

## Использование сетей стандарта IEEE 802.15.4/ZigBee в системах шахтной автоматизации

М. О. Жуков, А. Е. Иванов, И. В. Меркулов, Б. В. Нарымский

Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия

Представлены результаты исследования возможности использования беспроводных сетей ZigBee для сбора данных с объектов автоматизации и мониторинга подвижных объектов в шахтах – персонала или мобильного оборудования. Проведен сравнительный обзор различных стандартов беспроводной передачи данных и зарубежных достижений в области применения ZigBee в системах промышленной автоматизации. Представлены результаты испытаний ZigBee-приемопередатчиков, разработанных в Конструкторско-технологическом институте вычислительной техники СО РАН, предложена структура системы сбора данных на их основе.

**Ключевые слова:** ZigBee, мониторинг персонала, самоорганизующаяся сеть.

The work presented in this article has investigated the potential application of wireless ZigBee network technology for data acquisition from automation objects and for coal mine personnel positioning. The brief comparative review of various standards of wireless data transmission is given. The foreign achievements in application of ZigBee for industrial automation are also discussed in the paper. The special attention is given to the ZigBee-transceivers developed in the Design Technological Institute of Digital Techniques of the Siberian Branch of the RAS and to the results of their test.

**Key words:** ZigBee, personnel positioning, sensor network.

**Введение.** В последнее десятилетие в мире электроники наблюдается бурное развитие технологий беспроводной передачи данных. Широкое распространение в быту и технике получили стандарты IEEE 802.11 (WiFi) и IEEE 802.15.1 (Bluetooth). Приемопередатчики этих стандартов имеют как преимущества, так и существенные недостатки, к которым, в частности, относятся большое энергопотребление и примитивная топология сети, что не позволяет полноценно использовать их для передачи данных в системах автоматизации промышленных процессов. Программный стек ZigBee, использующий стандарт передачи пакетов данных IEEE 802.15.4, нацелен на приложения, в которых требуются значительное время автономной работы от батарей и большая надежность передачи данных при меньших скоростях. Использование интерфейса ZigBee дает инженеру возможность решать задачи контроля и мониторинга технологических параметров путем построения самоорганизующихся систем сбора, обработки и передачи информации.

**Технологии беспроводных сетей. Стек протоколов ZigBee.** На предприятиях угледобывающей отрасли остро стоит задача мониторинга технологических процессов. Использование кабельных коммуникаций для сбора данных с различных датчиков затруднительно, а иногда и невозможно (например, если речь идет о мониторинге персонала шахты). Постоянное снижение стоимости беспроводных решений и повышение их эксплуатационных характеристик позволяют постепенно отказываться от проводов и проводных сетей в системах сбора телеметрических данных, диагностики оборудования и обмена информацией. Использование сетей беспроводных устройств позволяет создать диспетчерскую систему, обеспечивающую оператору непрерывный доступ к информации о состоянии обслуживаемых объектов.

Важным аспектом является стандартизация протокола передачи данных, что делает измерительную систему открытой и совместимой с изделиями других производителей.

В настоящее время на рынке электроники представлено многообразие беспроводных приемопередатчиков, различающихся рабочими частотами, типом модуляции, мощностью сигнала, топологией организуемой сети и т. д. Применение приемопередатчиков ZigBee позволяет решить задачи мониторинга и контроля, которые критичны по времени автономной работы датчиков.

В основу сетей ZigBee положен стандарт беспроводной связи малого радиуса действия IEEE 802.15.4 [1], ориентированный на использование в недорогих и экономичных беспроводных устройствах сбора данных и управления. Узлы сенсорной сети применяются в системах, где необходимо передавать небольшие объемы данных и требуются низкое энергопотребление, малые габариты и простота интеграции.

Одним из основных преимуществ стандарта ZigBee/802.15.4 является простота установки и обслуживания устройств. Особенности спецификации ZigBee позволяют легко развертывать беспроводные персональные сети.

**Топология сети ZigBee.** В сети ZigBee существует три типа узлов: координатор, маршрутизатор и мобильное устройство (рис. 1). Главным устройством в ZigBee-сети является координатор, выполняющий функции по формированию сети. Основная задача координатора заключается в создании сети с заданными параметрами: номером радиочастотного канала, уникальным идентификатором сети, правилами доступа в сеть. При этом координатор является наиболее сложным из трех типов устройств, обладает наибольшим объемом памяти и повышенным энергопотреблением (питание от сети).

Маршрутизаторы используются для расширения радиуса действия сети, поскольку способны выполнять функции ретрансляторов между устройствами, расположенными на значительном расстоянии друг от друга.

Мобильные устройства используют режимы пониженного энергопотребления и, как правило, представляют собой узлы с батарейным питанием. Обычно они выполняют роль датчиков или контроллеров каких-либо исполнительных устройств. Их количество диктуется потребностью конкретного приложения.

Основная особенность технологии ZigBee заключается в том, что при относительно невысоком энергопотреблении она поддерживает не только простые топологии беспроводной связи ("точка-точка" и "звезда"), но и сложные беспроводные сети с ячеистой топологией с ретрансляцией и маршрутизацией сообщений (рис. 2).

Наиболее сложной является ячеистая топология (mesh-топология). В такой сети каждое устройство может связываться с любым другим устройством как непосредственно, так и через промежуточные узлы сети. Ячеистая топология предлагает альтернативные варианты выбора маршрута между узлами. Сообщения поступают от узла к узлу, до тех пор пока не достигнут конечного получателя. Возможны различные пути прохождения сообщений, что повышает доступность сети в случае выхода из строя того или иного звена.

**Беспроводные сети в системах шахтной автоматизации.** Зарубежный опыт применения беспроводных сетей в целях мониторинга персонала шахты и параметров технологических установок значительно превышает отечественный. В университете Exeter (Великобритания) в 2006 г. проводились исследования [2, 3] распространения электромагнитных волн УВЧ- и СВЧ-диапазонов в подземных условиях – железнодорожных туннелях, стволах шахт скальных и мягких пород. Также исследователями оценивалась работа беспроводных приемопередатчиков стандартов IEEE802.11/WiFi и IEEE802.15.1/Bluetooth, при этом особое внимание уделялось новой технологии IEEE802.15.4/ZigBee. Исследования показали целесообразность применения в условиях шахты приемопередатчиков стандарта ZigBee, которые вследствие малого энергопотребления и возможности самоорганизации позволяют оперативно разворачивать надежные сети для сбора данных с объектов автоматизации.

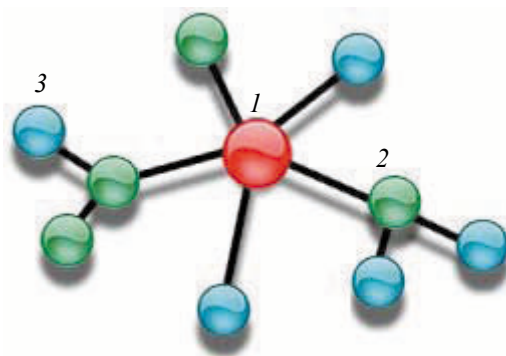


Рис. 1. Типы устройств сети ZigBee:  
1 – координатор, 2 – маршрутизатор,  
3 – мобильное устройство

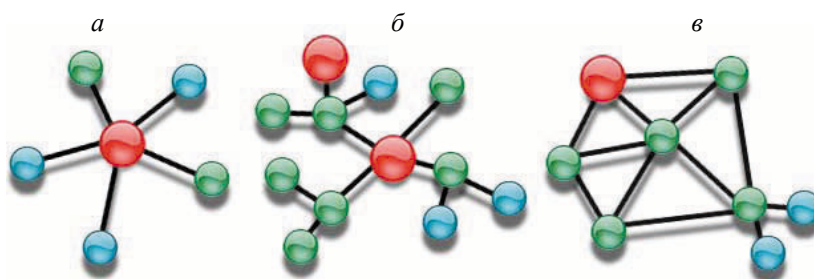


Рис. 2. Варианты топологий сетей ZigBee:  
а – звезда, б – кластерное дерево, в – Mesh

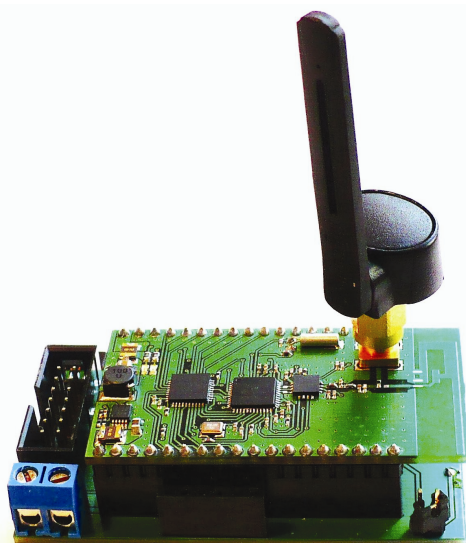


Рис. 3. Беспроводной ZigBee-приемопередатчик, разработанный Конструкторско-технологическим институтом вычислительной техники СО РАН

В России стек ZigBee в течение длительного времени не находил широкого применения в разработках систем передачи данных, а исследования возможности его применения для систем шахтной автоматизации не проводились. С 2008 г. в Конструкторско-технологическом институте вычислительной техники СО РАН ведутся исследования возможности построения развитых беспроводных сетей стандарта IEEE 802.15.4/ZigBee для сбора данных с объектов автоматизации и для мониторинга подвижных объектов на шахтах – персонала и мобильного оборудования.

**Разработки Конструкторско-технологического института вычислительной техники в области построения беспроводных сетей.** Принципиальное отличие разработок Конструкторско-технологического института вычислительной техники СО РАН в области построения беспроводных сетей заключается в конструировании дальнедействующего приемопередатчика ZigBee, позволяющего передавать данные на расстояние, в десятки раз превышающее показатели стандартных ZigBee-совместимых устройств. Создано два варианта исполнения приемопередатчика: с внешней антенной и планарной инверсной F-образной антенной (IFA). IFA принадлежит семейству антенн для низкопрофильных всенаправленных излучателей. Свое начало F-антенны берут от простейшего L-образного вибратора, расположенного в перевернутом виде (отсюда термин "инверсный") над плоским экраном. Данный приемопередатчик может выполнять функцию любого из устройств согласно спецификации ZigBee: координатора, маршрутизатора или мобильного устройства. Питание приемопередатчика может осуществляться от источников широкого диапазона напряжений, что позволяет использовать в качестве элементов питания батареи типа AAA, в случае если приемопередатчик используется как мобильное устройство, или источник напряжением до 12 В, в случае если устройство используется в качестве координатора или маршрутизатора сети.

Малые габаритные размеры приемопередатчика позволяют монтировать его в аккумуляторный отсек шахтного головного светильника. Такая комбинация позволяет оснастить персонал шахты приемопередатчиками типа мобильное устройство, не разрабатывая для этих целей какую-либо отдельную конструкцию. На рис. 3 представлен данный приемопередатчик с дополнительной антенной и дополнительной платой расширения, на которой расположены коммутационные разъемы. Разработанное устройство имеет следующие характеристики: стек протоколов – ZigBee; диапазон рабочих частот –  $2412 \div 2484$  МГц; мощность передатчика – +22 дБм; чувствительность приемника – -92 дБм; скорость передачи данных – до 250 кбит/с; дальность передачи данных ~ 500 м (шахтный ствол), ~ 1200 м (открытая местность); количество аналоговых входов – 3 шт.; количество дискретных входов – 15 шт.; ток потребления в режиме ожидания ~ 500 мкА; диапазон напряжений питания –  $2 \div 10$  В; линейные разме-

Возможность использовать недорогой стандартизованный интерфейс для передачи данных ZigBee вызвала огромный интерес профильных компаний. Так, американская компания "Mines Rescue Service Ltd" (MRSL), проведя сравнительный анализ работы передатчиков на 2.4 ГГц в условиях шахты, остановила свой выбор на использовании ZigBee для сбора данных с различных датчиков технологических установок [4]. В институте горной и топливной промышленности Индии (Institute of mining and fuel research, Dhanbad, India) разработана беспроводная информационная система контроля перемещения персонала и оборудования шахт на основе ZigBee-совместимых RFID-устройств [5]. Однако малый радиус действия примененных приемопередатчиков (50–60 м) не позволил создать сеть, охватывающую более или менее значительную часть шахты.

Китайская компания "Helicomm" на основе сети стандарта ZigBee разработала систему мониторинга персонала шахты. Данная разработка была одобрена и рекомендована к использованию в США Министерством охраны здоровья и безопасности труда на шахтах (U. S. Department of labor's mine safety and health administration) [6].

ры  $-30 \times 50$  мм; диапазон рабочих температур  $-20 \div +85$  С. В настоящее время ведутся работы по снижению уровня энергопотребления устройства в режиме ожидания, что позволит использовать данный приемопередатчик в качестве мобильного устройства, не требующего замены элементов питания в течение длительного периода времени. Предполагается увеличить срок работы без замены аккумуляторов до трех лет (в настоящее время этот срок составляет примерно один год).

Разработана также модификация приемопередатчика в корпусе IP65 с добавлением интерфейса RS-485 (рис. 4). Данные устройства легко интегрируются в существующую систему автоматизации шахты, так как для обмена данными с верхним уровнем в них используется стандартизованный протокол "Modbus RTU".

Разработанное устройство прошло испытания на открытом пространстве, в офисном здании и в шахте. На открытом пространстве при прямой видимости дальность приема (передачи) данных составила не менее 1200 м (RSSI – 85 дБм, PER 1 %). В здании получена связь сквозь железобетонные перекрытия двух этажей (RSSI – 85 дБм, PER 3 %). В шахте испытания проводились на прямом участке тоннеля протяженностью приблизительно 500 м. Устройство обеспечило устойчивую связь (RSSI – 70 дБм, PER 1 %) на всем протяжении участка, несмотря на то что значительная часть тоннеля занята металлическими конструкциями конвейера. Испытания также выявили незначительность преимущества внешней антенны по сравнению с F-антенной на плате, что позволяет отказаться от использования габаритной внешней антенны.

Исходя из результатов испытаний предлагается следующая структура беспроводной сети в условиях шахты (рис. 5): по всей протяженности тоннелей шахты устанавливаются стационарные устройства, являющиеся ZigBee-координаторами.

Вследствие того что достигнута значительная дальность передачи данных, для полного покрытия координаторы необходимо ставить не более чем через каждые 500 м (на прямом участке). В случае если тоннель имеет сложную геометрию, в местах изгиба или разветвления необходимо использовать ретранслятор. Координаторы связаны с диспетчерским пунктом на поверхности посредством проводного интерфейса RS-485.

Объекты контроля оснащаются автономными беспроводными датчиками типа "мобильное устройство", которые, находясь в режиме малого энергопотребления, измеряют и передают координатору необходимые параметры, координатор, в свою очередь, передает их в диспетчерский пункт.

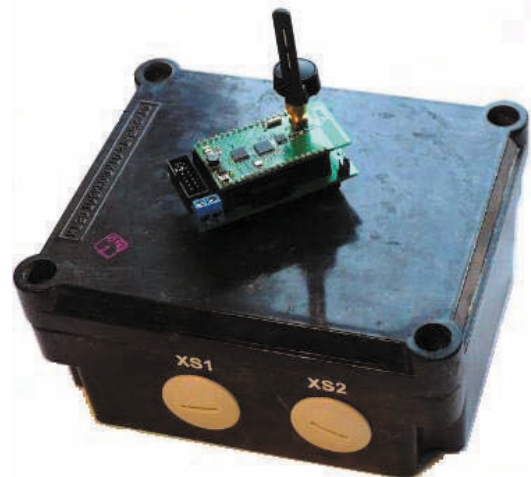


Рис. 4. Беспроводной ZigBee-приемопередатчик, разработанный Конструкторско-технологическим институтом вычислительной техники СО РАН, в корпусе IP65

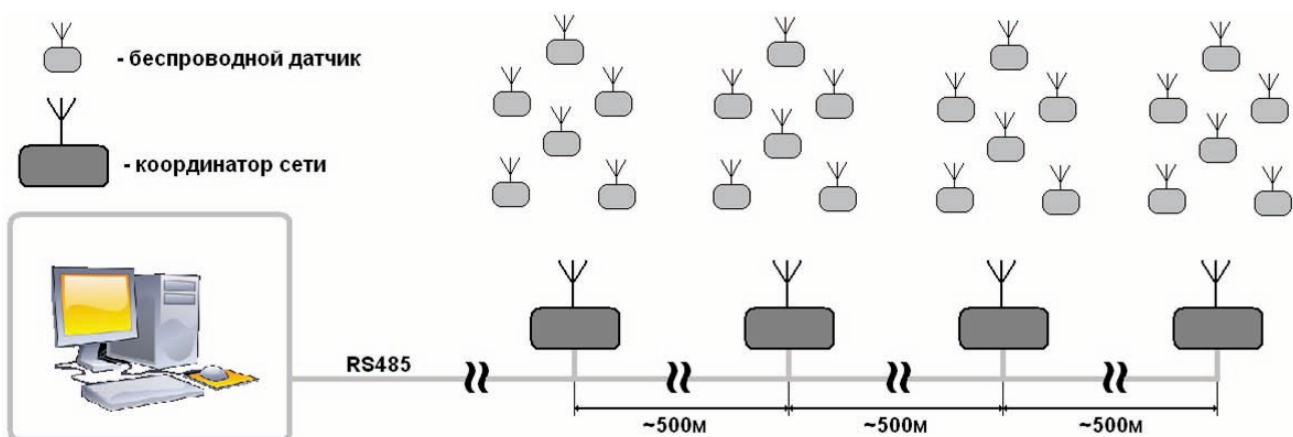


Рис. 5. Структура сети сбора данных и мониторинга персонала

Для контроля перемещения подвижных объектов (персонала, оборудования) последние оснащаются передатчиками типа "мобильное устройство". Передатчики с некоторой периодичностью отправляют уникальный номер подвижного объекта координатору, который передает номер и мощность принятого сигнала в диспетчерский пункт. Используя методику определения расстояния по величине принятого сигнала, программное обеспечение верхнего уровня отслеживает перемещение объекта. Помимо определения местоположения персонала система позволяет передавать адресные сообщения персоналу шахты в аварийных ситуациях.

Таким образом, рассмотренная беспроводная сеть может быть использована не только в системах сбора телеметрических данных и диагностики оборудования, но и в системах мониторинга подвижных объектов и адресной передачи данных персоналу шахты в аварийных ситуациях.

### Список литературы

1. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2006.pdf>.
2. KENNEDY G. A., FOSTER P. J. "High resilience networks and microwave propagation in underground mines" // Proc. of the 9th IEEE Europ. conf. of the wireless technology, Manchester (Great Britain), Sept. 2006. S. 1.: S. n., P. 193–196.
3. <http://exeter.openrepository.com/exeter/handle/10036/25360>.
4. MARK LANGDON. "ZigBee goes underground", E&T Magazine, 2009, Aug.
5. <http://ursi-test.intec.ugent.be/files/URSIGA08/papers/D01p5.pdf>.
6. <http://msha.gov/techsupp/acc/lists/menthly/2008/january2008.pdf>.

*Максим Олегович Жуков – инженер-электроник 1-й категории Конструкторско-технологического института вычислительной техники СО РАН; тел. (383) 330-12-68; e-mail: maxim.zhukov@kti.nsc.ru*  
*Анатолий Ефимович Иванов – главный специалист Конструкторско-технологического института вычислительной техники СО РАН; e-mail: ivt1303@mail.ru*  
*Иван Васильевич Меркулов – нач. отд. Конструкторско-технологического института вычислительной техники СО РАН; e-mail: merk@kti.nsc.ru*  
*Борис Витальевич Нарымский – гл. электроник Конструкторско-технологического института вычислительной техники СО РАН; e-mail: boris-nar@yandex.ru*