

Пути повышения производительности вибросейсморазведки

- Жуков А.П., ООО «Геофизические Системы Данных», г. Москва
- Скирта Д.А., Московский государственный университет, г. Москва
- Шехтман Г.А., ООО «НПП «Спецгеофизика»», г. Москва

Повышение производительности вибросейсморазведки (ВСР) с самого начала ее применения стало едва ли не наиболее важной проблемой. Обусловлено это было тем, что требуемое отношение сигнал/помеха достигалось в ВСР путем увеличения продолжительности свип-сигнала, а платить за это приходилось неизбежным снижением количества физических наблюдений, т.е. производительности [Гридин и др., 2014]. Поэтому одной из важнейших задач, стоящих перед сейсморазведчиками, стало повышение производительности ВСР с минимальным ущербом для качества полевых материалов.

Производительность вибросейсмических исследований можно оценить так:

$$Q = \frac{3600 \cdot N}{T_v + T_n + t},$$

где Q – производительность (число физических наблюдений в день), N – число одновременно отрабатываемых пунктов возбуждения (ПВ); T_v и T_n – затраты времени на возбуждение и приём колебаний, соответственно; t – затраты времени на переезд источников на новое место [Шнеерсон, Жуков, 2013].

Таким образом, производительность может быть увеличена либо путем сокращения времени отработки ПВ либо путем одновременной отработки нескольких ПВ. Рассмотрим возможности повышения производительности ВСР в рамках каждого из этих направлений.

1. Снижение длительности единичного цикла возбуждения.

В рамках данного направления прора-

батываются способы снижения временных издержек при отработке отдельных ПВ: временных затрат на перемещение источников, возбуждение и приём колебаний.

1.1 Попеременная отработка несколькими группами.

Данное решение представляет собой рациональный подход к организации работы нескольких групп источников на исследуемой площади. Идея заключается в том, чтобы в течение интервала времени от начала возбуждения колебаний первой группой и до полного завершения регистрации полезных колебаний, сформированных этой группой, вторая группа вибраторов перемещалась и была готова к работе на следующем ПВ. Этот способ, получивший название *flip-flop*, сокращает временной цикл отработки каждого ПВ на время, необходимое для перемещения группы вибраторов с точки на точку. В тех случаях, когда оперативное перемещение одной из групп вибраторов затруднено, используют 3-4 группы вибраторов.

1.2 Применение длительных управляющих сигналов.

При проведении вибросейсмических исследований до сих пор практически повсеместно проводится *накапливание сигналов*, т.е. отработка одного и того же ПВ несколько раз с последующим суммированием полученных записей. При этом заметно увеличивается отношение сигнал/помеха. Однако тот же эффект может быть достигнут увеличением длительности управляющего сигнала. В этом случае отпадает необходимость в приёме и регистрации колебаний после

каждого воздействия, что ведёт к повышению производительности работ.

1.3 Оптимизация навигационных систем.

Производство недорогих и при этом миниатюрных GPS-чипов привело к появлению на рынке большого количества автономных регистрирующих систем. Широкие возможности для применения глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) существуют как для пунктов приема (ПП), так и для ПВ. Последнее в случае вибросейсморазведки сами определяют свои координаты и начало возбуждения свип-сигнала, что позволяет развивать новые высокопроизводительные методики наблюдений с автономными источниками и приемниками. При этом наблюдения проводят не только на открытой местности, но и в сложных поверхностных условиях, включая населенные пункты.

В современных методиках наземной сейсморазведки спутниковая система позволяет не только определить координаты ПП и вибраторов, но также осуществить режим наведения вибраторов на следующие виброточки. Это позволяет реализовать съемки без предварительной разбивки пикетов, что также повышает общую производительность работ.

1.4 Автоматизация установки сейсмических датчиков.

Заглубление датчиков давно получило признание в сейсморазведке как эффективное средство для уменьшения уровня микросейсм и повышения частоты контактного резонанса вплоть до выведения ее за пределы рабочей полосы частот. Наибольшую востребованность заглубленные датчики получили в бескабельных системах. К примеру, бескабельная система NuSeis содержит регистраторы NRU, снабженные встроенными высокочувствительными приемниками, распо-

ложенными в нижней части обтекаемого сигарообразного корпуса длиной около 20 см. Такая конструкция регистраторов позволяет осуществлять их почти полное погружение в грунт или плотный снег.

Заглубление регистраторов в бескабельных системах, осуществляемое вручную, приводит к существенному снижению производительности работ. Это привело к необходимости разработать автоматизированные установщики. Для модулей NRU в США были разработаны колесные и гусеничные «автоматы», управляемые одним человеком. Они содержат до 300 заглубляемых модулей. По команде оператора осуществляется выдавливание или пробивка углублений в грунте в заданных ПП, сбрасывание в эти углубления модулей NRU из заранее заряженных кассет и последующее обдавливание модулей, обеспечивающее хороший контакт с грунтом.

Завершается разработка «динамического автомата» на дронах с возможностью устанавливать и собирать модули NRU на ходу, что бесспорно повысит производительность полевых работ.

1.5 Применение дронов и роботов.

Беспилотный летательный аппарат (БПЛА), получивший в англоязычных странах в разговорной речи название *дрон* (от английского *drone* – трутень), находит все большее применение в разведочной геофизике. Использование таких аппаратов обеспечивает автоматизацию полевых работ и, соответственно, резкое увеличение их производительности. Кроме того, появление модификаций легких и доступных дронов позволило отказаться от пилотируемых вертолетов и существенно снизить стоимость контроля бескабельных расстановок.

Университет Хьюстона значительно продвинулся в вопросах роботизации и

занился конструированием «сейсмического дрона» [Stewart et al., 2016]. В Техасе были проведены опытные работы с дроном-квадрокоптером, в четырех лапах-опорах которого были установлены сейсмоприемники для регистрации сейсмических колебаний (рис. 1). Такой автономный регистрирующий прибор способен перелетать с места на место по команде оператора и в нужные интервалы времени регистрировать сейсморазведочные данные.

Контакт сейсмоприемников с грунтом у сейсмического дрона получается намного хуже, чем у сейсмоприемников, вдавленных в грунт вручную. На записях, полученных от сейсмоприемника, прикрепленного к дрону, наблюдаются помехи резонансного характера, наиболее заметные на участках с высокой травой (рис. 2). В целом же качество сейсмограмм сопоставимо, что доказывает хорошие перспективы применения сейсмических дронов в случае относительно мягкого грунта (поля с невысокой травой, пашня и т.п.).

В настоящее время разрабатывается множество дронов и самоходных наземных аппаратов, содержащих сейсмоприемники (рис. 3). Отметим, что практика сейсморазведочных работ не вполне поспевает за их автоматизацией и роботизацией, которым сопутствует неизбежное ухудшение качества сейсмических

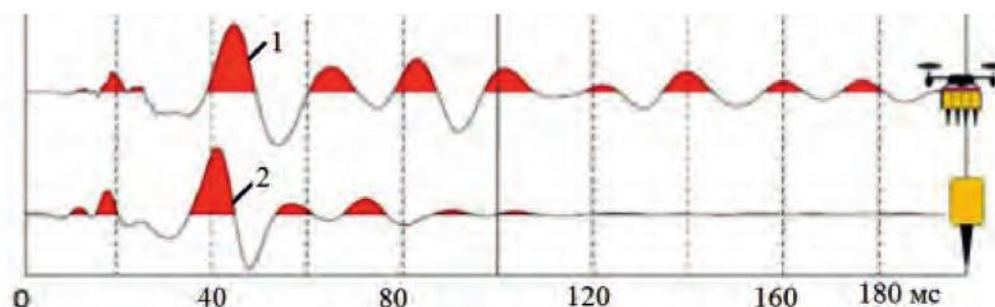


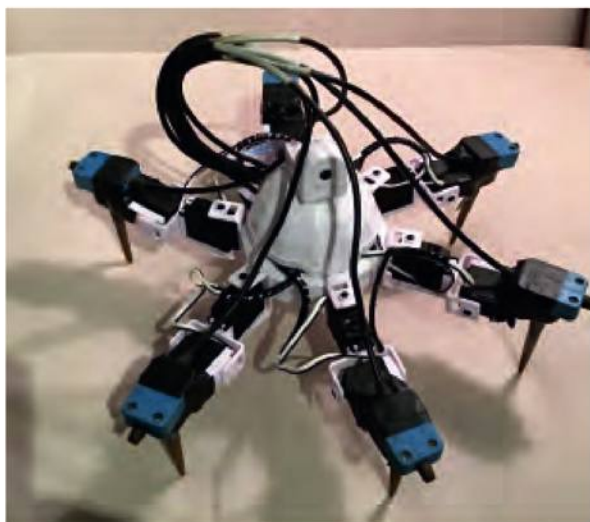
▲ Рис. 1. Сейсмический квадрокоптер с прикрепленной к нему четвероногой записывающей платформой с сейсмоприемниками в каждой из ног. Модифицированный рисунок из [Stewart et al., 2016].

записей, полученных с использованием дронов и прикрепленных к ним роботов. Предстоит еще многое сделать, чтобы справиться с резонансными колебаниями, возникающими на контакте сейсмоприемника со средой.

Устройства, сопряженные с легкими дронами, пока не в состоянии обеспечить надежный контакт с грунтом, исключая регистрацию резонансных помех. Возможно, один из путей преодоления этих трудностей состоит в использовании такого же подхода к данной проблеме, как и в буксируемых наземных косах (стримерах) [Кузнецов, 2013]. Суть его заключается в использовании утяжеленных самоориентирующихся

▼ Рис. 2. Сопоставление записей, полученных путем использования дрона (1) и от заглубленного сейсмоприемника, содержащего концентратор (2). Модифицированный рисунок из [Stewart et al., 2016].





▲ Рис. 3. Самоходный шестирычажный робот, транспортируемый дроном. К каждому рычагу прикреплен сейсмоприемник. Модифицированный рисунок из [Stewart et al., 2016].

геофонов на кардановом подвесе.

2. Увеличение количества одновременно работающих вибраторов.

Сущность такого подхода к решению проблемы вполне ясна из его определения: увеличив количество одновременно работающих источников, мы получим большее количество данных за единицу времени, т.е. напрямую увеличим производительность.

Строгую классификацию методов этой группы составить довольно затруднительно в силу их многообразия и технологической сложности. Танг и Кампман [Tang, Campman, 2016] рассмотрели эти методы с точки зрения когерентности волновых полей отдельных источников (в таком случае большинство методов являются некогерентными) и предложили собственную схему когерентного излучения. Багаини [Bagaini, 2010] выделил три типа методов: одновременное излучение (*simultaneous shooting*), каскадный свип (*cascaded sweep*) и скользящий свип (*slip-sweep*), в зависимости от длительности времени слушания (и наличия такового). В его же работе

[Bagaini et al., 2012] описан более общий подход, согласно которому всю совокупность методов подразделяют на две категории: независимое одновременное вибрирование (*Independent Simultaneous Shooting, ISS*) и управляемое одновременное вибрирование (*Managed Simultaneous Shooting, MSS*). К первой категории относятся методы, в которых отдельные источники действуют совершенно независимо; в методах второй применяют определённые правила их расположения и времени начала работы.

При одновременной работе нескольких вибраторов возбуждаемые ими волновые поля накладываются друг на друга, что создаёт помехи на результирующем изображении. Эти помехи впоследствии довольно успешно устраняются методами обработки, однако результат во многом зависит от качества исходных коррелограмм. Поэтому каждая методика, подразумевающая одновременную работу источников, предлагает свои способы разделения волновых полей на этапе излучения. Авторы настоящего обзора предлагают взять именно этот принцип за основу классификации методик из данной группы. Таким образом, все методики с увеличением числа одновременно работающих вибраторов можно распределить в три категории:

- разделение во времени и в пространстве (в области $t-x$);
- разделение в частотной области (по частотному спектру);
- разделение в фазовой области (по фазовому спектру).

2.1 Методы, основанные на разделении сигналов в пространстве и времени.

Разделение сигналов в методиках этой группы осуществляется за счёт определённых расстояний на местности между источниками и/или временных сдвигов между отсчётами старта их работы. При

этом сигналы либо совершенно разделены во времени, либо излучаются таким образом, чтобы одна и та же частота спектра не излучалась двумя источниками одновременно. Такие методы получили довольно широкое распространение в силу относительной простоты реализации при высокой эффективности.

1) Скользящий свип (*slip-sweep*).

Основы метода впервые предложены в работе [Rozemond, 1996]. Возбуждение колебаний следующей группой проводят в то время, когда предыдущая ещё продолжает работу, с использованием того же свип-сигнала. При этом формируемые ими волновые поля разделены во времени: интервалы между точками старта работы отдельных групп (*slip time*) выбирают с учётом необходимости полного освещения разреза. Это условие позволяет исключить совпадение моментов вступления свип-сигналов, соответствующих целевым отражениям, формируемым разными группами вибраторов, и обеспечивает временную селекцию корреляционных импульсов от разных групп. Последовательности перекрывающихся таким образом вибросейсмических записей сохраняются в памяти регистрирующей системы и затем с использованием отметки момента для каждого возбуждения коррелируются с соответствующим управляющим сигналом.

По оценке разработчиков данного способа, потенциальный максимум его производительности может составить 360 физических наблюдений в час при использовании 4-х групп вибраторов и временном цикле отработки каждого пикета, равном 10 с. К недостаткам данного способа следует отнести мешающее влияние гармонических помех, формируемых вследствие нелинейных искажений высокоамплитудных колебаний, регистрируемых в области первых

вступлений при последующих воздействиях и включаемых в конечные интервалы виброграммы от предыдущих воздействий. Уровень таких помех возрастает по мере того, как временной цикл отработки пикетов приближается ко времени прослушивания. Однако эти помехи могут быть определены экспериментально либо расчетным путем и затем исключены из каждой коррелограммы путем вычитания. Тем самым в принципе возможно поддерживать временной цикл отработки пикетов близким ко времени прослушивания.

Способ давно внедрён в сейсморазведочную практику, в том числе в России, он демонстрирует высокую эффективность (например, [Исмагилов и др, 2013], [Смирнов, Бондарев, 2017]).

2) Динамический скользящий свип (*dynamic slip-sweep*).

Данный способ является модификацией скользящего свипа и отличается от него наличием дополнительного изменяемого параметра – дистанции между одновременно работающими источниками (*slip distance*). Параметры взаимозависимы: чем выше дистанция, тем меньше временной интервал, и, следовательно, выше производительность. Соотношение этих характеристик (т.н. *time-distance rules*, TDR) выбирается с целью оптимального подавления интерференционных и гармонических помех. Основы способа изложены в работе [Liu et al., 2014].

3) Одновременное вибрирование с разделением по расстоянию (*Distance Separated Simultaneous Sweeping*, DSSS, или DS3), предложено в работе [Boushka, 2010]. Принцип технологии довольно прост: действующие одновременно источники располагаются друг от друга на расстоянии, превышающем удвоенный максимальный вынос: таким обра-

зом, зона интерференции волновых полей будет располагаться ниже целевого интервала исследований. В той же работе приводится пример успешного применения метода при широкоазимутальных высокоплотных наблюдениях в Омане. Также описано его применение при изучении угольных залежей [Batting et al., 2019].

4) Метод псевдослучайных временных сдвигов (*pseudorandom time delays*).

Технология, предложенная в работе [Hampson et al., 2008], напоминает метод скользящего свипа, но с различными псевдослучайными сдвигами между временами старта отдельных источников. Такой подход позволяет снизить когерентность интерференционных помех.

5) Методика независимого возбуждения сигналов (*Independent Simultaneous Sweeping, ISS*).

Метод является зарегистрированной технологией компании British Petroleum и впервые описан в работе [Howe et al., 2008]. Он основан на использовании современных систем ГНСС и непрерывной регистрации. Вибраторы, оснащенные системами GPS, работают совершенно независимо друг от друга и возбуждают один или несколько сигналов различной длительности, с тем, чтобы суммарная энергия воздействия на всех ПВ была одинакова. Радиосвязь между вибраторами и сейсмостанцией в этой методике не обязательна, а время начала возбуждения свип-сигналов и времена сейсмических отсчетов присваиваются при помощи системы GPS. Взаимное влияние волновых полей источников друг на друга на выборках равных удалений приобретает характер случайного шума и устраняется стандартными процедурами обработки.

Метод позволяеткратно повысить производительность работ (увеличение зависит только от количества одновременно работающих вибраторов) без потери качества окончательных изображений. Существенно, что поломка одного из источников мало влияет на ход работ.

Примеры успешного применения метода описаны в ряде статей, в том числе [Stone, Tailor, 2010; McCarthy et al., 2017; Коротков, Жуков, 2020]. Известны также примеры применения ISSN, т.е. технологии ISS с нодальными регистрирующими системами [Howe et al, 2013; Ahmad et al., 2013; Dvorak et al., 2014].

6) Сверхвысокопроизводительная методика (*Ultra High Productivity, UHP*).

Технология, разработанная специалистами компании Petroleum Department Oman, во многом схожа с технологией ISS, но подразумевает сочетание некоторых минимальных правил расположения источников в пространстве и временных сдвигов между отсчётами старта их работы. Подробное описание метода и пример его применения на практике приведены в статье [Zhao et al., 2018]. Отметим, что, несмотря на название этого метода, технология ISS позволяет добиться более высоких показателей производительности (более 40 тыс. ПВ в сутки против 25-30 тыс. у метода UHP).

2.2 Методы, основанные на разделении сигналов в частотной области.

Для данной группы методов также не происходит одновременного излучения одной и той же частоты спектра, но этот эффект достигается видоизменением самого сигнала, внесением изменений в его частотный спектр либо в закон изменения частоты во времени.

1) Взаимно ортогональные сигналы (*upsweep + downsweep*).

Управляющие сигналы (также называемые свип-сигналами или вибросейсмическими развёртками) представляют собой квазигармонические колебания с изменяющейся во времени частотой. При этом частота может со временем как возрастать (*upsweep*), так и снижаться (*downsweep*). Взаимно ортогональными называют свип-сигналы, взаимная корреляция которых стремится к нулю: пара *upsweep + downsweep* относится именно к таким сигналам..

Исторически одним из первых способов, нацеленных на повышение производительности ВСП, был способ, в котором применяется обработка двух ПВ с использованием взаимно ортогональных вибросейсмических сигналов при регистрации записей на один носитель. При этом с первого ПВ задают ЛЧМ-сигнал типа *upsweep*, а для второго ПВ – такой же по длительности и по частотному диапазону ЛЧМ-сигнал типа *downsweep*. При корреляционной обработке такой записи с разными свип-сигналами получают соответствующие им коррелограммы.

Этот способ позволил примерно в 2 раза повысить производительность работ. Однако при этом на коррелограммах присутствует фон помех, связанный с работой другого ПВ. Для устранения этого недостатка потребовалась некоторая модернизация. Модернизированный способ для каждого из двух ПВ предусматривает применение ортогональных сигналов, но в виде четного количества разнополярных сегментов комбинированного сигнала. При этом кодовые функции последовательностей сегментов комбинированных сигналов выбирают, исходя из условия полного исключения взаимного влияния волновых полей, возбуждаемых разными группами вибраторов [Deluchi et al., 1987]. Поскольку модернизация ориги-

нального метода помимо обращения зависимости частоты от времени подразумевает также фазовое кодирование сигнала, в нашей классификации она может быть отнесена также к методам с разделением сигналов в фазовой области.

2) Взаимно ортогональные сигналы с переменным диапазоном частот (*orthogonal vibroseis sweeps*).

Данный метод также предполагает излучение взаимно ортогональных сигналов, но построены они на нескольких иных принципах. В работе [Xia et al., 2005] предлагается использовать развёртки, состоящие из набора сегментов. Длительность и спектральный состав каждого сегмента выбираются таким образом, чтобы одновременно излучаемые сегменты относились к разным, не перекрывающимся, диапазонам частот, и, следовательно, были бы взаимно ортогональны.

3) Смешанный сбор данных с распределённым массивом источников (*blended acquisition with dispersed source array*).

Теоретические основы метода изложены в работе [Berkhout, Blacquiére, 2011]. Он подразумевает одновременное излучение множества узкополосных сигналов с различными центральными частотами, в сумме перекрывающих нужный диапазон частот. Метод подразумевает рассеянное размещение излучателей (*Dispersed Source Array, DSA*) на площади, так как в соответствии с критерием Найквиста расстояния между источниками должны быть меньше половины длины излучаемой волны. Такой подход позволяет перейти к узкополосным виброисточникам более простой конструкции. В дальнейшем метод получил развитие: в работе [Ishiyama, Wei, 2021] предлагается дополнить оригинальную технологию различ-

ными и/или модулированными свип-сигналами. Кроме того, в другой работе авторов исходного метода [Berkhout, Blacquiére, 2013] показано, что использование смешанных наблюдений позволяет даже повысить отношение сигнал/помеха на исходных данных относительно стандартной вибрационной сейсморазведки благодаря увеличению временной плотности энергии источников.

4) Псевдослучайные сигналы (*pseudo-random sweeps*).

Псевдослучайными называют свип-сигналы, зависимость излучаемой частоты от времени в которых носит характер, близкий к случайному (хотя в действительности они задаются в соответствии с определённым законом). Такие сигналы известны довольно давно: они, как и многие другие нелинейные развёртки, были описаны в статье [Goupillaud, 1976], однако сейчас интерес к ним снова пробуждается в связи с развитием методов повышения производительности вибрационной сейсморазведки. К примеру, в отечественной технологии Shuffle. Исходный ЛЧМ сигнал (или сигнал другого типа) разбивают на интервалы, которые соизмеримы между собой по временной продолжительности, при этом продолжительность отдельного интервала на два порядка меньше продолжительности управляющего сигнала. После этого интервалы сигнала стыкуют между собой в виде новой последовательности, причем место каждого из выделенных ранее интервалов в этой последовательности определяют по датчику случайных чисел [Гридин и др., 2016]. Поскольку закон, по которому изменяется частота в псевдослучайной развёртке, меняется от источника к источнику, результирующие сигналы довольно слабо коррелируют между

собой при одновременном излучении, что значительно снижает уровень интерференционных помех.

Различные типы псевдослучайных сигналов подробно описаны в работе [Dean, 2014]. Один из примеров применения подобных сигналов в контексте повышения производительности приведён в статье [Zhukov et al., 2017], где отмечается повышение доли высоких частот на результирующей записи. В работе [Scholtz, 2014] предлагается способ оптимизации псевдослучайных сигналов для расширения спектра записи в область низких частот.

5) Свип-сигналы переменной длительности (*dithered sweep length*).

В работе [Dean et al., 2016] предложено использовать при одновременном излучении свип-сигналы со слегка изменяющейся длительностью. Такой подход менее эффективен с точки зрения разделения волновых полей (в сравнении с методами фазопеременных сигналов), но зато менее чувствителен к нерегулярности съёмки и позволяет подавлять гармонические помехи в ситуациях, когда невозможно применить фазопеременные развёртки.

2.3 Методы, основанные на разделении сигналов в фазовой области.

В таких методах разделение сигналов происходит посредством внесения изменений в их фазовые спектры.

1) Каскадные свип-сигналы (*cascaded sweeps*).

При использовании данного метода свип-сигналы, идентичные по длительности и частотному диапазону, излучаются один за другим без временных задержек (эти развёртки часто рассматриваются как сегменты одного каскадного свипа). Каждый последующий сегмент сдвигается в фазовой области на $2\pi/n$, где

n – число сигналов в серии. Затем проводится корреляция со свип-сигналом, имеющим соответствующий набор фазовых сдвигов и один дополнительный сегмент, идентичный первому: это нужно для эффективного подавления гармонических искажений, о которых пойдёт речь далее. Метод разработан компанией Exxon Mobil и впервые описан в патенте [Andersen, US Patent № 5410517 (Apr. 25, 1995)]. В работе [Benabentos et al., 2006] описано применение метода в рамках полевого эксперимента в Мексике.

2) Вибрационная сейсморазведка повышенной надёжности (*High-Fidelity Vibratory Seismic*, HFVS).

Данный метод, впервые описанный в статье [Allen et al., 1998], основан на использовании при обработке данных сигнала, записанного акселерометрами, установленными на опорной плите и инерционной массе виброисточника (*ground-force* сигнала). Это позволяет повысить достоверность данных, поскольку при таком подходе устраняется искажающее влияние кратных гармоник, изгибания опорной плиты и неоднородностей внутри излучающих групп. Кроме того, авторы кратко затрагивают тему фазового кодирования сигналов при одновременной работе нескольких источников. Эту тему продолжает работа [Moldoveanu, Tite, 1999], в которой описывается способ повышения отношения сигнал/помеха для метода HFVS в сложных геологических условиях путем перемещения групп с перекрытиями и разделения частотного диапазона развёртки на несколько сегментов. Затем в статье [Moldoveanu et al., 2017] рассматривается применение в полевых условиях комбинации фазового и частотного кодирования, что повышает ортогональность сигналов отдельных источников и

снижает эффект зашумления кратными гармониками.

Специфические проблемы, характерные для методов одновременного излучения:

1) Необходимость непрерывной регистрации крупными приёмными расстановками (т.н. «супер-спредами») и в течение длительного периода времени.

Эта проблема характерна для всех методов одновременного излучения и является их неотъемлемой составляющей. Такое требование накладывает соответствующие издержки для исполнителя работ с точки зрения технического обеспечения, логистики и контроля; этот факт должен учитываться при расчёте экономического эффекта от применения метода. Отчасти связанные с этим фактором неудобства могут быть нивелированы использованием бескабельных систем регистрации, однако они имеют свои недостатки, связанные с автономностью модулей, невозможностью контролировать их состояние и качество регистрируемых данных.

2) Невозможность проведения контроля качества данных в реальном времени.

Из непрерывности и продолжительности записи следует невозможность контролировать её качество в реальном времени стандартными методами. В настоящее время значимость полевого контроля качества (QC) снижается; тем не менее, этот фактор накладывает дополнительные риски на производство работ.

3) Подавление интерференционных помех (*деблендинг*).

Главной и основополагающей проблемой при использовании методов с одновременным излучением является устранение взаимного влияния волновых полей отдельных источников друг на друга. Ранее уже были рассмотрены

способы снижения этого влияния на этапе проведения полевых работ. Ниже речь пойдёт о подавлении интерференционных помех, остающихся на записях после корреляции.

В целом сейчас выделяются три принципиальных подхода к решению данной проблемы. Первый подход заключается в том, чтобы полностью отказаться от её решения: при корреляции, сортировке и дальнейшем суммировании, по мнению некоторых авторов, обеспечивается достаточное для решения большинства геологических задач качество итоговых изображений. Так, подобная точка зрения отстаивается в работе [Huo et al., 2011]; вместе с тем, её авторы признают необходимость деблендинга при контроле качества данных.

Второй подход, назовём его здесь *фильтрационным*, более содержателен. Время начала излучения в методах с одновременной работой нескольких источников, как правило, случайно; тогда на коррелограммах сигнал когерентен во всех сортировках, в то время как интерференционные помехи – только в коррелограммах ОПВ. Методы на основе фильтрации используют некогерентность помех в других сортировках и подавляют их как случайный шум. Примеры успешного использования такой схемы подавления интерференционных помех представлены в работах [Hampson et al., 2008; Коротков, Жуков, 2020].

Третий, инверсионный, подход рассматривает вопрос деблендинга как проблему итерационного приближения к некоторому свободному от помех результату. Такие методы используют разделение сигналов в других областях (например, в $f-k$). Разработано множество способов деблендинга в рамках инверсионного подхода; с некоторыми из них можно ознакомиться в работах

[Mahdad et al., 2011; Wapenaar et al., 2012; Ibrahim, Sacchi, 2015; Dong et al., 2018; Song et al., 2019; Nakayama et al., 2019; Shipilova et al., 2020, Bilsby et al., 2021].

В уже упомянутой ранее статье [Bagaini et al., 2012] проводится прямое сравнение перечисленных подходов; наилучшие результаты достигаются при использовании *инверсионных* методов, однако они при этом являются наиболее затратными и сложными в реализации.

4) Гармонические искажения.

Вибрационной сейсморазведке, как известно, присуща проблема возникновения нелинейных искажений – *кратных гармоник*, которые возникают на сейсмических изображениях вследствие нелинейности гидравлической системы источника, уплотнения грунта под воздействием опорной плиты и её неидеальной жёсткости. Специфическим для методов одновременного излучения является тот неприятный факт, что интенсивные кратные гармоники (как правило, третья) от последующего излучения накладываются на данные предыдущего. Описание и примеры подобного влияния приведены в работе [Bagaini, 2010].

Хорошие результаты в подавлении гармонических помех показывают методы, использующие фазоманипулированные сигналы. Этот подход известен как способ Рича [Rietsch, 1981], он в полной мере реализован в методе каскадного свипа, описанном ранее. Также для этих целей могут применяться, пусть и с меньшей эффективностью, свип-сигналы переменной длительности (*dithered sweep length*). Кроме того, в приложении к статье [Bagaini, 2010] описан способ подавления гармоник, основанный на предсказывающей деконволюции.

5) Корреляционные помехи.

В работе [Денисов, Шалашников,

2011] описан специфичный для метода *slip-sweep* тип корреляционных помех, обусловленный наличием в виброграмме выраженного цуга поверхностных волн, а также способ устранения этих помех.

Заключение

Разнообразие устоявшихся и новых технологий, нацеленных на повышение производительности вибросейсморазведки, не снимает вопроса об обеспечении при этом достаточно высокого качества сейсмических записей, необходимо для решения тонких динамических задач. Совершенствование технических средств и программно-алгоритмического обеспечения должны в целом обеспечивать оптимизацию решения поставленных задач путем сокращения затрат без снижения точности получаемых результатов.

Разработка новых технологий вибросейсморазведки будет наиболее эффективна, если она будет осуществляться на стыке разных направлений. К примеру, в скважинно-наземной сейсморазведке, а также в проектах, где используются разные типы излучателей упругих волн.

Литература

- Гридин П. А., Жуков А. П., Шехтман Г. А. Способ вибрационной сейсморазведки // Патент РФ № 2570587 от 22.10.2014, опублик. 10.12.2015 Бюл. № 34.
- Гридин П. А., Жуков А. П., Шехтман Г. А. Способ вибрационной сейсморазведки // Патент РФ № 2623655 от 01.07.2016, опублик. 28.06.2017 Бюл. № 19.
- Денисов М.С., Шалашников А.В. Способ подавления помех на коррелограммах, полученных при использовании высокопроизводительной схемы наблюдений *slip-sweep*. // «Геомодель – 2011», г. Геленджик, 11–15 сентября 2011 г.
- Жуков А.П., Колесов С.В., Шехтман Г.А., Шнеерсон М.Б. Сейсморазведка с вибрационными источниками // Тверь, ООО «Издательство ГЕРС», 2011. – 412 с.
- Исмагилов А.Ф., Гилаев Г.Г., Манасян А.Э. и др. Опыт проведения сейсморазведочных работ МОГТ-3D по методике *Slip-Sweep* // Нефтяное хозяйство. - 2013. - № 4. - С. 82-85.
- Коротков И.П., Жуков А.П. Независимое одновременное возбуждение свип сигналов для повышения производительности вибросейсморазведки. // ГеоЕвразия – 2020. Труды конференции. 2020, Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», том 2, с. 93-96.
- Кострыгин Ю.П. Вибросейсмический и кодоимпульсный способы сейсмической разведки. // Краснодар: Просвещение-Юг, 2014, 494 с.
- Кузнецов И.М. Буксируемая сейсмическая коса – это актуально! // Саратов, Приборы и системы разведочной геофизики, 1, 2013, с. 11-18.
- Кузьмичев В.Е. Время сделать следующий шаг в сейсморазведке (RT SYSTEM 2) // Саратов, Приборы и системы разведочной геофизики, 4, 2014, с. 50-58.
- Мужно Д.А. Высокопроизводительный вибросейс // Саратов, Приборы и системы разведочной геофизики, 3, 2004, с.9-11.
- Мужно Д.А., Череповский А.В. Использование глобальных навигационных спутниковых систем в полевой геофизике // Саратов, Приборы и системы разведочной геофизики, 4, 2012, с.47-50.
- Смирнов В.Н., Бондарев Е.Б. Современное состояние, возможности и недостатки комплекса вибросейс Nomad по сравнению с взрывным источником сейсмических колебаний в зимних условиях ЯНАО. // Технологии сейсморазведки, № 2, 2017, с. 108–122.
- Череповский А.В. Сейсморазведка с одиночными приемниками и источниками: обзор современных технологий и проектирование съемок // Тверь, ООО

«Издательство ГЕРС». 2012. – 134 с.

Череповский А.В., Мужно Д.А. Оправдан ли переход на бескабельные системы регистрации? // Саратов, Приборы и системы разведочной геофизики, 2, 2011, с.16-20.

Череповский А.В., Овчинников В.А. Повышение качества сейсмических данных и снижение рисков травматизма путем автоматизации и роботизации полевых работ// Саратов, Приборы и системы разведочной геофизики, 2, 2019, с.26-31.

Шехтман Г.А., Жуков А.П., Харисов Р.Г. Способ вибрационной сейсморазведки//Патент РФ № 2627549 от 02.11.2016, опубл. 08.08.2017, Бюл № 22.

Шнеерсон М.Б., Жуков А.П. Современные технологии возбуждения сейсмических волн. // Приборы и системы разведочной геофизики 3(45), 2013, с. 6-22.

Шнеерсон М.Б., Жуков А.П. Современное состояние вибрационной сейсморазведки. Обзор методик.// Саратов, Приборы и системы разведочной геофизики, 4, 2015, с.11-18.

Ahmad K., Manning T., Dvorak M., Bradley J. The impact of ISS(R) blending on amplitude fidelity for AVO analysis. // 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013, London, UK, 10-13 June 2013.

Allen K.P., Johnson M.L., May J.S. High fidelity vibratory seismic (HFVS) method for acquiring seismic data. // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1998, p. 140-143.

Andersen K.D. Method for cascading sweeps for a seismic vibrator. // US Patent №5,410,517 (Apr. 25, 1995).

Bagaini C. Acquisition and processing of simultaneous vibroseis data. // Geophysical Prospecting, vol. 58, pp. 81–99, - 2010.

Bagaini C., Daly M., Moore I. The acquisition and processing of dithered slip-sweep vibroseis data. // Geophysical Prospecting, 2012, 60, 618–639.

Batting E., Schijns H., Grant M., Millar N.

High-productivity, high-resolution 3D seismic surveys for open-cut coal operations. // ASEG Extended Abstracts, 2019:1, 1-4.

Benabentos M., Ortigosa F., Moldoveanu N., Munoz P. Cascaded sweeps – a method to improve vibroseis acquisition efficiency: a field test. // 9th Simposio Bolivariano - Exploracion Petrolera en las Cuencas Subandinas, 2006.

Berkhout G., Blacquiére G. Effect of noise in blending and deblending. // SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2013, 94-98.

Berkhout G., Blacquiére G. Blended Acquisition with Dispersed Source Arrays, the Next Step in Seismic Acquisition? // SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2011, 16-19.

Bilsby P., Clark A., Busanello G., Jackson Z., Alexander G. Innovative simultaneous source separation of high-density land data – a case study from Prudhoe Bay, Alaska. // 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition 2021, Volume 2021, p.1–5.

Bouska J. Distance separated simultaneous sweeping, for fast, clean, vibroseis acquisition. // Geophysical Prospecting, vol. 58, pp. 123–153, 2010.

Dean T., Iranpour K., Clark M., Poole A. Dithered sweep length – a new technique for attenuating harmonic noise in vibroseis data. // 78th EAGE Conference & Exhibition 2016, Vienna, Austria, 30 May–2 June 2016.

Dean T. The use of pseudorandom sweeps for vibroseis surveys. // Geophysical Prospecting, 2014, vol. 62, pp. 50–74.

Deluchi I., Marchall R. and Werner H. 3-D seismic survey of the Gaggiano Oil Field with quaternary encoding dual-source Vibroseis technique//Expanded Abstracts, Technical Program SEG, 1987, S8.2, 570-573.

Dong L.Q., M.G. Zhang, C.H. Wang, Y.M. Zhang, Y. Zhu. Blended noise suppression using a hybrid median filter, normal moveout and complex curvelet transform approach. // 80th EAGE Conference & Exhibition 2018, 11-14 June 2018, Copenhagen, Denmark.

Dvorak M., Tough K., Eller M. Smith M. Imaging a mature oil field using simultaneous source technology – the processing of the Iraq Rumalia ISSN Survey. // 76th EAGE Conference & Exhibition 2014, Amsterdam RAI, The Netherlands, 16-19 June 2014.

Goupillaud P.L. Signal design in the “vibroseis” technique. // *Geophysics*, vol.41, №6, 1976, p. 1291-1304.

Hampson G., Stefani J., Herkenhof F. Acquisition using simultaneous sources. // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2008, 2816-2820.

Howe D., Allen T., Dvorak M., Buddery D., Foster M., Manning T., Pfister M. High productivity cable less acquisition in Libya with the ISSN technique – from field trial to a production survey. 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013, London, UK, 10-13 June 2013.

Howe D., Foster M., Allen T., Taylor B, Jack I. Independent Simultaneous Sweeping -a method to increase the productivity of land seismic crews. // SEG Technical Program Expanded Abstracts: 2826-2830, 2008.

Huo S., Tsingas C., Kelamis P., Xu H., Pecholcs P. Debending in the simultaneous source data – is it necessary? // 73rd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011, Vienna, Austria, 23-26 May 2011.

Ibrahim A., Sacchi M. D. Fast simultaneous seismic source separation using Stolt migration and demigration operators. // *Geophysics*, vol. 80, 6, p.1-17, 2015.

Ishiyama T., Wei T. Blended acquisition with temporally signatred/modulated and spatially dispersed source array: productivity enhancement in a pilot survey. // Conference Proceedings, 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition 2021, Netherlands, Amsterdam.

Liu Yi, Qi Yongfei, Tao Longshu, E Dianliang, Hou Chengfu. Application and effect analysis of Dynamic Slip Sweep in a high channel and high productivity seismic acquisition project. // CPS/SEG Beijing 2014 International Geophysical Conference, p. 163 – 166.

Mahdad A., Doulgeris P., Blacquièrre G., Campman X. Separation of blended sources – application to land seismic data. // 73rd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011, Vienna, Austria, 23-26 May 2011.

McCarthy D., Berhaud A., Mahrooqi S., Henin G., Shorter J. The benefits of simultaneous shooting on land for improved productivity and enhanced data quality through dense source sampling. // 79th EAGE Conference & Exhibition 2017, Paris, France, 12-15 June 2017.

Moldoveanu N., Jones P., Totten S., Rosso R. Vibroseis simultaneous shooting using encoded sweeps: a field experiment. // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017, 146-150.

Moldoveanu N., Tite G. High Fidelity Vibratory Seismic in a Difficult Geologic Area. // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1999.

Nakayama S., Blacquièrre G., Ishiyama T., Ishikawa S. Blended-acquisition design of irregular geometries towards faster, cheaper, safer and better seismic surveying. *Geophysical Prospecting*, 2019, vol. 67, pp. 1498–1521.

Rietsch E. Reduction of harmonic distortion in vibratory source records. // *Geophysical Prospecting* 29, 1981, 178–188.

Rozemond J. H. Slip-sweep acquisition. // SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1996, 64-67.

Scholtz P. Broadband pseudo-random vibratory sweeps for productivity enhancement. // EAGE Workshop on Land and Ocean Bottom - Broadband Full Azimuth Seismic Surveys, Apr 2014, Volume 2014, p.1–3.

Shipilova E., Barret M., Bloch M., Boelle J.-L., Collette J.-L. Simultaneous seismic sources separation based on Matrioshka Orthogonal Matching Pursuit, application in oil and gas exploration. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 58, 2020, p.1-18.

Song J., Li P., Wang W., Qian Z., Sun P., Xue

H. Separating Highly-Blended 3D Land Data by Sparse Inversion. // 81st EAGE Conference and Exhibition, 2019, Volume 2019, p.1–5.

Stewart R.R., Chang Li., Sudarshan S. K.V., Becker A.T., Huang Li An unmanned aerial vehicle with vibration sensing ability (seismic dron)//SEG International Exposition and 86th Annual Meeting, Dallas, 18-21 October 2016.

Stone J., Taylor B. BP's (ISSTM) Technique for High Quality, Fast, Efficient 3D Vibroseis Acquisition in Challenging Desert Terrain. // Developments in Land Seismic Acquisition for Exploration, 2010, p. 1-5.

Tang Z., Campman X. A Coherent Simultaneous Shooting Scheme and its Source Separation. // 78th EAGE Conference & Exhibition, 2016, Volume 2016, p.1–5.

Xia J., Geier N.A., Miller R.D., Tapie C.R. Orthogonal vibroseis sweeps. // Geophysical Prospecting, 2005, 53, p. 677–688.

Wapenaar K., Joost van der Neut, Thorbecke J. On the relation between seismic interferometry and the simultaneous-source method. // Geophysical Prospecting, 2012, 802–823.

Zhao Jie, Jin Hengjie, Zhu Yang, Yasin Charles, Clow Forbes. Vibroseis Ultra High Productivity blended Acquisition: Field Trial and Full Scale implementation in Oman. // SEG Global Meeting Abstracts, 2018, 150-153.

Zhukov A., Korotkov I., Sidenko E., Nekrasov I., Gridin P., Galikeev T. Simultaneous pseudo-random shuffle sweep generation and increased seismic data acquisition productivity. // SEG Annual Meeting. Houston. – 2017.

Подробнее об авторах



Жуков
Александр Петрович

Генеральный директор
ООО «Геофизические
Системы Данных»,
г. Москва. Доктор
технических наук,
профессор.



Скирта
Дмитрий Андреевич

Аспирант кафедры
сейсмометрии
и геоакустики
Московского
государственного
университета
им М.В.Ломоносова.



Шехтман
Григорий Аронович

Ведущий научный
сотрудник
ООО «НПП
«Спецгеофизика»»,
г. Москва
Доктор технических
наук.