

Принятие оптимальных решений

при проектировании сетей датчиков

Харди Шмидбауэр
(Hardy Schmidbauer)

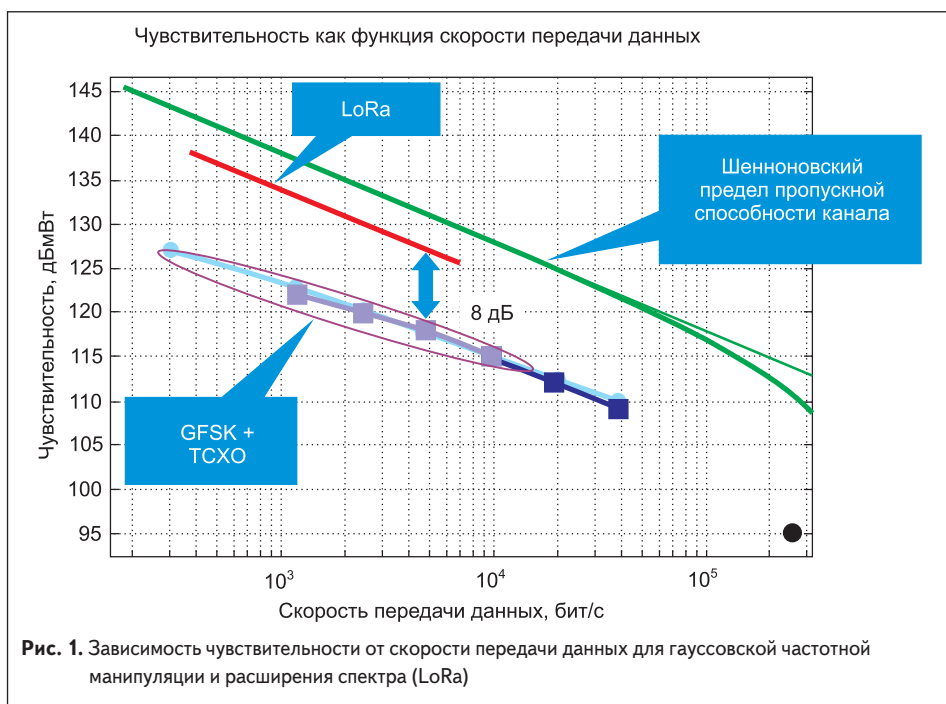
Распространение экономически эффективных технологий беспроводной связи и широкая доступность системных решений привели к резкому росту применения сетей датчиков и так называемого «интернета вещей» (Internet of Things, IoT). Цель производителей беспроводных систем — обеспечить возможность создания устойчивых сетей связи с максимальным временем автономной работы узлов и как можно большим радиусом действия. Многие из этих сетей состоят из простых узлов, собирающих и передающих ограниченное количество данных на центральный контроллер или концентратор. В статье рассматриваются предложения по улучшению характеристик систем на базе традиционных технологий, а также описывается новая технология, способная оптимизировать параметры будущих систем.

Скорость передачи данных и радиус действия

Скорость передачи данных — ключевой конструктивный параметр, который непосредственно влияет на многие характеристики системы. Радиус действия приемопередатчика определяется суммой чувствительности приемника и выходной мощности передатчика.

Эту сумму часто называют энергетическим потенциалом канала связи (link budget). На выходную мощность накладываются нормативно-законодательные ограничения, что оставляет чувствительность приемника в качестве единственного конструктивного параметра, на который сильно влияет скорость передачи данных. Для всех схем модуляции справедливо следующее: чем ниже скорость передачи данных, тем меньше потребная полоса пропускания приемника и тем выше его чувствительность. Частотная манипуляция (Frequency Shift Keying, FSK) и, в частности, гауссовская частотная манипуляция (Gaussian Frequency Shift Keying, GFSK) — наиболее широко применяемые схемы модуляции в современных экономически эффективных приемопередатчиках беспроводной связи. Сужение полосы пропускания системы, в которой применяется частотная манипуляция, возможно только до уровня частотной погрешности генератора опорной частоты или кварцевого резонатора (XTAL). Если не уделять внимания этому параметру, результирующий сдвиг частоты может легко превысить ширину полосы пропускания приемника. Погрешность недорогих кварцевых резонаторов составляет обычно порядка 20 ppm (2×10^{-5}), что при несущей частоте 868 или 915 МГц ограничивает скорость передачи данных значением 20 кбит/с, а чувствительность приемника — уровнем -112 дБмВт. Можно добиться и более высокой чувствительности, но для этого необходим кварцевый генератор с температурной стабилизацией (ТСХО), который обычно примерно втрое дороже кварцевого резонатора.

В некоторых других областях уже в течение ряда лет для этих целей используется расширение спектра, но до сегодняшнего момента не существовало недорогого решения, которое было бы пригодным для применения в сетях датчиков. Представленные на рынке доступные по цене решения, предназначенные для расширения спектра, способны обеспечить прирост чувствительности на 8–10 дБ при эквивалентной скорости передачи данных по сравнению с системой, в которой используется частотная манипуляция. В новом семействе приемопередатчиков SX127x компании Semtech в дополнение к традиционной гауссовской частотной манипуляции реализована технология расширения спектра под торговой маркой LoRa (Long Range). На рис. 1 показана зависимость чувствительности от скорости передачи данных для гауссовской частотной манипуляции и расширения спектра (LoRa)



Некоторые схемы модуляции с расширением спектра гораздо менее чувствительны к сдвигу частоты, вызванному погрешностью кварцевого резонатора, и позволяют достичь чувствительности, близкой к -140 дБмВт при полосе пропускания приемника 125 кГц с использованием недорогого кварцевого резонатора, имеющего погрешность 20 ppm. Это дает практически осуществимый прирост чувствительности на 30 дБ по сравнению с частотной манипуляцией, что теоретически выливается в пятикратное увеличение радиуса действия. Вместе с тем существует противоречие между максимизацией радиуса действия за счет снижения скорости передачи данных и продлением времени автономной работы от батареи. От скорости передачи данных зависит время работы в эфире: чем выше скорость передачи данных, тем меньше времени приходится тратить системе на передачу или прием данных. При скорости передачи данных 50 кбит/с приемопередатчик должен пробить во включенном состоянии примерно вдвое дольше, чем на скорости 100 кбит/с. Чем выше скорость передачи данных, тем больше узлов можно расположить рядом без конфликтов между ними, но тем ниже будет чувствительность и достижимый радиус действия. В каждом приемопередатчике предусмотрен ряд активных режимов и режимов ожидания с разным энергопотреблением. Какие из этих режимов в наибольшей степени отразятся на энергопотреблении, зависит от рабочего цикла приема-передачи данных узла. Например, если узел часто принимает данные, важен ток в режиме приема. Если же узел передает данные лишь один раз в день — наиболее значимым фактором станет ток режима ожидания.

Выбор диапазона частот

Учитывая популярность ряда стандартов беспроводной связи, использующих диапазон $2,4$ ГГц (а именно Bluetooth, Wi-Fi и ZigBee), многие производители полагают, что они должны использовать стандартный протокол, а $2,4$ ГГц — стандарт де-факто на частоту передатчика. Это справедливо для некоторых областей применения, где применение общепринятого протокола обусловлено объективными требованиями рынка. Например, Wi-Fi обеспечивает универсальную связь с высокой скоростью передачи данных, а Bluetooth — совместимость с изделиями массового потребительского рынка, такими как сотовые телефоны и компьютерные принадлежности. Но во многих сферах необходимая скорость передачи данных относительно невелика, а работа происходит в закрытой беспроводной сети. В этих случаях проприетарный протокол позволяет существенно снизить себестоимость системы за счет более простой реализации, сокращения потребных вычислительных ресурсов и исключения расходов, связанных с испытаниями на соответствие стандартам и лицензированием логотипов. На некоторых рынках практикуется одновременное использование нескольких технологий беспроводной связи. Так, автоматизированные счетчики потребления коммунальных услуг действуют в субгигагерцовом диапазоне для транзитной передачи данных на дальние расстояния по беспроводному каналу и в диапазоне $2,4$ ГГц

для связи между счетчиком и абонентскими устройствами. В домашних охранных системах субгигагерцовый диапазон предназначен для датчиков с низкой скоростью передачи данных, а диапазон $2,4$ ГГц — для видеокамер с высокой скоростью передачи данных. Участники ряда рынков еще не определились окончательно с протоколами беспроводной связи. В частности, в существующих системах автоматизации дома применяются субгигагерцовые частоты, но сейчас появляются и новые системы, работающие в диапазоне $2,4$ ГГц. У каждого из этих диапазонов — субгигагерцового и $2,4$ ГГц — есть свои достоинства и недостатки. Основными преимуществами диапазона $2,4$ ГГц являются доступность и соответствие нормативно-законодательным требованиям в общемировом масштабе, а также малые размеры антенны. Антенна диапазона $2,4$ ГГц по своим габаритам втрое меньше антенны на 900 МГц и дешевле благодаря широкому распространению устройств, использующих стандарты Bluetooth и Wi-Fi. Главный недостаток диапазона $2,4$ ГГц, который нередко ограничивал его применение в сетях датчиков и «интернете вещей», — ограниченный радиус действия: потери в окружающей среде здесь примерно на 9 дБ выше, чем на частоте 900 МГц. К тому же спектр в диапазоне $2,4$ ГГц перегружен, и в нем возможны значительные помехи от устройств Wi-Fi и Bluetooth, а также микроволновых печей. В таблице кратко перечислены сравнительные преимущества и недостатки диапазона $2,4$ ГГц и субгигагерцового диапазона.

Новые технологии модуляции на основе расширения спектра могут изменить соотношение преимуществ и недостатков обоих диапазонов. Расширение спектра позволяет компенсировать потерю 9 дБ в тракте передачи данных, в результате чего системы диапазона $2,4$ ГГц по своему радиусу действия становятся эквивалентными системам субгигагерцового диапазона с частотной манипуляцией. Ввиду свойств модуляции, применяемой при расширении спектра, эта технология гораздо более устойчива к помехам, чем широко распространенная частотная манипуляция (в том числе гауссовская). Выигрыш в 30 дБ по подавлению помех от соседнего канала и значительно более высокие избирательность и способность к блокированию помех обеспечивают надежную работу в диапазоне $2,4$ ГГц. Сигналы, передаваемые с расширением спектра на базе разных последовательностей, могут быть ортогональными, что позволяет одновременно передавать разные сигналы по одному каналу. Это свойство предо-

ставляет возможность значительно повысить пропускную способность сети по сравнению с существующими системами, использующими частотную манипуляцию.

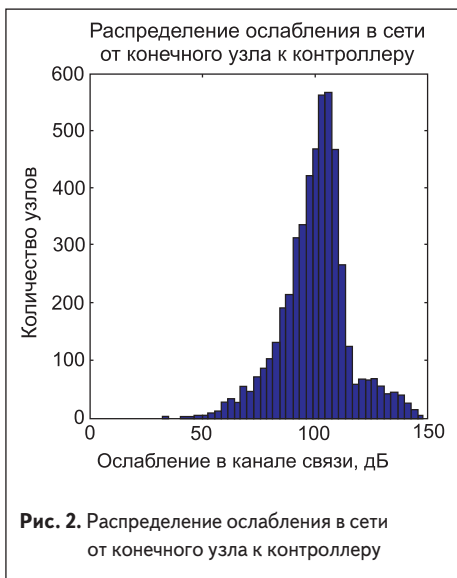
Архитектура сети и протокол

Ключевым фактором, определяющим общие характеристики сети, является также выбор между звездообразной и ячеистой топологией. Звездообразная топология — это простейшая архитектура с наименьшей задержкой. Обычно ее выбирают, если каждый узел способен непосредственно взаимодействовать с главным контроллером. В звездообразной сети при использовании простого протокола легко рассчитать длительность автономной работы каждого узла от батареи. Ячеистую топологию выбирают в основном тогда, когда звездообразная топология не обеспечивает достаточного радиуса действия. Для увеличения радиуса в этом случае применяется транзитная передача данных. Транзитная передача между узлами усложняет всю архитектуру и увеличивает задержку в системе. В большой системе бывает трудно предсказать требуемое количество транзитных скачков, что делает оценку времени автономной работы ненадежной. Маршрутизация между всеми узлами, автоматическое распознавание, самовосстановление и исключение отказа всей сети в результате отказа одного узла — вот основные трудности, с которыми приходится сталкиваться при построении ячеистой сети. К счастью, на рынке есть многочисленные решения, позволяющие преодолеть подобные затруднения. Разработанный компанией Virtual Extension метод синхронной лавинной маршрутизации [1] облегчает установку, настройку и распознавание узлов, представляя собой простое в использовании решение для создания ячеистых сетей малого и большого размера с низким энергопотреблением.

На время автономной работы может также влиять общее количество узлов в сети. При наличии сотен узлов, соревнующихся друг с другом за доступ к контроллеру, возникает существенное число конфликтов и повторных попыток передачи в зависимости от частоты сеансов связи. Повторные попытки влекут непроизводительный расход энергии и затрудняют предсказание времени автономной работы. Оценка потенциальных конфликтов — важный шаг при проектировании устойчивой сети датчиков. Например, если каждому узлу достаточно передавать всего несколько байт данных дважды в день, их сеансы связи можно разнести по времени, снизив вероятность конфликтов или полностью устранив их.

Т а б л и ц а . Основные преимущества и недостатки диапазона $2,4$ ГГц и субгигагерцового диапазона

Ключевой фактор	Преимущество	Примечания
Радиус действия	< 1 ГГц	На частоте $2,4$ ГГц потери в тракте передачи на 9 дБ выше, чем на частоте $868/915$ МГц
Размеры антенны	$2,4$ ГГц	Антенна на $2,4$ ГГц втрое меньше субгигагерцовой антенны
Применение во всем мире	$2,4$ ГГц	Открытый (доступный) диапазон во всем мире
Нормативно-законодательные ограничения	$2,4$ ГГц	В случае ETSI в диапазоне $2,4$ ГГц действуют менее жесткие ограничения на рабочий цикл
Помехи	< 1 ГГц	В диапазоне $2,4$ ГГц больше помех из-за Wi-Fi и Bluetooth, но спектр в субгигагерцовых диапазонах постепенно заполняется



Если же каждый узел должен постоянно передавать на контроллер длинный поток данных, даже при небольшом количестве узлов будут серьезные конфликты при условии, что скорость передачи данных мала.

Преимущества расширения спектра в части радиуса действия, возможности одновременной передачи по одному каналу, подавления помех от соседнего канала и избирательности позволяют реализовывать альтернативные системные решения с более высокими характеристиками, которые были недостижимы при частотной манипуляции. За счет повышения эквивалентной скорости передачи данных при расширении

спектра можно легко увеличить пропускную способность существующей ячеистой сети, но оптимальные характеристики систем обеспечит все же звездообразная топология. В условиях, когда радиус действия в пригородных районах составляет 8–10 км, больше нет необходимости использовать ячеистую топологию для обеспечения широкого покрытия в крупной сети. Чтобы достичь широкого радиуса действия, скорость передачи данных должна быть низкой, но обычно лишь малой доле узлов требуется максимальный энергетический потенциал канала связи. На рис. 2 показано типовое распределение энергетического потенциала каналов связи в крупной сети между контроллером и конечными узлами. Если бы каждый узел в системе работал на очень низкой скорости передачи данных, это бы приводило к конфликтам и ограничивало общую пропускную способность сети. Узлы, расположенные вблизи от главного контроллера, могут передавать данные на гораздо большей скорости, за счет чего время работы их приемопередатчиков будет минимальным.

Многоканальный концентратор с множеством модемов может регулировать скорость передачи данных и выходную мощность каждого узла, максимизируя пропускную способность сети и время автономной работы от батарей. Изменение скорости передачи данных при передаче с расширением спектра подразумевает использование разных коэффициентов расширения. Этот метод повышает общую пропускную способность сети, так как сигналы с различными коэффициентами расширения способны сосуществовать в одном канале.

С помощью средств моделирования сетей можно легко показать, что звездообразная сеть, в которой находят применение эти методы, дает значительный выигрыш по сравнению с системой, где используется частотная манипуляция при фиксированной скорости передачи данных: 95% узлов в такой сети потребляют 1/10 общей мощности, а ее общая пропускная способность повышается в 5–6 раз.

Заключение

Итак, основными параметрами, от которых зависят характеристики сетей датчиков, являются скорость передачи данных, диапазон частот и топология сети. Выбор скорости передачи данных решающим образом влияет на радиус действия системы и время ее автономной работы от батарей. Определяя, какой диапазон частот необходим, следует сопоставить целевое назначение системы с преимуществами и недостатками различных диапазонов. Выбор топологии сети в системе с частотной манипуляцией обуславливается потребным радиусом действия и количеством узлов в системе. Новые экономически эффективные приемопередатчики семейства LoRa компании Semtech, использующие технологию расширения спектра, изменяя параметры оптимизации при проектировании, позволяя реализовывать более простые системы с увеличенным радиусом действия, более длительным временем автономной работы и большей пропускной способностью сети. ■

Литература

1. www.virtual-extension.com/