

Проблемы современной инструментальной базы полевых технологий

■ Ясницкий Ю.С., Geospace Technologies Corp., г. Хьюстон

История широкого применения сейсморазведки при поисках и разведке месторождений нефти и газа насчитывает уже более 70 лет. За это время техника и полевые технологии сейсморазведочных работ претерпели несколько этапов революционных изменений, что каждый раз существенным образом сказывалось на результативности и производительности выполняемых работ, обеспечивая повышение эффективности нефтегазовой сейсмической разведки при решении основной задачи - разведать, подтвердить и извлечь максимальное количество углеводородов при минимальных затратах финансов и времени.

По разнообразию и сложности используемых технических, программных средств и полевых технологий сейсморазведка существенно превосходит все другие геофизические методы. При этом иногда положение дел складывается таким образом, что различные участники процесса, а именно представители различных структур индустрии, имеют своё видение актуальных проблем, не всегда совпадающее с мнением коллег. У производителей, представителей научной сферы и производителей аппаратуры могут складываться даже противоположные взгляды на решение тех или иных задач и зачастую убедить их уступить и принять точку зрения коллег весьма сложно.

Переходя к конкретике, нужно сказать, что каждая нефтяная компания рассматривает свои задачи под собственным углом видения, используя различные подходы к освоению собственных лицензионных участков. Одни недропользователи вкладывают значительные ресурсы в максимально эффективное использова-

ние своих месторождений, выполняя доразведку месторождений и улучшая прогнозные данные, а также проводя чрезвычайно затратные мероприятия по повышению коэффициента извлечения полезных ископаемых, включая сложно извлекаемые запасы. Другие компании стремятся сократить расходы на моделирование до минимально-достаточных значений и вкладывают деньги исключительно в быстрые проекты, не инвестируя в сложные и долговременные программы. Одной из главных причин, сдерживающих развитие технологий разведки и добычи, является тот факт, что природные ресурсы являются политэкономическим инструментом. В последнее время даже лучшие аналитические агентства не могут дать достоверные долгосрочные прогнозы, касающиеся движения цен на полезные ископаемые. Таким образом, крупные инвестиции в разработки прогрессивных и сложных методов разведки и добычи природных ресурсов становятся весьма рискованным мероприятием с весьма непредсказуемыми результатами. Однако остаётся шанс, что некоторые игроки будут продолжать делать ставку на технологичность, заглядывая в будущее немного дальше завтрашнего дня, и тем самым двигаясь вразрез общей тенденции. Такая стратегия, учитывая цикличность развития экономики и волнообразный характер рыночных процессов, с большой долей вероятности, способна привести к успеху.

Инструментальная база полевых технологий в геофизике представляет собой весьма широкий спектр технических средств, предназначенных для изучения, разработки и эксплуатации природных ресурсов. По функциональному назначению эти технические средства использу-

ются для решения трех основных задач: создание, приём и обработка сигналов. И если разобрать и разложить на столе совершенно различные по своему предназначению геофизические приборы, будь то контроллер сейсмоисточника, георадар, полевой регистратор кабельной или бескабельной системы или скважинный зонд, то окажется, что основная компонентная база будет одна и та же: аналогово-цифровые преобразователи, ППВМ (полевая программируемая вентильная матрица), центральный процессор, сетевые контроллеры, память и контроллеры систем геопозиционирования. Самое интересное заключается в том, что на уровне компонентной базы электроники существует практически полная монополия нескольких производителей микросхем. И на самом деле, какой бы прибор любого из производителей геофизического оборудования мы ни подвергли полной разборке, перечисленные компоненты на 70% будут совпадать во всём спектре различных геофизических приборов. Так, к примеру, и в скважинном зонде, и в полевом регистраторе кабельной телеметрической, бескабельной или автономной сейсмосистемы, и в контроллере источника сейсмических сигналов будет идентичная конфигурация центрального процессора, вентильной матрицы, сетевых и GPS контроллеров, памяти и АЦП. Причём будут они от одних и тех же производителей, и, скорее всего, одних и тех же моделей. В настоящее время монополия на электронную компонентную базу геофизических приборов принадлежит компаниям Siemens, Texas Instruments, U-Blox, Cirrus Logic, NXP Semiconductors, Trimble и Transcend.

Производители геофизического оборудования во всём мире собирают практически идентичные по своему функционалу микрокомпьютеры, которые и являют-

ся основными функциональными элементами тех или иных приборов. Такая ситуация возникла при эволюционном переходе от аналоговых систем к цифровым в начале 80-х годов двадцатого века. До упомянутой смены поколений можно было абсолютно достоверно распознать страну-производителя системы, всего лишь взглянув на элементы компонентной базы электрической схемы прибора. При появлении современной компонентной базы обнаружилась тенденция к резкому росту количества производителей геофизического оборудования на рынке. При этом, с одной стороны задача первичного проектирования и дизайна приборов в «железе» существенно упростилась, а с другой — встал вопрос доводки готового устройства на программном уровне, что оказалось задачей не менее, а зачастую, более сложной.

Ситуация разрозненности между производителями стала серьёзно накаляться с начала двухтысячных годов. На рынке появилось множество новых компаний, которые на фоне технологического взлёта полупроводниковой индустрии пришли к выводу, что создать изделие из готовых компонентов будет не так уж и сложно и на уровне концептов можно заявить новые недоступные ранее возможности. По отношению к ситуации, сложившейся на рынке геофизического оборудования, напрашивается ёмкое определение «печального оптимизма». Не имея возможности провести детальную доработку продуктов и пройти стадию внутреннего массового стрессового тестирования спроектированного оборудования, основная масса новых игроков, не утруждаясь, выдаёт весьма громкие маркетинговые лозунги, обещающие своим клиентам «легкую жизнь».

Маркетинговая линия многих начинающих компаний максимально подстрое-

на под озвучиваемые желания нефтяных и сервисных компаний и не важно, в какой степени требуемые параметры возможно в действительности реализовать на практике. Главное — заявить всем, что именно они производят оборудование, полностью соответствующее всем поставленным требованиям. Ситуация многократно осложнилась в последние три – пять лет с момента выхода на рынок множества китайских производителей, которые либо просто копируют готовые продукты крупнейших брендов в обход всех патентных и интеллектуальных прав, либо же собирают изделие, выпуская его на рынок с минимальной обкаткой и тестированием. Программные составляющие китайских решений находятся в чрезвычайно сыром виде.

В свою очередь, у потенциальных конечных пользователей оборудования формируется ложное представление об истинном положении дел в индустрии, связанное с ожиданием того, что приобретенное оборудование будет соответствовать заявленным производителем характеристикам, а также будет отвечать общемировым стандартам надежности.

В действительности же, только несколько производителей в мире с богатой историей и высочайшей компетенцией персонала, имеют возможность создать по-настоящему качественный и отлаженный продукт, обещая при этом лишь то, на что это продукт действительно способен.

Для возможности производства в сжатые сроки десятков тысяч устройств нужна соответствующая производственная база, отлаженный процесс и заполненные необходимыми компонентами склады. Таким образом, ещё до заключения первых контрактов с пользователями необходимо инвестировать сотни миллионов условных денежных единиц в разработку и дальнейшую отладку оборудова-

ния, а также в создание и наладку производственной линии. В процессе реального тестирования устройств нередко обнаруживаются существенные недостатки, что вынуждает отправлять под списание тысячи единиц произведенных устройств. Увы, все крупные производители очень хорошо знакомы со столь типичной ситуацией. В противоположность добросовестным производителям, у которых слово не расходится с делом, новые игроки предпочитают проводить тестирование на собственных клиентах и практически всегда оказываются в неловких ситуациях, что в условиях довольно узкой сферы бизнеса неминуемо ведет к потере репутации и недоверию клиентов в будущем. Далее мы разберем несколько конкретных примеров, не называя из деликатности конкретные бренды.

Как и в любом другом бизнесе, при производстве геологоразведочного оборудования критически важны: ведение грамотной стратегии планирования действий на годы вперед, тесная взаимосвязь с клиентами и принятие верных решений. Единственное неверное решение может поставить под удар всю компанию, в особенности, когда бренд имеет узкую специализацию и компания не будет способна выдержать провал отдельной линейки выпускаемого оборудования.

Один из новых игроков на рынке показал решение, в теории способное удовлетворить самые нескромные запросы и ожидания геологоразведчиков, а именно, полностью бескабельную систему, способную передавать регистрируемые данные в реальном времени. Надо заметить, что производитель предпочёл использовать в маркетинговых слоганах именно термин «реальное время», а не квазиреальное. Заявляется, что доступны конфигурации, полностью сопоставимые

с сейсморазведочными кабельными системами, передающие регистрируемые данные в центральную систему в реальном времени. То есть производитель с ходу готов пообещать, что в реальных полевых условиях, после расстановки 6 – 8 тысяч станций по 3D профилям система активируется, произведёт корректную адресацию каждого блока и будет стабильно передавать данные в «реальном времени» с активной расстановки. При этом активная расстановка может быть и 3.5 и более тысяч каналов. Все современные телеметрические системы передачи данных построены с использованием известных сетевых протоколов (TCP, UDP и TCP/IP) и имеют классические топологии (кольцо, звезда или смешанный тип). При этом неизбежны и ограничения, накладываемые определенной структурой и используемым протоколом передачи данных. Адресация в кабельной системе происходит по цепочке и конфликтов авторизации устройств при автоматическом назначении метрики происходить не должно. Хотя такое случается и в кабельных сетях, причём не так уж и редко. А это означает, что конфликтующие приборы исключаются из маршрутизации и на определенных участках расстановка вдруг перестаёт «отвечать». В бескабельных же сетевых системах всё многократно сложнее: маршрутизатор даёт команду на активацию всем приборам в зоне радиовидимости, затем принимает от них ответное «слово», после чего происходит назначение метрики сегмента сети, и управляющая команда на активацию следующего участка сети передаётся следующему маршрутизатору. При этом роль маршрутизаторов берут на себя те же самые полевые регистраторы, выступая, в зависимости от ситуации, либо обычными участниками децентрализованной сети, либо маршрутизаторами.

Самая главная сложность заключается именно в построении одноранговой сети, когда маршрутизатор даёт команду на активацию в зоне радиовидимости, радиус которой может составлять несколько километров. При этом мощность сигнала на внешних участках радиуса будет значительно ослаблена. Сигнал на активацию, скорее всего, будет принят, а вот ответный сигнал может не дойти или дойти далеко не с первой сотни попыток. При этом уже будет активироваться следующий сегмент сети и уже следующий маршрутизатор может принять ответные сигналы от одиноких оставшихся участников первого сегмента. При этом собственная адресация на заданном уровне уже будет занята участниками своего сегмента и произойдёт конфликт адресации, что потребует отсылки команды на переинициализацию обоих сегментов сети, а дальше ситуация может банально повториться. В самом тривиальном случае, отдельные блоки просто не будут инициализированы. При более пессимистичном варианте время активации расстановки будет стремиться к бесконечности. Это лишь первый этап. Далее встаёт проблема асимметрии мощностей передатчиков. В зависимости от внешних условий связи, каждый участник сети – станция с полевым регистратором – может менять мощность радиоизлучения. Внешние условия всегда будут отличаться на разных участках расстановки. При этом изменения, как правило, будут иметь не плавный, а ступенчатый характер. Так, например, поле перешло в лесопосадку, затем в низменность с туманом, где поглощение высокочастотного сигнала будет просто колоссальным, или на определённом участке расстановки начнется дождь. Именно в таких переходных зонах и будут возникать основные сложности. Если передатчики (А) на

граничной полосе эксклюзивной зоны передают сигнал на повышенной мощности, к примеру, 250 мВт, а соседние станции (В) из ординарной зоны на 50–80 мВт, то неизбежно на граничной зоне возникнут места, где станции «В» будут хорошо слышать станции «А», но станции «А» не услышат соседей «В» или связь будет очень слабой – асимметрия. Сигнал есть, связи нет или скорость передачи данных в одну сторону будет высокой, а в другую сторону крайне низкой, с огромным количеством ошибок и, как следствие, с постоянными повторными запросами на передачу пакетов с несовпавшей контрольной суммой.

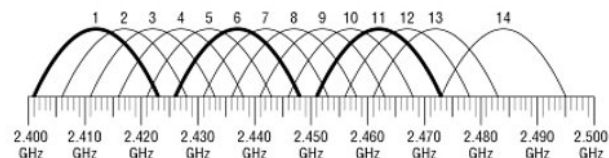
Следующая проблема и злейший враг бескабельных систем в сейсморазведке – интерференция высокочастотных сигналов беспроводной телеметрии. Решение использовать открытые полосы радиочастот в диапазонах 2,4 ГГц и 5 ГГц имеет положительные и отрицательные последствия. Отрицательных значительно больше. Положительные стороны – меньше сложностей с легализацией на территории некоторых государств (Россия не входит в их число. В России не требуется специальная регистрация в ФСБ и радиочастотном комитете только для систем, работающих в помещениях на частотах 2,4 и 5 ГГц и мощностью излучения не более 110 мВт) и возможность реализации широкого пропускного канала данных. Однако, минусов, как было упомянуто ранее, значительно больше. Когда полосы часто для передачи данных ограничены 100 МГц для частотного диапазона 2,4 ГГц (2400–2500 МГц) и 150 МГц для полосы 5 ГГц свободных от интерференции (не перекрывающихся по частотам) каналов остаётся немного. В табл. 1 представлены частотные каналы в спектральной полосе 2,4 ГГц [1].

Общая диаграмма перекрытия частот-

Канал WiFi	Нижняя частота	Центральная частота	Верхняя частота
1	2.401	2.412	2.423
2	2.406	2.417	2.428
3	2.411	2.422	2.433
4	2.416	2.427	2.438
5	2.421	2.432	2.443
6	2.426	2.437	2.448
7	2.431	2.442	2.453
8	2.436	2.447	2.458
9	2.441	2.452	2.463
10	2.446	2.457	2.468
11	2.451	2.462	2.473
12	2.456	2.467	2.478
13	2.461	2.472	2.483

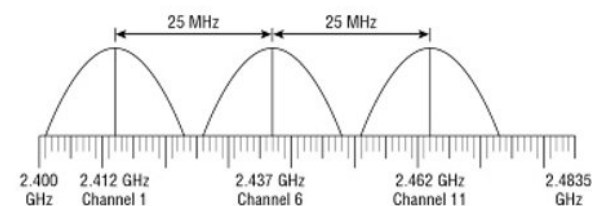
▲ Табл. 1.

ных каналов в полосе 2,4 ГГц представлена на рис. 1.



▲ Рис. 1.

В полосе частот WiFi 2.4GHz доступны 3 неперекрывающихся канала: 1, 6, 11. Данное выделение строится на требовании IEEE по обеспечению минимума в 25 МГц для разнесения центров неперекрывающихся частотных каналов WiFi. При этом ширина канала составляет 22 МГц (рис.2).



▲ Рис. 2.

Ниже представлена сетка рабочих каналов WiFi и частоты в 5GHz (табл.2, 3, 4) [1].

Для вычисления центральной частоты канала WiFi можно использовать следующую формулу: $5000 + (5 * N) / \text{MHz}$, где N это номер канала WiFi, например 36, 40 и т.д. [1].

Канал	36	40	44	48
Центральная частота, МГц	5180	5200	5220	5240
Полоса	UNII-1			

▲ Табл. 2.

Канал	149	153	157	161
Центральная частота, МГц	5745	5765	5785	5805
Полоса	UNNII-3			

▲ Табл. 3.

Канал	52	56	60	64	100	104	108	112	116	120	124	128	132	136	140
Центральная частота, МГц	5260	5280	5300	5320	5500	5520	5540	5560	5580	5600	5620	5640	5660	5680	5700
Полоса	UNII-2														

▲ Табл. 3. (Продолжение).

Формирование каналов в полосе 5 ГГц представлено на рис. 3.

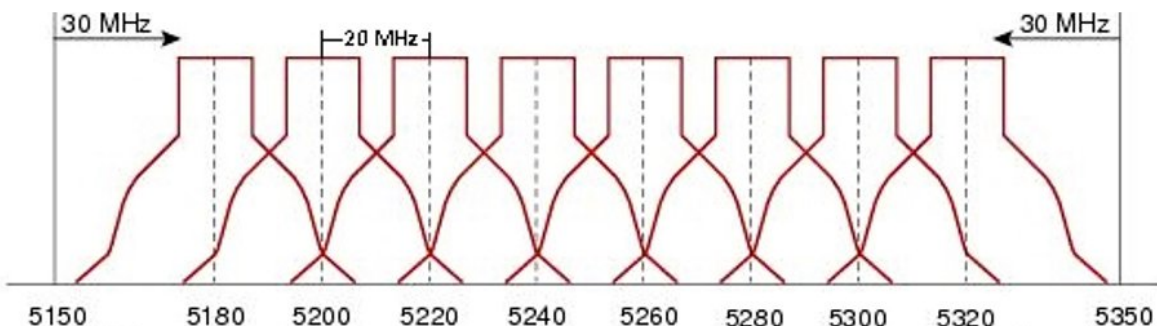
При этом дистанция от граничных диапазонов составляет 30 МГц, а межканальное разнесение составляет 20 МГц.

Таким образом, когда имеется лишь несколько доступных каналов и каждый полевой регистратор старается использовать наименее загруженный в момент получения собственной метрики, а затем ту же операцию проводят и все соседние каналы, то появляется множество устройств, работающих в одних и тех же участках спектра. Каждое дополнительное устройство, подключившееся к работе в том же спектре, будет интерферировать с полезным сигналом, передаваемым в данный момент другим блоком. Причём, дальнейшее наращивание плотности сети (применительно к системам сейсморазведки — это увеличение плотности расстановки) будет кратно

увеличивать проблемы интерференции и будет препятствовать получению требуемых характеристик производительности или сделает данные характеристики крайне нестабильными. Промежуточный вывод — чем плотнее расстановка, тем хуже она будет работать. Более того, при достижении определённого предела в наборе плотности, в один момент система просто перестанет выполнять функции телеметрии. Увы, с физикой не поспоришь. Часто даже не самые очевидные условия могут играть решающую роль. Так, например, всего лишь дождик или утренний туман способен полностью порушить ещё час назад стабильно работающую расстановку! И особенно летом в лесу, в утренние часы, когда роса будет конденсироваться на листьях и траве.

Изначально концепт системы с радиотелеметрией создавался для систем мониторинга гидроразрыва пласта, где не

▼ Рис. 3.



требуется большая плотность и значительное количество приборов для решения целевой задачи. Затем систему было решено приспособить для более крупного и доходного рынка сейсморазведки. Скорее всего, производитель не проводил масштабного стрессового тестирования системы при различных условиях и не учел тенденции на уплотнение шага регистрации. В настоящее время не существует достаточно надежной технологии для реализации полностью бескабельной телеметрии, работающей в реальном времени в масштабах тысяч каналов.

Значительно лучше ситуация с «полуслепыми» системами. Такие системы ведут автономную регистрацию 24 часа в сутки или по заранее заданному расписанию, обеспечивая при этом бескабельный доступ к регистраторам для контроля актуальных статусов расстановки и выгрузки данных на основе списков отметок моментов (время с точностью до микросекунды, показывающее начало воздействия на каждом пункте возбуждения). Сейсмоданные записываются во внутреннюю энергонезависимую память и хранятся там до момента выгрузки всех данных на сервер. В этом случае исключается возможность потери данных в результате нестабильной работы радиотелеметрии и надежность всей системы значительно повышается. Существует несколько действительно работоспособных систем от различных производителей и при этом каждая имеет свои уникальные особенности. Полуслепая концепция и есть та золотая середина, которая соответствует современному уровню технологического развития компонентной базы, удовлетворяя в достаточной степени нужды геологоразведчиков. Но опять всё не столь радужно и такие системы тоже не идеальны. Недостатки чаще всего связа-

ны с особенностями системы, которые должны были бы упростить методику работы с системой. Также сложности обязательно возникают, когда производитель в угоду запросам пользователей или же по своему собственному видению впадает в крайность, сдвигая продукт с той самой золотой середины в сторону «практически бескабельной телеметрии» или противоположную ей - «практически слепой системы», без возможности оперативного контроля состояния полевой расстановки. Разберем несколько примеров.

Один из производителей в самом начале периода становления бескабельных систем приобрел стартап небольшой компании с полным пакетом интеллектуальных прав на разработку. На тот момент времени, это была, возможно, наиболее технологически продвинутая система, имевшая, к сожалению, «детские болезни», которые она пронесла через весь свой цикл существования. Причина, по которой «детские болезни» так и не были исправлены, является методика создания изделия, о которой шла речь в начале статьи. Замена отдельного компонента может потребовать редизайна всей управляющей платы, то есть всего устройства. Замена контроллера GPS или же сетевого контроллера Wi-Fi потянет за собой полный редизайн блока питания, новую разводку дорожек на плате (стоит упомянуть, что печатные платы сейчас используются многослойные, в 8 или даже в 16 слоёв с собственной разводкой на каждом слое), разработку нового ядра для программируемой вентильной матрицы (FPGA), иного загрузчика для инициализации устройств и новой высокоуровневой управляющей программы для центрального процессора. В рамках отдельной линейки продуктов, особенно учитывая дальнейшее довольно длитель-

ное тестирование в полевых условиях, такие усилия будут практически равнозначны полному перезапуску линейки, что потребует колоссальных затрат. Для компании, у которой есть несколько успешных линеек оборудования проще было оставить бескабельную разработку «как есть», при этом вполне успешно вытягивая продукт за счёт заслуженного годами положительного имиджа компании. Так что же не так с бескабельной системой вышеупомянутого производителя? Тут сыграли несколько факторов одновременно.

Во-первых, это слабая антенна GPS приёмника. На самом деле это один из важнейших факторов стабильности и надёжности наземных бескабельных систем регистрации. GPS используется в первую очередь не для позиционирования приборов, а для точной временной синхронизации каждого регистратора в отдельности и системы в целом. В регистраторах наземных бескабельных сейсмосистем, в отличие от морских нодальных сейсмосистем, средства поддержки постоянной температуры внутренних часов не устанавливаются по экономическим соображениям. При этом среднесуточные температурные флуктуации могут достигать слишком больших величин, чтобы ими можно было пренебречь. При потере сигнала GPS на относительно длительное время внутренние часы регистратора начнут уходить в ту или иную сторону и частота дискретизации уже не будет точно соответствовать заданному значению. Именно поэтому качество исполнения блока GPS является критически важным и напрямую влияет на конечный результат.

Во-вторых, это стремление удовлетворить основной запрос геофизиков восточного региона на контроль расстановки в реальном времени. В качестве радиопе-

редатчика был выбран стандарт Wi-Fi на открытой частоте 2.4 ГГц, основные недостатки которого мы разбирали на предыдущем примере. Соответственно, тут возникают те же проблемы. Кроме того, в этой системе отсутствует возможность массовой скачки данных по кабельному интерфейсу. Если с каждого блока требуется скачать, к примеру, 10 Гб данных, а блоков при перекладке оборудования привезли сразу 3000, то на сервера нужно будет передать 30 терабайт данных. С использованием Wi-Fi интерфейса на это потребуются около 70 часов при идеальных условиях. А ведь на непрерывную передачу данных в течении 70 часов потребуются полностью заряженные аккумуляторы! Поэтому эта система и не сохраняет сырой массив данных, с которым можно было бы производить множество операций постобработки, дающих значительное преимущество в интерпретации (суточный мониторинг шумового поля, подключение специальных методик обработки СЛБО и СЛОЭ, динамическое изменение размера активной расстановки и нарезка данных с различной длительностью данных, бесшовные данные Continuous Receiver Gather), а выгружает нарезку данных, основанную на таблицах отметок моментов возбуждения.

В дополнение к сказанному, приёмопередатчик Wi-Fi довольно невелик в отношении потребления электроэнергии, в особенности в условиях слабого сигнала, когда требуется использовать максимальное усиление на передатчик. При наличии внутренней батареи не самой высокой ёмкости, в реальных условиях автономность блока составляет в среднем менее 10 дней. И это при условии положительных температур и нового оборудования, т.е. с литий-ионными батареями, ёмкость которых соответствует заявленной величине, которая обычно рассчиты-

вается при температуре 20 °С. При отрицательных температурах батарея может терять до 60% от первоначальной ёмкости (в среднем потеря составляет 10% ёмкости на каждые 10 градусов С). Дело в том, что все 100% батарей производятся на заказ в Китае и производители батарей обозначают нижний рабочий температурный предел в -20 °С. Все остальные цифры (-40; -50 градусов) производители геофизического оборудования указывают на собственный страх и риск.

Следующим примером может послужить оборудование от производителя, достигшего определённых успехов со своей морской нодальной системой. Наземное оборудование этого производителя в целом показало весьма надёжную и стабильную работу, но сложности пришли с противоположной стороны. Полевые регистраторы не имеют никакого бескабельного интерфейса в угоду упрощения конструкции блоков и повышения их надёжности. Производитель любит говорить об исключительной надёжности своей продукции, но опыт подсказывает, что абсолюта не существует, и в особенности это касается электроники. Рассматриваемые полевые регистраторы всё же имеют диагностическую карту, отображаемую последовательностью сигналов и цветовым кодом светодиода на корпусе каждого регистратора, а также имеют проводной диагностический разъём, позволяющий собирать детальные статусы расстановки с помощью планшетного компьютера, подключаемого кабелем к каждому из нескольких тысяч расставленных на поле приборов. Разумеется, такой способ не реализуем на практике и пользователь вынужден слепо верить, что все каналы пишут качественный материал. В результате, такая система регистрации допускает возможность появления недиагности-

рованных бракованных данных и пропущенных трасс.

Использование концепции полностью слепой системы получило некоторое распространение. В настоящее время такие системы регистрации предлагают несколько компаний. Один из новых производителей предлагает слепые трехкомпонентные модули в исполнении, напоминающем болотофоны, и роботизированную систему установки модулей. Робот, заряженный сотней приборов, сам проезжает по координатам пунктов приёма, разбуривает лунки глубиной в 30 сантиметров и устанавливает в них приборы. Конечно, заглубление электродинамических датчиков безусловно положительно сказывается на качестве данных, но в настоящее время подобного рода системы способны функционировать только на концептуальном уровне. Гораздо правильнее, как нам кажется, использовать роботизированные системы не на земле, а в воздухе, в связке с полуслепой системой, где автономный дрон способен за час пролететь на высоте 50 – 70 метров по координатам большей части расстановки со скоростью около сотни километров в час, собрать на миниатюрный приёмопередатчик все статусы работы со всех полевых регистраторов и уже через час предоставить для контроля качества все необходимые данные. После этого можно провести анализ и принять решение об обслуживании отдельных приборов, если это необходимо. Такой облёт можно совершать несколько раз в сутки или в непрерывном режиме и всегда иметь актуальную информацию о работе всей системы. В качестве коммуникационного модуля разумно использовать протоколы с низким профилем электропотребления и бинарной передачей сервисных данных.

Следует отметить, что производителям часто приходится устранять проблемы,

упущенные на стадии проектирования. В качестве примера можно привести случай, когда из-за неправильно спроектированного корпуса прибора приемопередающая антенна была расположена слишком близко к внутренней стенке прибора под острым углом и высокочастотный сигнал попросту отражался от пластиковой стенки, в результате чего радиопокрытие не соответствовало расчётному. Уже готовый модуль, находящийся на стадии производства, пришлось в срочном порядке отправлять на доработку с изменением дизайна антенны.

Среди сейсморегистрирующих систем, предлагаемых в настоящее время производителями геофизического оборудования, несколько особняком стоит так называемая комбинированная система, в которой совмещены кабельный и бескабельный принципы сбора данных. Изначально концепт такой тандемной системы близок к идеальному, избавляя от многих проблем как кабельных, так и бескабельных систем регистрации, пытающихся работать в приближенном к реальному времени. Из очевидных недостатков остаются только классические сложности, связанные с расстановкой и транспортировкой габаритной кабельной системы и стоимость системы в целом. Такая система обеспечивает честную передачу данных и контроль расстановки в реальном времени, высокую надёжность в сравнении с кабельными системами и легко преодолевает большинство инцидентов, связанных с разрывами и повреждениями кабеля, если только не случится двойной разрыв в сегменте, зависящий от линейных блоков, питающих сегменты с обеих сторон. При этом вероятность именно такой конфигурации отказа довольно низка и будет немедленно обнаружена с точностью до крайних перед разрывом приборов. Проблема

расстановки профиля в эксклюзивной зоне решается выкладкой сегментов расстановки бескабельными регистраторами, интегрированными в систему, либо любой другой бескабельной системой с подключением данных, собранных с эксклюзивного участка, на стадии обработки данных.

Неочевидный недостаток станции берет начало из ее же достоинств. При обрыве линии каждый отдельный регистратор на телеметрическом кабеле способен переключаться в бескабельный режим с установкой радиотелеметрии с соседним блоком, находящимся после разрыва. Межлинейные блоки способны перестраивать маршрутизацию данных и перенаправлять сигнал с помощью радиотелеметрии в обход обрывов отдельных линий, не имеющих связи с собственными межлинейными блоками. Конечный пользователь вероятнее всего будет затягивать с ремонтом повреждённых кабелей, продолжая работу до тех пор пока не наберется критическая масса неисправностей и сама система не перестанет справляться с перемаршрутизацией телеметрии. В конечном итоге, если затягивать с ремонтом, то, когда настанет момент переброски линий, потребуется потратить весьма значительное время на ремонт множества порывов, устранения утечек кабелей. В массовом объёме это приведёт к эффекту «дорожной пробки», когда полевые ГМЛ к середине сезона столкнутся с массовым ремонтом. Безусловно, это вопрос организации работы конечного пользователя, но с практической точки зрения высокая надёжность гибридной системы будет провоцировать пользователей к откладыванию ремонта.

Стоит упомянуть историю одной из старейших компаний, ставшей жертвой ряда совершенных ошибок и неверных маркетинговых ходов. Компания была

создана в 1968 году в г. Хьюстон в Соединенных Штатах и начинала свою деятельность с производства специализированных систем синхронизации сейсмоисточников. Затем было развернуто производство электродинамических геофизических датчиков. Компания начала приобретать всемирную известность, в том числе и благодаря весьма успешной серии геофонов SM. Позднее, в производственном портфеле компании появились наземные сейсморазведочные станции, сейсмовибраторы, системы синхронизации и программные комплексы, на равных конкурирующие с европейским законодателем рынка. Практически на протяжении всей своей истории, компания приобретала технологии и интеллектуальные права у других игроков на рынке. В середине 90-х годов XX века, были приобретены права на технологию сейсмовибраторов у компании «Western Geophysical», а затем, шесть лет спустя, была приобретена линейка сейсмоконтроллеров «Pelton». Таким образом, к середине 2000 годов, компания могла предложить практически полный спектр сейсморазведочного оборудования и сервисов для наземных и морских сейсморазведочных работ.

Но каждая последующая модификация системы и новые модели станций не несли в себе явных инноваций. Если вторая серия системы полностью соответствовала современному уровню развития и в некоторых областях превосходила конкурентов, то следующие поколения оборудования содержали в себе всё меньше и меньше инноваций и начали по всем параметрам уступать конкурентам. Дизайн в железе был надежным, но при этом значительно отставал по массогабаритным параметрам. Основная проблема оказалась в программной составляющей выпускаемых компанией продуктов. В самом начале статьи упоминалось, что

при построении системы из набора компонентов, доступных на рынке, одну из наибольших сложностей представляет программная адаптация аппаратных компонентов и общая программная среда взаимодействия. Сейсмостанция, как класс оборудования, представляет собой большую компьютерную сеть, и её правильное функционирование является критически важным для работы всей системы. Если в программной составляющей допущено множество, пусть даже и

некритических ошибок, то это потребует от конечного пользователя развития особых приспособленческих навыков. За несколько сезонов оператор, постоянно работающий с одной и той же системой, способен подстроиться под нестабильно работающую систему и не допускать последовательности действий, способных вызвать очередной сбой. Но любой новый сотрудник, начавший работу после обучения работы с оборудованием, будет попросту не готов начать использовать систему, как это описывается в руководстве пользователя или во время специализированных курсов. Такого рода сбои называются регулярными и к ним кое-как можно приспособиться. Нерегулярные ошибки, возникающие сами по себе, без инициирования особой последовательностью действий, являются куда более существенными и не оставляют возможности предсказать поведение системы.

В определённый момент, конечными пользователями была накоплена критическая масса претензий и никто не захотел обновлять устаревающий парк оборудования на новые версии системы, отдав предпочтение другим маркам.

Хочется также затронуть некоторые проблемы морских нодальных систем, которые в своём современном состоянии очень близки по концепции к наземным слепым бескабельным системам. По сути,

это те же бескабельные четырехканальные регистраторы, лишенные приёмников GPS. Хронирование времени осуществляется по тем же алгоритмам, только временные промежутки между подсчётами фазовой ошибки от референтных временных отсчётов, полученных по GPS, составляют десятки дней. Донные станции синхронизируются дважды: перед раскладкой и после подъёма на борт. Во время первого отсчёта замеряется точность хода часов по микросекундной шкале. При взятии второго отсчёта замеряется фазовый сдвиг. Впоследствии при формировании сейсмических файлов значение фазового сдвига применяется для сжатия или растяжения отдельных трасс. Как правило, применяется линейная интерполяция. Для того, чтобы получить качественные данные, фазовый сдвиг не должен быть значительным и ход часов должен быть стабилен. Другими словами, небольшой уход часов вполне допустим, но величина ухода должна быть стабильной и постоянной на протяжении всего времени автономного действия регистратора. Только тогда данные можно будет выровнять.

Существует два подхода в реализации стабильного хронирования для донных регистрирующих систем. Классическим вариантом можно назвать применение кварцевых часов, а инновационным – установку миниатюрных цезиевых атомных часов, работающих на основе квантового эффекта КПН (когерентного пленения населенностей).

Как известно, стабильность хода кварцевых часов зависит от температурного режима и применяемой системы компенсации. Золотым стандартом является применение термостатированного кварцевого осциллятора с двойной печкой (OCXO Oven-controlled crystal oscillator) (рис.4). Такая компоновка позволяет

поддерживать постоянную температуру, при которой работа кварцевого осциллятора наиболее стабильна.



▲ Рис. 4. Термостатированный кварцевый осциллятор с двойной печкой.

Первый и второй контуры печки независимы и управляются отдельно, поддерживая строго заданную температуру ядра даже при резком изменении внешних условий. А это именно тот сценарий, при котором и работают нодальные системы, когда донные регистраторы, пролежавшие на палубе несколько часов и изрядно нагретые солнцем, сбрасывают в холодную воду. К основному недостатку системы с двойной печкой можно отнести довольно длительное время, необходимое для фазовой автоподстройки частоты (Phase-Locked loop), когда фаза осциллятора подстраивается так, чтобы она была равна фазе опорного сигнала, которым выступает ежесекундно получаемый импульс в секунду (PPS – pulse per Second), синхронизированный с GPS временем. Происходит сравнение фазы входного и опорного сигналов и фиксируется ошибка, равная разности между фазами. Сигнал ошибки затем используется в качестве управляющего для генератора, управляемого напряжением, обеспечивающего обратную отрицательную связь. В случае отклонения выходной частоты от опорной, сигнал ошибки увеличивается,

воздействуя на управляемый генератор в сторону уменьшения ошибки. Так повторяется до тех пор, пока система не достигнет равновесного состояния, и выходной сигнал не будет зафиксирован на частоте опорного. Учитывая известный факт старения кварцевой системы, и, как следствие, ухудшение со временем заводских характеристик, еще одним недостатком можно считать увеличивающееся с возрастом время синхронизации системы.

В 2011 году компания Symmetricom, впоследствии приобретенная Microsemi Corp., представила миниатюрную систему цезиевых атомных часов на чипе (рис.5).



▲ Рис. 5. Чип цезиевых атомных часов.

Продукт получил весьма широкий спектр применения и быстро нашел применение в различных высокотехнологичных продуктах, в том числе эти чипы стали применять и производители сейсморазведочных донных станций. Но применение этой инновационной и дорогостоящей технологии не стало панацеей. Во-первых, данные чипы весьма дороги и их установка целесообразна в наиболее дорогие модификации. Во-вторых, не существует альтернативы. Такого рода цезиевые атомные осцилляторы на

данный момент выпускает только один производитель на рынке, а монополист, как известно, всегда может и будет диктовать собственные условия. Так и случилось, когда компания Symmetricom перешла под контроль MicrosemiCorp со сменой высшего руководства. В ходе организации массового выпуска донных систем, построенных на основе атомных часов, вдруг выяснилось, что продукт имеет непредсказуемые показатели старения, приводящее к частым и, что самое плохое, внезапным рассинхронизациям. Предугадать момент потери синхронизации и раскалибровки чипа невозможно. Этот факт производитель прямо указывает в официальном листе спецификаций продукта, упоминая также, что все параметры соответствуют температуре 25 градусов Цельсия [2]. Для перекалибровки необходимо отправлять чип производителю, причём микросхема не должна быть впаяна в плату. И, казалось бы, что уже и так непреодолимая сложность была ещё более усугублена отказом нового руководства компании принимать устройства, ранее выпущенные компанией Symmetricom. Сразу несколько компаний-производителей донных сейсморегирующих систем оказались в заложниках у диктующего собственные правила игры производителя чипов. Так следует отметить, что в текущем году все производители, включая тех, кто ранее производил донные станции исключительно с атомными часами, расширили собственную линейку и начали продвигать модификации с термостатированными кварцевыми осцилляторами. Преимущества атомных часов - быстрая начальная синхронизация, теоретическая независимость от температурных колебаний и опять же теоретическая точность хода – были нивелированы не всегда корректным поведением производителя микросхем и

непредсказуемым поведением самой системы атомных часов.

Крупные производители геологоразведочного оборудования стараются преодолеть стагнацию рынка, используя периоды спада производства для совершенствования технологий и разработки инновационных решений. Хотелось бы верить, что сервисные и нефтяные компании будут следовать тем же курсом, делая ставку на новейшие технологии, позволяющие в итоге добиваться целей с меньшими экономическими затратами именно благодаря инновациям в производственном полевом цикле и повышению надежности оборудования, а не за счёт единовременной экономии при закупке некачественных китайских изделий, выполненных с нарушением патентных и интеллектуальных прав крупнейших производителей, и, как правило, не соответствующих собственным спецификациям, заявленным в документации к их продуктам. Российский рынок геофизического оборудования следовало бы обезопасить от недобросовестных азиатских производителей, прибегающих к политике демпинга, продающих оборудование зачастую ниже себестоимости за счёт максимальной экономии на производственных материалах и компонентах приборов. Идеальным решением было бы создание независимой сертификационной лаборатории на территории Российской Федерации по контролю и сертификации ввозимого и произведенного в России геофизического оборудования и принятие соответствующих норм на законодательном уровне.

Литература

1. Частоты, частотные полосы и частотные каналы сетей стандарта WiFi IEEE 802.11 2.4GHz, 5 GHz, www.wi-life.com [2017]
2. Chip Scale Atomic Clock (CSAC), <https://www.microsemi.com> [2017].