

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АППАРАТУРЫ ДЛЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Мишаткин В.Н.

Геофизическая служба РАН, Обнинск Калужской обл., vmish@gstras.ru

Сейсмометрия является достаточно узким направлением научных исследований со своими особенностями, связанными в первую очередь с беспрецедентно большим динамическим диапазоном и широким частотным диапазоном. В сейсмометрии всегда существовали и продолжают существовать проблемы, связанные с ограниченными возможностями аппаратуры для регистрации сейсмических сигналов. Относительная длина сейсмических волн изменяется, в зависимости от их скорости распространения от нескольких метров до более чем 10 000 км. Диапазон амплитуд, которые должны быть зарегистрированы - от долей нанометра до дециметров. Эти особенности сейсмических сигналов приводили к тому, что для сейсмических наблюдений всегда было необходимо разрабатывать и производить свое специфическое оборудование, использовать свои методы производства наблюдений.

На протяжении истории создания и развития аппаратуры для сейсмических исследований легко прослеживаются две основных тенденции:

1. Совершенствование аппаратуры с целью улучшения технических характеристик: расширения частотного диапазона, увеличения динамического диапазона и улучшения эксплуатационных характеристик.

2. Расширение возможностей использования общетехнических промышленных решений в каналах сейсмической регистрации, приводящих к снижению стоимости и упрощению обслуживания сейсмологического оборудования.

В начале прошлого века было заложено основание для производства инструментальных сейсмических наблюдений. Особенности сейсмических колебаний потребовали создания специальных датчиков, регистрирующих приборов, носителей информации, своих средств обработки записей, своих средств передачи информации. Практически никакие общепромышленные технические решения использовать было невозможно.

С развитием науки и техники ситуация изменялась, но эволюционно и весьма медленно. В течение первых пятидесяти лет технология производства инструментальных наблюдений оставалась практически одной и той же.

Регистраторы. В 60-х годах прошлого века появились первые элементы новой цифровой регистрации сейсмической информации, но их технические характеристики не позволяли качественно улучшить регистрацию сейсмических сигналов. Многочисленные разработки цифровых станций, специальных приборов записи-воспроизведения сейсмических сигналов внедрялись как отдельные образцы, были весьма дороги и качественно не изменяли ситуацию.

Лишь в начале последнего десятилетия прошлого века произошли столь существенные изменения, которые вызвали революционные преобразования в производстве сейсмических наблюдений:

- внедрение в производство новых моделей форс-балансных датчиков;
- разработка и внедрение в производство 24-х разрядных регистраторов.

Два эти события, наряду с развитием компьютерной техники и средств передачи данных, обусловили массовый и достаточно быстрый переход на новую цифровую технологию сбора, накопления, обмена и обработки сейсмической информации.

В это время появились широкополосные велосиметры STS-1 и STS-2, регистратор PDAS-100, позволяющие организовать каналы регистрации, которые имели и имеют технические характеристики, остающиеся до настоящего времени вполне современными.

Достижения 10-15 последних лет в разработке современных форс-балансных сейсмических датчиков, в соединении с 24-х разрядным кодированием сигналов позволяют регистрировать сейсмические волны в очень широкой полосе частот с чрезвычайно высоким разрешением и с намного большим динамическим диапазоном, чем был возможен в дни аналоговой сейсмологии. Современные компьютерные аппаратные средства и разностороннее программное обеспечение анализа чрезвычайно облегчают задачу всестороннего и точного анализа сейсмограммы. Это позволяет рутинно определять параметры, которые несколько десятилетий назад были далеко за пределами возможностей анализа сейсмограмм. Прецизионное хранение времени и его чтение на

записях стало несоизмеримо меньшей проблемой, чем это было до создания GPS (Глобальной Навигационной Системы) и внедрения ее в сейсмометрии. Распространение в глобальном масштабе высокоскоростных линий связи устранило любые технические барьеры широкому, близкому к реальному времени, обмену данными, в том числе о волновых формах.

Переход на новую технологию сбора данных позволил использовать общепромышленные решения в средствах обработки сигналов, их преобразовании, системах сбора накопления и хранения данных, а также в передаче и обмене информации. Если на начальном этапе инструментальных наблюдений практически все элементы были специализированными, то с развитием техники постепенно отпадала необходимость в использовании отдельных специальных элементов и произошла замена их общепромышленными решениями. Переход к цифровой регистрации обусловил отказ от целого арсенала специальных технических средств и материалов. Ушли в прошлое такие устройства и материалы как регистры фото- и видимой записи, фотобумага, диаграммная бумага, материалы для фотообработки. Исчезла необходимость в специальном оборудовании для копирования и преобразования фотозаписей. Использование стандартных аппаратных средств и программного обеспечения значительно уменьшили стоимость имущества сейсмической сети, увеличили надежность и гибкость систем наблюдений. Пользователь намного меньше зависит от индивидуальных изготовителей сейсмических систем. Долгосрочное обслуживание и модернизация систем также становятся намного легче. Составляющее существенную часть систем электронное оборудование очень трудно обслуживать, и оно имеет среднюю «продолжительность жизни» уже сейчас три - четыре года. И, несмотря на все усилия, продолжительность жизни современных электронных устройств становится все короче и короче. Учитывая эту ситуацию, использование стандартизированных изделий, в противоположность специально разработанным, является более простым и менее дорогостоящим. К тому же стандартные новые изделия обычно нисходящие совместимы. Этого практически не бывает в случае с новыми разработками изготовителей сейсмического оборудования.

Из большого числа специальных средств для проведения сейсмических исследований к настоящему времени практически остались два прибора не общепромышленного применения: сейсмометр и регистратор.

Естественно, развитие общепромышленных средств течет своим путем и здесь не является предметом для обсуждения. Развитие только двух важных для сейсмических исследований типов приборов должно рассматриваться на настоящий момент времени.

Регистратор PDAS-100 фирмы Teledyne Geotech имел собственные, собранные полностью на дискретных элементах, 24-х разрядные аналого-цифровые преобразователи (АЦП), что обусловило его очень высокую стоимость. Цена первых экземпляров этого регистратора была выше 100 тысяч долларов, но заложенный в приборе принцип цифрового преобразования путем осуществления избыточных выборок обеспечил расширение динамического диапазона и улучшение разрешения цифрового преобразования сигналов. Преобразование производится с намного большей, чем требуется в сейсмологии, частотой выборок, затем значение каждого отсчета в выходном потоке (с более низкой частотой выборок) вычисляется в соответствии со статистической моделью. Увеличение разрешения очень существенно. Эффективность избыточной выборки зависит от отношения между избыточной частотой выборок и итоговой частотой преобразования фактических сейсмических данных. Чем ниже итоговая частота выборок, тем больше преимуществ от избыточности выборок. Достигнутые параметры АЦП явились основанием для очень быстрой реализации этого устройства в микросхемном варианте и промышленного выпуска микросхем [1]. Цена изделия в этом случае упала в десятки раз. Производство 24-х разрядных регистраторов на базе этих микросхем в короткие сроки было освоено как ведущими известными изготовителями геофизического оборудования, так и вновь появившимися другими производителями. Функции регистраторов наряду с записью событий стали все больше и больше расширяться. Многие модели регистраторов дополнились рядом ранее не свойственных им функций:

- средствами привязки времени и синхронизации внутренней шкалы времени со шкалой UTC;
- встроенными аккумуляторными батареями и устройствами для заряда их с целью обеспечения работы регистратора и питания датчика при отключении сети электропитания;
- средствами передачи данных по различным типам каналов связи;
- системами внутреннего контроля параметров каналов регистрации;
- средствами включения регистрации:
 - по пороговым уровням сигналов,

- по алгоритмам, параметры которых определяются задаваемыми критериями выделения сигналов;
- по сеансам с задаваемой периодичностью и продолжительностью.

Естественно, что управление этими функциями стало возможным только внешним подключаемым компьютером, а дистанционное управление стало целесообразным производить через сеть Интернет, которая у многих регистраторов может быть использована как среда для передачи данных.

Такое расширение функций и возможностей неумолимо приближает регистратор все ближе и ближе к компьютеру, отличаясь от него лишь по надежности работы, исполнению и потреблению, т.е. по тем характеристикам компьютера, которые все чаще и чаще предъявляются к последнему для промышленного применения. С другой стороны, и изготовители регистраторов начали приближать естественное исчезновение этого типа геофизического прибора. Недавно фирма Кинеметрикс выпустила изделие, которое представила на первом этапе как геофизический компьютер, лишь позднее все же вернула ему название – система сбора геофизических данных.

Эта система выполняет все функции компьютера. Она имеет достаточно мощный процессор, большую оперативную память, позволяет использовать три вида жестких дисков, имеет 2 Ethernet–порта, 2 RS-232–порта, 1 USB–порт. При напряжении питания 8-18 вольт потребление составляет всего 0,4 Вт, достигая 0,9 Вт при использовании всех портов. Исполнение позволяет эксплуатировать систему при жестких условиях – температурах от -30 °С до + 70 °С и влажности до 100%. Наряду с этим встроена высокопроизводительная версия достаточно широко известной программы Antelope.

Но пока регистраторы продолжают выпускаться и широко использоваться, а многие фирмы продолжают разработку и новых моделей регистраторов. На сегодня не видны перспективы развития регистраторов в главном направлении: по частотному диапазону достигнут предел, а для расширения динамического диапазона в настоящее время нет перспективы. Самое последнее достижение - это 26-ти разрядный регистратор фирмы Kinometrics модели Q330HR. Но этот шаг вперед слишком мал. Требуется пересмотр форматов представления данных без ощутимого выигрыша по динамическому диапазону. Большинство потребителей регистраторов считают целесообразным переходить на новые форматы записи лишь после того, как станет реальным достижение 28-ми разрядного цифрового преобразования.

Новые разработки регистраторов направлены, прежде всего, на расширение функциональных возможностей, удобство применения, улучшение эксплуатационных характеристик. Основное преимущество цифровых средств сбора и обработки данных в сравнении с аналоговыми - это возможность создавать в рамках одной аппаратной платформы набор устройств, способных изменять выполняемые функции, путем обновления только аппаратного программного обеспечения. Наряду с основной функцией регистрации сейсмических сигналов регистраторы снабжаются новыми элементами, обеспечивающими с одной стороны дистанционное управление параметрами и режимами регистрации, а с другой стороны - дистанционную передачу данных практически по любому типу каналов связи. Сама же передача данных стала коммерчески доступна со стандартизированным программным обеспечением и при помощи стандартных компонент аппаратных средств.

Датчики. Самым важным элементом канала регистрации естественно является сейсмометр. В обычном пассивном сейсмометре инерционная сила, произведенная сейсмическим движением основания, отклоняет массу от положения ее равновесия, и смещение, скорость или ускорение массы преобразовываются в электрические сигналы. Мощность электрических сигналов зависит от частоты и становится на длинных периодах столь малой, что сигналы слишком слабы для обработки их даже современными электронными устройствами. Этот принцип измерения теперь используется только в короткопериодных сейсмометрах. Большинство современных широкополосных сейсмометров и акселерометров построены на принципе баланса силы. Инерционная сила компенсируется (или балансируется) электрически генерируемой силой так, чтобы сейсмическая масса переместилась настолько мало, насколько возможно. Ее движение воспринимается высокочувствительными параметрическими преобразователями перемещения. Сила обратной связи генерируется электромагнитным преобразователем. Выходные сигналы датчика в этом случае имеют уровень достаточный для обработки и преобразования их стандартными электронными устройствами [2].

В настоящее время все широкополосные сейсмометры имеют диапазон аналоговых выходных сигналов порядка единиц, а некоторые и десятков вольт, т.е. диапазон,

соответствующий стандартному ряду выходных сигналов приборов общепромышленного назначения. Соответственно, для обработки таких сигналов также приемлемы общепромышленные решения. Интегральные высокоточные и экономичные АЦП оказались возможным устанавливать в корпусе сейсмометра или акселерометра. За короткий период времени ведущие изготовители датчиков стали выпускать их как с аналоговым, так и цифровым выходом. При этом условия со стабильной температурой в месте установки датчика позволяют улучшить и характеристики цифрового преобразования, а короткие линии связи между аналоговым выходом датчика и входами АЦП - снизить инструментальный шум канала регистрации. Следующий шаг в развитии датчиков обусловило быстрое развитие и рост объема памяти флэш-карт, благодаря которым появились датчики с внутренней регистрацией цифровых данных.

Если прибор имеет цифровой выход и внутреннюю память, то совсем просто подключить его к каналу связи для дистанционной передачи данных. Несколько лет назад появились первые, так называемые, интернет-акселерометры. А на настоящее время можно заказать практически любой тип датчика с возможностью передачи его цифровых данных практически по любому каналу связи вплоть до беспроводного соединения через Интернет. Таким образом, современный датчик сейсмических сигналов уже выполняет практически все функции регистратора. Нет сомнений, что целесообразность применения цифрового регистратора сейсмических сигналов исчезнет так же, как исчезла необходимость применения регистраторов фотозаписи и иных специальных приборов, а сейсмометр останется в сети сейсмических наблюдений единственным специализированным прибором.

Сейсмические сооружения. Другой важной проблемой является необходимость в создании специальных условий для установки сейсмических датчиков. Широкополосный датчик должен устанавливаться в местах с минимальным сейсмическим шумом и условиях с очень стабильной температурой, суточные вариации которой должны быть не выше 0.1°C . Обычный путь создания условий для установки датчика – строительство подземных сооружений. Они снижают влияние культурных и поверхностных шумов и обеспечивают стабильную температуру. Строительство таких сооружений является трудоемкой и дорогостоящей задачей. Благодаря уменьшению размеров датчиков, появлению возможностей дистанционного управления процессом арретирования и регулировки положения инертной массы появились широкополосные датчики в скважинном исполнении. Пробурить скважину в стороне от зданий и сооружений часто проще и дешевле, чем строить подземные сооружения для установки датчиков. Скважина также обеспечивает лучший контакт между инструментом и основанием, чем это возможно при установке поверхностного датчика на постаменте. Во многих случаях уже неглубокая скважина глубиной 5-10 метров достаточна для снижения поверхностного шума и создания температурных условий, необходимых для сейсмометра. Разнообразие моделей изготавливаемых скважинных инструментов позволяет выбрать устанавливаемые как в обсадные, так и в необсадные скважины, в скважинный замок для установки на промежуточных глубинах скважины, на дно скважины с засыпкой песком. Можно выбрать инструменты для установки в скважинах с разным диаметром в пределах от 90 до 230 мм. За последние годы установка датчиков в скважины существенно упростилась из-за отказа от ориентации горизонтальных компонент прибора. Математическое обеспечение легко позволяет определить ориентацию установленного в скважине прибора путем сравнения его сигналов с сигналами аналогичного датчика, установленного на поверхности.

Перспектива. Представляется возможным, что в самое ближайшее время сейсмическая станция, регистрирующая практически весь спектр сейсмических сигналов, будет представлять собой скважину с сеймоприемником и мачтой вблизи неё, на которой будут установлены две небольшие антенны: приема сигналов навигационной системы GPS и беспроводной связи с ближайшим узлом сети Интернет.

Список литературы

1. Application Note AN-283: Sigma-Delta ADCs and DACs. Applications Reference Manual, Analog Devices. 1993. Pp. 20-3 – 20-18.
2. Wielandt, E.; Bormann, P.; Bribach, J. New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP). Chapter 5: Seismic sensors and their calibration. 2002. www3.gfz-potsdam.de/gfzFrames/