

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СУММИРОВАНИЯ ГАУССОВЫХ ПУЧКОВ К ЗАДАЧАМ ГЕОФИЗИКИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, МИГРАЦИЯ, ПОСТРОЕНИЕ СКОРОСТНОГО РАЗРЕЗА.

М. М. Попов

*(ПОМИ имени В.А. Стеклова РАН, Санкт-Петербург, Россия)*

# APPLICATION OF THE GAUSSIAN BEAM SUMMATION METHOD IN GEOPHYSICS: MODELLING, MIGRATION, TOMOGRAPHY

M. M. Popov

*(St. Petersburg V.A. Steklov Mathematical Institute, Russia)*

## **Аннотация**

В докладе излагаются ключевые моменты метода суммирования гауссовых пучков (МСГП) и обсуждаются возможности применения этого метода к задачам сейсморазведки, связанным с моделированием волновых полей, глубинной миграцией и томографией. Практическая эффективность предложенных методов демонстрируется с помощью стандартных синтетических тестов таких как: Salt Bag, BP Velocity и Sigsbee2A.

## **Abstract**

In the presentation the key points of the Gaussian Beam Summation Method (GBSM) and its applications to problems of exploration geophysics related with modeling of wave fields, depth migration and tomography are discussed. The efficiency of the proposed methods is demonstrated on the synthetic benchmark datasets such as: Salt Bag, BP Velocity and Sigsbee2A.

Алгоритмы, основанные на лучевом представлении волновых полей, являются в настоящее время основным инструментом вычислительной геофизики. Их достоинствами являются наглядность, простота программной реализации, высокая эффективность и легкость переноса на распределенные вычислительные системы. Однако они обладают и значительными недостатками, такими как, например, появление сингулярностей при описании волнового поля на каустиках, трудности с учетом поздних вступлений и т.п. Это приводит к деградации результатов моделирования и миграции Кирхгофа в том случае, когда исследуемый геофизический объект имеет сложную структуру, приводящую к многочисленным каустикам. Использование лучевого приближения в алгоритмах томографии для итеративного восстановления скоростной модели среды на основе записанных на сейсмической поверхности отраженных и/или рефрагированных волн также приводит к ряду естественных ограничений, таких как необходимость трудоемкого выделения сейсмических волн на сейсмограммах, ограниченность разрешения восстановленной скорости шириной первой зоны Френеля и, что наиболее важно, почти полной невозможность восстановления структуры среды расположенной под массивными соляными включениями сложной формы.

В свою очередь методы моделирования, глубинной миграции до суммирования и томографии, основанные на применении конечно-разностных схем лишены большинства недостатков лучевых методов, но

требуют значительно больших вычислительных ресурсов и более точного знания начальной скоростной модели среды.

В 1980-х годах в ленинградской математической школе по теории дифракции и распространению волн был создан и развит метод суммирования гауссовых пучков (МСГП) для расчета волновых полей различной физической природы. Он позволил преодолеть проблемы с каустиками и в тоже время сохранил отмеченные выше преимущества лучевого подхода. В последнее время МСГП стал активно использоваться в ПОМИ им. В.А. Стеклова для построения алгоритмов вычислительной сейсморазведки.

В настоящем докладе излагаются основные идеи применения МСГП в прикладных геофизических задачах, таких как моделирование сейсмических волн в сложных средах, глубинная миграция до суммирования и восстановление скоростных разрезов по сейсмическим данным.

**Моделирование.** Основную идею МСГП можно наглядно описать следующим образом. Для того, чтобы вычислить волновое поле в некоторой точке  $M$ , необходимо построить веер лучей, более или менее равномерно покрывающих некоторую окрестность  $M$ . Для каждого такого луча строится гауссов пучок, распространяющийся вдоль него. Затем вклады гауссовых пучков в  $M$  суммируются по всем лучам веера. Поскольку гауссовы пучки не имеют особенностей на каустиках, построенный таким образом численный алгоритм приближенного вычисления волнового поля не зависит как от положения  $M$  относительно каустики, так и от ее геометрической структуры. Ввиду того, что амплитуда гауссова пучка быстро убывает при удалении от центрального луча, существенный вклад в величину амплитуды волнового поля в точке  $M$  дают лишь те из них, которые оказываются удаленными от  $M$  не более чем на полуширину пучка. Уже первые численные эксперименты, выполненные в 1980-х годах, показали, что для построения волнового поля с относительной ошибкой порядка 5%, необходимо просуммировать вклады около 20 гауссовых пучков. При наличии в среде границ необходимо строить отраженные и преломленные гауссовы пучки подобно тому, как это делается в лучевом методе.

В наших исследованиях мы использовали основанные на МСГП алгоритмы моделирования для построения синтетических сейсмограмм, оценки освещенности выделенных интерфейсов в области миграции, а также как составную часть нашего алгоритма томографии.

**Глубинная миграция до суммирования.** Наша схема применения МСГП к задаче миграции может быть наглядно описана следующим образом. Предположим, что на сейсмограмме имеется отраженная волна. Если мы продолжим ее обратно во времени вглубь области миграции одновременно с построением прямого волнового поля, используя заданную начальную и достаточно сглаженную скоростную модель, и фиксируем ее в таком положении, где обе волны окажутся когерентны, т.е. совпадут по фазе, то мы получим изображение отражающего интерфейса, который породил исходную волну на сейсмограмме. Однако, поскольку условие когерентности прямого

и обратно продолженного волновых полей на отражающей границе является только необходимым, но не достаточным условием, последующее суммирование мигрированных изображений, построенных по сейсмограммам, соответствующим разным позициям источников или приемников, позволяет подавить области, где прямое и обратное поля оказываются случайно когерентны, тем самым, улучшая качество изображения.

В качестве преимущества нашего алгоритма миграции отметим следующее: 1) отсутствие проблем с каустиками; 2) возможность обработки сейсмических данных, соответствующих произвольной конфигурации источников и приемников (включая ВСП), расположенных как на сейсмической поверхности так и внутри скважин; 3) естественное включение/исключение из процесса миграции запаздывающих вступлений; 4) ориентированность алгоритма на прицельную миграцию; 5) возможность построения изображений в истинных амплитудах; 6) простота адаптации алгоритма к выполнению на распределенных вычислительных системах, в том числе и кластерах гибридной структуры.

Следует отметить, что наш метод глубинной миграции до суммирования существенно отличается от метода, предложенного в 2001 году Хиллом (N.R. Hill), в котором также используются элементы МСП. Метод Хилла является дальнейшим развитием алгоритма глубинной миграции до суммирования Кирхгофа, где каждый отдельный луч, выходящий из общей средней точки на сейсмической поверхности, заменен одним гауссовым пучком, который переносит в глубину соответствующую угловую компоненту сейсмограммы общей средней точки, сосредоточенную на заранее заданном интервале. Хотя алгоритм Хилла дает возможность использовать при построении сейсмических изображений не только первые, но и более поздние вступления, его метод не позволяет учесть все вступления и вычислить правильные амплитуды волновых полей, что является препятствием к построению изображений в истинных амплитудах. Тем не менее, метод Хилла обладает высокой производительностью и позволяет получать визуально качественные сейсмические изображения.

**Томография.** Наш алгоритм итеративного восстановления скоростной модели по известным сейсмическим данным построен на использовании характерных особенностей МСП. Используя локальную когерентность гауссовых пучков в выбранной точке изображения, полученного по результатам миграции после суммирования, которая выполнена по начальной скоростной модели, и осуществляя затем демиграцию, автоматическую фильтрацию и выбор подобных вступлений, отсортированных по углам выхода луча, мы получаем возможность избежать трудоемкого ручного выделения сейсмических волн на соответствующих сейсмограммах. Используя моделирование с гауссовыми пучками, мы вычисляем невязку между замеренными и смоделированными вступлениями, учитывая при этом, в отличие от лучевой томографии, также информацию, содержащуюся в амплитудах. Основными достоинствами нашего алгоритма является

практически полная независимость получаемого результата от качества начальной скоростной модели и возможность восстановления среды под массивными соляными включениями, что является крайне трудной или даже неразрешимой задачей для существующих методов как лучевой, так и волновой томографии.

\*\*\*\*\*