

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СИСТЕМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

Ю. К. Выболдин

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия

Аннотация: Сейсмическая разведка обладает большой глубиной проникновения, позволяет получить изображение подземных структур с высокой разрешающей способностью и может дополнять программы бурения скважин и разведки, выполняемые другими геофизическими методами. Сейсмические методы показали высокую эффективность при разведке твердых полезных ископаемых. Беспроводные системы сейсмической разведки позволяют значительно упростить развертывание и обслуживание системы, особенно при увеличении числа и плотности размещения узлов сбора данных в условиях сложного рельефа местности, позволяют масштабировать систему, снизить вес оборудования, повысить надежность, уменьшить стоимость и эксплуатационные расходы. В работе проанализированы способы построения системы сбора и передачи сейсмических данных как одного из важных компонентов системы сейсмической разведки. Задача построения крупномасштабной беспроводной системы георазведки, работающей в реальном времени, остается нерешенной из-за ограниченной пропускной способности беспроводного канала, задержки передачи и высокого энергопотребления, вызванного конфликтами при передаче данных в устройствах сбора с батарейным питанием. При построении беспроводных систем сейсморазведки, основанных на одной технологии беспроводной связи, трудно достичь одновременно обеспечения высокой скорости передачи данных и большого охвата территории. Поэтому современные методы предполагают двухуровневую структуру построения систем. В данной работе предлагается использовать высокоскоростные стандарты технологии Wi-Fi как на нижнем уровне для построения подсетей сбора данных, так и на верхнем уровне для построения сети связи с центральной станцией мониторинга. В статье сформулированы требования, предъявляемые к построению беспроводных систем сейсморазведки, рассмотрен ряд наиболее перспективных технологических решений, включая технологии LPWAN, Wi-Fi-LTE, UBW, позволяющие построить крупномасштабные беспроводные сети с большим количеством узлов сбора данных, работающие в нелицензионных диапазонах частот. Особое внимание при анализе уделяется вопросам обеспечения требуемой пропускной способности сети и ее масштабированию, обеспечению требуемого количества независимых каналов сбора данных, определению положения узлов сбора данных с помощью спутниковых навигационных систем и методов кооперативной локализации, временной привязке при съеме данных. Анализ всех технических решений связывается с уменьшением энергопотребления сети. Сформулированы предложения по улучшению процедуры сбора данных.

Ключевые слова: сейсмическая разведка, беспроводные технологии, узел сбора данных, центральная станция мониторинга, энергосбережение, управление доступом к среде, протоколы маршрутизации, сенсорные сети.

Для цитирования: Выболдин Ю. К. Применение беспроводных сетевых технологий при построении систем сейсмической разведки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-2. – С. 283–304. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_283.

Application of wireless network technologies in the construction of seismic exploration systems

Yu. K. Vyboldin

St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia

Abstract: Seismic survey has a greater depth of penetration, allows images of underground structures with high resolution and can complement well drilling and exploration programs performed by other geophysical methods. Seismic methods have shown high efficiency in the exploration of solid minerals. Wireless systems of seismic exploration allow to simplify significantly the deployment and maintenance of the system especially when the number and density of data collection nodes increase in difficult terrain, allow to scale the system, reduce equipment weight, improve reliability, reduce cost and operating costs. The paper analyzes ways of building a seismic data acquisition and transmission system as one of the important components of a seismic exploration system. The task of building a large-scale wireless seismic acquisition system operating in real time remains unsolved due to the limited bandwidth of the wireless channel, transmission delays and high power consumption caused by data transfer conflicts in battery-powered acquisition devices. When building wireless seismic acquisition systems based on a single wireless technology, it is difficult to achieve high data rates and large area coverage simultaneously. Therefore, modern methods involve a two-tiered system structure. In this paper, we propose to use high-speed standards of Wi-Fi technology both at the lower level for building data collection subnetworks, and at the upper level for building a communication network with the central monitoring station. The article formulates the requirements to the construction of wireless seismic survey systems, considers a number of the most promising technological solutions, including LPWAN, Wi-Fi-LTE, UBW technologies, allowing the construction of large-scale wireless networks with a large number of data collection nodes, operating in unlicensed frequency bands. Special attention during the analysis is paid to the issues of providing the required network capacity and its scaling, providing the required number of independent data collection channels, positioning of the data collection nodes with the help of satellite navigation systems and cooperative localization methods, time reference during data acquisition. The analysis of all technical solutions is connected with the reduction of power consumption of the network. Suggestions for improving the data collection procedure are formulated.

Key words: seismic exploration, wireless technologies, data collection node, a central monitoring station, energy conservation, environmental access control, routing protocols, sensor networks.

For citation: Vyboldin Yu. K. Application of wireless network technologies in the construction of seismic exploration systems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6-2):283–304. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_283.

Введение

В секторе минеральных ресурсов развитие цифровых технологий определяют будущее глобального сырьевого рынка. Цифровые преобразования, основанные на использовании искусственного интеллекта, интернета вещей, нанотехнологий являются важными факторами, обеспечивающими развитие эконо-

мики [1, 2]. Анализ сейсмических волн с помощью распределенной по поверхности земли группы сенсорных модулей-геофонов используется в системах раннего предупреждения землетрясений, мониторинга активности вулканов, исследования влияния климатических изменений на подледную среду, исследования минеральных ресурсов [3–5],

построения пространственно-распределенных систем мониторинга опасных ситуаций [6].

Сейсмическая разведка обладает большей глубиной проникновения, позволяет получить изображение подземных структур с высокой разрешающей способностью и может дополнять программы бурения скважин и разведки, выполняемые другими геофизическими методами. Методы сейсмической разведки нашли широкое применение при поиске нефтяных и газовых месторождений, а также показали высокую эффективность при разведке твердых полезных ископаемых. В мировой практике сейсмические методы используют на рудных (Швеция) и угольных (США) месторождениях, при поиске алмазов и платины (Южная Африка), для картирования месторождений калийных солей (Испания), определения природы разломов [7]. К наиболее известным проектам в России относятся поиск кимберлитовых трубок в Якутии, поиск рудных тел, содержащих медь, платину, никель на Таймыре, съемка 3D на месторождениях калийных солей в Поволжье. Во всех проектах использование сейсмической разведки позволило оптимизировать расположение шахтных стволов, избежать бурения пустых скважин, помогло выявить дополнительные запасы твердых полезных ископаемых. Поскольку запасы промышленно значимых полезных ископаемых сокращаются, а открытия крупных приповерхностных месторождений становятся редкими, методы, которые позволяют вести разведку на большей глубине, являются актуальными.

При сейсмической разведке твердых полезных ископаемых обычно площади работ составляют 15–25 км² и глубина исследования составляет до 1 км, что значительно меньше, чем при раз-

ведке на углеводороды, где площади разведочных работ могут составлять 1000–2000 км², а глубина исследования до 6 км. Это требует значительно меньшего числа регистрирующих каналов. Однако сейсмическую разведку используют также и для проведения исследований на большой глубине. В работе [8] представлены результаты трехмерного сейсмического исследования рудного тела на золотоносном руднике в Южной Африке, расположенного на глубине 4,2 км², 4,5 км. Данные позволили обнаружить множество структурно сложных блоков и идентифицировать разломы с отклонениями, превышающими 25 м. Далее полученная модель улучшается за счет скважинного подземного картирования. Площади разведочных работ также могут увеличиваться. Например, при разведке запасов калийных месторождений они могут превышать 200 км² [9].

Особенности сейсмических методов разведки твердых полезных ископаемых по сравнению с исследованием нефтяных месторождений связаны, прежде всего, с размерами, формой и расположением объекта исследования. При разведке твердых полезных ископаемых требуется обеспечивать более высокую разрешающую способность изображения и, следовательно, меньший шаг при установке пунктов возбуждения и пунктов приема. При шаге их установки в 10 м число регистрирующих каналов при 2D-разведке может составлять 1000–1500, а при разведке по площади (3D-разведке) более 2 000 000. Шаг дискретизации выбирается меньший, чем при разведке на нефть, и составляет 0,25 мс. Кроме того, при расположении приборов регистрации следует учитывать, что отличия исследуемого объекта от плоской структуры и расположение поверхности отражения под углом по отноше-

нию к направлению падающей волны приводит к большим угловым отклонениям отраженного луча.

Сейсмические методы являются важным компонентом разведки твердых полезных ископаемых, особенно для глубин, превышающих 500 м [9], при которых другие геофизические методы не обеспечивают необходимого разрешения. При этом считается, что разведочное бурение, планируемое на основе 2D-сейсморазведки, является рискованным и программы глубокого бурения должны быть основаны на результатах трехмерных и даже четырехмерных исследований [10], которые добавляют временной аспект к 3D-модели. Для того чтобы сейсмическая методология смогла получить еще большее распространение в горнодобывающей промышленности, стоимость исследований должна быть снижена. Для этого необходимо, чтобы достижения в области нефтеразведки были адаптированы к условиям разведки твердых полезных ископаемых. Требуется развитие технологий сбора данных, включая применение беспроводных технологий, совершенствование многокомпонентных датчиков и разработка высокочастотных недорогих сейсмических источников, которые позволяют оптимизировать формирование сигналов при исследовании твердых пород.

Системы сейсморазведки обычно состоят из трех частей: искусственного сейсмического источника, системы сбора и передачи сейсмических данных и центра мониторинга. Все три части работают вместе.

При разведке твердых полезных ископаемых для возбуждения сигнала можно использовать менее мощные импульсные или вибрационные источники [7, 9], чем при разведке нефтяных месторождений. Для уменьшения воз-

действия на окружающую среду предпочтение отдается вибраторам. При их использовании формируется акустический сигнал с частотой, изменяющейся по линейному или по логарифмическому законам в диапазоне 10–150 Гц. В спектре сигнала содержатся более высокочастотные составляющие, чем при разведке на нефть (5–50 Гц). Это обеспечивает более высокое разрешение.

Для регистрации волн используются аналоговые геофоны, основанные на перемещении катушки в поле постоянного магнита, геофоны, вырабатывающие электрический сигнал, пропорциональный изменению своей емкости при движении грунта, и молекулярно-электронные датчики [11]. Геофоны, работающие в составе беспроводных регистрирующих систем, которые называются нодами, выпускаются многими компаниями. Ведущими производителями являются STRYDE (Великобритания), выпускающая самый маленький нод весом 150 г, SERCEL (Франция), DTCC (Китай), Wireless SIEMIC (США), Geospace Technologies (США). Первой российской бескабельной регистрирующей системой является система «Открытие» компании «ГЕОТЕК Сейсморазведка», которая использует молекулярно-электронные геофоны. В работе [12] представлены результаты использования молекулярно-электронных геофонов в составе беспроводной телеметрической системы SCOUT, использующей при регистрации запись сигнала и его последующее считывание устройством Wi-Fi. Отмечается, что эти геофоны позволяют за счет расширения частотного диапазона до 300 Гц повысить разрешающую способность измерений, обеспечить более высокий коэффициент преобразования по сравнению с аналогами, низкий уровень соб-

ственных шумов и нечувствительность к углам наклона при установке.

Система сбора и передачи сейсмических данных обычно использует кабели для питания и соединения отдельных геофонов, это позволяет эффективно осуществлять сбор сейсмических данных в условиях плоской поверхности. Кабельные системы сейсмической разведки надежны и позволяют получить хорошие результаты [13, 14]. Однако системы сбора информации на основе кабелей имеют ряд недостатков. К их числу относятся сложности в развертывании и обслуживании, масштабировании системы, отсутствие гибкости в построении на сложных участках, избыточный вес, проблемы с надежностью, высокая стоимость, простои в работе, затраты на человеческие ресурсы. На долю кабелей приходится до 50% эксплуатационных расходов и 75% от общего веса оборудования при наземных сейсмических исследованиях.

Использование беспроводных технологий позволяет преодолеть эти недостатки кабельных систем и обеспечить развертывание сетей с большим количеством геофонов при низкой стоимости сети и высоком качестве регистрируемых изображений. Однако потенциальные возможности беспроводной сети сейсмической разведки можно реализовать только при высоком уровне развития технических решений, используемых для построения системы сбора и передачи сейсмических данных, который во многом определяется видом, спецификой и архитектурой используемых сетевых решений.

Для построения беспроводных систем ранее использовались технологии связи, работающие в диапазоне частот 100–300 МГц, которые обеспечивали передачу сейсмических данных на расстояние в несколько десятков

километров. Основным требованием к таким системам является обеспечение работы в реальном времени, создание условий, при которых время сбора и время передачи данных были бы примерно равны, при этом аппаратура содержала от 4 до 8 каналов. Важной особенностью этих радиосистем была их централизация. Данные собирались с помощью большой антенны, а центральная станция обеспечивала необходимую синхронизацию.

За последние годы новые технологии позволили перейти от централизованных радиосистем к автономным беспроводным системам. Решающим обстоятельством стала доступность недорогих высокочувствительных миниатюрных приемников GPS, обладающих малым энергопотреблением. Поскольку сейсморазведка требует точного дифференциального режима, приемники GPS используются для позиционирования и синхронизации с точностью до 30 нс. Другими важными достижениями стали технологии производства компактных литиево-ионных батарей, необходимых для непрерывной записи данных, флэш-памяти высокой емкости и компактной электроники с низким энергопотреблением. Все это позволило создать автономные блоки сбора данных.

Постановка задачи

Необходимость более высокой детализации геологических структур при наземной сейсмической разведке, применение приборов трехкомпонентной регистрации и их размещение на больших площадях требует значительного увеличения количества каналов аппаратуры систем измерения параметров физических полей.

Переход к беспроводным архитектурам при построении систем сбора данных сейсморазведки связан с выбором

существующей технологии передачи данных и ее использованием при построении сети геофонов. При этом предпочтение отдается системам стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi), стандарта IEEE 802.15.4 с технологией ZigBee и технологии, использующей диапазон частот LPD (433 МГц), который не требует лицензирования [15]. Используются также комбинации этих методов, реализующие комплексные решения.

При построении современных беспроводных систем сейсморазведки, основанных на одной технологии беспроводной связи, трудно одновременно достичь обеспечения высокой скорости передачи данных и больших зон обслуживания. Поэтому все рассмотренные методы предполагают иерархическую структуру построения систем.

Для анализа технологий необходимо сформулировать требования, предъявляемые к построению беспроводных систем сейсморазведки, и рассмотреть ряд наиболее перспективных технологических решений, позволяющих построить крупномасштабные беспроводные сети с большим количеством узлов сбора данных.

Целью работы является анализ последних опубликованных технических решений, связанных с построением системы сбора и передачи сейсмических данных, и исследования, связанные с этими технологиями проектных ограничений.

Основные требования к беспроводной сети сейсморазведки

1. Обеспечение низкого энергопотребления сети.

Это наиболее важное требование, которое должно быть специально учтено при разработке беспроводной сети. Выбор всех технических решений должен быть связан с уменьшением

энергопотребления. Система должна быть спроектирована таким образом, чтобы работать непрерывно на срок до 1 месяца при низком энергопотреблении. Условие сохранения автономной работы системы накладывает жесткие ограничения на используемые радиоприемники и радиопередатчики, а также на выбор метода управления доступом к среде (MAC).

2. Обеспечение требуемой пропускной способности сети.

Скорость получения данных с одного геофона зависит от интервала дискретизации формируемого аналогового сигнала и разрядности используемого АЦП. В зависимости от цели сейсморазведки, используемого прибора и допустимой его полосы пропускания интервал дискретизации находится в диапазоне от 0,25 мс до 8 мс. Чем меньше интервал выборки, тем выше диапазон частот, который может быть записан. Так, если время выборки аналогового сигнала от одного геофона составляет 0,25 мс, то для 24-разрядного АЦП каждый геофон в сети будет генерировать данные со скоростью 96 кбит/с. При времени регистрации 3 с общий объем данных составит 288 кбит. Рассмотрим вариант построения небольшой сети, состоящей из 500 геофонов. В этом случае общий объем данных составит 144 Мбит на один снимок и требуемая пропускная способность сети составит 48 Мбит/с. Однако большие сети могут состоять из нескольких десятков тысяч геофонов. Предположим, что число геофонов равно 20 000. Тогда в тех же условиях требуемая пропускная способность будет 1920 Мбит/с. При переходе к трехкомпонентным геофонам [16] пропускная способность должна быть пропорционально увеличена.

3. Обеспечение требуемого количества независимых каналов регистрации.

Плотность геофонов обеспечивает высококачественную картину строения массива пород на большой глубине, поэтому сейсмическая разведка и мониторинг месторождений требует использования большого количества узлов сбора данных, число которых значительно возрастает при масштабных полевых исследованиях.

4. Обеспечение масштабируемости сети.

Срок службы сети связан с потреблением энергии, так как требуемая мощность передачи возрастает и пропорциональна квадрату расстояния. Необходимо использовать протокол маршрутизации, обеспечивающий меньшее потребление энергии и поддерживающий возможность увеличения количества сенсорных узлов до нескольких тысяч.

5. Система синхронизации.

Синхронизация в бескабельных системах, устраняющая перекося и джиттер, должна обеспечивать временную привязку при съеме данных с допустимой погрешностью 10–20 мс.

6. Локализация узлов сбора данных.

Для того чтобы избежать ухудшения качества глубинного изображения, точное позиционирование узлов является обязательным. Локализация может быть обеспечена с помощью спутниковых навигационных систем. Однако если спутники не видны, то следует применять методы кооперативной локализации и учета специфики топологии сети, при этом можно уменьшить количество устройств, оснащенных GPS.

7. Надежность.

Автономная работа источников питания в сети, влияние внешней среды на эффективность работы каналов передачи информации, различия в условиях работы большого количества пространственно разнесенных геофонов приводят к тому, что некоторые сетевые узлы

не будут подключены или не смогут эффективно передавать собранные данные. Отказ узлов не должен оказывать значительное влияние на общую производительность сети.

8. Помехоустойчивость.

Система должна использовать каналы связи, устойчивые к помеховым воздействиям. В используемых диапазонах частот искажение сигналов возникает при их многолучевом распространении и от влияния помех, создаваемых другими средствами связи. Для уменьшения этих воздействий регулируют мощности излучаемых сигналов, используют сигналы со специальными методами модуляции и совершенствуют методы их приема.

9. Защита данных и безопасность.

Для обеспечения защиты функциональности беспроводного сейсмического оборудования, предотвращения несанкционированного доступа к собранным данным и информации о системе необходимо использовать алгоритмы безопасности, работающие в условиях ограничения потребляемой энергии, ресурсов памяти и вычислительной производительности компонентов сети. Стандарт шифрования AES-128 соответствует требованиям сейсморазведки.

10. Низкие накладные расходы.

При построении беспроводной сети сейсморазведки необходимо уменьшить ее зависимость от развертывания других технических средств.

11. Задержка данных.

Необходимо, чтобы время передачи данных незначительно отличалось от времени сбора, т.е. система осуществляла обработку данных в квазиреальном времени. Собранные геофонами данные для конкретного момента возбуждения должны быть доставлены на центральную станцию без задержки или прерывания следующего снимка.

12. Использование нелицензионного диапазона частот.

Исключает необходимость получения ведомственных разрешительных документов.

Технологии, используемые для построения беспроводной сети сейсморазведки
Технологии LPWAN

Маломощная глобальная сеть (LPWAN) является развивающейся сетевой технологией для Интернета вещей (Internet Things, IoT) [17], которая обеспечивает дальнюю связь с широкой зоной обслуживания при низком энергопотреблении.

Предполагается, что в дополнение к сотовой связи (например, 2G, 3G, LTE) и существующим беспроводным технологиям (например, WiFi, Bluetooth, IEEE 802.15.4, WiMax) [18] технологии LPWAN будут поддерживать большую дальность, низкое энергопотребление, низкую стоимость при развитии приложений и подключать огромное количество внешних устройств. Таким образом, они преодолевают ограничения по дальности и проблемы масштабируемости, связанные с традиционными беспроводными сенсорными сетями малого радиуса действия. Сети обладают высокой надежностью и помехоустойчивостью при обеспечении связи. Это связано с применением эффективных методов модуляции, позволяющих расширять спектр сигналов исходного узкополосного источника.

Среди энергоэффективных сетевых технологий дальнего радиуса действия LPWAN ведущее значение принадлежит технологии LoRa, работающей на безлицензионных частотах, в том числе частоте 433 МГц [19 – 21]. Дальность действия в условиях прямой видимости составляет порядка 15 км. Сетевую архитектуру определяет про-

токол LoRaWAN, который предусматривает использование при построении сети топологии типа «звезда». В этом случае устройства напрямую соединяются с опорной шлюзовой станцией. Это позволяет избежать затрат энергии при маршрутизации пакетов. Шлюзовые узлы передают сообщения между конечными устройствами и центральным сервером сети. Технология LoRa определяет три класса конечных устройств для обслуживания различных приложений, которые различаются требованиями к возможности их управления. Эти классы предлагают компромисс между нисходящей связью, задержкой и энергетической эффективностью (срок службы батареи). Для расширения спектра и сигналов и кодирования сообщений в технологии LoRa используется линейная частотная модуляция. Предполагается, что при использовании технологии LoRa сигналы в разных каналах ортогональны, и это уменьшает вероятность возникновения коллизий для шлюза, увеличивает пропускную способность и расширяет масштабируемость сети. В работе [20] для мониторинга датчиков на больших площадях предложено использовать ячеистую сеть LoRa, которая позволяет устранить необходимые для расширения сети дополнительные шлюзы.

В работе [21] исследовано применение этой технологии для построения крупномасштабных беспроводных сейсмических сетей (WSA). В качестве модуля LoRa использована интегральная микросхема (ИМС) SX1278 компании SEMTECH, для которой максимальная скорость передачи данных составляет 37,5 кбит/с. Исследования проводились в диапазоне частот 410 ... 525 МГц. В составе измерительного модуля используется 32-разрядный АЦП. Поскольку информационная скорость при передаче данных суще-

ственно меньше общей скорости передачи и на передачу данных с геофона требуется время порядка нескольких десятков секунд, то предлагается передавать не все сейсмические данные, а только информацию о мониторинге качества данных. Это снижает требования к пропускной способности сети.

В этом случае передается информация о состоянии самого устройства, включая состояние батареи, угол наклона, результаты работы приемника GPS, значение частоты дискретизации аналогового сигнала, коэффициент усиления приемного тракта, электрические параметры компонентов устройства. Это позволяет предотвратить возможные потери данных, вызванные отказом геофона. На основе анализа геофизических данных для каждого геофона рассчитывается оценочное число, которое называется индексом качества сейсмических данных SDQI. Геофоны передают рабочие параметры и SDQI на шлюз через LoRaWAN, который затем пересылает их в центр мониторинга. Если результат оценки SDQI является отрицательным, то процесс возбуждения сейсмических волн запускается повторно. Кроме того, центр мониторинга отслеживает состояние WSA и устанавливает рабочие параметры для шлюзов и геофонов. Сами сейсмические данные записываются на карту памяти, которая входит в состав каждого геофона. После завершения полевых работ информация от всех геофонов собирается и передается по внешней сети на специально разработанные устройства, которые называются Data Collection Box (DCB), при этом одновременно производится заряд внутренних аккумуляторов в устройствах системы.

Для реализации таких методов обработки конструкция геофона значительно усложняется и преобразуется

в модуль, позволяющий выполнить синхронизацию по времени. В его состав кроме первичного измерительного датчика с подвижной катушкой, системой фильтрации и защиты от перегрузок входят блок записи и синхронизации данных и беспроводной блок, реализующий радиointерфейс технологии LoRa. Блок записи и синхронизации данных является основой для построения платформы синхронизации времени и включает в себя АЦП, микроконтроллер, карты памяти, тактовый генератор, приемник GPS.

Микроконтроллер – это STM 32F4 производства компании STMicroelectronics. Приемник сигналов спутниковой навигации построен на ИМС NEO-M8N u-blox, использует активную керамическую антенну и поддерживает одновременно системы GPS и GLONASS. Приемник формирует один импульс в секунду, и этот импульс имеет временную метку, которая передается через последовательный порт GPS-модуля на микроконтроллер. Микроконтроллер запускает специальный счетчик, использующий сигналы генератора тактовых импульсов. Поскольку относительная нестабильность генератора составляет 0,02 ppm, то каждое значение счетчика может быть идентифицировано как точный временной интервал.

Несмотря на достоинства, которые подтверждаются результатами моделирования сети геофонов и ее компонентов [20–22], технология LoRa имеет ряд недостатков, наиболее существенным из которых является низкая скорость передачи данных. Система проектируется для ситуации, когда с помощью беспроводной сети осуществляется контроль только качества работы системы и не осуществляется контроль качества съема данных. Поэтому следует признать, что рассмотренная технология

не подходит для построения системы сейсморазведки с большим количеством данных и может быть использована только в сетях с небольшим числом геофонов. Это же относится и к другим распространенным беспроводным технологиям LPWAN этого класса, например NB-IoT [17].

Технология Wi-Fi

Построение сети геофонов на основе использования технологии Wi-Fi, работающей в режиме реального времени, рассмотрено в работах [23 – 25].

Типичными беспроводными системами сейсморазведки, использующими технологию Wi-Fi, являются система UNITE, разработанная компанией Sercel, и система RT2, произведенная компанией Wireless Seismic. В обеих системах используется двухуровневая сетевая структура. Для сбора данных с удаленных геофонов на узлы сотового доступа в системе UNITE используется топология типа звезда. Для обмена данными и передачи их на станцию центрального мониторинга применена ячеистая топология. Передача данных с геофонов осуществляется с помощью низкоскоростной технологии IEEE 802.11b со скоростью 1 Мбит/с в диапазоне частот 2,4 ГГц. При увеличении расстояния между узлами сбора для обеспечения надежной связи используются направленные антенны. Запись осуществляется на центральной станции, доставка данных в сети второго уровня осуществляется в диапазоне частот 5 ГГц. В системе RT2 на нижнем уровне используется двухзаходовая ячеистая сеть со станцией связи по восходящему потоку, предусматривающая последовательное объединение четных и нечетных узлов. Достоинством системы является возможность разделения отдельных звеньев сети при отказе соседних узлов сбора или станции связи.

В работе [26] для построения беспроводной сети сейсмической разведки предложено использовать технологию IEEE 802.11af, специально приспособленную для работы в телевизионном диапазоне частот от 54 до 790 МГц, в неиспользуемых полосах частот аналогового телевидения. Эти полосы освобождаются при переходе от аналогового телевидения к цифровому. При построении сети также используется топология типа «звезда». Стандарт IEEE 802.11af предусматривает использование при формировании сигналов OFDM и MIMO для работы с четырьмя потоками данных. В одном телевизионном канале шириной 8 МГц при использовании модуляции QAM-256 достигается скорость передачи данных 35,6 Мбит/с. При объединении полосы частот четырех каналов с учетом MIMO можно достигнуть скорости 569 Мбит/с. Использование более низких частот позволяет увеличить дальность связи, однако требует применения больших по размерам антенн. Для геофонов размер антенны составляет 1 м. Кроме того, может увеличиваться уровень помех из-за совместного использования полосы частот разными средствами связи. При развертывании сети необходимо учитывать региональные правила доступа к свободным телевизионным каналам.

Технология LTE

В работах [27, 28] для построения двухуровневой беспроводной сети сейсмической разведки предлагается использовать технологии Wi-Fi и LTE. Технология Wi-Fi используется на нижнем уровне для передачи данных на короткие расстояния. На верхнем уровне для обеспечения высокоскоростной передачи трафика нижнего уровня на большие расстояния используется технология LTE. На обоих уровнях для подключения компонентов сети применяется топология типа «звезда».

В центре каждой подсети нижнего уровня, состоящей из 8 устройств сбора данных, размещается шлюз, который является точкой доступа сети Wi-Fi. Узлы сбора выстраиваются в две длинные линии по 25 узлов в каждой. Таким образом, сеть объединяет массив из 400 геофонов, по 200 геофонов в каждой линии. Шлюзы, являющиеся компонентами сети верхнего уровня, подключаются к станции центрального мониторинга по технологии LTE. В каждой подсети нижнего уровня шлюз отправляет инструкции геофонам и принимает от них пакеты данных; в сети верхнего уровня получает инструкции от станции центрального мониторинга, выполняет указанные ею действия и направляет к станции агрегированные данные для записи и обработки.

Узел сбора должен выполнять такие функции, как синхронный сбор сейсмических данных и их хранение, позиционирование узла и связь по Wi-Fi. Устройство выполнено на основе использования энергоэффективных Wi-Fi-модулей GS2011MIES компании GainSpan, поддерживающих протокол IEEE802.11b/g/n, с максимальной скоростью передачи данных 72 Мбит/с (с .802.11n). Они используют всенаправленную стержневую антенну длиной менее 0,3 м. Основные действия узла по получению и отправке данных, обработке инструкций от других модулей производится микроконтроллером STM32F103ZE. Кроме того, в состав узла сбора данных входят блок хранения данных и управления модулем, который взаимодействует с АЦП геофона. Частота выборок сигнала геофона составляет 4 КГц. При использовании 32-разрядного АЦП ADS1282 формируется поток сейсмических данных со скоростью 128 Кбит/с. Позиционирование узлов в системе и синхронизация осуществляется с помощью

GPS модулей LEA-6T. Шлюзовой узел играет ключевую роль в создании сети системы. Этот узел должен выполнять функции по управлению сетью Wi-Fi и его связи с LTE. Кроме плат, обеспечивающих доступ к этим системам, в состав узла входит плата микропроцессорного блока, которая является ядром шлюзового узла, определяя внутри его направления информационных потоков. Плата глобальной системы позиционирования (GPS) обеспечивает привязку времени для синхронизации сбора данных.

Основные функции центральной станции включают отправку инструкции, прием данных и их хранение, управление базой данных и отображение состояния узлов. Перед каждым сбором данных центральная станция посылает параметры получения данных, включая время начала работы, на шлюзы, каждый из которых отправляет параметры сбора и конфигурации устройств на первичные узлы. Учитывая условия эксплуатации, для достижения высокой скорости передачи в подсети и уменьшения интерференции с соседними подсетями конфигурация точки доступа Wi-Fi может быть изменена в режиме реального времени. Объем данных и необходимое количество пакетов рассчитывается, исходя из частоты выборки и продолжительности сбора. На основе рассчитанного объема, учитывая, что общая длина пакета сейсмических данных составляет 1012 байт, определяется количество пакетов данных и определяются метки времени, используемые при их хранении.

Для проверки возможности реализации предложенной архитектуры системы был выполнен натурный эксперимент [28]. При его проведении сформировано девять подсетей, которые были расположены двумя параллельными линиями на расстоянии шести

метров друг от друга. Каждая подсеть состояла из расположенного в центре шлюзового узла и восьми узлов сбора данных. Расстояние между узлами сбора было выбрано равным 4 м. Таким образом, 72 узла были размещены в узлах прямоугольной сетки с размерами 140х6 м. Частота выборок была установлена равной 4000 Кбит/с. Период времени сбора данных был выбран равным 60 с. При использовании 32-битного АЦП общая скорость передачи сейсмических данных составляла 9,216 Мбит/с. Информационное поле в кадре каждого пакета составляло 1000 байт, поэтому в каждую секунду отправлялось 1152 пакета. В каждой тестовой операции выполнялся один снимок сейсмического источника. Всего в ходе эксперимента было выполнено десять тестовых операций. После сохранения и распаковки полученных сейсмических данных установлено, что потеря пакетов во время передачи данных не произошло. Однако отмечено, что расход времени на передачу данных был на 0,3–0,6 с больше, чем время сбора. Однако общая задержка при передаче является небольшой по сравнению с общим временем сбора данных, поэтому можно считать, что данная система реализует обработку сейсмических данных в квазиреальном времени.

При проведении эксперимента использовалась сеть LTE оператора мобильной связи. Необходимость использования такой структуры или воспроизведение ее в зоне проведения работ является недостатком. Для построения сети большого масштаба требуется размещение и установка нескольких мачт 4G, что приводит к очень высоким затратам.

Технология UBW

Беспроводная телеметрическая система реального времени требует передачи всех сейсмических данных во

время сбора данных, поскольку только в этом случае она полностью заменяет кабельные функции. Передача данных позволяет в режиме реального времени контролировать весь процесс съемки на блоке управления и выявлять неисправные компоненты трасс. Высокая плотность узлов и широкий азимут являются двумя ключевыми требованиями при проведении сейсмических исследований. Высокая плотность геоданных обеспечивает высококачественную картину строения массива пород на большой глубине, в то время как широкий азимут позволяет достичь наивысшего разрешения глубинных изображений из рассеянного назад волнового поля бокового обзора.

Для передачи данных в технологии UBW используются сверхкороткие сигналы с длительностью меньше наносекунды и, соответственно, с широким спектром. Маска спектра занимает диапазон частот от 3,1 до 10,6 ГГц. При большей общей мощности и при большей полосе частот сигнал UBW имеет низкую спектральную плотность мощности и создает помехи другим радиосредствам ниже допустимого уровня (-41 dBm/МГц). Согласно расчетам и экспериментальным данным такая система может обеспечивать скорость передачи данных до 300... 480 Мбит/с на расстояние 4... 10 м. В случае увеличения расстояния между передающим узлом и приемником до 20... 30 м может быть обеспечена скорость передачи 50 Мбит/с. Один из перспективных методов использования UBW предполагает использование только 500 МГц общей полосы пропускания и дальнейшее разделение ее на отдельные поддиапазоны. Такие системы обеспечивают контроль отдельных участков спектра сигнала и возможность адаптации к изменяющимся условиям среды.

В работах [29, 30] предложено использовать технологию UBW для построения сети геофонов. В данном случае также вся сеть разбивается на подсети, каждая из которых управляется и координируется беспроводным шлюзом. Далее подсети организуются в кластеры. Геофоны, входящие в состав каждого кластера, подключаются к соответствующим головным геофонам, выбранным внутри кластеров, и передают им свои данные. Собранные данные головные геофоны передают на шлюз. Каждый головной геофон, являющийся главой кластера, координирует максимум 15 обычных геофонов. Расстояние между геофонами составляет 5–10 м. В работе [29] указывается, что шаг наблюдения, выбранный в этом диапазоне значений, является оптимальным для обеспечения разрешающей способности и подавления помех. Каждая подсеть состоит из 20 кластеров. Все шлюзы объединяются в сеть более высокого уровня по технологии Wi-Fi, используя

модули, обладающие большей дальностью. Таким образом, шлюз поддерживает две радиотехнологии. Одна технология предназначена для сбора сейсмических данных и их передачи на небольшие расстояния в зоне действия шлюза, другая технология предназначена для передачи данных к центральной станции мониторинга для их записи и последующей обработки. Головные геофоны имеют в своем составе приемник сигналов спутниковой навигации. Это позволяет поддерживать синхронизацию данных и локализацию узлов сбора данных. Сетевая архитектура беспроводной системы сейсмической разведки на основе технологии UBW представлена на рис. 1.

В структуре передающегося по сети кадра предусмотрена служебная часть, в которой размещена информация о соседях, скорости передачи данных, уровне сигнала, доступные и зарезервированные ресурсы передачи. Оставшаяся часть кадра содержит слоты доступа к среде. Устройства могут

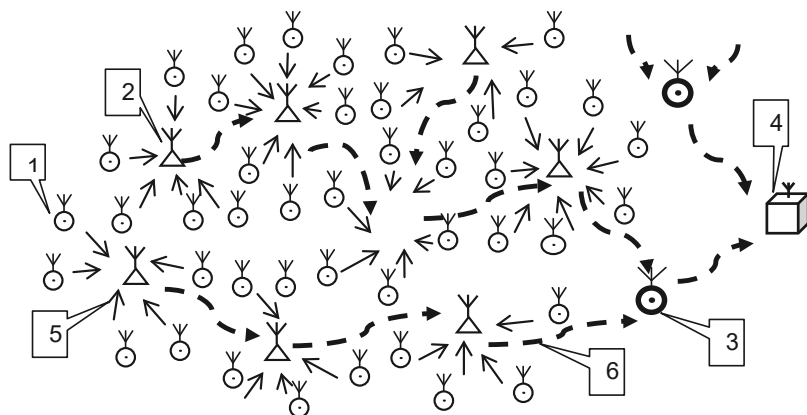


Рис. 1. Сетевая архитектура беспроводной системы сейсмической разведки на основе технологии UBW: 1 – узел сбора сейсмических данных; 2 – головной геофон; 3 – шлюз; 4 – центральная станция мониторинга; 5 – линии передачи данных по технологии Wi-Fi; 6 – линии передачи данных по технологии UBW

Fig. 1. Network architecture of the wireless seismic exploration system based on UBW technology: 1 – seismic data acquisition node; 2 – head geophone; 3 – gateway; 4 – central monitoring station; 5 – data transmission lines based on Wi-Fi technology; 6 – data transmission lines based on UBW technology

отправлять свою информацию после резервирования ресурсов передачи без коллизий или используя случайный доступ. Это гарантирует для сетей большого размера легко распространяемую синхронизацию, получение времени на передачу данных.

Шлюз работает как промежуточный узел и периодически выдает уникальное опорное время, действительное в устройствах, расположенных в пределах подсети. Головной геофон кластера является наиболее узким местом системы и, как правило, имеет меньший срок службы. В системе [29] наихудший срок службы головного геофона кластера для координированного доступа в режиме непрерывной записи составлял 29 дней.

Геофоны остаются активными в поле в течение нескольких дней, но могут быть перемещены во время сбора данных, и их необходимо точно локализовать для целей обработки, даже при отсутствии видимости со спутника. Для этой цели предлагается применить кооперативную локализацию, которая представляет собой метод, позволяющий использовать высокую точность определения дальности UWB-сигналов, в сочетании с измерениями, выполненными от спутниковых систем позиционирования. Для локализации обычные геофоны управляются головными узлами кластера с GPS. Эти узлы лишены возможности общаться с другими узлами за пределами кластера. Локализация основана на оценке времени прихода сигнала к узлу. Каждый узел на основе оценки времени задержки распространения сигнала вычисляет свое расстояние как минимум до трех соседних узлов. Кодирование источника, адаптированное для данного приложения, в значительной степени снижает общую скорость передачи данных

за счет использования корреляции сигналов. Поскольку большая корреляция приводит к меньшему количеству битов на выборку, каждый головной узел кластера, служащий в качестве ретранслятора, накапливает данные, полученные от предыдущих кластерных головных геофонов, и сжимает данные, полученные от предыдущих узлов. Сжатие достигается ценой некоторой дополнительной вычислительной нагрузки для каждого устройства.

Однако при таком способе построения подсети головным геофоном будет назначаться узел, который находится ближе всех по отношению к шлюзу, и удаленные узлы будут иметь больший расход энергии. Это необходимо предусмотреть в протоколах маршрутизации данных. В противном случае, несмотря на эффективное использование спектра используемых сигналов, время снятия данных может быть высоким, энергопотребление узлов окажется неравномерным и в среднем возрастет.

Архитектура сети предполагает передачу сейсмических данных между узлами по цепочке. Хотя спектр используется эффективно, время сбора данных может быть высоким, также как и энергопотребление узлов. В работе [29] анализ производительности сети не проводился.

Обсуждение результатов и предложения

Предлагаемая сетевая архитектура

Как для малых, так и для больших сетей предлагается строить двухуровневые сети. Каждая подсеть управляется беспроводным шлюзом, который служит в качестве центрального устройства управления и получателя данных для геофонов, которые находятся в пределах его зоны действия. Каждый геофон в подсети передает свои измеренные данные к шлюзу

с помощью технологии 802.11 WLAN, работающей в диапазоне частот 2,4 ГГц. Для уменьшения влияния помех по соседним каналам рабочие частоты соседних шлюзов выбираются разными. Эти частоты могут повторно использоваться для других шлюзов в сети. Шлюзы передают свои данные по цепочке в центр мониторинга. Большинство рассмотренных систем передают данные в промежуток времени после записи с геофонов. Стоит отметить, что данные можно передавать и в период записи. Это обеспечивает работу системы в режиме реального времени и повышает ее производительность. Шлюз работает как точка доступа. Предполагается, что реализуются механизмы доступа геофонов к каналу, включающие распределенную координационную функцию (DCF). Геофоны борются за доступ к среде передачи данных случайным образом на основе множественного доступа с учетом контроля несущей и предотвращения коллизий (CSMA/CA).

В двухуровневой сети шлюз действует как промежуточный узел, а также обеспечивает координацию группы или подсети геофонов в сети. Шлюзовой узел должен управлять двумя радиотехнологиями: технология дальнего радиуса действия используется для подключения к центральной станции, в то время как радиосвязь ближнего радиуса действия используется для покрытия подсети. Сетевая архитектура беспроводной системы сейсмической разведки на основе технологии Wi-Fi представлена на рис. 2. Наиболее трудной задачей при использовании Wi-Fi является построение сети дальнего радиуса действия с большей скоростью передачи данных. Такая задача решается при использовании направленных антенн и при снижении используемой рабочей частоты, например так, как это сделано в технологии IEEE 802.11af. При использовании топологии сети типа «звезда» дальность действия составляет порядка 2 км [26]. Для построения сети ближ-

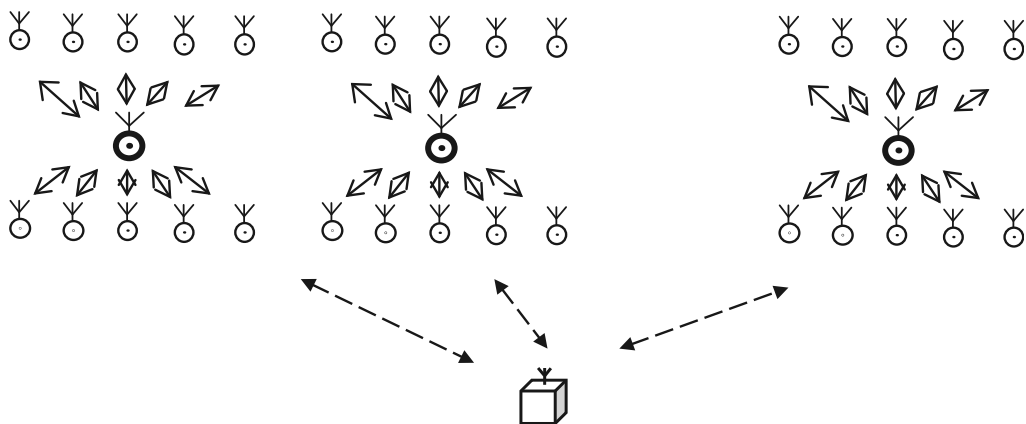


Рис. 2. Архитектура беспроводной системы сейсмической разведки на основе технологии Wi-Fi в двух уровнях: 1 — узел сбора сейсмических данных; 2 — шлюз, 3 — центральная станция мониторинга; 4 — линии передачи данных по технологии IEEE 802.11ax; 5 — линии передачи данных по технологии IEEE 802.11af

Fig. 2. The architecture of the wireless seismic exploration system based on Wi-Fi technology in two levels: 1 — seismic data acquisition node; 2 — gateway; 3 — central monitoring station; 4 — data transmission lines with IEEE 802.11ax technology; 5 — data transmission lines with IEEE 802.11af technology

него радиуса действия могут быть использованы технологии

Wi-Fi 6-го поколения IEEE 802.11ax, поддерживающие энергосберегающую опцию Target Wake Time.

Сбор данных

Сбор данных представляет собой один из основных вопросов при построении беспроводной сети. Операция предполагает считывание результатов измерения и служебной информации с оконечного устройства и передачу их на промежуточный узел сбора. При выборе метода маршрутизации необходимо учитывать, что все узлы сети будут работать от батарей и иногда в труднодоступных местах. Поэтому одним из главных приоритетов является сбор данных с максимальным увеличением срока службы сети. Во многих работах были предложены решения по маршрутизации для таких сетей. При построении большой сети геофонов будем использовать иерархические протоколы маршрутизации. Некоторые из иерархических протоколов были предложены для сенсорных сетей: LEACH, PEGASIS, TEEN и APTEEN, HEED, EEPSC, EEEPSC [25]. При организации сети с использованием опорных узлов с известным расположением выберем для маршрутизации и сбора данных протокол EEEPSC. Это протокол, основанный на статической маршрутизации, в котором формирование подсети изначально предопределено опорной станцией. Это устраняет накладные расходы, связанные с динамической кластеризацией. Процесс состоит из трех этапов: этапа настройки, этапа выбора ответственного узла и этапа устойчивого состояния. В этой схеме опорная станция посылает $n-1$ сообщений, где n — желаемое количество подсетей, заданное изначально, с разной мощностью

передачи. Конечные узлы (геофоны), которые прослушивают сообщения, отвечают сообщением запроса на присоединение. Конечные узлы, которые не присоединились ни к одной подсети, устанавливают число n в качестве своего идентификатора подсети и сообщают об этом опорной станции. Для отправки сообщений с запросом на присоединение к опорной станции используется множественный доступ с учетом несущей (CSMA). Это уменьшает количество коллизий, сохраняет энергию батареи и увеличивает срок службы сети.

Основную роль в организации работы сети играет опорная станция. На первом этапе она случайным образом производит выбор главного узла каждой подсети и назначает временные слоты для всех оконечных узлов, позволяя им осуществлять обмен информацией. На втором этапе осуществляется окончательный выбор главного узла подсетей. Для этого все узлы подсети направляют сообщения об уровне остаточной энергии ранее случайно выбранному главному узлу подсети, и он сравнивает уровни остаточной энергии всех узлов.

Главный узел подсети выбирается не только на основе наибольшей остаточной энергии, но и на основе относительного расположения узла в подсети. Задачей этого этапа является выбор узла с высоким остатком энергии, который находится примерно в центре подсети. Опорная станция вычисляет среднее положение распределения узлов в каждой подсети и расстояние от среднего положения до каждого узла в каждой соответствующей подсети. Узел с второй по величине остаточной энергией выбирается как временный главный узел подсети для следующего раунда в каждой подсети. На этапе устойчивого состояния происходит считыва-

ние данных с оконечных узлов. Этот механизм можно усовершенствовать. Для сокращения потребления энергии можно предложить использовать пороговую чувствительность при передаче данных, как это предусмотрено протоколами TEEN и APTEEN.

Эффективность сети сейсморазведки, построенной на базе Wi-Fi-устройств новых поколений, может быть существенно увеличена благодаря улучшению технических характеристик всех компонентов сети, соответствующих новым стандартам беспроводной передачи данных. Появились стандарты IEEE 802.11ah, IEEE 802.11ax и устройства, их реализующие, которые позволяют значительно повысить скорости передачи данных, улучшить режим доступа к сети, повысить безопасность и снизить энергопотребление. Новые стандарты Wi-Fi ориентированы на построение сети с большой плотностью подключаемых устройств. Это позволяет рассматривать решения Wi-Fi для построения верхнего уровня сети.

Современные маршрутизаторы для беспроводных Wi-Fi-систем предполагают организацию соединения в двух полосах частот с высокой скоростью передачи данных. В этом случае устройство в одной полосе частот будет получать данные, а в другой их отправлять. Маршрутизаторы, например TP-Link Archer AX73, применяют технологию множественного доступа с ортогональным частотным разделением OFDMA, что дает возможность подключать множество устройств по отдельным частотным каналам. Совместно с использованием многопозиционных методов модуляции, таких как 128-QAM, 256-QAM, 1024-QAM, это позволяет передавать данные со скоростями, достигающими нескольких Гбит/с. Использование тех-

нологий пространственной обработки MU-MIMO позволяет эффективно бороться с замираниями, вызванными многолучевым распространением сигналов. Энергетическая эффективность повышается за счет перевода узлов в режим ожидания сразу после завершения их фазы активности. Использование опции Target Wake Time позволяет устанавливать для оконечного узла время доступа к среде. Для сети большого масштаба это приводит к уменьшению соперничества за право доступа к каналу, уменьшению взаимного влияния узлов, повышению спектральной эффективности. Маршрутизаторы поддерживают новый протокол шифрования WPA3 с увеличенной разрядностью до 192 бит, что повышает безопасность системы передачи данных.

При ограничении мощности излучения беспроводных устройств возможно расширение зоны обслуживания за счет использования усилителей Wi-Fi. Так, усилитель AC1750 позволяет выполнить расширение на частотах диапазона 2,4 ГГц, с заявленной скоростью передачи данных 450 Мбит/с, а на частотах диапазона 5 ГГц — со скоростью 1300 Мбит/с. Этот же усилитель может быть использован для поддержки старых модификаций протокола IEEE 802.11, имеющего индексы .n, .g, .b.

Повышение надежности

Большинство узлов в беспроводной системе георазведки являются собирающими узлами, поэтому большая часть отказов может происходить в узлах сбора. Однако отказ одного собирающего узла не оказывает негативного влияния на другие узлы, и это является преимуществом топологии типа «звезда» по сравнению с многоходовыми ячеистыми сетями.

Для узла сбора отказы включают в себя поломку первичного датчика, сбой

при записи и хранении данных, прерывание сигнала спутниковой синхронизации по GPS или ГЛОНАСС. Эти факторы не зависят от связи с модулем Wi-Fi.

Сбой сбора данных, который происходит из-за проблем с АЦП или геофоном, может быть обнаружен при самотестировании АЦП или в начале сбора данных. Неисправность самого модуля Wi-Fi можно определить на центральной станции мониторинга по сообщениям об его отключении. Во время установления нового соединения на центральной станции мониторинга в списке отображаются все отсканированные шлюзовые узлы. Если соединение с каким-то шлюзом не удалось, то он удаляется из списка, при этом возможно назначение нового шлюзового узла, например, с самым высоким RSSI. Собирающие узлы присоединяются к одной или двум оставшимся близлежащим подсетям, а другие подсети не имеют изменений в своих соединениях. Центральная станция увеличивает пропускную способность шлюзов, у которых появилось дополнительное подключение.

Заключение

Сейсмические методы являются важным компонентом разведки твердых полезных ископаемых, особенно для глубин, превышающих 500 м, при которых другие геофизические методы не обеспечивают необходимого разрешения. Беспроводные системы позволяют значительно упростить развертывание и обслуживание системы, особенно при увеличении числа и плотности размещения узлов сбора данных

в условиях сложного рельефа местности, дают возможность масштабировать систему, снизить вес оборудования, повысить надежность, уменьшить стоимость и эксплуатационные расходы.

Беспроводные системы в ближайшее время не заменят полностью кабельные системы. Кабельные системы, подключенные к традиционным геофонам, по-прежнему составляют большую долю рынка, но предполагается, что эта доля будет уменьшаться. Можно ожидать, что их совместное использование, необходимое для адаптации к различным условиям рельефа и конфигурации сети, будет облегчено.

При построении современных беспроводных систем сейсморазведки, основанных на одной технологии беспроводной связи, трудно достичь одновременно обеспечения высокой скорости передачи данных и больших зон обслуживания. Поэтому все рассмотренные методы предполагают иерархическую структуру построения систем.

В данной статье сформулированы требования, предъявляемые к построению беспроводных систем сейсморазведки, рассмотрен ряд наиболее перспективных технологических решений, позволяющих построить крупномасштабные беспроводные сети с большим количеством узлов сбора данных. Предлагается использовать технологию Wi-Fi как на нижнем уровне для построения подсетей сбора данных, так и на верхнем уровне для построения сети связи с центральной станцией мониторинга. Сформулированы предложения по улучшению процедуры сбора данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Litvinenko V.S.* Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector // *Natural Resources Research*. 2020, vol. 29, no.3, pp.1521 – 1541, DOI 10.1007/s11053-019-09568-4.

2. Трушко В. Л., Протосеня А. Г. Перспективы развития геомеханики в условиях нового технологического уклада // Записки Горного института. — 2019. — Т. 236. — С. 162–366. DOI:10.31897/PMI.2019.2.162.

3. Разумов Е. Е., Рукавишников Г. Д., Мулёв С. Н., Простов С. М. Основные принципы построения систем сейсмического мониторинга // Горный журнал. — 2021. — № 1. — С. 8–12. DOI:10.17580/gzh.2021.01.

4. Потапов А. И., Кондратьев А. В. Неразрушающий контроль многослойных сред методом годографа скорости упругих волн // Записки Горного института. — 2020. — Т. 243. — С. 348–356. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.348.

5. Рассказов М. И., Терёшкин А. А., Цой Д. И., Константинов А. В., Сидляр А. В. Оценка геомеханического состояния горнорудного массива по данным сейсмоакустического мониторинга на удароопасных месторождениях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. № 12–1. — С. 167–182. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_167.

6. Voxberger T., Fleming K., Pittore M., Parolai S., Pilz M., Mikulla S. The multi-parameter wireless sensing system (MPwise): Its description and application to earthquake risk mitigation // Sensors. 2017, vol. 17, p. 2400. DOI:10.3390/s17102400.

7. Череповский А. В. Сейсморазведка с одиночными приемниками и источниками: обзор современных технологий и проектирование съемок. — М.: ЕАГЕ Геомодель, 2012. — 133 с.

8. Manzi M., Cooper G., Malehmir A., Durrheim R., Nkosi Z. Integrated interpretation of 3D seismic data to enhance the detection of the gold-bearing reef: Mponeng Gold mine, Witwatersrand Basin (South Africa) // Geophysical Prospecting. 2015, vol. 63, pp. 881–902. DOI: 10.1111/1365-2478.12273.

9. Malehmir A., Durrheim R., Bellefleur G., Urosevic M., Juhlin C., White D. J., Milkereit B. and Campbell G. Seismic methods in mineral exploration and mine planning: a general overview of past and present case histories and a look into the future // Geophysics. 2012, vol. 77(5), pp 173–190. DOI:10.1190/GEO2012-0028.1.

10. Dehghannejad M., Bauer T., Malehmir A., Juhlin C., Wehred P. Crustal geometry of the central Skellefte district, northern Sweden constraints from reflection seismic investigations // Tectonophysics. 2012, vol. 524–525, pp. 87–99. DOI: 10.1016/j.tecto.2011.12.021.

11. Абдулвалиев М. Т., Тиссен А. П., Толкачев В. М., Череповский А. В. Повышение информативности и достоверности наземной сейсморазведки с нодальными бескабельными системами // Геология нефти и газа. — 2020. — № 5. — С. 75–81. DOI: 10.31087/0016789420205758.

12. Навроцкий А. О., Аккуратов О. С., Абдулвалиев М. Т. Инновационная сейсморазведка особенности применения бескабельной телеметрической системы сбора сейсмической информации, основанной на использовании молекулярно-электронных сейсмических датчиков // Геоинформатика. — 2018. — № 3. — С. 59–67.

13. Mougnot D. Land cableless systems: Use and misuse // First Break. 2010, vol. 28, pp. 55–58.

14. Mousa W. A. Advanced digital signal processing of seismic data. Cambridge: University Press, Cambridge, 2019, 324 p.

15. Шерстюков О. Н., Рябченко Е. Ю., Гаязутдинов А. Р., Мартыничук С. Л. Применение беспроводных сетевых технологий в системах сбора сейсморазведочных данных // Георесурсы. — 2011. — №-6 (42). — С. 50–56.

16. Harris K., Bacon R. Utilizing source mechanism and microseismic event location to identify faults in real-time using wireless seismic recording systems — An Eagle Ford case study // First Break. 2015, vol. 33, pp. 57–61.

17. Jamali-Rad H., Campman X. Internet of Things-based wireless networking for seismic applications European Association of Geoscientists & Engineers // Geophysical Prospecting. 2018, vol. 66 (4), pp.1–21. DOI: 10.1111/1365-2478.12617.

18. Makama A., Kuladinithi K., Timm-Giel A. Wireless Geophone Networks for Land Seismic Data Acquisition: A Survey, Tutorial and Performance Evaluation // MDPI Sensors. 2021, vol. 21, pp. 2–22. DOI.org/10.3390/s21155171.

19. Haxhibeqiri A. J., De Poorter E., Moerman I., Hoebeke J. A survey of LoRaWAN for IoT: From technology to application // Sensor. 2018, vol. 18, no. 11, pp. 1–38. DOI:10.3390/S18113995.

20. Lee H. C., Ke K. H. Monitoring of Large-Area IoT Sensors Using a LoRa Wireless Mesh Network System: Design and Evaluation // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2018, vol. 67, pp. 2177–2187. DOI: 10.1109/TIM.2018.2814082.

21. Yang H., Wang F., Tong X., Lv H., Han Z. An Efficient Equal Air-Time Transmission Strategy for Wireless Seismometer Array Based on LoRaWAN With CuckooHash // IEEE Access. 2020, vol. 28 (8), pp. 201713–201727. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3034332.

22. Borisov S. V., Vybaldin Y. K. The methodology of choosing the distribution model of echoes for ground penetrating radar with broadband signals // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1753(1), 012012. DOI: 10.1088/1742–6596/1753/1/012012.

23. Jornet-Monteverde J. A., Galiana-Merino J. J., Soler-Llorens J. L. Design and Implementation of a Wireless Sensor Network for Seismic Monitoring of Buildings // MDPI Sensors. 2021, vol. 21, 3875, pp.1–26. DOI.org/10.3390/s21113875.

24. Beffa M., Crice D., Kligfield R. Very high speed ordered mesh network of seismic sensors for oil and gas exploration // Proceedings of the IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, Pisa, Italy. 2007, pp. 1–5.

25. Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. Wireless sensor networks: a survey // Computer Networks. 2002, vol. 38, pp. 393–422.

26. Reddy V. A., Stuber G. L., Al-Dharrab S., Mesbah W., Muqaibel A. H. A Wireless Geophone Network Architecture using IEEE802.11af with Power Saving Schemes // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2019, vol. 18, pp. 5967–5982. DOI: 10.1109/TWC.2019.2940944.

27. Tian R., Wang L., Zhou X., Xu H., Lin J., Zhang L. An integrated energy-efficient wireless sensor node for the microtremor survey method // Sensors. 2019, vol. 19, 544, pp.1–19. DOI:10.3390/s19030544.

28. Yin Z., Zhou Y., Li Y. Seismic Exploration Wireless Sensor System Based on Wi-Fi and LTE // MDPI Sensors. 2020, vol. 20, 1018. DOI:10.3390/s20041018.

29. Savazzi S., Spagnolini U., Goratti L., Molteni D., Latva-aho M., Nicoli M. Ultra-wide band sensor networks in oil and gas explorations // IEEE Communications Magazine, 2013, vol. 51, pp. 150–160.

30. Batra A., Balakrishnan J., Aiello G. R., Foerster J. R., Dabak A. Design of a Multiband OFDM System for Realistic UWB Channel Environments // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2004, vol. 52, no. 9, pp. 2123–2137. **TMAB**

REFERENCES

1. Litvinenko V. S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector. *Natural Resources Research*. 2020, vol. 29, no.3, pp. 1521–1541. DOI 10.1007/s11053-019-09568-4.

2. Trushko V. L., Protosenya A. G. Prospects for the development of geomechanics in a new technological order. *Zapiski Gornogo instituta*. 2019, vol. 236, pp.162–166. [In Russ]. DOI:10.31897/PMI.2019.2.162

3. Razumov E. E., Prostov S. M., Mulev S. N., Rukavishnikov G. D. Seismic information processing algorithms. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 2, pp. 17–29. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_17.

4. Potapov A. I., Kondratyev A. V. Nondestructive control of multilayer media by the method of the velocity hodograph of elastic waves. *Zapiski Gornogo instituta*. 2020, vol. 243, pp.348–356. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.348.

5. Rasskazov M. I., Tereshkin A. A., Tsoi D. I., Konstantinov A. V., Sidlyar A. V. Evaluation of the geomechanical state of the mining massif according to seismoacoustic monitoring data at rockburst-prone deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2021, no. 12–1. pp.167–182. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_167.
6. Boxberger T., Fleming K., Pittore M., Parolai S., Pilz M., Mikulla S. The multi-parameter wireless sensing system (MPwise): Its description and application to earthquake risk mitigation. *Sensors*. 2017, vol. 17, 2400. DOI:10.3390/s17102400.
7. Cherepovsky A. V. *Seismorazvedka s odinochnymi priemnikami I istchnikami : obzor sovremennykh technologii I proektirovaniya syimok* [Survey with single receivers and sources: review of modern technologies and survey design], Moscow, EAGE Geomodel, 2012. 133 p. [In Russ].
8. Manzi M., Cooper G., Malehmir A., Durrheim R., Nkosi Z. Integrated interpretation of 3D seismic data to enhance the detection of the gold-bearing reef: Mponeng Gold mine, Witwatersrand Basin (South Africa). *Geophysical Prospecting*. 2015, 63, pp. 881–902 doi: 10.1111/1365-2478.12273.
9. Malehmir A., Durrheim R., Bellefleur G., Urosevic M., Juhlin C., White D. J., Milkereit B. and Campbell G. Seismic methods in mineral exploration and mine planning: a general overview of past and present case histories and a look into the future. *Geophysics*. 2012, vol. 77(5), pp 173–190. DOI:10.1190/GEO2012-0028.1.
10. Dehghannejad M., Bauer T., Malehmir A., Juhlin C., Weiher P. Crustal geometry of the central Skellefte district, northern Sweden constraints from reflection seismic investigations. *Tectonophysics*. 2012, vol. 524–525, pp. 87–99. DOI: 10.1016/j.tecto.2011.12.021.
11. Abdulvaliev M. T., Tissen A. P., Tolkachev V. M., Cherepovsky A. V. Improvement of informativeness and reliability of ground seismic survey with nodal cableless systems. *Geologia nefty I gaza*. 2020, no. 5, pp. 75–81. [In Russ]. DOI: 10.31087/0016-7894-2020-5-75-8.
12. Navrotsky A. O., Akkuratov O. S., Abdulvaliev M. T. Innovative seismic exploration. features of application of cable-free telemetric seismic data acquisition system based on the use of molecular-electronic seismic sensors. *Geoinformatika*. 2018, no. 3, pp. 59–67. [In Russ].
13. Mougénot D. Land cableless systems: Use and misuse. *First Break*. 2010, vol. 28, pp. 55–58.
14. Mousa W.A. Advanced digital signal processing of seismic data. Cambridge University Press, Cambridge, 2019, 324 p.
15. Sherstyukov O. N., Ryabchenko E. Yu., Gayazutdinov A. R., Martynchuk S. L. Application of wireless network technologies in seismic data acquisition systems. *Georesurs*. 2011, no. 6 (42), pp. 50–56. [In Russ].
16. Harris K., Bacon R. Utilizing source mechanism and microseismic event location to identify faults in real-time using wireless seismic recording systems – An Eagle Ford case study. *First Break*. 2015, vol. 33, pp. 57–61.
17. Jamali-Rad H., Campman X. Internet of Things-based wireless networking for seismic applications European Association of Geoscientists & Engineers. *Geophysical Prospecting*. 2018, vol. 66 (4), pp.1–21. DOI: 10.1111/1365-2478.12617.
18. Makama A., Kuladinithi K., Timm-Giel A. Wireless Geophone Networks for Land Seismic Data Acquisition: A Survey, Tutorial and Performance Evaluation. *MDPI Sensors*. 2021, vol. 21, pp. 2–22. DOI.org/10.3390/s21155171.
19. Haxhibeqiri A. J., De Poorter E., Moerman I., Hoebeke J. A survey of LoRaWAN for IoT: From technology to application. *Sensor*. 2018, vol. 18, no. 11, pp. 1–38. DOI:10.3390/S18113995.
20. Lee H. C., Ke K. H. Monitoring of Large-Area IoT Sensors Using a LoRa Wireless Mesh Network System: Design and Evaluation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2018, vol. 67, pp. 2177–2187. DOI: 10.1109/TIM.2018.2814082.

21. Yang H., Wang F., Tong X., Lv H., Han Z. An Efficient Equal Air-Time Transmission Strategy for Wireless Seismometer Array Based on LoRaWAN With CuckooHash. *IEEE Access*. 2020, vol. 28 (8), pp. 201713–201727. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3034332.
22. Borisov S. V., Vyboldin Y. K. The methodology of choosing the distribution model of echoes for ground penetrating radar with broadband signals. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1753(1), 012012. DOI: 10.1088/1742–6596/1753/1/012012.
23. Jornet-Monteverde J. A., Galiana-Merino J. J., Soler-Llorens J. L. Design and Implementation of a Wireless Sensor Network for Seismic Monitoring of Buildings. *MDPI Sensors*. 2021, vol. 21, 3875. DOI.org/10.3390/s21113875.
24. Beffa M., Crice D., Kligfield R. Very high speed ordered mesh network of seismic sensors for oil and gas exploration. *Proceedings of the IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems*, Pisa, Italy, 2007, pp. 1–5.
25. Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*. 2002, vol. 38, pp. 393–422.
26. Reddy V. A., Stuber G. L., Al-Dharrab S., Mesbah W., Muqaibel A. H. A Wireless Geophone Network Architecture using IEEE802.11af with Power Saving Schemes. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2019, vol. 18, pp. 5967–5982. DOI: 10.1109/TWC.2019.2940944.
27. Tian R., Wang L., Zhou X., Xu H., Lin J., Zhang L. An integrated energy-efficient wireless sensor node for the microtremor survey method. *Sensors*. 2019, vol. 19, 544. DOI:10.3390/s19030544.
28. Yin Z., Zhou Y., Li Y. Seismic Exploration Wireless Sensor System Based on Wi-Fi and LTE. *MDPI Sensors*. 2020, vol. 20, 1018. DOI:10.3390/s20041018.
29. Savazzi S., Spagnolini U., Goratti L., Molteni D., Latva-aho M., Nicoli M. Ultra-wide band sensor networks in oil and gas explorations. *IEEE Communications Magazine*. 2013, vol. 51, pp. 150–160.
30. Batra A., Balakrishnan J., Aiello G. R., Foerster J. R., Dabak A. Design of a Multiband OFDM System for Realistic UWB Channel Environments. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2004, vol. 52, no. 9, pp. 2123–2137.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Выболдин Юрий Константинович — канд. техн. наук, доцент,
<https://orcid.org/0000-0002-7813-9470>,

Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21-я В. О. линия, д. 2, Россия, e-mail: Y.Vyboldin@mail.ru

Для контактов: Выболдин Юрий Константинович, Y.Vyboldin@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vyboldin Yu. K., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
<https://orcid.org/0000-0002-7813-9470>,

St. Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, 21 V. O. line, 2, Russia,
e-mail: Y.Vyboldin@mail.ru.

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 15.04.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 15.04.2022; accepted for printing 10.05.2022.

