

Автономные регистраторы РОСА-А для высокоточных сейсмических наблюдений

Сагайдачная О.М., Сагайдачный А.В., Сальников А.С., Шмыков А.Н., Щегольков А.В.,
ФГУП «СНИИГГиМС», г. Новосибирск

Введение

Сейсмические методы исследований являются одним из основных источников знаний о внутреннем строении и эволюции земной литосферы. Современные задачи, решаемые на этапе глубоких сейсмических исследований, включают определение прогнозных критериев нефтяных и рудных провинций, что обуславливает повышение требований к детальности и точности инструментальных наблюдений. Достоверные и детальные сведения о скоростной характеристике земной коры являются основой для комплексной интерпретации и анализа данных других геофизических полей, для оценки геодинамических процессов, происходящих в сейсмоактивных регионах.

Обеспечение геологической эффективности сейсмических исследований, особенно в сложных сейсмогеологических условиях, где наблюдаются значительные уровни регулярных помех одновременно со слабыми сигналами (регулярная помеха может превышать полезный сигнал на 50 дБ, например при использовании вибрационных источников упругих колебаний), прямым образом связано с достижением необходимой точности регистрации сигналов в поле. Поэтому в современных сейсмических станциях используются цифровые регистраторы с максимально возможным количеством разрядов, построенные на основе 24-х разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), которые обеспечивают мгновенный динамический диапазон выше 100 дБ. При выполнении глубоких сейсмических исследований приходится дополнительно решать нетривиальные задачи доставки, расстановки и эксплуатации сейсмического оборудования в условиях отсутствия не только подготовленных сейсмических профилей, а просто дорог. В этом случае применение телеметрических сейсмостанций с развертыванием достаточно громоздкого кабельного хозяйства крайне затруднено и оптимальным решением является сбор и регистрация сейсмических данных с использованием автономных регистраторов.

Автономные регистраторы позволяют выполнять сейсмические наблюдения в заданных пунктах приема в течение длительного времени с высокой надежностью, которая определяется, в том числе и автономностью устройства. Современный уровень развития микроэлектроники позволяет практически убрать ограничения на

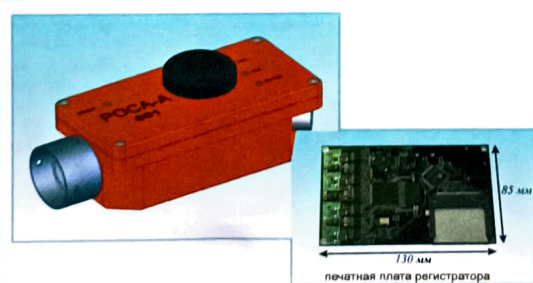


Рис. 1. Общий вид автономного 4-х канального сейсмического регистратора РОСА-А.

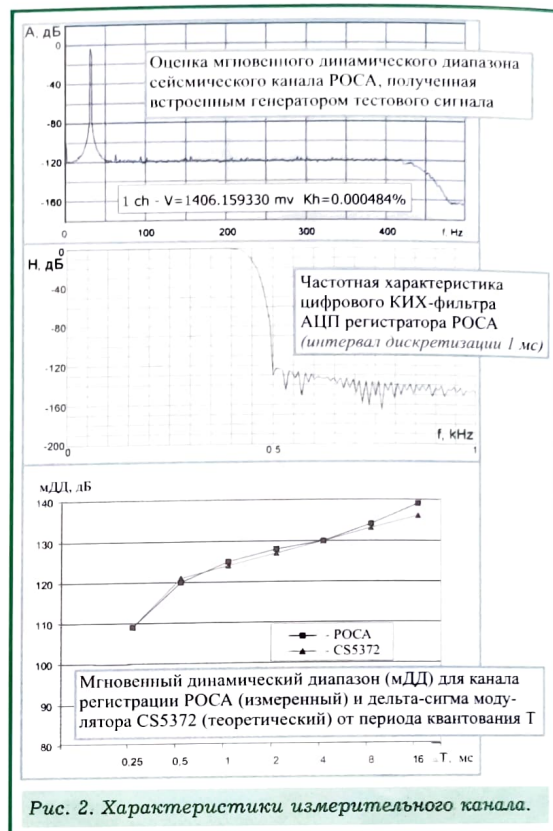


Рис. 2. Характеристики измерительного канала.

автономность, связанные с сохранением больших объемов зарегистрированных данных. В настоящее время существует твердотельная Flash-память объемом до 4 Гбайт, которая может быть использована в широком температурном диапазоне от - 40°C до 60°C. Подобный размер памяти обеспечивает режим непрерывной регистрации в течение нескольких суток, что позволяет полностью или частично отказаться от фиксированной по времени работы с искусственными источниками возбуждения (взрывными и вибрационными).

Имеющийся опыт по созданию сейсмической аппаратуры позволил разработать автономный высокоточный регистратор РОСА-А и на его основе организовать бескабельную распределенную систему регистрации и сбора данных для выполнения глубоких сейсмических исследований, сейсмологического и сейсмического мониторинга [2, 3, 5].

Схемотехнические решения сейсмического канала измерения

Автономный регистратор сейсмических колебаний РОСА-А, общий вид которого приведен на рис. 1, разработан на новейшей элементной базе: многократно программируемых логических матрицах сверхвысокой степени интеграции, прецизионных малощумящих аналоговых компонентах, интегральных источниках питания, высокоскоростных элементов телекоммуникаций. Техническое решение защищено патентами [4, 6].

Аналоговый канал регистрации автономного модуля РОСА-А схемотехнически построен на

основе 24-х разрядного канала измерения телеметрического портативного сейсмического регистратора РОСА. Измерительный канал регистратора РОСА, включающий в себя аналого-цифровой преобразователь и усилитель, реализован на комплекте микросхем известной фирмы Cristal Semiconductor, Co. (США). АЦП построен с использованием дельта-сигма модулятора 4-го порядка CS5372. В качестве справки отметим, что данный модулятор CS5372 имеет наилучшее, из всех коммерчески доступных модуляторов, отношение сигнал/шум в полосе частот до 1000 Гц. Обработка последовательного непрерывного потока данных от модулятора и получение 24-х разрядного слова (отчета) в АЦП выполняется с использованием разработанного оригинального цифрового КИХ-фильтра нижних частот. Построенный цифровой фильтр имеет высококачественные параметры: узкая частотная переходная полоса, высокая равномерность в диапазоне частот пропускания, подавление в частотной полосе задержания превышает 120 дБ (рис. 2).

Применение дельта-сигма модулятора CS5372 совместно с фильтром собственной разработки позволили получить 24-х разрядный АЦП, превосходящий по основным параметрам (мгновенный динамический диапазон, уровень собственных шумов, коэффициент нелинейных искажений) АЦП, реализованный в регистраторе CTC-24P с использованием комплекта CS5321 (Таблица 1). Величина реального мгновенного действующего диапазона для сейсмического канала измерения РОСА показана на графике, приведенном на рис. 2. Канал имеет 24 эффективных разряда АЦП (около 140 дБ мДД) на периоде квантования 16 мс, 23 разряда (136 дБ мДД) - на периоде 2 мс, 22 разряда (115 дБ мДД) - на периоде 1,0 мс.

Функциональные характеристики и технические параметры автономного регистратора

Автономный сейсмический регистратор РОСА-А, структурная схема которого приведена на рис. 3, содержит следующие основные функциональные блоки:

- четырехканальный 24-х разрядный АЦП;
- устройство управления;
- блок внутреннего контроля;
- генератор тестовых сигналов;



Рис. 3. Структурная схема автономного регистратора РОСА-А.

- твердотельную Flash-память;
- GPS-приемник;
- высокостабильный термостатированный тактовый генератор;
- модуль энергонезависимой памяти.

Конструктивно 4-канальный автономный модуль в основной части реализован на одной печатной плате (рис.1), на второй плате установлен тактовый генератор и индикация.

Система управления работой регистратора реализована на перепрограммируемых логических матрицах сверхвысокой степени интеграции фирмы Altera, обеспечивающих одновременную организацию нескольких независимых вычислительных процессов. Устройство управления выполняет следующие основные функции:

- настройка АЦП в соответствии с выбранным режимом регистрации;
- синхронизация внутренних часов модуля;
- управление режимами энергосбережения и регистрации;
- мониторинг технического состояния модуля.

Внутреннее программное обеспечение регистратора хранится в перезаписываемой Flash-памяти, объем которой достаточен для возможных расширений и модернизаций в будущем.

При программировании режима работы АЦП, помимо задания частоты квантования и коэффициента усиления, возможно конфигурирование входов АЦП на работу с внутренним генератором тестовых сигналов для диагностики параметров канала регистрации без использования дополнительных приборов. Контролируются следующие

Таблица 1. Сравнение технических параметров сейсмических регистраторов

параметры	CTC-24P	РОСА	РОСА-А	Reftek model 130-01
тип	телеметрический		автономный	
количество каналов регистрации	6	4	4	3 (6)
аналого-цифровой преобразователь	24 разряда			
интервал дискретизации, мс	0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0; 16,0	0,125; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0; 16,0		1; 2; 4; 8; 10; 20; 25; 50; 100; 200; 1000
регистрируемые частоты, Гц	0-1600	0-3200		0-400
мгновенный динамический диапазон, дБ	более 120			
коэффициент нелинейных искажений, %	менее 0,002	менее 0,0003		
взаимные влияния между каналами, дБ	менее минус 110			менее минус 70
действующее значение напряжения шума канала, приведенное ко входу при усилении, мкВ (дБ)	менее 0,2 (36)			менее 0,5
потребляемая мощность на канал в рабочем режиме, Вт	менее 0,33	менее 0,25	менее 1,7	
способ питания, аккумулятор	на модуль	на 60 каналов	на модуль	
габариты регистратора, мм	242x242x150	200x98x75	245x105x70	343x185x135
масса регистратора, кг	менее 5	менее 1,35	1,2	2
диапазон рабочих температур, °C	от минус 40 до плюс 60			от минус 20 до плюс 60
максимальная длительность регистрации	200 000 отсчетов		практически не ограничено	
погрешность синхронизации GPS, мкс	—		<1	
объем энергонезависимой памяти, Гб	—		до 4	
нестабильность частоты опорного генератора	—		<10 ⁻⁸	
время автономной работы, суток	—		не менее 10	

параметры: шумы, максимальный неискаженный сигнал регистрации, коэффициент нелинейных искажений, подавление синфазной помехи, коэффициент взаимного влияния, идентичность коэффициентов усиления, сопротивление и импульсная характеристика подключаемого геофона, правильность настроек регистрации. Генератор тестовых сигналов регистратора построен на принципах дельта-сигма цифрового аналогового преобразователя и обеспечивает уровень нелинейных искажений сигналов меньше 0,0003%. Реализованные параметры внутреннего генератора тестовых сигналов определяют высокое качество автономного метрологического обеспечения.

В регистраторе реализовано два варианта синхронизации внутреннего времени: с использованием GPS-приемника и при помощи встроенного высокостабильного тактового генератора. С помощью GPS-приемника возможно наиболее точно синхронизировать работу любого количества регистраторов вне зависимости от продолжительности автономной работы. Поэтому синхронизация регистратора осуществляется, насколько это возможно, от GPS-приемника, и только при нестабильности приема радиосигналов регистратор переходит в режим синхронизации с использованием внутреннего генератора.

Источник питания регистрирующего модуля содержит все необходимые функции управления энергосбережением. Наихудшим, с точки зрения энергопотребления, является режим непрерывной регистрации с синхронизацией от термостатированного генератора. При этом ориентировочная продолжительность работы модуля от стандартного аккумулятора (12 В, 30 Ач) составляет 10 суток.

В качестве энергонезависимой памяти используются промышленные Flash-карты емкостью от 256 Мб до 1 Гб, с возможностью их замены и считывания отдельно от устройства. Для записи информации на карту используется стандартная файловая система FAT16, которая обеспечивает многоуровневое защищенное хранение и высокую скорость передачи (перенос на другие носители) больших объемов информации.

Для конфигурирования автономного регистратора используется любой персональный компьютер, например Notebook, с USB портом и предустановленной операционной системой, поддерживающей файловую систему FAT и накопители USB Mass Storage (MS Windows ME 2000, XP 2003 Server, Linux с ядром > 2.4, MacOS 9 MacOS X и так далее).

USB-интерфейс регистратора соответствует стандартам: USB 1.1 Full-speed и USB Mass Storage Class Bulk-Only Transport, Revision 1.0. Применение USB-порта позволяет легко организовать управление регистратором с использованием широкого перечня вычислительной техники. При подключении к компьютеру регистратор представляется пользователю как жесткий диск (аналогично опознаванию USB FlashDrive или цифрового фотоаппарата), доступный для записи и чтения файлов. Для программирования режима работы пользователю достаточно сформировать, используя стандартные средства операционной системы (Блокнот, WordPAD), в корневой директории этого диска файл «config.txt», содержащий информацию о предстоящих сеансах работы. Программное обеспечение регистратора позволяет создать на этом диске текстовый файл report.txt с информационными сообщениями о

состоянии модуля, GPS, проведенных сеансах и т.п., который так же доступен к прочтению стандартными средствами операционной системы. Помимо этого файла на диске формируются бинарные файлы, содержащие данные сейсмических записей, которые можно для их просмотра и дальнейшей обработки конвертировать в требуемый формат с помощью поставляемого программного обеспечения. В состав этого обеспечения входит конвертер файлов в формат SEG-Y, разработанный «Society of Exploration Geophysicists», а также библиотека функций для реализации собственных вариантов хранения и архивации записей.

В полевых условиях можно выполнить оперативный многооперационный контроль за системой регистрации сейсмических данных: устройство обладает функциями самодиагностики и самотестирования с документированием результатов в виде файлов внутри встроенной Flash-памяти. При установке на местности оператору доступна индикация подключения геофона по уровню принятого сигнала.

По техническим характеристикам разработанный автономный регистратор РОСА-А (таблица 1) сопоставим с лучшими образцами, предназначенными для сбора и регистрации сейсмических данных глубинных исследований, к которым, прежде всего, относятся зарубежные модели Reftek фирмы REFRACTION TECHNOLOGY, Inc. (США).

Результаты испытаний

В настоящее время экспериментальный образец автономного сейсмического регистратора РОСА-А испытан в полевых условиях. Были проведены сравнительные одновременные сеансы регистрации сейсмических данных с использованием автономного 4-х канального регистратора РОСА-А, телеметрического 6-ти канального регистратора станции СТС-24Р и сейсмологической станции «Байкал».

Следует отметить, что телеметрическая сейсмостанция СТС-24Р была изготовлена по заказу МПР России для проведения региональных и глубинных сейсмических исследований. В период 2001 - 2004 гг. станция применялась при вибросейсмических исследованиях методами

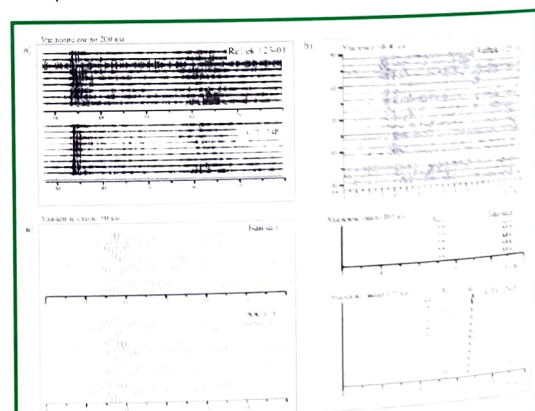


Рис. 4. Фрагменты сравнительных коррелограмм, полученных с использованием различных регистраторов:

- а) региональный геофизический профиль п. Быстровка (Новосибирская обл.) - г. Новокузнецк (Кемеровская обл.); источник - 100-тонный стационарный вибратор ЦВ-100;
- б) опорный геофизический профиль 2-ДВ (Мазаданская обл.), источник - 40-тонный передвижной вибратор ЦВП-40;
- в) геофизический полигон СО РАН п. Ключи (Новосибирская обл.), источник - 40-тонный вибратор ЦВП-40;



КМПВ и ГСЗ на региональном профиле п. Быстровка (Новосибирская обл.) - г. Новокузнецк (Кемеровская обл.) и геотранверсе 2-ДВ (Матанская обл.), которые проводили ФГУП «СНИИГГиМС» совместно с Геофизической службой СО РАН [1, 3]. В качестве источников сейсмических колебаний использовались мощные вибраторы ЦВ-100 и ЦВП-40 (100-тонный стационарный и 40-тонный передвижной), обеспечивающие генерацию ДЧМ - свин в диапазоне частот от 6 Гц до 11 Гц. Длительность одного вибросейсмического сеанса составляла около одного часа. При выполнении этих полевых наблюдений использовалась и специализированная регистрирующая аппаратура - автономные сейсмические регистраторы Reitek и сейсмологические станции «Дельта-Геон» и «Байкал». На опорном геофизическом профиле 2-ДВ отечественная регистрирующая аппаратура (станции СТС-24Р и «Байкал») устанавливались, как правило, на самых больших удалениях до 250 - 300 км для получения на непрерывных многоканальных расстановках «опорных» данных предомненных и отраженных волн от поверхности Мохоровичича. Качество полученного полевого материала можно оценить как хорошее, на коррелограммах уверенно выделяются волны в первых вступлениях от границ в верхней части земной коры (осадочного чехла), поверхности кристаллических пород и поверхности Мохоровичича. На рис. 4 (а, б) приведены фрагменты сравнительных коррелограмм, которые иллюстрируют возможности регистрирующего канала станции СТС-24Р при выполнении глубинных наблюдений.

Испытания автономного модуля РОСА-А проводились с использованием 40-тонного вибратора ЦВП-40, расположенного на геофизическом полигоне СО РАН (п. Быстровка, Новосибирская обл.). Расстояние от 40-тонного вибратора составляло около 50 км. Были зарегистрированы вибрационные сеансы длительностью около одного часа с линейно-частотно-модулированными и монохроматическими сигналами в диапазоне от 6,25 Гц до 11,23 Гц. Обработка и сравнение результатов наблюдений, полученных автономными регистраторами РОСА-А и телеметрическими регистраторами СТС-24Р, показали, что технические параметры испытуемых регистраторов соответствуют заявленным характеристикам. Полученные сейсмозаписи (виброграммы, коррелограммы и импульсные сейсмограммы) показывают высокое качество (по значению динамического диапазона, уровню помех, соотношению сигнал/шум, разрешенности записи) регистрирующего канала РОСА-А, которое не ниже, чем для станции СТС-24Р.

В дальнейшем с автономным регистратором РОСА-А выполнялись непрерывные, продолжительностью до 10 суток, наблюдения с запрограммированным режимом записи, согласованном с расписанием работы вибрационного источника. Рабочее расписание регистратора сохраняется в энергонезависимой Flash-памяти в специальном файле. Наблюдения проводились одновременно со станцией «Байкал», установленной на платформе в термостатированном павильоне, расположенном на геофизическом полигоне СО РАН (п. Ключи, Новосибирская обл.). Регистрация проводилась с использованием трехкомпонентного датчика СК-III и вертикальных геофонов СВ-5. На рис. 4 приведены сравнительные записи полученных коррелограмм, практическая идентичность которых доказывает возможность выполнения

достаточно длительных высокоточных сейсмических (вибросейсмических) наблюдений с использованием данных автономных регистраторов.

Заключение

На основе автономных регистраторов РОСА-А можно построить бескабельную пространственно распределенную систему для выполнения длительных высокоточных сейсмических измерений при проведении глубинных исследований и сейсмического активного и пассивного мониторинга. Технологический интерфейс предлагаемой бескабельной системы сбора сейсмических данных обеспечивает возможность работы с различными источниками упругих колебаний, в том числе и с вибраторами, при практически неограниченном количестве точек наблюдений.

Предлагаемая бескабельная система сбора сейсмических данных имеет следующие отличительные характеристики:

- свободный режим работы с сейсмическими, в том числе и вибросейсмическими, источниками колебаний;
- возможность организации сейсмического мониторинга;
- практически неограниченное количество точек наблюдений;
- экономичность, отсутствие аналого-цифровых телеметрических линий связи (сейсмических кос);
- многоуровневое защищенное хранение и высокую скорость передачи больших объемов информации на основе файловой системы FAT16;
- высокоточная внешняя синхронизация по сигналам спутниковой системы GPS;
- оперативный многооперационный контроль системы регистрации сейсмических данных в полевых условиях с документированием результатов в виде файлов внутри встроенной Flash-памяти;
- широкий частотный диапазон регистрации: до 3,2 кГц на частотах квантования 8 кГц;
- возможность использования цифровых акселерометров, выполненных по MEMS-технологии;
- возможность работы в особо сложных условиях эксплуатации.

Литература

1. Еманов А.Ф., Кузнецов В.Л., Сагайдачная О.М., Сальников А.С., Соловьев В.М. Технология региональных исследований методом ГСЗ с вибрационным источником / Приборы и системы разведочной геофизики. 2004, 3.
2. Сагайдачная О.М., Сагайдачный А.В., Шмыков А.Н. Опыт построения российских многоканальных телеметрических станций для сейсмических исследований (СТС-24 СТС-24Р РОСА) / Приборы и системы разведочной геофизики. 2003, 2.
3. Сагайдачная О.М., Мальцев А.И., Птицына Т.С., Сагайдачный А.В., Сальников А.С., Шмыков А.Н. Отечественная многоканальная телеметрическая станция СТС-24Р для сейсмических исследований / Геофизический вестник. 2002, 10.
4. Сагайдачная О.М., Сагайдачный А.В., Шмыков А.Н., Щегольков А.В. Многоканальная телеметрическая система сбора сейсмических данных / Патент №2244945 (RU) на изобретение, приоритет от 01.08.2003г.
5. Сагайдачная О.М., Сальников А.С., Шмыков А.Н. Бескабельная распределенная система регистрации для глубинных сейсмических исследований / II Международный симпозиум «Активный геофизический мониторинг литосферы Земли». Материалы докладов. Новосибирск. 2005.
6. Сагайдачный А.В., Шмыков А.Н. Бескабельное устройство для регистрации сейсмических данных / Патент №41376 (RU) полезная модель, приоритет от 24.05.2004г.