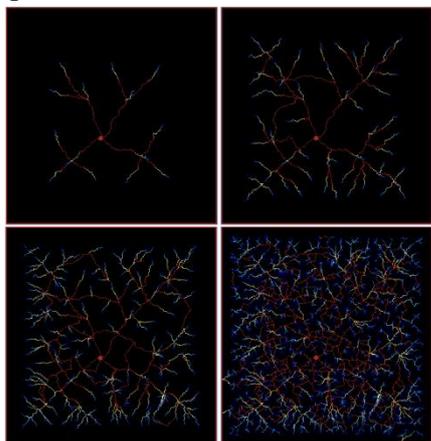


Рис. 2. Пример моделирования роста фрактальной структуры из точки.

По своему смыслу и определению фрактал – самоподобная структура на любом уровне генерализации, в любом масштабе. То есть фрактал бесконечен. Понятно, что работая с гридом, например 25 на 25 метров, мы можем наблюдать рост фрактальной структуры только до некоторого уровня, ограниченного шагом сетки. Поэтому мы пришли к выводу о необходимости комплексирования нового алгоритма роста фрактальных структур и фрактальной интерполяции. С помощью интерполяции мы итерационно переходим к меньшему шагу сетки и на каждом шаге (иногда многократно) запускаем алгоритм роста фрактальной структуры. Таким образом, мы получаем реалистические изображения фрактальной среды в любом масштабе. В качестве метода интерполяции может быть использован известный алгоритм «плазма», нашедший широкое применение при моделировании фрактальных структур, например, реалистичного рельефа в кинематографе.

4. Выводы и дискуссия

Рассмотрение конкретных геологических приложений для новой технологии выходит за рамки данной работы (и будут продемонстрированы в секции «Сейсмические технологии» данной конференции). В целом, возможности ее применения в нефтегазовой отрасли

достаточно многогранны:

1. создание реалистичной фрактальной структуры трещин для прямого моделирования на основе численного решения полноволнового уравнения;
2. моделирование трещин гидроразрыва пласта;
3. создание детальной высокоразрешенной модели трещинной среды, соответствующей сейсмическим данным и данным микросканеров трещиноватости.

Полученная высокоразрешенная модель трещинной среды может быть использована для оптимизации и анализа разработки и существенного расширения возможностей «ручной» тектонофизической интерпретации [12].

К ограничениям новой технологии можно отнести возможность моделирования только «вторичной трещиноватости», не связанной с активными тектоническими движениями. То есть, в модели смещение частей среды друг относительно друга не заложено, поэтому трещин в виде кулис, например, мы получить в рамках этой технологии не можем. Заметим также, что развитая технология требовательна не к вычислительным мощностям, а к возможностям для работы с высокоразрешенными, огромными по размеру, изображениями. Действительно, при стандартной сейсмической съемке 3D, например 10 на 10 км, при переходе к шагу сетки 10 см срез сейсмического куба будет содержать ~ 10 млрд. точек. То есть, даже на мониторе 4K мы можем изучать «точка в точку» только кусочек области месторождения не более чем 300 на 300 метров. Возможно, к суперкомпьютерным технологиям следует отнести и технологии, требующие не только высоких вычислительных мощностей, но высокотехнологичных средств визуализации 2D и 3D данных.

Интересно отметить, что, на самом деле, первый базовый принцип алгоритма является просто следствием второго и третьего. То есть он автоматически выполняется с некоторой точностью, если последовательно реализовать второй принцип на разных масштабах. Замечательно, что верно и обратное: можно обойтись только первым принципом, т.к. он является более фундаментальным, и рассматривать второй как один из возможных способов его реализации. Конечно, второй принцип не может обеспечить точное выполнение первого, но дает возможность простой и быстрой его приблизительной реализации. В условиях, когда точные параметры среды неизвестны, и рассчитать энергию и энтропию различных возможных состояний системы не представляется возможным, **второй базовый принцип метода почти всегда обеспечивает практически приемлемое решение.** Именно поэтому было решено при описании нового метода оставить оба обсуждаемых выше принципа.

Представляется перспективным дальнейшее совершенствование новой технологии, в частности, создание полноценного 3D алгоритма, его верификация на синтетических и реальных тестах для проверки адекватности моделирования в различных условиях и различных средах.

Список литературы

Шленкин С.И., Масюков А.В., Масюков В.В и др. Вычисление кубов когерентности и сингулярностей // Технологии сейсморазведки. 2012.– № 2.– С. 5-11

Харахинов В.В., Шленкин С.И., Зеренинов В.А и др. Новые подходы к созданию геологических моделей трещинных резервуаров в древних комплексах Восточной Сибири // Нефтяное хозяйство, №11, 2012, С.93-97

Харахинов В.В., Шленкин С.И., Афонасин В.В. и др. Особенности геологического и гидродинамического моделирования трещинных резервуаров в древних комплексах

Восточной Сибири // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2013.– № 2.– С. 11-20

Масюков В.В., Харахинов В.В. Новый подход к кластеризации трещинных коллекторов углеводородов на основе данных 3D сейсморазведки // Технологии сейсморазведки. – 2015.– № 2. – С. 29-35

Афонасин В.В., Масюков В.В. Развитие методов предсказания трещиноватости на основе сейсморазведки 3D требует совершенствования аппаратуры для прямых скважинных измерений трещиноватости // Приборы и системы разведочной геофизики. –2016. – Т. 56.– № 2. – С. 27-34

Масюков А.В., Масюков В.В., Берин М.В., Юрченко О.С. Обнаружение нарушений когерентности при сдвиге на период и выделение разномасштабных особенностей сейсмических данных В сборнике: Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение Материалы научно-практической конференции. 2017. С. 26-29.

Масюков А.В., Масюков В.В., Шлёнкин В.И. Предсказание трещиноватости на основе незеркальной компоненты сейсмического поля: сопоставление с микроимиджерами В книге: Сейсмические технологии-2016 научно-практическая конференция: сборник тезисов. 2016. С. 44-47.

Масюков В.В., Масюков А.В., Шленкин В.И., Берин М.В., Юрченко О.С. Совершенствование технологии выявления и использования спектральных аномалий сейсмических данных В сборнике: Сейсмические технологии- 2017 материалы научно-практической конференции. ООО «Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В. Ломоносова». 2017. С. 188-191.

Свидетельство о регистрации программы на ЭВМ EvolDIST № 2011615678 от 20.06.2011.

Белов А.Н., Масюков В.В. Модель контролируемого горнолыжного спуска и ее гидродинамические аналогии // Вестник ТвГУ, серия: прикл. матем. – 2012. – № 1(24).– С. 49-66.

Мартюшев Л.М. Принцип максимальности производства энтропии в физике и смежных областях. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. – 2006. – 83 с.

Юрченко О.С. Тектонофизические исследования на основе данных МОГТ 3D // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений – 2008.– № 12.– С. 32-41.