

## Опыт практического внедрения беспроводных сенсорных сетей

С.С. Баскаков (Компания МешЛоджик)

Рассмотрены основные особенности и сложности, которые возникают на практике при внедрении беспроводных сенсорных сетей и систем телеметрии. Описаны некоторые варианты их решения, реализованные в продукции компании МешЛоджик.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, беспроводные датчики, системы телеметрии, мониторинга и распределенного сбора данных.

### Введение

В последние годы беспроводные сенсорные сети (БСС) активно переходят из стадии научно-исследовательских работ в практическую плоскость — на рынке (в том числе в России) появляется все больше систем и отдельных продуктов, в которых в той или иной степени используются технологии БСС. Это происходит благодаря как развитию элементной базы (снижение энергопотребления, стоимости и габаритных размеров радиочастотных приемопередатчиков, микроконтроллеров и датчиков), так и появлению промышленных стандартов (например, ZigBee, 6LowPAN, ISA100.11a и др. [1]), а также возрастанию интереса к концепции Internet of Things, неотъемлемой частью которой являются БСС.

В общем случае сенсорными сетями называют беспроводные многоячейковые (mesh) сети с низкой скоростью передачи данных и сверхнизким энергопотреблением, основное назначение которых заключается в сборе показаний от распределенных в пространстве датчиков.

Главными особенностями БСС являются самоорганизация и адаптивность к условиям эксплуатации, поэтому требуются минимальные затраты при развертывании такой сети на объекте и при последующем ее сопровождении в процессе функционирования.

Поддержка многоячейковой топологии и способность узлов в случае необходимости ретранслировать сообщения других устройств обеспечивают значительную площадь покрытия системы при малой мощности передатчиков и устойчивость сети к отказу отдельных узлов или беспроводных соединений по различным причинам (появление помех или препятствий, физическое повреждение или перемещение узла и т.д.). Такой подход позволяет эксплуатировать сеть в зданиях и на промышленных объектах с неблагоприятными условиями распространения радиоволн. При этом узлы самостоятельно определяют оптимальные маршруты доставки данных и корректируют их в режиме РВ при изменении топологии сети.

Аппаратное обеспечение беспроводных узлов и протоколы се-

тевого взаимодействия между ними оптимизированы по энергопотреблению для достижения длительного срока эксплуатации системы при автономных источниках питания (батареи, аккумуляторы и т.п.). В зависимости от режима работы время жизни узла может достигать нескольких лет.

Преимущества беспроводных сенсорных сетей в целом и некоторые их особенности, которые необходимо учитывать при проектировании систем телеметрии на их основе, многократно описывались во многих публикациях (например, [2, 3]). Поэтому цель данной статьи заключается не в том, чтобы показать теоретические возможности БСС, а в описании некоторых сложностей, возникающих на практике при внедрении БСС в различных приложениях (в частности, строительный и геоэкологический мониторинг, биомедицинские технологии в сельском хозяйстве и др.), и в предложении вариантов их решения, реализованных в беспроводной системе мониторинга ML-SM и других специализированных изделиях компании «МешЛоджик» (Россия).

### Оценка качества радиоканалов

В БСС используются маломощные радиоканалы, отличающиеся значительными колебаниями и асимметрией качества связи (вероятность успешного приема пакета), причинами которых являются неравномерность затухания сигнала в сложных условиях

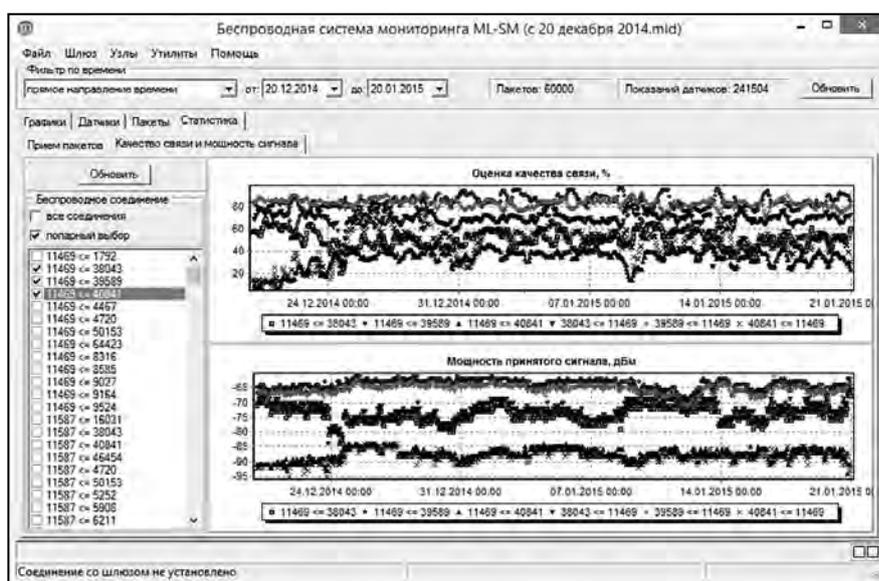


Рис. 1. Колебания качества связи и мощности принятого сигнала в радиоканалах

распространения радиоволн, случайные отклонения параметров передатчиков от номинальных значений и изменения локальной помеховой обстановки [4]. Например, на рис. 1 показаны колебания качества связи и мощности принятого сигнала в течение месяца для нескольких беспроводных соединений между узлами в системе строительного мониторинга, в которой беспроводные узлы с датчиками размещены на техническом этаже здания в окружении множества металлоконструкций. В процессе эксплуатации взаимное расположение устройств не изменяется (за исключением редких случаев переноса датчиков на другие элементы конструкции здания), но видно, что мощность принятого сигнала может колебаться в пределах 10 дБ, а вероятность успешного приема пакета — на десятки процентных пунктов.

При этом надежность беспроводных соединений между узлами сети оказывает непосредственное влияние на пропускную способность и энергопотребление узлов, так как низкое качество радиоканала приводит к возрастанию числа потерь пакетов и повторных передач, а также повышается вероятность перебора (восстановления) маршрута доставки данных, вызванного отказом одного из каналов на пути следования пакета [5]. Поэтому наличие актуальной информации о параметрах беспроводных соединений является необходимым условием для получения высоких показателей качества обслуживания БСС (в частности, срока службы автономных источников питания узлов). Следовательно, сетевой стек, используемый для реализации БСС, должен включать механизм оценки качества связи в режиме РВ.

В общем случае оценка качества радиоканала выполняется в два этапа: мониторинг параметров канала и вычисление метрики качества на основе накопленных значений. В сетевом стеке MeshLogic используется пассивный мониторинг канала, то есть в фоновом режиме анализируется только существующий в сети трафик без передачи тестовых пакетов специально для целей оценки качества радиоканалов. По сравнению с активным мониторингом (периодически передаются специальные сигнальные сообщения) данный подход минимизирует энергозатраты узлов, но при этом снижается скорость реакции на изменения в топологии сети, поэтому этот вариант применим в сетях со стационарной топологией, в которых все или большинство узлов не перемещаются, а параметры окружающего пространства изменяются медленно.

Следует также учитывать, что для получения адекватной оценки качества связи необходимо проанализировать статистику по нескольким десяткам пакетов, поэтому при пассивном мониторинге и низкой интенсивности сетевого трафика эта процедура занимает длительное время. Но на практике в некоторых приложениях беспроводные узлы могут большую часть времени находиться вне зоны досягаемости других узлов сети, а возможность для передачи данных (связь с другими узлами) у них появляется только

на небольшом интервале времени. В этом случае использовать стандартный подход с пассивным мониторингом нецелесообразно, поскольку полученные оценки качества связи будут некорректны (не будут отражать актуальное состояние канала), а применение активного мониторинга приведет к возрастанию энергопотребления узла, что также крайне нежелательно. В таких случаях, как правило, достаточно учитывать только мощность принятых сигналов (RSSI — received signal strength indicator) в качестве грубой, но быстрой оценки качества беспроводного соединения.

Возможны также ситуации, в которых топология сети полностью стационарна и связность сети всегда сохраняется, но для получения максимально длительного срока службы автономных источников питания узлов сетевой трафик очень низкий (например, узлы передают пакеты с периодом в несколько часов). Тогда время переходного процесса при оценке качества связи с пассивным мониторингом может достигать нескольких суток, поэтому узлы будут не в состоянии своевременно отслеживать возможные изменения в сети (например, отключение соседнего узла для технического обслуживания или его выход из строя). Следовательно, в подобных системах нет смысла использовать сложные механизмы оценки качества радиоканалов, а целесообразно также ориентироваться на более простую метрику — мощность принятого сигнала.

Таким образом, специфика прикладных задач накладывает свои ограничения на методы анализа качества связи, но в любом случае оценка надежности радиоканалов является важным элементом эффективной БСС, поэтому лежащий в основе сетевой стек должен обладать достаточной гибкостью для учета особенностей конкретного приложения.

#### Диапазоны радиочастот

До последнего времени подавляющее большинство сетевых стеков и аппаратных платформ (в том числе решения MeshLogic) для БСС использовали частотный диапазон 2400...2483,5 МГц по нескольким взаимосвязанным причинам.

Во-первых, диапазон 2,4 ГГц является нелицензируемым в большинстве стран мира, поэтому оборудование, ориентированное на этот диапазон, получает максимально широкий рынок сбыта без необходимости адаптации под требования регулирующих органов той или иной страны.

Во-вторых, производители полупроводниковой элементной базы для радиоканалов малого радиуса

Таблица 1. Параметры оборудования «МешЛоджик» для диапазонов 868 МГц и 2,4 Гц

	868	2,4
	868,7...869,2	2400...2483,5
	4	16
	25	100
	-110	-98

действия также долгое время отдавали предпочтение именно диапазону 2,4 ГГц, поэтому в этом диапазоне в первую очередь появлялись интегральные радиочастотные приемопередатчики, реализующие современные цифровые методы манипуляции с пакетной передачей данных, низким энергопотреблением, стоимостью и габаритными размерами.

В-третьих, относительно большая выделенная ширина полосы в диапазоне 2,4 ГГц (> 80 МГц) позволяет гибко выбирать между скоростью передачи данных, дальностью радиосвязи и помехоустойчивостью, а также упрощает задачу частотного планирования.

Однако практика показала, что во многих условиях применения БСС (например, в лесном массиве) эффективнее использовать более длинноволновые диапазоны (до 1 ГГц), поскольку меньше затухание и рассеивание сигнала. Именно поэтому в настоящее время оборудование MeshLogic, предназначенное для построения беспроводных систем телеметрии, выпускается не только для диапазона 2,4 ГГц, но и для частотного диапазона 868,7...869,2 МГц, который также является нелицензируемым в России. В табл. 1 указаны некоторые технические параметры устройств для данных диапазонов. Видно, что по сравнению



Рис. 2. Беспроводной узел ML-SM-N

с 2,4 ГГц в диапазоне 868 МГц меньше выходная мощность передатчиков (ограничения в соответствии с требованиями ГКРЧ) и доступно меньшее число частотных каналов, но при этом выше чувствительность приемника.

Очевидно, что невозможно однозначно назвать частотный диапазон, который был бы оптимален во всех приложениях БСС, поэтому при выборе решения для построения беспроводной системы телеметрии следует ориентироваться на платформы, которые представлены в различных частотных диапазонах.

### Система измерения

В зависимости от прикладной задачи технология БСС может эффективно использоваться для сбора показаний самых различных датчиков. Для демонстрации в табл. 2 приведены некоторые примеры реальных областей применения решений «МешЛоджик» и виды используемых в них датчиков. При этом перечисленные типы датчиков значительно отличаются как по выходным сигналам, так и требованиями к питанию. Кроме того, каждый беспроводной узел, как правило, должен обслуживать несколько разнотипных датчиков для корректной постобработки результатов измерений.

Следовательно, современное оборудование для построения систем телеметрии на основе БСС должно обладать достаточной гибкостью и универсальностью, чтобы быть адаптированным к требованиям конкретной прикладной задачи с минимальными затратами. По этой причине беспроводные узлы ML-SM-N (рис. 2) имеют модульную конструкцию: в узел может быть установлено в произвольном порядке и комбинациях до четырех мезонинных модулей сопряжения ML-SM-Sx (рис. 3), к каждому из которых возможно подключение 1...16 датчиков. В табл. 3 указаны разработанные на текущий момент модули сопряжения и совместимые с ними типы датчиков, но номенклатура датчиков может быть расширена путем создания новых модулей.

Модульный принцип комплектации беспроводных сенсорных узлов обеспечивает следующие преимущества:

- на этапе проектирования системы телеметрии возможно подобрать оптимальный по стоимости и техническим характеристикам набор оборудования в зависимости от типов и мест размещения датчиков;

Таблица 2. Типы датчиков в некоторых приложениях БСС

	•
	•
	•
	•
	•
	• ( , )
	•
	•
	•
	• pH (Redox) ( )

Таблица 3. Модули сопряжения ML-SM-Sx

ML-SM-SB		1	3
ML-SM-SP		4	3
ML-SM-STC	( )	2	-
ML-SM-SRTD		2	500
ML-SM-SVA	±10 0...20	3	4...36
ML-SM-S1W	1-Wire I2C	16	3,3 5
ML-SM-SRS	RS-232 RS-485	16	4...36

- возможность замены или добавления модулей сопряжения в процессе эксплуатации снижает затраты на модернизацию системы или изменение ее функций;

- обслуживание каждым узлом нескольких датчиков (в том числе разнотипных) снижает стоимость оборудования сбора данных в пересчете на одну точку измерения (контроля), а также повышает точность результатов измерения (например, позволяет реализовать температурную компенсацию и т. д.).

В большинстве приложениях БСС беспроводные узлы должны в течение длительного времени (от нескольких месяцев до нескольких лет) работать от автономных источников питания, обеспечивая как собственное электропитание, так и питание подключенных к ним датчиков. В частности, для питания внешних датчиков беспроводные узлы ML-SM-N формируют либо фиксированное напряжение 3 В, либо регулируемое напряжение 4...36 В постоянного тока при нагрузочной способности 1 Вт на каждый модуль сопряжения, что обеспечивает совместимость с большинством применяемых датчиков. При этом основным источником питания узлов ML-SM-N являются встроенные литиевые батареи, но возможно дополнительно подключить внешний источник (например, батарею большей емкости или стационарный блок питания).

При проектировании беспроводной системы телеметрии следует учитывать, что для снижения среднего энергопотребления питание датчиков осуществляется в импульсном режиме, то есть питание подается на датчик только на время опроса, а в остальное время датчик выключен. Однако для некоторых моделей датчиков подобный вариант электропитания неприменим из-за их большой инерционности и длительного (сопоставимого с периодом измерения) выхода на режим после включения. При этом потребляемая мощность таких датчиков может достигать нескольких ватт, поэтому потребуется внешний дополнительный источник питания, что накладывает ограничения на места установки беспроводных узлов. Следовательно, на этапе проекта нужно учитывать особенности электропитания предполагаемых к использованию датчиков, отдавая предпочтение тем из них, которые допускают импульсный режим питания, при прочих равных характеристиках (диапазон измерения, точность и т. д.).

Очевидно, встречаются ситуации, когда выбор датчиков ограничен. Например, в проекте геоэкологического мониторинга применяются уникальные датчики газа, фиксирующие очень малые концентрации водорода (диапазон измеряемых концентраций сотни ppm). Но датчики потребляют 100 мА от 12 В постоянного тока, а время выхода на режим составляет порядка 15 мин. При этом требуется обеспечить срок службы автономных элементов питания  $\geq 1$  мес. при периоде измерения 1 час. Для решения поставленной

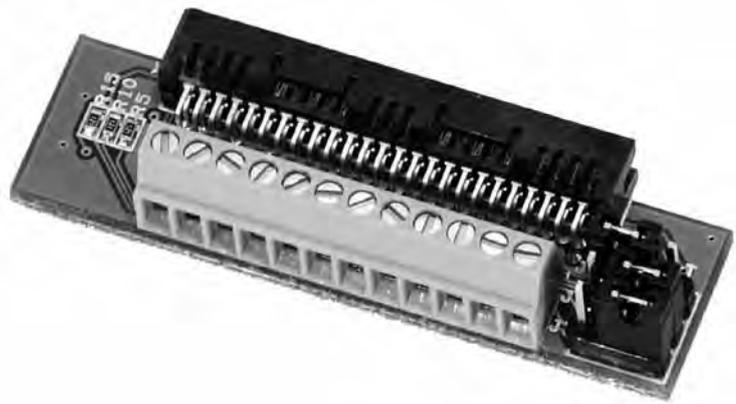


Рис. 3. Модуль сопряжения ML-SM-SVA

задачи беспроводной узел ML-SM-N в начале очередного периода опроса через реле подает на датчик газа электропитание от внешнего свинцового аккумулятора (номинальное напряжение 12 В, емкость 18 Ач), после ожидания 15 мин снимает показания и снова выключает питание датчика, то есть узел выполняет коммутацию внешнего источника питания датчика для снижения среднего потребления.

Помимо совместимости с различными типами выходных сигналов и диапазонами напряжения питания датчиков, еще одним требованием к системе измерения узла БСС является поддержка различных режимов опроса датчиков для того, чтобы, с одной стороны, обеспечить необходимую степень детализации наблюдения за объектом мониторинга, а с другой — минимизировать время активности датчиков для экономии энергии. С этой целью, например, в беспроводных узлах ML-SM-N режим измерения для каждого слота (модуля сопряжения) настраивается по отдельности. Например, возможно задать следующие параметры опроса датчиков:

- слот № 1 — датчики, подключенные модулю сопряжения в слоте № 1, опрашиваются каждые 15 мин;
- слот № 2 — каждые 4 ч (в 00:00, 04:00, 08:00, 12:00 и т. д.) с периодом 1 с выполняется выборка из 50 отсчетов по датчикам, подключенных к слоту № 2;
- слот № 3 — два раза в сутки (в 7:00 и 19:00) с периодом 5 с опрашиваются датчики, подключенные к слоту № 3, с объемом выборки 25 отсчетов.

#### Способы повышения надежности

Как правило, при обсуждении БСС предполагается, что сеть имеет многоячеюковую топологию, в которой каждый узел имеет несколько соседей, то есть обеспечивается коммуникационная избыточность, что в сочетании со способностью узлов самостоятельно автоматически определять альтернативные пути доставки информации в обход поврежденных элементов сети обеспечивает высокий уровень надежности и отказоустойчивости системы телеметрии. Во многих приложениях это действительно имеет место, но практический опыт внедрения БСС диктует необходимость учитывать следующие обстоятельства.

В типовых беспроводных системах сбора данных множество сенсорных узлов периодически (или по какому-то более сложному сценарию) опрашивают подключенные к ним датчики и передают по радиоканалу результаты измерений шлюзу, который в свою очередь предоставляет собранные данные вышестоящим системам по различным проводным или беспроводным каналам связи. То есть информация от многих источников поступает в одну точку сбора, поэтому надежность всей системы телеметрии зависит от степени доступности шлюза. Для снижения этой зависимости рекомендуется использовать в системе несколько шлюзов, при этом в зависимости от требований прикладной задачи узлы могут передавать пакеты только ближайшему шлюзу или всем шлюзам для резервирования данных. Кроме того, установка в сети нескольких шлюзов позволяет более равномерно распределить сетевой трафик между узлами, чтобы их элементы питания разряжались примерно с одинаковой скоростью. Например, в беспроводной системе мониторинга ML-SM может быть 1...4 шлюзов.

В нашей практике есть задачи, в которых часть узлов сети большую часть времени не имеют возможности передать телеметрическую информацию из-за отсутствия связи с каким-либо другим узлом, а в зону радиовидимости соседей такие узлы попадают ненадолго в случайное время суток. При этом требуется, чтобы узлы постоянно с заданным периодом выполняли измерения независимо от доступности радиоканала, а телеметрическая информация поступала на шлюз в полном объеме. Для этого в беспроводных узлах предусмотрен встроенный кольцевой буфер для хранения результатов измерений (например, в узлах ML-SM-N размер буфера составляет 128 отсчетов), содержимое которого асинхронно передается по радиоканалу при появлении возможности. Естественно, в этом случае режим РВ не обеспечивается,

но телеметрическая информация поступает на сервер в полном объеме (при условии, что буфер не переполняется), что является основным требованием для большинства систем мониторинга.

### Заключение

Интерес к технологиям БСС постоянно возрастает, поскольку их применение позволяет решать задачи, в которых использование традиционных проводных каналов связи ограничено или невозможно по техническим, экономическим или организационным причинам. Но пока опыт практического использования подобных систем относительно мал, а каждая новая прикладная задача имеет свои особенности, поэтому на текущем этапе развития данного направления сложно говорить о наличии типовых решений в различных приложениях. Тем не менее, даже накопленный опыт позволяет утверждать, что беспроводные системы телеметрии на основе БСС являются эффективным средством мониторинга в различных областях применения.

### Список литературы

1. Аристова Н.И. Беспроводная связь в промышленной автоматизации: современные стандарты и области применения // Автоматизация в промышленности. 2013. № 1.
2. Баскаков С.С. Беспроводные сенсорные сети: вопросы и ответы // Автоматизация в промышленности. 2008. № 4. С. 34-35.
3. Баскаков С.С. Построение систем телеметрии на основе беспроводных сенсорных сетей // Автоматизация в промышленности. 2012. № 12. С. 30-36.
4. Баскаков С.С. Надежность радиочастотного цифрового канала связи при крупномасштабном замирании и случайном разбросе параметров приемопередатчиков // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 12. С. 47-54.
5. Баскаков С.С., Читаев Д.Е. Оценка качества радиоканала в беспроводных сенсорных сетях // Беспроводные технологии. 2013. № 3. С. 72-74.

*Баскаков Сергей Сергеевич – канд. техн. наук, генеральный директор компании MeshLogic.*

*Контактный телефон: (495) 920-20-80.*

*E-mail: baskakov@meshlogic.ru*

### «ЭРБИЙ 1002» – беспроводной термометр с аналоговым выходом

#### Передатчик:

- Внешний термодатчик ТСМ-50
- Измерение от -5 до +115 °С
- Точность не хуже 1 °С
- Измерения раз в 5/10/20/40 с.
- Питание от двух элементов АА (до 5 лет без замены батарей)
- Класс защищенности – IP65
- Дальность связи до 10 метров
- Адресная идентификация с приемником (16 адресов)

#### Приемник:

- Выходы 0-1 и 0-10 Вольт на терморегулятор или регистратор
- Выдача сигнала «отказ датчика»
- Питание от напряжения 24 В

*Отличное решение для измерения температуры там, где прокладка проводов невозможна или нежелательна (подвижные объекты, герметичные камеры, удаление от объекта и пр.)!*

Подробнее: +7-917-205-41-03; <http://mcprogramming.ru/1002>

