

СТАНДАРТ ZigBee И ПЛАТФОРМА MeshLogic: ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАРШРУТИЗАЦИИ В РЕЖИМЕ "МНОГИЕ К ОДНОМУ"

В статье предложена модель беспроводного канала связи, описывающая физический уровень стандарта IEEE 802.15.4 в условиях замирания и при наличии случайных отклонений параметров приемопередатчиков от номинальных значений. На основе данной модели выполнена приближенная к реальным условиям эксплуатации оценка эффективности протоколов маршрутизации стандарта ZigBee и платформы MeshLogic. Кроме того, продемонстрировано влияние особенностей маломощных беспроводных каналов на характеристики алгоритмов маршрутизации.

В последнее время беспроводные технологии связи активно развиваются в различных направлениях. Среди них одним из наиболее новых и перспективных являются беспроводные сенсорные (датчиковые) сети. Обычно под беспроводной сенсорной сетью (БСС) понимается беспроводная многоячейковая (mesh) сеть с низкой скоростью передачи данных и сверхнизким энергопотреблением. Такие сети имеют множество применений – для автоматизации зданий, в промышленной автоматике, в системах безопасности и обороны, в здравоохранении и др.

В области БСС единственным установившимся стандартом сегодня является ZigBee. Однако процесс стандартизации продолжается, в частности, развиваются и другие спецификации. Так, недавно была принята спецификация WirelessHART, являющаяся частью 7-й версии стандарта HART, в процессе разработки находится стандарт ISA SP100.11a. Существуют также частные решения, например, SmartMesh компании Dust Networks, MeshScape от Millennium Net и SensiNet от Sencicast. Одним из таких решений является российская разработка – платформа MeshLogic (www.meshlogic.ru).

Аппаратно-программная платформа MeshLogic предназначена для создания беспроводных сенсорных сетей под различные прикладные задачи. В платформе MeshLogic на физическом уровне используется стандарт IEEE 802.15.4, а отличие от других решений заключается в собственном стеке сетевых протоколов, который обеспечивает следующие ключевые преимущества:

- полностью многоячейковая топология сети;
- все узлы равноправны и являются маршрутизаторами;
- самоорганизация и автоматический поиск маршрутов;
- устойчивость к соканальной интерференции;
- высокая масштабируемость и надежность доставки данных;
- возможна работа всех узлов от автономных источников питания.

Краткий сравнительный анализ платформы MeshLogic с решениями на базе ZigBee по различным критериям приведен в работе [1]. В данной статье мы сравним протоколы маршрутизации ZigBee и MeshLogic, поскольку маршрутизация пакетов является одной из наиболее важных составляющих любого стека сетевых протоколов, оказывая значительное влияние на показатели качества обслуживания сети.

Рассматриваемый тип трафика "многие к одному", при котором все устройства сети передают пакеты в одну точку сбора (базовая станция, шлюз и т.п.), характерен для многих задач распределенного сбора информации (например, системы мониторинга). Поэтому оценка эффективности механизмов маршрутизации в данном режиме имеет важное практическое значение.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК

Сравнение механизмов маршрутизации выполнено с помощью имитационного моделирования сетей с многоячейковой топологией, узлы и точка сбора случайно распределены на двумерной плоскости (рис.1). Оценка характеристик выполнена для следующего сценария работы сети. Все узлы работают на автономном источнике питания с одинаковой начальной емкостью, а точка сбора имеет стационарное питание. После первоначальной конфигурации сети (обнаружение соседей и т.п.) все узлы начинают периодическую передачу пакетов данных в точку сбора, используя соответствующий алгоритм маршрутизации (ZigBee или MeshLogic).

Под стандартом ZigBee подразумевается версия 2006 года [2] в сочетании с наиболее полным и функциональным дополнением "ZigBee PRO Feature Set". Этот набор включает в себя поддержку трафика типа "многие к одному" для простого поиска маршрутов с минимальной стоимостью и учет асимметрии качества связи между узлами. Точка сбора информации – PAN-координатор, все узлы сети являются маршрутизаторами (оконечных устройств нет). Таким образом, для сравнения выбрана наилучшая конфигурация стека ZigBee для рассматриваемой задачи.

В платформе MeshLogic все узлы эквивалентны и являются маршрутизаторами, функциональные отличия узлов определяются только прикладным уровнем. В данном случае один из узлов назначается точкой сбора, а остальные узлы передают ему пакеты данных.

Для наглядной демонстрации влияния особенностей маломощных каналов связи на характеристики протоколов маршрутизации рассмотрено два варианта моделей беспроводного канала связи:

- модель идеального канала связи – пакет успешно принимается только при условии, что расстояние между передатчиком и приемником меньше некоторого фиксированного радиуса радиосвязи r ;
- модель реального канала связи – физический уровень стандарта IEEE 802.15.4 в условиях замирания и при наличии случайных отклонений параметров приемопередатчиков от номинальных значений.

Для сравнения выбраны следующие критерии оценки протоколов маршрутизации:

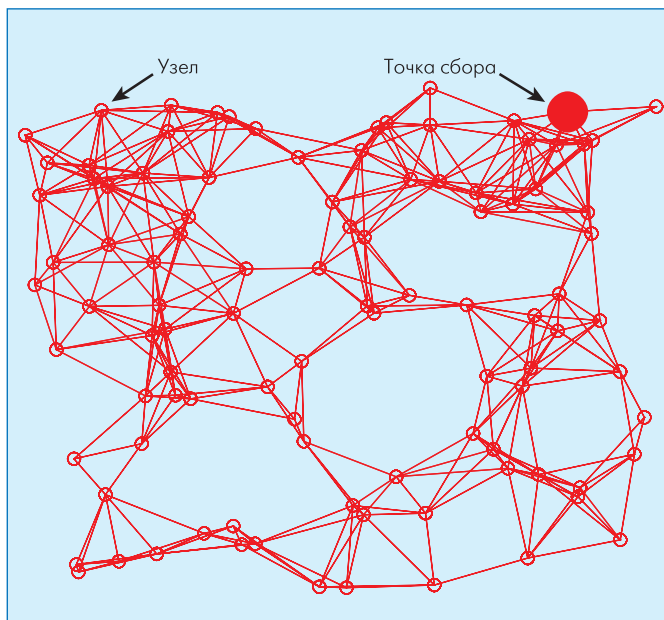


Рис.1 Пример топологии сети

- эффективность по трафику η_T – отношение объема полезного трафика к общему объему трафика в сети;
 - эффективность по энергии η_E – общее число принятых точкой сбора пакетов данных до первого выхода из строя какого-либо узла по причине истощения источника энергии.
- Эффективность по трафику рассчитывается по формуле

$$\eta_T = \frac{L_{data} T}{L_{data} T_{data}^{\Sigma} + L_{ack} T_{ack}^{\Sigma}},$$

где L_{data} и L_{ack} – длина пакетов данных и подтверждения, соответственно (байт); T – общее число пакетов данных, принятых точкой сбора; T_{data}^{Σ} и T_{ack}^{Σ} – суммарное число переданных в сети пакетов данных и подтверждения, соответственно. Причем отдельно считается каждый пакет, переданный между двумя узлами. Так, если пакет передается в точку сбора данных через один промежуточный узел (два пролета), считаем, что в сети передано два пакета данных – "полезный" пакет и пакет ретрансляции.

Поэтому чем больше значение η_T , тем более эффективно протокол маршрутизации использует пропускную способность канала связи. Для простоты полагаем, что все пакеты данных и подтверждения имеют фиксированные размеры L_{data} и L_{ack} , которые задаются в параметрах модели сети. При этом величина T отражает только число "полезных" пакетов данных, т.е. без учета пакетов, которые повторно принимаются из-за потерь пакетов подтверждения.

При идеальном канале связи величины T_{data}^{Σ} и T_{ack}^{Σ} включают только "полезные" пакеты данных и пакеты ретрансляции. При реальном канале связи в T_{data}^{Σ} и T_{ack}^{Σ} дополнительно входят пакеты, переданные при повторных попытках доставить пакет.

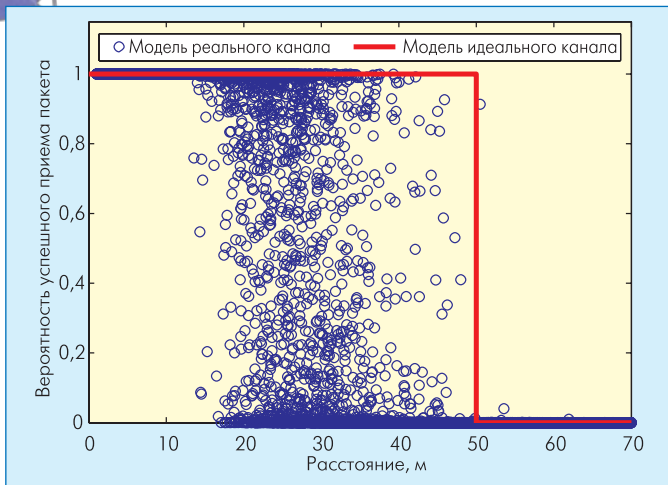


Рис.2 Модели беспроводного канала связи

Также предполагаем, что широковещательные пакеты используются только для передачи служебной информации для конфигурации сети и ее объем пренебрежимо мал, поэтому при оценке эффективности механизмов маршрутизации широковещательный трафик не учитывается.

Согласно данному выше определению, эффективность по энергии $\eta_E = T$. Этот параметр можно интерпретировать как срок службы сети до начала ее разрушения из-за разряда элементов питания. Многие приложения БСС требуют длительного срока эксплуатации сети при автономных источниках питания узлов, поэтому энергетическая эффективность является одним из ключевых критериев оценки протоколов маршрутизации для систем данного класса.

МОДЕЛЬ БЕСПРОВОДНОГО КАНАЛА

Многочисленные исследования характеристик маломощных беспроводных каналов связи показали, что в реальных системах качество связи значительно колеблется. Кроме того, соединения между узлами асимметричны, т.е. вероятность успешного приема узлом А пакета от узла В не равна вероятности успешной передачи в обратном направлении.

Вариация надежности соединений в основном обусловлена влиянием эффектов многолучевого распространения сигналов, а причиной асимметрии является разброс выходной

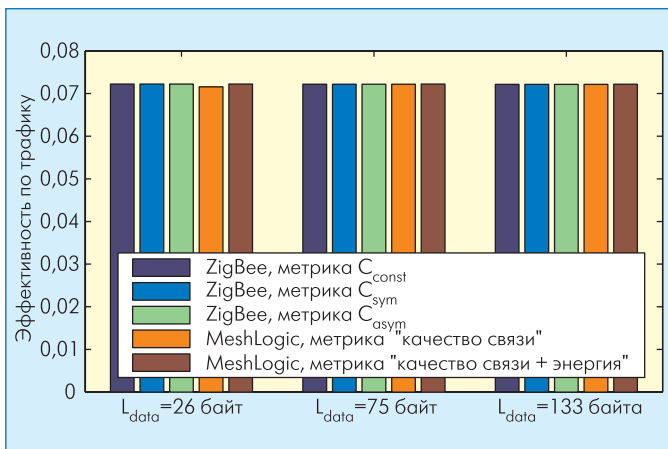


Рис.3 Эффективность по трафику при модели идеального канала связи

мощности передатчиков и уровня собственных шумов приемников из-за технологических особенностей аппаратной реализации узлов. Представленная ниже модель основана на приведенных в работе [3] выражениях, аналитически описывающих эти эффекты.

В большинстве практических приложений сети ZigBee и MeshLogic эксплуатируются внутри помещений, а не на открытом пространстве в условиях прямой видимости между узлами. Одна из наиболее часто используемых моделей распространения радиосигналов внутри помещений – модель логарифмически-нормального распределения потерь в тракте:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\alpha \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + N(0, \sigma_{ch}^2) = \bar{PL}(d) + N(0, \sigma_{ch}^2) \text{ [дБ]}, \quad (1)$$

где d – расстояние между передатчиком и приемником (м); d_0 – эталонное расстояние (м); α – показатель степени потерь в тракте; $N(0, \sigma_{ch}^2)$ – случайная гауссова переменная с нулевым средним и дисперсией σ_{ch}^2 (дБ).

При моделировании мы не учитываем как мобильность узлов, так и динамику объектов окружения, а также предполагаем, что все соединения между узлами имеют одинаковое затухание на эталонном расстоянии $PL(d_0)$ и показатель степени потерь в тракте α .

Таким образом, при фиксированном расстоянии d соединения имеют равные средние потери $\bar{PL}(d)$ и могут отличаться между собой только значением случайной величины $N(0, \sigma_{ch}^2)$, отражающей влияние эффектов замирания. При этом затухание между каждой парой узлов предполагается постоянным во времени.

Считаем, что в ZigBee и MeshLogic на физическом уровне используются приемопередатчики стандарта IEEE 802.15.4 [4], хотя в платформе MeshLogic могут применяться приемопередатчики различного типа.

Разброс значений выходной мощности и уровня шумов приемопередатчиков опишем с помощью нормального распределения. Тогда при расстоянии d между передатчиком и приемником отношение сигнал-шум (ОСШ) на входе приемника равно:

$$\gamma(d) = N(\bar{P}_t, \sigma_t^2) - PL(d) - N(\bar{P}_n, \sigma_n^2) \text{ [дБ]}, \quad (2)$$

где \bar{P}_t – средняя (номинальная) выходная мощность передатчика (дБм), σ_t^2 – дисперсия выходной мощности, \bar{P}_n – средний (номинальный) уровень шумов приемника (дБм), σ_n^2 – дисперсия уровня шумов.

Для упрощения полагаем, что уровень шумов определяется только тепловым шумом (при этом температура постоянна) и особенностями аппаратной реализации конкретного узла. Влияние внутрисполосных помех не учитывается, так как предполагается, что для работы сети выбран частотный диапазон, свободный от других систем связи. Кроме того, из-за малого объема трафика вероятность возникновения коллизий

пренебрежимо мала, поэтому они также не учитываются при расчете ОСШ.

Учитывая независимость случайных переменных $N(\bar{P}_t, \sigma_t^2)$, $N(\bar{P}_n, \sigma_n^2)$ и $N(0, \sigma_{ch}^2)$, выражения (1) и (2) можно объединить:

$$\gamma(d) = \bar{P}_t - \bar{P}_L(d) - \bar{P}_n + N(0, \sigma^2) \text{ [дБ]}, \quad (3)$$

где $\sigma^2 = \sigma_t^2 + \sigma_n^2 + \sigma_{ch}^2$.

Последнее слагаемое в формуле (3) отражает случайную составляющую в ОСШ, вызванную как параметрами окружающей среды, так и аппаратными особенностями узла, и характеризуется общей дисперсией ОСШ σ^2 .

Для расчета вероятности битовой ошибки в зависимости от значения ОСШ используем выражение из спецификации стандарта IEEE 802.15.4:

$$\beta(\gamma) = \frac{1}{30} \sum_{k=2}^{16} (-1)^k \binom{16}{k} \exp \left[20 \left(\frac{1}{k} - 1 \right) 10^{\gamma/10} \right]. \quad (4)$$

Тогда вероятность успешного приема пакета длиной L байт равна:

$$\psi(\gamma) = [1 - \beta(\gamma)]^{8L}. \quad (5)$$

Таким образом, выражения (3–5) представляют собой модель физического уровня стандарта IEEE 802.15.4, которая позволяет описать зависимость вероятности успешного приема пакетов в условиях многолучевого распространения сигналов и при наличии отклонений параметров приемопередатчика от номинальных значений.

На рис.2 приведен пример зависимости вероятности успешного приема пакетов от расстояния между передатчиком и приемником для моделей идеального и реального каналов связи. Видно, что для реального канала диапазон приема разделен на три области: надежного приема, переходную и отсутствия связи. При этом переходная область имеет относительно большую протяженность и характеризуется значительной вариацией и асимметрией качества связи.

МОДЕЛЬ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ УЗЛА

В целом среднее потребление узла зависит от потребляемой мощности в различных режимах работы и проведенного в них времени. Основными режимами узла являются переда-

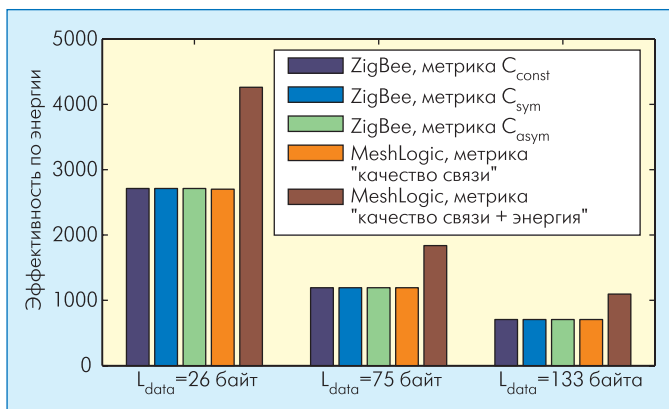


Рис.4 Эффективность по энергии при модели идеального канала связи

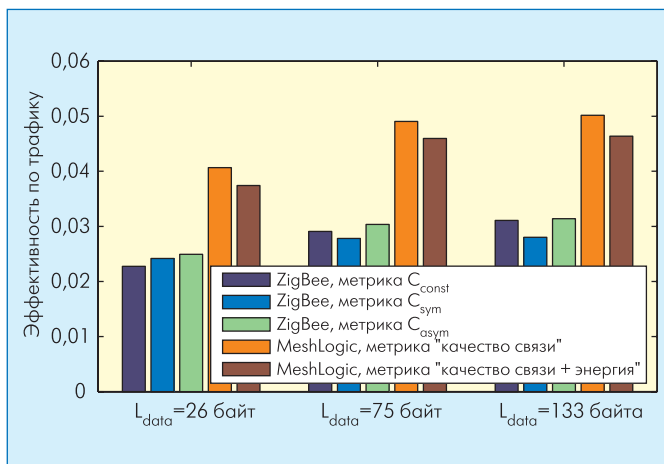


Рис.5 Эффективность по трафику при модели реального канала связи

ча и прием пакетов, прослушивание канала, обработка данных (например, опрос датчиков, фильтрация и т.п.) и дежурный режим.

Как правило, беспроводной сенсорный узел большую часть времени находится в "спящем" режиме, поэтому среднее энергопотребление узла в основном определяется затратами на передачу/прием пакетов и прослушивание канала, для оценки которых необходимо подробно рассматривать протокол организации множественного доступа к среде (MAC-уровень). В данной работе объектом исследования являются только механизмы маршрутизации, поэтому особен-



ности реализации MAC-уровня не учитываются и используется упрощенная модель энергопотребления узла, согласно которой среднее потребление узла складывается только из затрат энергии непосредственно на передачу и прием пакетов.

Для большинства приемопередатчиков стандарта IEEE 802.15.4 можно считать, что мощности потребления в режиме приема и передачи примерно равны. Например, для однокристалльного трансивера CC2420 компании Chipcon (куплена Texas Instruments) токи потребления в режиме передачи и приема равны 17,4 мА и 18,8 мА, соответственно.

В стандарте IEEE 802.15.4 наиболее коротким является пакет подтверждения суммарной длины $L_{ack} = 11$ байт (с учетом преамбулы и служебных полей). Поэтому энергию, необходимую для его передачи/приема, примем в качестве ее единицы измерения, т.е. $e_{ack} = 1$. Тогда затраты энергии на передачу/прием пакетов данных длиной L_{data} (без шифрования и с 16-разрядной адресацией) равны:

$$e_{data}(n) = L_{data}(n)/L_{ack} = (17 + n)/11,$$

где n – размер поля данных (байт).

Поле данных пакета может включать в себя от 0 до 116 байт. Мы рассмотрим несколько значений n : 9 байт – поле данных пакета длиной $L_{data} = 26$ байт, для которой по стандарту специфицируется чувствительность приемника; 58 байт – среднее поле данных ($L_{data} = 75$ байт) и 116 байт – поле данных пакета с максимальной длиной $L_{data} = 133$ байта.

УЧЕТ КАЧЕСТВА СВЯЗИ В ПРОТОКОЛАХ МАРШРУТИЗАЦИИ

Каждое беспроводное соединение между узлами можно описать качеством входящей связи p_{RX} (вероятность успешного приема пакета) и качеством исходящей связи p_{TX} (вероятность успешной передачи пакета). Если $p_{TX} = p_{RX}$, то соединение является симметричным, но в общем случае $p_{TX} \neq p_{RX}$, т.е. соединение может быть асимметричным по качеству связи.

Согласно стандарту ZigBee, стоимость маршрута равна сумме стоимостей соединений между узлами, через которые этот путь проходит. В ZigBee предусмотрены следующие метрики стоимости соединения:

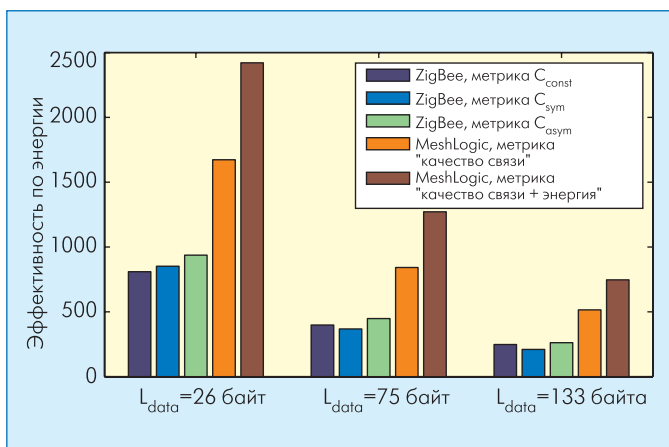


Рис.6 Эффективность по энергии при модели реального канала связи

Принятые значения параметров моделирования

Количество узлов	100
Площадь покрытия сети, м	280×280
Модель идеального канала	
Дальность радиосвязи r , м	50
Модель реального канала	
Эталонное расстояние d_0 , м	1
Затухание на эталонном расстоянии $PL(d_0)$, дБ	55
Показатель степени потерь в тракте α	3
Средняя выходная мощность передатчика \bar{P}_t , дБм	0
Средний уровень шума приемника \bar{P}_n , дБм	-95,5
Среднеквадратическое отклонение ОСШ σ , дБ	3

- $C_{const} = 7$ – постоянная стоимость;
- $C_{sym} = \min(7, p_{RX}^4)$ – стоимость с учетом качества связи при симметричности соединения;
- $C_{asym} = \max[\min(7, p_{RX}^4), \min(7, p_{TX}^4)]$ – стоимость с учетом асимметрии качества связи. Приведенный вариант метрики основан на данных документа [5].

В платформе MeshLogic также используется метрика стоимости соединения, учитывающая асимметрию качества связи, но она отличается от принятой в ZigBee. Кроме того, если аппаратные возможности узла позволяют оценить текущий заряд источника питания (например, напряжение батареи), то эта информация также может быть использована протоколом маршрутизации MeshLogic.

Заметим, что мы фактически сравниваем эффективности метрик маршрутизации, принятых в ZigBee и MeshLogic, поскольку не учитываем затраты на первоначальную конфигурацию сети, объем хранимой служебной информации и т.п.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для имитационного моделирования использовались приведенные в таблице параметры сети. Результаты моделирования для идеального канала связи представлены на рис.3 и 4 для пакетов различной длины. Как и следовало ожидать, при идеальном канале связи эффективность протоколов маршрутизации одинаковая, поскольку при $p_{TX} = p_{RX} = 1$ все метрики, основанные на параметрах качества беспроводного соединения, эквивалентны простой метрике минимального числа переходов.

Увеличение длины пакетов данных приводит к росту затрат энергии на их передачу и прием, поэтому сокращается число пакетов, которые могут быть переданы до начала истощения источников питания узлов (см. рис.4). При этом эффективность по трафику остается постоянной, так как при идеальном канале η_T определяется только соотношением между числом "полезных" пакетов и пакетов ретрансляции. При идеальном канале связи количество пакетов ретрансляции для каждого маршрута равно числу промежуточных узлов-ретрансляторов между узлом-источником и точкой сбора информации, т.е. зависит только от метрики маршрута и топологии сети. Из рис.4 видно, что использование в платформе MeshLogic информации о текущем запасе энергии узла поз-

воляет значительно – примерно в 1,6 раза – увеличить время жизни сети при всех размерах пакетов данных.

Результаты моделирования для реального канала связи (рис.5 и 6) дают более разнообразную картину. Для ZigBee вид метрики стоимости маршрута не оказывает значительно-го влияния на эффективность протокола маршрутизации. Более того, когда качество исходящей связи значительно ниже качества входящей ($p_{TX} < p_{RX}$), предположение о симметричности соединений (метрика C_{sym}) может привести к худшему результату, чем при выборе маршрутов просто по количеству промежуточных узлов (метрика C_{const}). Этот эффект проявляется с увеличением длины пакетов данных (см. рис.5 и 6).

Учитывающая асимметрию соединений метрика C_{asym} дает несколько лучший результат, но она не позволяет в полной мере использовать информацию о качестве связи. Действительно, если хотя бы один из показателей качества связи p_{TX} или p_{RX} принимает значение менее $7^{-1/4} \approx 0,62$, то эта метрика становится эквивалентной простой метрике постоянной стоимости C_{const} . Однако в реальных каналах возможны значительные вариации надежности связи (см. рис.2), поэтому неравенства $p_{TX} \geq 0,62$ и $p_{RX} \geq 0,62$ выполняются только на малом интервале расстояний между передатчиком и приемником, а в большей части зоны приема качество связи существенно колеблется. Следовательно, метрика C_{asym} дает преимущества относительно C_{const} только для небольшой части беспроводных соединений, а в остальных случаях они эквивалентны.

В платформе MeshLogic метрика стоимости маршрута более полно использует информацию об асимметрии качества связи между узлами, что обеспечивает значительные преимущества по сравнению с ZigBee. В среднем срок эксплуатации сети увеличивается в 1,9 раза, а эффективность использования пропускной способности канала выше в 1,6 раза относительно параметров, достигаемых в наилучшей конфигурации ZigBee.

Если доступно значение текущего заряда элемента питания, протокол маршрутизации платформы MeshLogic позволяет еще больше увеличить время жизни сети (в среднем в 2,8 раза), при этом эффективность по трафику оказывается незначительно ниже, чем при стандартном варианте метрики.

В целом сравнение результатов, полученных для идеального и реального каналов связи, показывает, что из-за потерь пакетов эффективность использования пропускной способности канала в сети в ZigBee в среднем снижается в 2,6 раза, в MeshLogic – в 1,6 раза, время жизни сети ZigBee сокращается в 3 раза, сети MeshLogic – в 1,5 раза.

Таким образом, результаты имитационного моделирования показывают, что предложенная в новой версии стандарта ZigBee метрика стоимости маршрута не дает существенного выигрыша по сравнению с предыдущими вариантами метрик. В целом эффективность механизма маршрутизации ZigBee

значительно зависит от параметров окружающей среды и характеристик приемопередатчиков, так как не учитывает в полной мере особенности маломощных радиоканалов.

Используемые в платформе MeshLogic метрики более точно описывают параметры беспроводных соединений, поэтому в реальных условиях эксплуатации механизм маршрутизации MeshLogic обеспечивает более эффективное использование пропускной способности канала связи и более длительный срок эксплуатации сети при работе от автономных источников питания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баскаков С.С., Оганов В.И. Беспроводные сенсорные сети на базе платформы MeshLogic. – Электронные компоненты, 2006, № 8, с. 65–69.
2. ZigBee specification. – ZigBee Alliance, 1 December 2006.
3. Zuniga M., Krishnamachari B. An analysis of unreliability and asymmetry in low-power wireless links. – ACM Transactions on Sensor Networks, Vol. 3, No. 2, June 2007.
4. IEEE Std 802.15.4–2006. IEEE standard for local and metropolitan area networks. Part 15.4: wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low rate wireless personal area networks (LR-WPANs). – IEEE, 8 September 2006.
5. EmberZNet application developer's guide. – Ember Corporation. 17 July 2007.