



Для обеспечения больших и более плотных приемных сетей наблюдения число сейсмических каналов, регистрируемых наземными сейсмическими партиями, удваивается каждые пять лет. Параллельно, увеличивается плотность пунктов возбуждения, поскольку для сейсмических изображений пространственное распределение энергии источника также важно. Однако стоимость одного пункта возбуждения превышает стоимость пункта приема. Это приводит к необходимости развертывания больших активных расстановок, имеющих до 8000 активных каналов, подключенных к сотням тысяч геофонов тысячами километров кабеля.

Затраты на приобретение, поддержку и развертывание такой большой расстановки увеличились до такой степени, что может быть, по крайней мере для открытых районов и для ВиброСейса, более экономично увеличивать число пунктов возбуждения вместо дополнительных пунктов приема.

В открытых пустынных районах большие 3D партии, использующие ВиброСейс, смогли значительно увеличить число вибрационных возбуждений (VP) в час. Благодаря использованию нескольких групп вибраторов (до 4-х) был сокращен временной цикл (интервал между двумя последовательными свипами), что привело к увеличению производительности наземной партии до уровней (215 VP/час), сравнимых с производительностью в морской сейсморазведке (до 360 возбуждений пушки в час). Эта высокая производительность позволяет проводить большие 3D наблюдения (1000 км<sup>2</sup>/мес, кратность 60) в течение временного периода, необходимого для предыдущих плотных 2D наблюдений и увеличить кратность 3D наблюдений в шумящих районах до 960 (9600 %), удерживая стоимость работ на приемлемом для клиента уровне.

Этот успех стал возможен благодаря тесной интеграции электроники вибратора с регистрирующей системой. В данной статье описаны дополнения, сделанные Sercei в регистрирующих системах SN388 и 408UL для достижения этих уровней вибросейсмической производительности с использованием вибраторной электроники VE432. Сначала показан вклад новых вибросейсмических методик в сокращение временного цикла. Затем описаны аппаратные и программные усовершенствования, обеспечивающие управление работами источником возбуждения, использование сверхбольших расстановок (только для 408UL) и системы контроля качества в реальном времени (также для Ve416).

## Вибросейсмические методики

Производительность, прежде всего, зависит от числа возбуждений (VP), которые вибраторы могут выполнить в течение часа или дня. Для упрощения примем, что каждое VP выполняется с одиночным свипом, как это все чаще и чаще имеет место для регистрации 3D для увеличения плотности пунктов возбуждения.

### Регистрация с одиночной группой вибраторов

В случае одного вибратора или одиночной группы вибраторов временной цикл представляет

собой сумму длительности свипа и времени перемещения (Рис.1). Для заданной вибросейсмической записи (длительность свипа + время прослушивания) временной цикл зависит от времени перемещения, особенностей местности и расстояния между последовательными пунктами возбуждения. С точки зрения регистрации время перемещения является потерей времени. Максимальная производительность, даже в случае короткого 12 с свипа и расстояния между пунктами возбуждения 5 м, составляет менее 100 возбуждений в час.

Вибросейсмическую запись удобно представить на диаграмме "частота/время" в виде параллелограмма. По горизонтали отображается каждая излучаемая частота свипа (от  $F_{min}$  до  $F_{max}$ ) в течение постоянного временного интервала, называемого временем прослушивания. Эта F/T диаграмма свидетельствует, что между двумя записями остается большой F/T промежуток. Поскольку наивысшие частоты (HF) подавляются до достижения ими поверхности, в конце времени прослушивания регистрируются лишь шумы. Таким образом, время прослушивания после возбуждения свипа может быть сокращено без потери качества данных (возможно лишь в UL408 для версии 8.1).

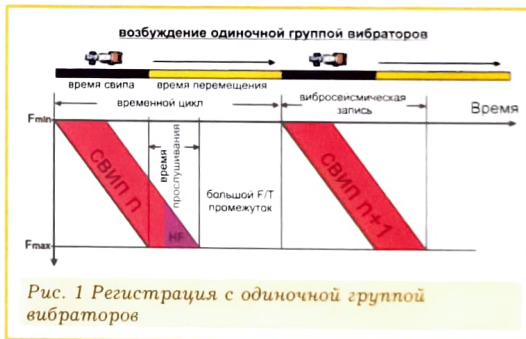


Рис. 1 Регистрация с одиночной группой вибраторов

### Регистрация с несколькими группами вибраторов: режим flip-flop

В начале 90-х годов в 3D партиях стали внедрять вторую группу вибраторов. Идея заключалась в том, чтобы в то время как одна группа вибраторов проводит возбуждение (время свипа), другая группа вибраторов перемещается на следующий пункт возбуждения (время перемещения). Эта вибросейсмическая методика известна как Flip-Flop возбуждение (Рис. 2). Это уменьшает F/T промежуток, связанный со временем перемещения. В лучшем случае, временной цикл может стать равным сумме времени свипа и времени прослушивания (при более коротком временном цикле две последовательные вибросейсмические записи перекроются).

Такая регистрация в режиме Flip-flop в настоящее время стала обычной практикой в открытых районах. Две группы вибраторов могут осуществлять возбуждение в центре расстановки (как для геометрии двойного зигзага) или вне расстановки, на обоих ее концах. Производительность может достигать 155 VP/час. Для партий, работающих в непрерывном режиме, число возбуждений в день зачастую превышает 3000 VP.

ТЕХНОЛОГИИ ВИБРОСЕЙСМОРАЗВЕДКИ  
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

при производительности регистрации более 3700 VP/день. В случае, когда продвижение вдоль одной из сторон полосы возбуждения затруднено, иногда используют три группы вибраторов. Поскольку группы вибраторов могут перемещаться сбоку (в линию) по отношению к расстановке, требуется активировать вдоль профилей различные пункты приема. Этим объясняется, почему в регистрирующей системе 408UL предусмотрена возможность формирования активной расстановки для каждой группы вибраторов в считанные секунды.



Рис. 2 Регистрация в режиме Flip-flop

## Регистрация с несколькими группами вибраторов: скользящий свип (slip-sweep)

В основе регистрации в режиме slip-sweep лежит начало возбуждения следующей группой вибраторов в то время, когда предыдущая группа вибраторов еще продолжает возбуждение. Как это видно на F/T диаграмме, два перекрывающихся вибросейсмических возбуждения не интерферируют друг с другом, когда они излучают различные частоты. F/T промежуток теперь ограничивается узкой полосой (Рис.3). Временной цикл, названный slip time, должен быть длиннее, чем время прослушивания, чтобы обеспечить возможность полной записи для каждой из частот. Последовательности (называемые "залпами") перекрывающихся вибросейсмических возбуждений сохраняются в памяти регистрирующей системы до проведения корреляции с исходным свипом. Используя Отметку Моента (ОМ) каждого возбуждения, "залповая" запись разделяется для воссоздания отдельных возбуждений. Следует отметить, что в зависимости от времени перемещения (например, от характера местности и расстояния) slip-slip возбуждения могут не перекрываться, как это имеет место в режиме flip-flop, и затем снова перекрываться. Вибраторная электроника VE432 и регистрирующая система рассчитаны на эти особенности.

Регистрация в режиме скользящего свипа впервые была испытана в 1995 г. в Омане и использовалась в работах для PDO с 1998 г., когда Sercel внедрило данную методику с помощью VE432 (P. Burger и др., The Leading Edge, Октябрь,



Рис. 3 Регистрация в режиме скользящего свипа (slip-sweep)

1999). Эти ранние работы показали, что и нелинейных искажений шум от одного возбуждения может загрязнять последующее возбуждение, влияя на качество данных. Этот эффект увеличивается по мере того, как slip time приближается ко времени прослушивания. Однако, этот шумовый загрязнение может быть вычислено и удалено, чтобы поддерживать slip time как можно ближе к времени прослушивания (HPVA от CGG). Производительность регистрации в режиме скользящим свипом с использованием 4-х групп вибраторов составляет 215 VP/час. Потенциальный максимум производительности с HPVA оценивается в 360 VP/час (с использованием 16-х Slip time и 4-х групп вибраторов). Удивительно, но регистрация в режиме скользящего свипа редко используется вне Омана. Одной из причин является необходимость иметь отдельные радиочастоты и DPG (часть VE432) для каждой группы вибраторов (для регистрации в режиме flip-flop достаточно одной радиочастоты).

## Новые достижения в области ВиброСейса

Работа с несколькими группами вибраторов базируется на взаимосвязанных достижениях в области аппаратных и программных средств, которые включают: управление работой источником возбуждения, сверхбыструю расстановку и контроль качества в реальном времени.

### Управление работой источником возбуждения

Группа вибраторов часто расположена в нескольких километрах от центральной системы регистрации, а оператор не может начать регистрацию до того, как группа готова к возбуждению. Таким образом, более эффективно разрешить группе вибраторов начать возбуждение сразу же по достижении ею нужного пункта возбуждения. Этот вид работы назван "управление работой источником возбуждения", поскольку находится под контролем вибраторов, помощью вибраторной электроники (VE432).

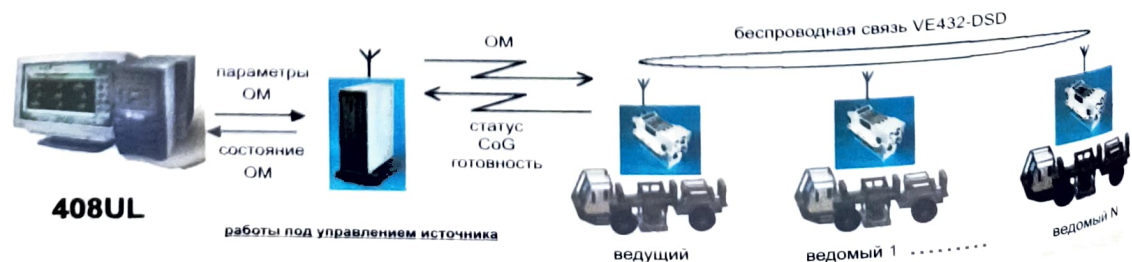


Рис. 4 Управление работой источником возбуждения

разделенной на отдельные блоки (Рис. 4)

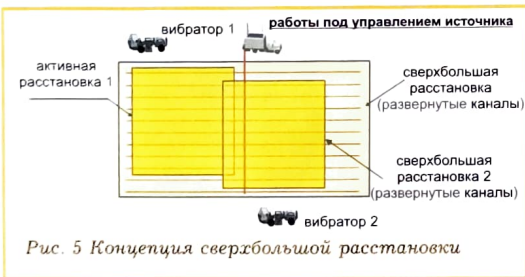
- Цифровой генератор свипа (DPG), подключенный через Ethernet к регистрирующей системе, который действует в качестве ведущего управляющего блока.

- Цифровой сервогенератор (DSD), устанавливаемый на каждом вибраторе, обеспечивающий управление свипом в реальном времени и передачу соответствующих атрибутов по радио в DPG.

Каждый вибратор группы позиционируется с помощью дифференциального GPS. Для определения положения центра гравитации (CoG) и состояния каждого вибратора связь между вибраторами управляющей группы осуществляется по местной беспроводной связи. Когда управляющая группа вибраторов сообщает DPG о готовности вибраторов, 408UL формирует активную расстановку, соответствующую положению CoG и вырабатывает команду "Огонь" (FO) для DPG.

#### Сверхбольшие расстановки

Задержка с формированием активной расстановки, соответствующей каждому пункту возбуждения, становится заметной (до 4 с) по мере увеличения размера расстановки. Для уменьшения этой задержки до величин менее 1 с Sercel выдвинула концепцию сверхбольшей расстановки и реализовала ее в 408UL. Сверхбольшая расстановка это шаблон, включающий все развернутые каналы, в границах которого находятся все активные расстановки, соответствующие нескольким последовательным пунктам возбуждения (Рис. 5). Все каналы сверхбольшей расстановки подключены к центральной регистрирующей системе и обрабатываются в ней. Для записи на ленту с помощью соответствующего SPS файла отбираются только те каналы, которые относятся к активной расстановке. Это сокращение временного цикла на несколько секунд обеспечило увеличение общей производительности больших вибросейсмических партий в среднем на 15%. Однако, концепция сверхбольшей расстановки предполагает одновременное развертывание большого числа каналов и наличие достаточной памяти в центральной регистрирующей системе.



#### Контроль качества источника возбуждения в реальном времени

Для обеспечения надежности данных, получаемых высокопроизводительными партиями, обязателен непрерывный контроль полевой аппаратуры, данных и работ. Контроль качества (QC) в реальном времени особенно важен для ВиброСейса, поскольку форма сигнала зависит от характеристик грунта (твердость и вязкость). VE432 вычисляет для каждого свипа и для каждого вибратора среднюю и пиковую фазовую ошибку, общее нелинейное искажение и пиковое усилие. Эти параметры отображаются в виде гистограммы со значением последнего VP в сравнении с текущим средним значением предыдущих 50-ти VP (Рис. 6). В конце дня все эти значения статистически анализируются для проверки качества данных и выявления

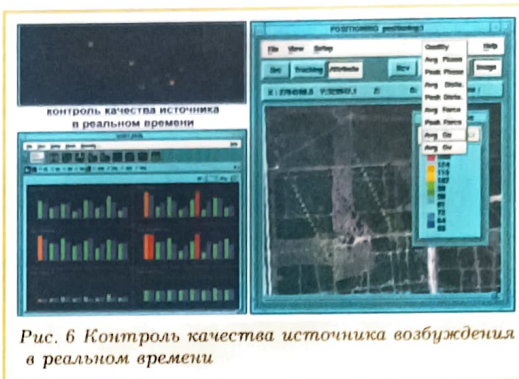


Рис. 6 Контроль качества источника возбуждения в реальном времени

вибраторов, нуждающихся в превентивном обслуживании.

Для соотношения измерений QC с окружающей средой, в которой они проводились, в контрольных изображениях используются спутниковые фотографии Географической Информационной Системы (GIS) (Рис.6). Это облегчает установление возможной связи между характером местности и изменениями сигнала.

#### Заключение

Работа с несколькими группами вибраторов и создание новых аппаратных (VE432) и программных (сверхбольшая расстановка, QC) средств обеспечили возможность существенного увеличения производительности источников возбуждения. Это усиление акцента на источник возбуждения уже доказало свою предпочтительность для сейсмических изображений из-за более симметричного пространственного квантования между возбуждением и приемниками (G.Vermeer, 3D seismic survey design, SEG 2002). Например, регистрация типа "пункт возбуждения/пункт приема" требует одновременного плотного пространственного квантования приемной линии (вдоль профиля) и линии возбуждения (поперек профиля) для получения непрерывно квантованных наборов предварительно суммированных данных (поперечная расстановка) для подавления поверхностной волны.

Другими достижениями в области повышения производительности ВиброСейса являются:

- свободное позиционирование вибраторов (вибраторы позиционируются в реальном времени, а не по предварительно установленным вехам);
- использование тяжелых вибраторов (типа Nomad 90T) для уменьшения длительности свипа и более плотного размещения вибраторов в пункте возбуждения.

Возможно ли еще больше сократить временной цикл? Единственной возможностью является использование непрерывной регистрации вибро-сейсмических возбуждений (подобно режиму непрерывного прослушивания системы 408UL) и внедрение другой системы управления группой вибраторов. Конечно, все эти существующие и будущие улучшения в вибросейсмической регистрации имеют смысл в случае финансовой заинтересованности геофизического подрядчика со стороны Заказчика в увеличении производительности работ.

#### Благодарности

Автор признателен Daniel Boucard, менеджеру Sercel в области разработки наземного оборудования, за его поддержку.

(перевод И.М. Кузнецова, ОАО СКБ СП, г. Саратов)



# ТЕХНОЛОГИИ ВИБРОСЕЙСМОРАЗВЕДКИ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ