Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, № 6. С. 34–45. ISSN 2073-0128 (print)

Petroleum Engineering. 2021. Vol. 19, No. 6, P. 34–45. ISSN 2073-0128 (print)

Научная статья

УДК 04.735

doi: 10.17122/ngdelo-2021-6-34-45

ОРГАНИЗАЦИЯ НАЗЕМНОГО КАНАЛА СВЯЗИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ

Сергей Викторович Емец¹, Андрей Николаевич Краснов¹,
Марина Юрьевна Прахова¹, Юлия Викторовна Калашник¹

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Автор, ответственный за переписку

Калашник Юлия Викторовна, nuv@npaufa.ru

Аннотация. В процессе бурения скважин на углеводороды необходимо в режиме реального времени получать с забоя технологическую, инклинометрическую и геофизическую информацию, для чего используются LWD- и MWD-системы. Далее эта информация поступает на верхний уровень системы управления бурением. В обратном направлении передаются управляющие команды в РУС. Передача информации в наземной части системы телеметрии, от устьевого оборудования к АРМ оператора, возможна посредством радиоканала, работающего по одному из протоколов беспроводной связи.

В статье рассмотрены и проанализированы такие протоколы и стандарты беспроводной связи, как ZigBee, LPWAN и Bluetooth LE. Исходя из требований, предъявляемых к беспроводному каналу связи со стороны скважинной части рассматриваемой системы телеметрии и условий эксплуатации, для организации наземного канала связи рекомендован стандарт Bluetooth LE 5.2. Показано также, что в зависимости от конкретной задачи (дальность связи, скорость передачи данных, требуемая энергоэффективность) может быть также использован ZigBee.

Ключевые слова

бурение скважин, скважинная телеметрия, передача данных, радиоканал, протокол связи, ZigBee, Bluetooth LE, LPWAN

Благодарности

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» — соисполнителя НИОКТР «Комплект модулей устьевого оборудования комплекса высокоскоростного канала передачи данных в процессе бурения» при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в соответствии с постановлением Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. N 218.

Для цитирования

Емец С.В., Краснов А.Н., Прахова М.Ю., Калашник Ю.В. Организация наземного канала связи для системы передачи данных в процессе бурения // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, № 6. С. 34–45. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-34-45>.

Original article

ORGANIZATION OF A GROUND COMMUNICATION CHANNEL FOR THE SYSTEM DATA TRANSMISSION WHILE DRILLING

Sergey V. Emets¹, Andrey N. Krasnov¹, Marina Yu. Prakhova¹, Yuliya V. Kalashnik¹

¹Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Corresponding author

Yuliya V. Kalashnik, nuv@npaufa.ru

Abstract. While well drilling for hydrocarbons, it is necessary to receive technological, directional and geophysical information from the bottom-hole in real time, so LWD and MWD systems are used. Then this information goes to the upper level of the drilling control system. In the opposite direction, control commands are transmitted to the RCS.

Information transmission in the ground part of the telemetry system, from the wellhead equipment to the operator's workstation, is possible by means of a radio channel operating over one of the wireless communication protocols.

The article reviews and analyzes such wireless protocols and standards as ZigBee, LPWAN and Bluetooth LE. Based on the requirements for the wireless communication channel from the downhole part of the telemetry system under consideration and operating conditions, the Bluetooth LE 5.2 standard is recommended for organizing a ground communication channel. It is also shown that depending on the specific task (communication range, data transfer rate, required energy efficiency), ZigBee can also be used.

Keywords

well drilling, downhole telemetry, data transmission, radio channel, communication protocol, ZigBee, Bluetooth LE, LPWAN

Acknowledgements

The work was carried out at Ufa State Petroleum Technological University — co-executor of the R&D project «A Set of Wellhead Equipment Modules for a High-Speed Data Transmission Channel while Drilling» with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in accordance with the Government Decree RF dated April 9, 2010 No. 218.

For citation

Emets S.V., Krasnov A.N., Prakhova M.Yu., Kalashnik Yu.V. Organizatsiya nazemnogo kanala svyazi dlya sistemy peredachi dannykh v protsesse bureniya [Organization of a Ground Communication Channel for the System Data Transmission while Drilling]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2021, Vol. 19, No. 6, pp. 34–45. [in Russian]. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-34-45>.

Введение

Бурение скважин на углеводороды является сложным технологическим процессом, эффективность которого зависит от многих параметров. Поэтому появились и активно развиваются телеметрические системы, позволяющие измерять необходимые параметры как на устье скважины, так и на забое, в режиме реального времени. Вся собираемая информация о процессе бурения может быть условно разделена по целевому назначению на три группы:

- технологическая информация (обороты турбобура, давление и температура в трубах и затрубном пространстве, разница давлений и температур на забое и устье, нагрузка на долото, момент на долоте и др.);

- инклинометрическая информация (угол искривления, азимут искривления, угол установки отклонителя);

- геофизическая информация (сопротивление горных пород, гамма-активность горных пород, самопроизвольная поляризация горных пород и ряд других).

С появлением новых технологий бурения, в частности кустового бурения, бурения горизонтальных скважин, объем требуемой для ведения процесса информации постоянно воз-

растает, а также ужесточаются требования к скорости ее передачи. Эти обстоятельства привели к резкому увеличению исследований в области скважинной телеметрии, или, более конкретно, к поиску наиболее эффективных способов передачи информации от забойных телеметрических систем (ЗТС) на земную поверхность [1].

Последние несколько лет ознаменовались переходом к цифровизации процесса бурения и появлением понятия интеллектуального бурения [2, 3]. Таким образом, от системы управления одной скважиной ведущие компании переходят к интегрированным системам управления операционной деятельностью сразу нескольких буровых площадок посредством центров управления бурением [4]. Эти системы представляют собой распределенные системы, отдельные компоненты которых связаны между собой каналами связи, как проводными, так и беспроводными [5, 6].

В данной статье приводится обзор и анализ беспроводных каналов связи (БКС) с точки зрения возможности их использования в системе телеметрии, предназначенной для передачи информации от скважинных MWD- и LWD-систем на верхний уровень системы управления бурением.

Краткая характеристика разрабатываемой системы телеметрии

Разрабатываемая система представляет собой систему телеметрии для сбора и передачи данных с забоя скважины на земную поверхность и далее в автоматизированную систему контроля и управления технологическими процессами (АСКУ ТП), а также передачу управляющих команд в РУС непосредственно в процессе бурения. Она состоит из скважинной и наземной частей.

Скважинная часть должна обеспечивать двухстороннюю (полудуплексную) беспроводную передачу измеряемых данных о параметрах бурения, геофизических данных и сигналов управления между роторной управляющей системой (РУС) и устьевым оборудованием (УО) в режиме реального времени.

Связь между устьевым оборудованием и АРМ оператора осуществляется по радиоканалу.

Наземная часть представляет собой распределенную систему и является верхним уровнем разрабатываемой системы телеметрии.

Таким образом, система телеметрии включает в себя три компонента (рисунок 1):

1. канал связи «забой — устье»;
2. комплекс программно-технических средств (ПТС) верхнего уровня, входящий в состав устьевого оборудования (УО) и состоящий из двух модулей: модуля приема-передачи данных с забоя скважин и обратно (МППД) и модуля связи (МС), выполняющего в том числе функции ретранслятора;
3. радиоканал между модулями УО и АРМ оператора.

Постановка задачи исследования

Объектом исследования в данной статье является последний компонент — канал связи между обоими модулями ПТС и АРМ оператора.

Несмотря на то, что этот канал связи наземный и эксплуатируется в более мягких условиях по сравнению со скважинным, его некорректная или неустойчивая работа делает невозможным оперативное управление процессом бурения.

Для организации БКС необходимо всесторонне проанализировать требования, предъявляемые к этому каналу связи, во-первых, со стороны всей системы в целом, а во-вторых, со стороны особенностей конструкции и функционала модуля МППД.

Рисунок 1. Система телеметрии для бурения на углеводороды

Figure 1. Telemetry system for drilling for hydrocarbons

Этот модуль предназначен для приема сигналов с забоя, их преобразования в цифровую форму и передачу по радиоканалу на МС. Дальность передачи составляет несколько сотен метров. Осложняющими факторами является то, что модуль МППД представляет собой конструкцию, вращающуюся вместе с бурильной колонной со скоростью до 200 об/мин и одновременно движущуюся возвратно-поступательно (вверх — вниз) на расстояние порядка 36 м, поэтому качество передачи будет определяться, в том числе, взаимным расположением модулей МППД и МС. Модуль МППД расположен между верхним приводом и колонной бурильных труб, поэтому еще одним влияющим фактором является воздействие на него механических вибраций и ударов. Зона размещения МППД является взрывоопасной, в связи с чем его конструкция должна отвечать существующим требованиям по взрывозащите, что, в свою очередь, ограничивает возможные технические решения.

Сам радиоканал связи МППД — МС находится в условиях действия различных помехообразующих факторов, таких как изменяющаяся в широких пределах температура (от минус 50 °С до 50 °С), наличие экранирующих металлоконструкций, электромагнитных наводок от работающего оборудования и др.

Промышленные беспроводные сети: виды и характеристики

Как видно из описания, разрабатываемая система телеметрии (СТМ), включающая некоторое количество датчиков, формирующих набор данных, и средства для их передачи, может быть отнесена к области промышленного Интернета вещей (IIoT). Каналы связи в такой системе в принципе могут быть как беспроводными, так и проводными. Основным преимуществом беспроводных решений являются простота и гибкость доступа к данным из любой точки в любое время, что очень важно, если производственные площадки располагаются на значительном удалении друг от друга и в местах с недостаточно развитой инфраструктурой.

На сегодняшний день существует большое количество стандартов беспроводной связи, в том числе для нелицензированных частот 2,4 и 5 ГГц. В промышленности наибольшее распространение получили беспроводные сенсорные сети, представляющие собой самоор-

ганизирующуюся сеть из множества датчиков и устройств, объединенных между собой посредством радиоканала.

Для беспроводной передачи данных важную роль имеют такие характеристики, как скорость передачи данных, энергоэффективность, отказоустойчивость, совместимость с другими компонентами системы, возможность самовосстановления после сбоев.

Многие протоколы беспроводных сенсорных сетей основаны на стандарте IEEE 802.15.4 [7], который определяет физический слой и управление доступом для организации энергоэффективных персональных сетей, например, популярные в системах IoT протоколы ZigBee, LPWAN, LoraWAN. Также широко используется в IoT протокол Bluetooth LE [8].

ZigBee — технология организации сетей беспроводной передачи данных, обеспечивающая невысокое потребление энергии и передачу данных на частотах 2,4 ГГц (Россия), 915 МГц (Северная Америка) и 868 МГц (Европа). Изначально ZigBee предназначалась для сетей из распределенных по значительной площади маломощных датчиков. Расстояние передачи варьируется в пределах 10–75 м (для оборудования спецификации ZigBee PRO возможна передача на расстояние в несколько километров в условиях прямой видимости). Поддерживаются как простые топологии типа «дерево», «точка — точка», «звезда», так и ячеистая топология.

В настоящее время технология имеет 3 сетевые спецификации: ZigBee PRO, ZigBee RF4CE, ZigBee IP [9, 10].

ZigBee PRO максимизирует все возможности стандарта IEEE 802.15.4 [7], а также обеспечивает поддержку сетей, состоящих более чем из 64000 устройств. Также ZigBee PRO предлагает функцию Green Power для подключения устройств с автономным сверхнизким потреблением. Спецификация позволяет организовать ячеистые сети, а также сети с топологией «звезда». ZigBee PRO в первую очередь подходит для сетей с датчиками и исполнительными механизмами.

ZigBee RF4CE предназначен для устройств, которым в первую очередь требуется интерфейс для взаимодействия с человеком (клавиатуры, пульты дистанционного управления), и которые характеризуются пониженным энергопотреблением. С помощью RF4CE также можно организовывать сети типа «звезда».

ZigBee IP представляет собой открытый стандарт для IPv6, обеспечивающий подключение к интернету недорогих устройств с низким потреблением энергии.

Устройства, образующие сеть ZigBee (базовые станции), имеют функционал одного из трех типов: координатор (ZigBee Coordinator, ZC), маршрутизатор (ZR), входящие в группу так называемых родительских устройств, и конечное устройство (ZED).

Координатор является «руководителем» сети, в его функции входит запуск сети, ее формирование и управление сетью. Он принимает участие в маршрутизации сетевого трафика, на него возложены функции Trust-центра (доверительного центра) — разрешение на подключение других устройств и работа с ключами шифрования (периодическое обновление ключей и уведомление об этом других узлов). Координатор должен иметь стационарный источник питания, т.к. его функционал не допускает перехода в спящий режим.

Маршрутизатор, или роутер, транслирует пакеты, осуществляет динамическую маршрутизацию, восстанавливает маршруты при перегрузках в сети или отказе какого-либо устройства. При формировании сети возможно соединение маршрутизатора с координатором, другими маршрутизаторами и конечными устройствами. Поскольку маршрутизатор работает в непрерывном режиме, он также должен иметь стационарное питание. Один маршрутизатор может обслуживать до 32 спящих устройств.

Конечное устройство может принимать и отправлять пакеты, но не занимается их трансляцией и маршрутизацией. Оно может выйти в сеть только через ZC или ZR и не может иметь дочерних устройств. ZED также может иметь стационарный источник питания, но, как правило, в сетях ZigBee используются спящие (SED), т.е. конечные устройства с питанием от батареи, которые могут длительное время находиться в спящем режиме (сеть это время не регламентирует). Физически конечные устройства представляют собой датчики, локальные контроллеры и исполнительные механизмы. Необходимо отметить, что с точки зрения одно физическое устройство может содержать несколько SED. Например, термостат может содержать с точки зрения сети такие независимые SED, как нагреватель, выключатель, датчик температуры и т.п. [11].

Конкретное значение «длительного времени» зависит от конкретного приложения; срок работы SED от одного комплекта батареек может составить от нескольких месяцев до нескольких лет. Такие устройства выходят из спящего режима только по какому-либо внешнему событию (по прерыванию от таймера, чтобы оцифровать показания датчика; по нажатию на кнопку и т.д.) или же когда пришло время отправлять пакет данных [12–14]. Есть также мобильные конечные устройства (MED), которые могут перемещаться по объекту. Чтобы избежать коллизий при передаче сообщений, запись MED в родительском узле хранится непродолжительное время (до нескольких минут), — в этом единственное отличие от SED.

Технология ZigBee обладает следующими преимуществами [15]:

- самоорганизация, т.е. структура сети задается параметрами профиля стека конфигурирования и формируется автоматически путем присоединения (повторного присоединения) к сети образующих ее устройств;

- ячеистая топология сети и использование специальных алгоритмов маршрутизации обеспечивает самовосстановление и гарантированную доставку пакетов в случаях обрыва связи между отдельными узлами (появления препятствия), перегрузки или отказа какого-то элемента;

- криптографическая защита данных, передаваемых по беспроводным каналам, по стандарту шифрования AES 128;

- низкое электропотребление входящих в сеть устройств, в том числе конечных, для которых предусмотрен режим «сна»;

- последовательная ретрансляция пакетов от узла источника до узла адресата, которая осуществляется несколькими альтернативными алгоритмами маршрутизации, выбор которых происходит автоматически;

- в частотном диапазоне от 2,4 до 2,48 ГГц обеспечиваются максимальные скорость передачи и помехоустойчивость;

- передача возможна на расстояние десятков метров внутри помещений и сотен метров на открытом воздухе;

- простота масштабирования или зонирования сети для снижения нагрузки и повышения скорости передачи данных.

Но необходимо отметить, что эта сеть имеет относительно низкую скорость передачи данных. Для всего пакета, включая слу-

жебную информацию, она составляет 250 кбит/с, а средняя скорость передачи полезных данных, в зависимости от загрузки сети и числа ретрансляций, составляет от 5 до 40 кбит/с [15].

LPWAN (*Low-Power Wide Area Network*, энергоэффективная сеть дальнего радиуса действия) представляет собой группу беспроводных технологий передачи небольших по объёму данных на дальние расстояния [16]. Характеризуется низким энергопотреблением.

Областями применения LPWAN являются телеметрия, межмашинное взаимодействие и интернет вещей. Наиболее часто используемой топологией сетей LPWAN является «звезда»: устройство или модем с LPWAN-модулем передает данные по радиоканалу на базовую станцию, которая в свою очередь обрабатывает сигнал и передаёт его на удалённый сервер, используя доступный канал связи. Архитектурой сети предусматривается также и наличие обратных каналов связи для управления устройствами. Для передачи информации применяются радиоканалы нелицензируемого спектра частот (ISM диапазон): 169, 433, 868, 915 МГц и 2,4 ГГц.

К сильным сторонам LPWAN-технологии следует отнести:

- дальность передачи информации более 10 км (в зависимости от условий окружающей среды и используемого протокола максимальное расстояние передачи может достигать 50 км);

- использование нелицензируемых частот;

- низкое энергопотребление сети, способное обеспечить автономную работу входящих в нее устройств до 5 лет;

- высокая масштабируемость сети на больших территориях;

- возможность управлять временем задержки соединения, что позволяет интегрировать в сеть устройства, требующие прогнозируемого времени отклика.

К недостаткам LPWAN обычно относят:

- низкую скорость передачи данных, которая варьируется от нескольких сотен бит в секунду до нескольких десятков килобит в секунду в зависимости от используемого протокола передачи информации;

- небольшое количество передаваемых сообщений в сутки (50–150 сообщений);

- отсутствие единого стандарта, определяющего физический уровень сети и доступ к ней;

- короткую информационную посылку (4–20 байт).

К наиболее существенным недостаткам, которые необходимо учитывать при построении систем телеметрии, относятся низкая скорость передачи данных и ограничение по количеству передаваемых сообщений. И, если низкая скорость информационного обмена является следствием высокой дальности передачи данных, то ограничение по количеству передаваемых сообщений предстает существенным недостатком, не позволяющим применять LPWAN для мониторинга количественно изменяющихся параметров в реальном времени.

Bluetooth LE (*BLE, Bluetooth Low Energy*) представляет собой беспроводную технологию Bluetooth с низким энергопотреблением. Эта технология была создана для современных беспроводных устройств, которые нуждаются в постоянном обмене данными, в том числе в системах автоматизации. Возможна организация устройств Bluetooth в сети с топологиями «точка-точка», «звезда» и «ячеистая сеть» [17, 18]. С точки зрения организации топологий Bluetooth устройства объединяются в пикосети или в рассейные сети.

Два или более устройства, которые используют один и тот же канал, образуют пикосеть (*piconet*). Одно из устройств работает как основное (*master*), а остальные — как подчиненные (*slave*) устройства. В одной пикосети может быть до восьми активных подчиненных устройств, при этом остальные подчиненные устройства находятся в состоянии «парковки», не предусматривающем участия устройства в пикосети, но требующее от него оставаться его частью. На расстоянии 10 м может существовать до 10 пикосетей. Рассейную сеть (*scatternet*) образуют взаимодействующие пикосети. В каждой пикосети действует только одно основное устройство, но подчиненные устройства могут входить в различные пикосети.

Радиосвязь между устройствами осуществляется на частоте 2,4 ГГц. При построении сетей Bluetooth LE важно учитывать тот факт, что устройства BLE могут быть как двухрежимными, совместимыми с классическими Bluetooth устройствами, так и однорежимными, способными обмениваться информацией только с такими же BLE устройствами.

На данный момент применяются различные стандарты Bluetooth LE, каждый из кото-

рых представляет собой развитие предыдущего. В настоящее время все более популярной становится версия стандарта BLE 5.2. Отличие этой версии от предыдущих касается прежде всего таких параметров, как скорость передачи и длина пакета данных [19].

С эксплуатационной точки зрения можно выделить следующие особенности данной технологии:

- максимальный ток, потребляемый устройствами BLE, составляет порядка 15–30 мА в режиме передачи (зависит от модели и условий передачи) и единицы микроампер в «спящем» режиме, что при оптимальной настройке аппаратуры позволяет им работать несколько месяцев без замены элемента питания;

- возможность передачи информации на расстояния более 100 м (в частности, широко используемые модули серии EZ-BLE компании Cypress Semiconductor способны передавать данные на расстояние до 400 м). В целом с помощью технических средств возможно организовать передачу между двумя устройствами на расстояние более 1 км;

- максимальная скорость передачи данных составляет 2 Мбит/с (по стандарту Bluetooth LE 5.2);

- используется алгоритм шифрования данных (AES 128);

- максимальный размер пакета данных 251 байт;

- минимальные промежутки между пакетами данных составляют 150 мкс;

- достаточно высокая надежность передачи данных, определяемая использованием избыточного циклического кода (CRC);

- распространенность Bluetooth устройств [19].

Анализ рассмотренных систем с точки зрения их применимости

в разрабатываемой системе телеметрии

Для выработки конкретных рекомендаций по использованию БКС в разрабатываемой системе телеметрии необходимо сравнить их по следующим критериям:

- надежность передачи данных;
- электромагнитная совместимость с другими системами;
- скорость и дальность передачи данных;
- безопасность передачи данных;
- структура сети;
- энергопотребление;
- характер взаимодействия узлов сети.

Основные технические характеристики рассматриваемых БКС приведены в таблице 1.

Рассмотрим более подробно обеспечение надежности передачи данных о процессе бурения. Под этим показателем понимается передача данных с постоянным соединением и без их потери [20].

Потерю данных и нарушение соединения могут вызывать два основных фактора: электромагнитные помехи или затухание сигнала из-за распространения радиоволн в свободном пространстве и возникновения отражений.

Электромагнитные помехи на буровой площадке генерируются работающим электрооборудованием, таким как частотные преобразователи, электроприводы и т.п. Такие помехи имеют частотный диапазон, кратный килогерцам или мегагерцам, и диапазона 2,4 ГГц не достигают. Однако в этом диапазоне источником помех становятся другие беспроводные системы, передающие данные на той же частоте 2,4 ГГц. Для обеспечения электромагнитной совместимости различных

Таблица 1. Основные технические характеристики БКС

Table 1. Main technical characteristics of WSN

Характеристика	Протокол беспроводной связи		
	LPWAN	ZigBee	Bluetooth LE 5.2
Частотный диапазон	868 МГц	2,4–2,483 ГГц	2,4–2,483 ГГц
Скорость передачи данных, кбит/с	0,3–50	250	до 2000
Дальность связи, м	45000	200	до 1500
Потребление тока (active/sleep), мА/мкА	18/1	30/1	15/1
Модуляция, доступ к среде	DSSS	DSSS	FHSS, AFH
Топология системы	«звезда»	«точка — точка», «звезда», «сеть»	«точка — точка», «звезда», «сеть»

систем используется два вида модуляции [20] – широкополосная модуляция с прямым расширением спектра (*Direct Sequence Spread Spectrum*, DSSS) и псевдослучайная перестройка рабочей частоты (*Frequency Hopping Spread Spectrum*, FHSS) (рисунок 2). Преимуществом DSSS является возможность передачи данных с очень высокой скоростью, но только до определенного порога ширины частотного спектра помехи.

При использовании FHSS частота передачи данных меняется в псевдослучайном порядке, поэтому возникшая помеха будет влиять только на одну из случайных частот, вне зависимости от ширины спектра. Таким образом, при возникновении серьезных электромагнитных помех в FHSS системе потеряется часть данных, а в DSSS системе передача данных остановится полностью.

Вторым фактором, влияющим на надежность, как уже отмечалось, является затухание сигнала из-за возникновения отражений при распространении радиоволн.

Сигнал от передатчика к приемнику распространяется в нескольких направлениях. В

связи с этим до приемника доходит несколько волн, которые содержат одну и ту же информацию, но ввиду различных путей распространения могут иметь разные фазы, что может привести к ослаблению сигнала (когда пришедшие радиоволны находятся в противофазе).

Использование FHSS модуляции позволяет избежать такого эффекта и уменьшить влияние отражений, возникающих в ходе распространения радиоволн. Поскольку частота, на которой передаются данные, постоянно меняется, то на какой-либо из них влияние отражений будет минимальным.

Для разрабатываемой системы этот момент очень важен, т.к. на буровой площадке находится множество металлоконструкций, которые будут вызывать переотражение сигнала. Поэтому с точки зрения надежности передачи Bluetooth LE 5.2 имеет преимущество.

Следующая очень важная для сетей, использующих устройства с автономным питанием, характеристика — энергоэффективность (ЭЭ). В соответствии с [21] показатель ЭЭ

Рисунок 2. Виды модуляции в БКС: DSSS (a), FHSS (b)

Figure 2. Types of modulation in WSN: DSSS (a), FHSS (b)

определяется как отношение между функциональной единицей и энергией, требуемой для её выработки. Под функциональной единицей в БКС понимается обычно переданное сообщение [22], т.е. фактически параметр ЭЭ — это количество энергии, затраченное на отправку одного сообщения. При этом этот показатель зависит от времени в эфире и мощности передатчика, т.е. он будет одинаков при передаче сообщения на фиксированную дальность быстро и с большой мощностью или медленно с маленькой мощностью [23]. Таким образом, при оценке ЭЭ необходимо учитывать взаимосвязь трех показателей: собственно ЭЭ, дальности передачи и ее скорости.

В разрабатываемой системе на параметр ЭЭ будет дополнительно влиять температура окружающего воздуха. МППД, работающий

от автономного источника питания, должен сохранять работоспособность при температурах от минус 45 °С до 60 °С, ресурс же автономного источника питания при работе в условиях низких температур уменьшается (рисунок 3).

В данной системе при построении БКС требуемая скорость передачи данных во многом диктуется невысокой пропускной способностью скважинного канала. Расстояние между буровой установкой и АРМ оператора также невелико и составляет порядка нескольких сотен метров. В этих условиях возникает возможность обеспечить длительную работу системы от автономных источников питания даже с учетом снижения их емкости за счет воздействия низких температур.

Рисунок 3. Зависимость тока и емкости литий-тионилхлоридного элемента питания ER26500H Fanzo Tehnology (типоразмер C) от температуры

Figure 3. Dependence of the current and capacity of the lithium-thionyl chloride battery ER26500H Fancy Technology (size C) on temperature

Выводы

Как показал анализ рассмотренных протоколов БКС, каждый из них обладает определенным сочетанием достоинств и недостатков, что не позволяет сформулировать однозначные рекомендации по использованию какого-либо протокола.

Протокол Bluetooth LE обладает явным преимуществом по надежности передачи данных в условиях действия множества внешних помех за счет использования технологии адап-

тивной смены частоты (AFH, Adaptive Frequency Hopping).

Далее, в протоколе очень много решений, снижающих энергопотребление. Так, BLE поддерживает очень короткие пакеты данных (от 8 до 27 байтов), которые передаются на скорости 1 Мбит/с. Установка соединения и передача аутентифицированных данных занимает всего 3 мс.

На сегодняшний момент наиболее целесообразным для сопровождения процесса буре-

ния как отдельной задачи является выбор протокола Bluetooth LE, однако будущие испытания разрабатываемой системы могут скорректировать этот выбор. Например, при необходимости организовать передачу на расстояние порядка нескольких километров с невысокой скоростью (до 25 кбит/с) предпочтительным будет выбор технологии LPWAN. Если же увеличивается число узлов сети для сбора дополнительных технологических данных, логично строить самоорганизующуюся беспроводную сенсорную сеть на основе стандарта ZigBee.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стукач О.В., Мирманов А.Б., Гопоненко А.С., Кочумеев В.А. Разработка новой телесистемы для передачи данных по радиоканалу в процессе бурения скважин // Вестник науки Сибири. 2014. № 1 (11). С. 76-83.
2. Рустамов И.Ф., Кулаков К.В., Ильичев С.А., Кульчицкий В.В. Цифровизация бурения скважин // ROGTEC Российские нефтегазовые технологии. 2020. Вып. 54. С. 24-33. URL: https://gasoilcenter.ru/files/file/Manager/pub/56_Kulchitsky_Rustamov_Kulakov_Iliychev_Cifrovizaciya_bureniya_skvazhin-ROGTEC_04_2020.pdf (дата обращения: 10.10.2021).
3. Ерёмин Н.А., Столяров В.Е., Архипов А.И., Черников А.Д., Сарданашвили О.Н. Цифровые технологии строительства скважин. Создание высокопроизводительной автоматизированной системы предотвращения осложнений и аварийных ситуаций в процессе строительства нефтяных и газовых скважин // Деловой журнал «Neftegaz.RU». 2020. № 4. URL: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/tekhnologii/547745-tsifrovyye-tekhnologii-stroitelstva-skvazhin-sozdanie-vysokoproizvoditelnoy-avtomatizirovannoy-sistem/> (дата обращения: 08.10.2021).
4. Архипов И.С. Организация сбора технологических данных с буровой и передачи данных в централизованное хранилище // Молодой ученый. 2018. № 15 (201). С. 99-103. URL: <https://moluch.ru/archive/201/49399/> (дата обращения: 30.10.2021).
5. Билинчук А.В., Рустамов И.Ф., Булгаков Е.Ю. Принципы построения интегрированных систем управления операционной деятельностью на примере центра управления бурением группы компаний «Газпром нефть» // ROGTEC Российские нефтегазовые технологии. 2018. Вып. 54. С. 36-44.
6. Пат. 2703576 РФ, МПК Е 21 В 44/00. Адаптивная система управления бурением скважин на базе единой цифровой платформы / В.В. Кульчицкий, А.К. Пархоменко, С.А. Ильичев, В.Л. Александров, А.В. Щербетов. 2019101435, Заявлено 18.01.2019; Опубл. 21.10.2019. Бюл. 30.
7. IEEE 802.15.4-2020 — IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks // Standards. IEEE. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html (дата обращения: 10.10.2021).
8. Закалюжный А.А. Развитие беспроводных сетей как средство контроля и управления удаленными системами // Молодой исследователь Дона. 2018. № 4 (13). С. 46-51.
9. Павлова З.Х., Балтин Р.Р., Краснов А.Н., Майский Р.А. Об основных аспектах проектирования беспроводных сетей параметрического мониторинга удаленных объектов // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 12 (54). С. 161-164. DOI: 10.18454/IRJ.2016.54.052.
10. Соколов М., Воробьев О. Реализация беспроводных сетей на основе технологии ZigBee стандарта 802.15.4 // Компоненты и технологии. 2005. № 2. С. 160-163.
11. Павлов А. Адресация и профили ZigBee // Электронные компоненты. 2010. № 10. С. 33-35. URL: https://russianelectronics.ru/files/53410/EK2010_10_33-35.pdf (дата обращения: 25.10.2021).
12. Петриго В. Беспроводные сети ZigBee. Часть 2 (Работа с радиомодулями ETRX35X) // Хабр. URL: <https://habr.com/ru/company/efo/blog/306062/> (дата обращения: 25.10.2021).
13. Gislason D. ZigBee Applications — Part 1: Sending and Receiving Data // EETimes. 07.02.2010. URL: <https://www.eetimes.com/zigbee-applications-part-1-sending-and-receiving-data> (дата обращения: 27.10.2021).
14. Kinney P. ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works // Nettsiden er Flyttet — Institutt for Teknisk Kybernetikk, NTNU. URL: <https://www.itk.ntnu.no/fag/TTK4545/TTK2/PDF/ZigBee%20Technology%20-%20Wireless%20control%20that%20simply%20works.pdf> (дата обращения: 28.10.2021).
15. Лекнин В. Сети ZigBee. Зачем и почему? // Хабр. 17.10.2012. URL: <https://habr.com/ru/post/155037/> (дата обращения: 30.10.2021).
16. Shea S. LPWAN (Low-Power Wide Area Network) // Tech Target. URL: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/LPWAN-low-power-wide-area-network> (дата обращения: 02.10.2021).
17. Mohammad Afaneh Intro to Bluetooth Low Energy // Novel Bits. URL: <https://www.novelbits.io/introduction-to-bluetooth-low-energy-book/#download> (дата обращения: 02.11.2021).
18. Аникин А. Обзор современных технологий беспроводной передачи данных в частотных диапазонах ISM (Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi) и 434/868 МГц // Беспроводные технологии. 2011. № 4. URL: http://www.wirelesse.ru/articles/technologies/2011_4_6.php (дата обращения: 09.11.2021).

19. Bluetooth 5 / 5.1 / 5.2 — Unthinkably Connected // Elektronik Kompendium. URL: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/2107121.htm> (дата обращения: 10.11.2021).

20. Промышленные беспроводные сети: какую выбрать? // Хабр. 21.02.2019. URL: https://habr.com/ru/company/phoenix_contact/blog/441146/ (дата обращения: 04.11.2021).

21. Рекомендация МСЭ-Т. L.1310. Показатели энергоэффективности и методы измерения для электрооборудования связи. Женева: Международный союз электросвязи, 2017. 30 с. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-L.1310-201408-S!!PDF-R&type=items (дата обращения: 09.10.2021).

22. Шептовецкий А. Что такое энергоэффективность LPWAN // Хабр. 04.04.2021. URL: <https://habr.com/ru/post/550570/> (дата обращения: 12.10.2021).

23. Abhishek Gupta, Imran Mohammed, Cypress Semiconductor The Basics of Bluetooth Low Energy // Radio Locman. URL: <https://www.radiolocman.com/review/article.html?di=183939> (дата обращения: 15.10.2021).

REFERENCES

1. Stukach O.V., Mirmanov A.B., Goponenko A.S., Kochumeev V.A. Razrabotka novoi telesistemy dlya peredachi dannykh po radiokanalu v protsesse bureniya skvazhin [Development of a New Telemetry System for Transmitting Data Over a Radio Channel While Drilling Wells]. *Vestnik nauki Sibiri — Siberian Journal of Science*, 2014, No. 1 (11), pp. 76-83. [in Russian].
2. Rustamov I.F., Kulakov K.V., Ilichev S.A., Kulchitskii V.V. Tsifrovizatsiya bureniya skvazhin [Well Drilling Digitalization]. *ROGTEC Rossiiskie neftegazovye tekhnologii — ROGTEC Oil and Gas Magazine*, 2020, Issue 54, pp. 24-33. URL: https://gasoilcenter.ru/files/fileManager/pub/56_Kulchitsky_Rustamov_Kulakov_Ilyichev_Cifrovizatsiya_bureniya_skvazhin_ROGTEC_04_2020.pdf (accessed 10.10.2021). [in Russian].
3. Eremin N.A., Stolyarov V.E., Arkhipov A.I., Chernikov A.D., Sardanashvili O.N. Tsifrovye tekhnologii stroitel'stva skvazhin. Sozdanie vysokoproizvoditel'noi avtomatizirovannoi sistemy predotvrashcheniya oslozhnenii i avariinykh situatsii v protsesse stroitel'stva neftyanykh i gazovykh skvazhin [Digital Technologies for Well Construction. Creation of a High-Performance Automated System for Preventing Complications and Emergencies during the Construction of Oil and Gas Wells]. *Delovoi zhurnal «Neftegaz.RU» — Business Magazine «Neftegaz.RU»*, 2020, No. 4. Available at: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/tekhnologii/547745-tsifrovye-tekhnologii-stroitelstva-skvazhin-sozdanie-vysokoproizvoditelnoy-avtomatizirovannoy-sistem/> (accessed 08.10.2021). [in Russian].
4. Arkhipov I.S. Organizatsiya sbora tekhnologicheskikh dannykh s burovoi i peredachi dannykh v tsentralizovannoe khranilishche [Organization of Collection of Technological Data from the Rig and Data Transfer to a Centralized Storage]. *Molodoi uchenyi — Young Scientist*, 2018, No. 15 (201), pp. 99-103. Available at: <https://moluch.ru/archive/201/49399/> (accessed 30.10.2021). [in Russian].
5. Bilinchuk A.V., Rustamov I.F., Bulgakov E.Yu. Printsipy postroeniya integrirovannykh sistem upravleniya operatsionnoi deyatelnost'yu na primere tsentra upravleniya bureniem gruppy kompanii «Gazprom nef't» [Gazprom Neft: Drilling Management Centre Case Study — Integrated Operating Management Systems]. *ROGTEC Rossiiskie neftegazovye tekhnologii — ROGTEC Oil and Gas Magazine*, 2018, Issue 54, pp. 36-44. [in Russian].
6. Kulchitskii V.V., Parkhomenko A.K., Ilichev S.A., Aleksandrov V.L., Shchebetov A.V. *Adaptivnaya sistema upravleniya bureniem skvazhin na baze edinoi tsifrovoy platformy* [Adaptive Well Drilling Control System Based on a Single Digital Platform]. Patent RF, No. 2703576, 2019.
7. IEEE 802.15.4-2020 — IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. Standards. IEEE. Available at: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html (accessed 10.10.2021).
8. Zakalyuzhnyi A.A. Razvitie besprovodnykh setei kak sredstvo kontrolya i upravleniya udalennymi sistemami [Development of Wireless Networks as a Means of Remote Systems Control and Management]. *Molodoi issledovatel' Dona — Young Don Researcher*, 2018. № 4 (13). S. 46-51. [in Russian].
9. Pavlova Z.Kh., Baltin R.R., Krasnov A.N., Maiskii R.A. Ob osnovnykh aspektakh proektirovaniya besprovodnykh setei parametricheskogo monitoringa udalennykh ob'ektov [About the Main Aspects of Design of Wireless Network Parametric Monitoring Remote Objects]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal — International Research Journal*, 2016, No. 12 (54), pp. 161-164. DOI: 10.18454/IRJ.2016.54.052. [in Russian].
10. Sokolov M., Vorobev O. Realizatsiya besprovodnykh setei na osnove tekhnologii ZigBee standart 802.15.4 [Implementation of Wireless Networks Based on ZigBee Technology Standard 802.15.4]. *Komponenty i tekhnologii — Components and Technologies*, 2005, No. 2, pp. 160-163. [in Russian].
11. Pavlov A. Adresatsiya i profili ZigBee [ZigBee Addressing and Profiles]. *Elektronnye komponenty — Electronic Components*, 2010, No. 10, pp. 33-35. URL: https://russianelectronics.ru/files/53410/EK2010_10_33-35.pdf (accessed 25.10.2021). [in Russian].
12. Petrigo V. Besprovodnye seti ZigBee. Chast' 2 (Rabota s radiomodulyami ETRX35X) [ZigBee Wireless Networks. Part 2 (Working with ETRX35X Radios)]. *Khabr*. Available at: <https://habr.com/ru/company/efo/blog/306062/> (accessed 25.10.2021). [in Russian].
13. Gislason D. ZigBee Applications — Part 1: Sending and Receiving Data. *EETimes*. 07.02.2010. Available at: <https://www.eetimes.com/zigbee-applications-part-1-sending-and-receiving-data/> (accessed 27.10.2021).
14. Kinney P. ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works. *Nettsiden er Flyttet — Institutt for Teknisk Kybernetikk, NTNU*. URL: <https://www.itk.ntnu.no/fag/TTK4545/TTK2/PDF/ZigBee%20Technology%20-%20Wireless%20control%20that%20simply%20works.pdf> (accessed 28.10.2021).
15. Leknin V. Seti ZigBee. Zachem i pochemu? [ZigBee Networks. Why and Why?]. *Khabr*. 17.10.2012. Available at: <https://habr.com/ru/post/155037/> (accessed 30.10.2021). [in Russian].
16. Shea S. LPWAN (Low-Power Wide Area Network). *Tech Target*. Available at: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/LPWAN-low-power-wide-area-network> (accessed 02.10.2021).

17. Mohammad Afaneh. Intro to Bluetooth Low Energy. *Novel Bits*. Available at: <https://www.novelbits.io/introduction-to-bluetooth-low-energy-book/#download> (accessed 02.11.2021).

18. Anikin A. Obzor sovremennykh tekhnologii besprovodnoi peredachi dannykh v chastotnykh diapazonakh ISM (Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi) i 434/868 MGts [Overview of Modern Technologies for Wireless Data Transmission in the Frequency Bands ISM (Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi) and 434/868 MHz]. *Besprovodnye tekhnologii — Wireless Technology*, 2011, No. 4. Available at: http://www.wirelesse.ru/articles/technologies/2011_4_6.php (accessed 09.11.2021). [in Russian].

19. Bluetooth 5 / 5.1 / 5.2 — Unthinkably Connected. *Elektronik Kompendium*. Available at: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/2107121.htm> (accessed 10.11.2021).

20. Promyshlennye besprovodnye seti: kakuyu vybrat'? [Industrial Wireless Networks: Which One to Choose?]. *Khabr*. 21.02.2019. Available at: [https://habr.com/ru/](https://habr.com/ru/company/phoenix_contact/blog/441146/)

[company/phoenix_contact/blog/441146/](https://habr.com/ru/company/phoenix_contact/blog/441146/) (accessed 04.11.2021). [in Russian].

21. Rekomendatsiya MSE-T. L.1310. Pokazateli energoeffektivnosti i metody izmereniya dlya elektrooborudovaniya svyazi [Recommendation MSE-T. L.1310. Energy Efficiency Indicators and Measurement Methods for Electrical Communication Equipment]. Geneva, Mezhdunarodnyi soyuz elektrosvyazi Publ., 2017. 30 p. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-L.1310-201408-S!!PDF-R&type=items (accessed 09.10.2021). [in Russian].

22. Sheptovetskii A. Chto takoe energoeffektivnost' LPWAN [What is Energy Efficiency LPWAN]. *Khabr*. 04.04.2021. Available at: <https://habr.com/ru/post/550570/> (accessed 12.10.2021). [in Russian].

23. Abhishek Gupta, Imran Mohammed, Cypress Semiconductor The Basics of Bluetooth Low Energy. *Radio Locman*. Available at: <https://www.radiolocman.com/review/article.html?di=183939> (accessed 15.10.2021).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Емец Сергей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации, телекоммуникации и метрологии, УГНТУ, Уфа, Россия

Sergey V. Emets, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Automation, Telecommunications and Metrology Department, USPTU, Ufa, Russia

serg.emets2010@yandex.ru

Краснов Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации, телекоммуникации и метрологии, УГНТУ, Уфа, Россия

Andrey N. Krasnov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Automation, Telecommunications and Metrology Department, USPTU, Ufa, Russia

ufa-znanie@mail.ru

Прахова Марина Юрьевна, доцент кафедры автоматизации, телекоммуникации и метрологии, УГНТУ, Уфа, Россия

Marina Yu. Prakhova, Assistant Professor of Automation, Telecommunications and Metrology Department, USPTU, Ufa, Russia

prakhovamarina@yandex.ru

Калашник Юлия Викторовна, старший преподаватель кафедры автоматизации, телекоммуникации и метрологии, УГНТУ, Уфа, Россия

Yuliya V. Kalashnik, Senior Lecturer of Automation, Telecommunications and Metrology Department, USPTU, Ufa, Russia

niv@npauufa.ru

Статья поступила в редакцию 15.10.2021; одобрена после рецензирования 23.10.2021; принята к публикации 01.11.2021.

The article was submitted 15.10.2021; approved after reviewing 23.10.2021; accepted for publication 01.11.2021.