

Оценка качества радиоканала

в беспроводных сенсорных сетях

В статье показана необходимость оценки качества радиоканалов в беспроводных сенсорных сетях для достижения высоких показателей качества обслуживания. Сформулированы требования к методам оценки и выполнен сравнительный анализ основных подходов к решению этой задачи.

Сергей Баскаков, к. т. н.
baskakov@meshlogic.ru

Дмитрий Читаев
dchitayev@gmail.com

Введение

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) — это распределенная, самоорганизующаяся сеть из множества датчиков (сенсоров) и исполнительных устройств, объединенных между собой посредством маломощных радиоканалов. Сенсорные сети находят применение во многих прикладных задачах, связанных со сбором информации и передачей команд управления, в таких областях, как автоматизация зданий, промышленная автоматика, системы безопасности и обороны, здравоохранение, сельское хозяйство и т. д.

В общем случае БСС имеют многоячеичковую (mesh) топологию, поэтому одной из основных проблем является маршрутизация пакетов, эффективность которой во многом зависит от надежности беспроводных соединений, выбранного протоколом маршрутизации для доставки информации между узлами сети. Использование радиоканалов с высоким качеством связи улучшает пропускную способность и уменьшает энергопотребление узлов, поскольку снижаются потери пакетов и, следовательно, количество повторных передач, а также снижается вероятность перевыбора (восстановления) маршрута, вызванного отказом одного из каналов.

Оценка качества радиоканала также играет ключевую роль в механизмах управления топологией сети для поддержания ее стабильности. Каналы с высоким качеством имеют продолжительное время работы без сбоев, поэтому эффективные механизмы управления топологией используют каналы с высокой надежностью для поддержания отказоустойчивости сети на длительных временных интервалах.

Таким образом, наличие актуальной (обновляемой в режиме реального времени) информации о надежности беспроводных соединений является необходимым условием

для получения высоких показателей качества обслуживания БСС, в частности, срока службы автономных источников питания узлов.

Требования к методам оценки качества радиоканала

В общем случае оценка качества радиоканала выполняется в два этапа: мониторинг параметров канала и вычисление метрики на основе полученных значений.

Мониторинг параметров радиоканала может производиться в активном, пассивном и гибридном режимах. Активный режим подразумевает мониторинг соединений с другими узлами путем передачи тестовых (сигнальных) пакетов с определенной частотой, при выборе значения которой следует искать компромисс между экономией энергии (низкая частота) и точностью оценки (высокая частота) [1]. В пассивном режиме анализируется только уже существующий в сети трафик, при этом могут рассматриваться все пакеты, которые способен принять узел, даже если они адресованы не ему. Гибридный мониторинг является комбинацией предыдущих двух вариантов и позволяет достичь оптимального баланса между актуальностью данных мониторинга и затратами энергии узлов. Отметим, что результаты мониторинга трафика могут использоваться также в других сетевых протоколах, например маршрутизации и определении топологии.

Метрика — это математическое выражение, в котором используется полученная в ходе мониторинга информация об отправленных или полученных пакетах в пределах окна оценки w (к примеру, каждые w секунд или каждые w принятых/полученных пакетов). Основное отличие между методами оценки качества радиоканала (МОКР) заключается в форме используемой метрики: число и наименование параметров и алгоритм (формула)

их объединения для вычисления значения, характеризующего качество (надежность) беспроводного соединения между двумя заданными соседними узлами.

Основными требованиями к МОКР являются энергоэффективность, точность и реактивность.

Обеспечение высокой энергетической эффективности — одна из основных проблем в БСС, поэтому МОКР должен требовать минимальных вычислений и дополнительного служебного сетевого трафика. Следовательно, сложные техники оценки канала (например, основанные на обучении) малоприменимы в БСС (в том числе из-за ограниченных вычислительных ресурсов и объемов памяти узлов), а использование активного мониторинга также не будет в общем случае отвечать этому требованию из-за необходимости постоянной передачи тестовых пакетов, что приведет к увеличению потребления энергии узлами.

Под точностью понимается способность МОКР корректно определять состояние и поведение канала, что значительно влияет на эффективность протоколов сетевого уровня. В обычных методиках оценки исследуемый процесс, как правило, сравнивается с определенной вероятностной функцией, но в данном случае подобное сравнение невозможно, так как, во-первых, нет адекватной модели канала, которую можно было бы использовать в общем случае для оценки качества связи, и, во-вторых, оценка качества канала может быть вычислена из параметров БСС, различных по своей физической природе.

Реактивность МОКР — способность своевременно реагировать на изменения параметров радиоканала в процессе функционирования БСС. Реактивность зависит от двух параметров: размера окна оценки и типа мониторинга. Очевидно, что МОКР с малым значением окна оценки и активным мониторингом будет наиболее реактивным, но при этом полученная оценка может быть статистически неустойчива из-за коротких интервалов наблюдения, а активный мониторинг приведет к повышению затрат энергии узлов.

Таким образом, разработка эффективного МОКР является комплексной задачей, при решении которой необходимо учитывать особенности маломощных радиоканалов в БСС и обеспечить баланс между противоречивыми требованиями.

Существующие методы оценки качества канала в БСС можно разделить на две основные категории: аппаратные и программные.

Аппаратные методы оценки качества радиоканала

К аппаратным относятся методы, основанные на оценке индикатора качества радиоканала LQI (Link Quality Indicator), индикатора мощности принятого сигнала RSSI (Received Signal Strength Indicator) и отношения сигнал/шум SNR (Signal-to-Noise Ratio). Преимущество данных методов заключается в том, что они не требуют дополнительных вычислений, поскольку используемые параметры могут быть получены напрямую с приемопередатчика беспроводного узла.

LQI-методы позволяют быстро определить, относится ли канал к зоне надежного приема, но если беспроводное соединение находится в переходной области (диапазон расстояний между соседними узлами, в котором имеют место значительные колебания качества связи), однократное считывание LQI без усреднения даст некорректный результат. В случае, когда значение LQI крайне высокое (к примеру, около 110 для приемопередатчиков CC2420 стандарта IEEE 802.15.4 частотного диапазона 2,4 ГГц), канал имеет практически идеальные характеристики (вероятность успешного приема пакета приближается к 100%) и в дальнейшем значение LQI также остается стабильно высоким. Таким образом, однократного считывания LQI достаточно, чтобы определить, является ли качество канала стабильно высоким. С другой стороны, для остальных значений LQI, относящихся к промежуточному состоянию канала, единичного считывания недостаточно для определения качества соединения.

Если беспроводное соединение установлено, то RSSI-методы позволяют получить быструю и точную оценку его качества. Эмпирические исследования показали, что при значении RSSI выше определенного порога (например, более -87 дБм для приемопередатчиков CC2420 [2]) вероятность успешной передачи пакета стабильно высокая. Ниже этой границы даже незначительные сдвиги RSSI могут привести к нестабильной передаче и наоборот.

Таким образом, разумно использовать однократное считывание значений RSSI и LQI только для определения, является ли качество канала высоким или нет. Такое решение основывается на использовании граничных значений RSSI и LQI, выше которых канал остается стабильным (вероятность успешного приема пакета не менее 95%). Важно отметить, что граничные значения зависят от характеристик приемопередатчиков и среды распространения радиоволн [1].

Отношение сигнал/шум SNR является более точным параметром для оценки качества сигнала по сравнению с RSSI [2], так как RSSI является суммой полезного сигнала с шумом на входе приемника, а SNR описывает отношение этих составляющих.

Однако аппаратные средства оценки имеют следующие ограничения. Во-первых, все эти метрики измеримы только для успешно принятых пакетов, поэтому в условиях наличия потерь пакетов качество радиоканала может быть переоценено, поскольку не будет учтена информация о пакетах с ошибками. Во-вторых, несмотря на то, что аппаратные методы являются быстрым и низкостратным способом определения качества связи, они не способны дать точную оценку [1]. Фактически каждый из этих методов позволяет получить достаточно ограниченную информацию для стабильных радиоканалов, но ни один из них не способен предоставить информацию, характеризующую качество радиоканала в целом, т. е. в том числе, в переходной зоне. Следовательно, комбинация аппаратных и программно вычисляемых метрик позволит повысить точность определения качества радиоканала.

Программные методы оценки качества радиоканала

Программные МОКР могут быть разделены на три категории:

- методы на основе определения вероятности успешного приема пакета PRR (Packet Reception Ratio), получаемой путем либо прямого вычисления, либо аппроксимации;
- методы на основе показателя необходимого числа попыток передачи пакета RNP (Required Number of Packet Retransmission);
- методы на основе композитной оценки качества радиоканала.

PRR-методы позволяют производить оценку со стороны приемника и являются достаточно простым средством измерения, широко распространенным в протоколах маршрутизации. В дальнейшем PRR (отношение числа успешно принятых пакетов к общему числу переданных пакетов) часто используется как несмещенная оценка для расчета точности аппаратных методов. Но эффективность подобных методов зависит от настройки размеров временного окна. Для радиоканалов с очень высоким или очень низким PRR (т. е. со значениями, позволяющими отнести канал к зоне надежного приема или отсутствия связи) точная оценка может быть получена на коротких временных интервалах [3]. С другой стороны, каналы с промежуточными показателями PRR (т. е. каналы в переходной области) требуют гораздо большего размера временных окон для сходимости и точности статистической оценки.

Основной задачей методов, аппроксимирующих PRR, является предоставление более эффективной оценки качества канала по сравнению с простым вычислением PRR. Например, в ряде методов выполняется пассивный мониторинг сетевого трафика, вычисляется значение PRR на некотором временном окне, а затем производится сглаживание значений PRR с использованием EWMA-фильтра (Exponentially Weighted Moving Average, экспоненциально взвешенное скользящее среднее), что позволяет получить более стабильную и достаточно реактивную оценку по сравнению с простым вычислением PRR.

Методы, основанные на определении необходимого числа передач пакета для успешного приема RNP, позволяют оценить качество радиоканала со стороны передатчика. Показатель RNP вычисляется как отношение общего числа переданных пакетов (в том числе повторно отправленных из-за потерь) в рассматриваемом временном окне к числу пакетов, успешно принятых соседним узлом, минус 1 (чтобы исключить первую передачу). Один из RNP-методов — метод, основанный на вычислении метрики «ожидаемое число передач» ETX (Expected Transmission Count), которая определена как обратное значение к произведению вероятностей успешной передачи пакетов в прямом и обратном направлении по данному беспроводному соединению между соседними узлами.

Результаты оценки некоторых МОКР могут быть не напрямую связаны с каким-либо физическим параметром соединения, поскольку предоставляют оценку, полученную как ком-

позиция нескольких величин. Рассмотрим примеры таких МОКР.

Метод MetricMap [4] был предложен как альтернатива методу ETX для иерархического протокола маршрутизации MintRoute. В MetricMap используется алгоритм классификации соединения внутри заранее определенного набора групп (к примеру, «хорошее» и т. д.). Входными данными для алгоритма является вектор, состоящий из набора параметров, влияющих на качество канала, включающего RSSI, нагрузку на канал и т. д. При этом используется обучение на наборе выборок, где каждый элемент содержит эталонный вектор параметров и соответствующий ему класс соединения. Опыт использования MetricMap показал, что метод позволяет улучшить качество оценки канала, но может быть использован только как дополнение к какому-либо другому МОКР. Данное ограничение обусловлено тем, что использованные во время обучения эталонные выборки могут не соответствовать реальным условиям эксплуатации БСС.

Метод DUCHY [5] используется в протоколах маршрутизации и позволяет выбирать пути доставки пакетов с малым числом переходов и высоким качеством каналов. В данном случае выполняется активный мониторинг сигнальным трафиком для получения взвешенной суммы нормализованных значений RSSI и LQI, а затем результат уточняется с помощью RNP.

Сравнение методов оценки качества радиоканала

Сравнение МОКР является нетривиальной задачей. В частности, отсутствует общепринятый критерий качества канала, что не позволяет получить числовое выражение эффективности конкретного метода. Кроме того, дополнительную сложность создает разнородность

МОКР: от простого определения, например, LQI до вычисления композитной метрики. Следовательно, для сравнения эффективности методов требуется методика, позволяющая оценить их работу независимо от заложенных в них механизмов.

Ниже приведен краткий анализ наиболее распространенных программных МОКР по таким критериям, как точность, стабильность и энергоэффективность. Аппаратные МОКР не рассматриваются, поскольку фактически они не могут использоваться как самостоятельные методы.

Наибольшей точностью обладают композитные МОКР (например, DUCHY), так как в них для оценки качества канала используется сразу несколько параметров. Как показывают исследования, следующими по степени точности являются RNP-методы, поскольку, в отличие от PRR-методов, в них учитываются повторные передачи пакетов, следовательно, оценка качества связи не будет завышена. При этом использование активного мониторинга также положительно влияет на точность оценки качества радиоканала.

Самой высокой стабильностью обладают методы, в которых используется низкочастотная фильтрация анализируемых параметров (например, PRR), что обеспечивает устойчивость к флуктуациям характеристик канала. Обратной стороной хороших показателей стабильности является необходимость контроля интервала измерений, поэтому целесообразным является адаптивный выбор периода обновления оценки в зависимости от скорости изменения топологии сети и среды распространения радиоволн.

Наиболее энергетически эффективными являются PRR-методы, требующие минимальных вычислений и потока сигнального трафика. Вполне логично, что более точные и стабильные

композитные МОКР требуют наибольших затрат энергии, так как используют более сложные алгоритмы оценки качества. Компромиссным решением является использование RNP-методов. С другой стороны, высокое качество оценки канала позволяет уменьшить число повторных передач, что в свою очередь может скомпенсировать относительно высокие энергозатраты методов с высокой точностью.

Таким образом, основной задачей при выборе метода оценки качества радиоканала в беспроводных сенсорных сетях в конкретных условиях эксплуатации является поиск оптимального соотношения между объемом служебной информации, сложностью вычислений и выигрышем от уменьшения числа повторных передач пакетов. ■

Литература

1. Gomez C., Boix A., Paradells J. Impact of LQI-based routing metrics on the performance of a one-to-one routing protocol for IEEE 802.15.4 multihop networks // *EURASIP journal on wireless communications and networking*. 2010.
2. Srinivasan K. et al. An empirical study of low power wireless // *ACM transactions on sensor networks*. 2010. Vol. 6. № 2.
3. Cerpa A. et al. Temporal properties of low power wireless links: modeling and implications on multi-hop routing // *Proceedings of the 6th ACM international symposium on mobile ad hoc networking and computing*. 2005.
4. Wang Y., Martonosi M., Peh L.-S. Predicting link quality using supervised learning in wireless sensor networks // *Mobile computing and communications review*. 2007. Vol. 11. № 3.
5. Puccinelli D., Haenggi M. DUCHY: double cost field hybrid link estimation for low-power wireless sensor networks // *The 5th workshop on embedded networked sensors*. 2008.