

ОБЗОР МЕТОДОВ МАРШРУТИЗАЦИИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

Ташкентский университет информационных технологий

имени Мухаммада ал-Хоразмий

Доцент кафедры «Телекоммуникационный инжиниринг»

Садчикова Светлана Александровна

Ташкентский университет информационных технологий имени

Мухаммада ал-Хоразмий

Магистрант кафедры «Телекоммуникационный инжиниринг»

Вахабов Абдор Акмал угли

Аннотация

Статья представляет обзор современных методов маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях. Кратко описываются принципы работы восьми наиболее распространённых алгоритмов: SPIN, DD, RR, GBR, GPSR, MCF, LEACH, TEEN. Для каждого метода приводится краткая характеристика, отмечаются особенности применения и существующие модификации. Материал сопровождается иллюстрациями и ссылками на первоисточники.

Ключевые слова: WSN, протоколы маршрутизации, передача данных, энергоэффективность, кластеризация, географическая маршрутизация.

Введение

Исследования в области беспроводных сенсорных сетей (БСС) в настоящее время занимают одно из ведущих мест среди приоритетных научных направлений. Несмотря на большое количество публикаций в зарубежных источниках, в русскоязычной научной литературе по-прежнему наблюдается заметный дефицит материалов по данной тематике. Настоящая статья направлена на формирование базового представления о методах и принципах маршрутизации в БСС на примере

ряда наиболее распространённых и показательных алгоритмов, таких как SPIN, DD, RR, GBR, GPSR, MCF, LEACH и TEEN. Для каждого из них приводится краткое описание, сопровождаемое библиографическими ссылками на первоисточники и иллюстративными материалами.

SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation)

Семейство протоколов SPIN предназначено для доставки данных в беспроводных сенсорных сетях на основе специальной процедуры «переговоров» между узлами [1]. Механизм SPIN особенно эффективен в сетях с динамической топологией и мобильными узлами.

В основе SPIN лежит адаптивный вариант классической техники лавинного распространения (flooding), что делает маршрутизацию значительно эффективнее по сравнению с традиционным методом. Каждый узел способен распространить сообщение по всей сети, обеспечивая быстрый доступ к информации по запросу.

Процесс обмена основан на использовании трех типов сообщений:

- ADV — уведомление о появлении новых данных, содержащее их описание (метаданные);
- REQ — запрос на получение данных;
- DATA — передача самих данных.

Алгоритм работы можно описать следующим образом: при появлении новых данных узел сначала рассылает соседям сообщение ADV и ожидает реакции. Узлы, которым необходимы эти данные, отвечают запросом REQ, после чего отправитель пересылает им пакет DATA. Получив новые данные, соседние узлы повторяют ту же процедуру со своими ближайшими узлами, передавая информацию только тем, кто в ней заинтересован и способен пересылать ее дальше (см. рис. 1).

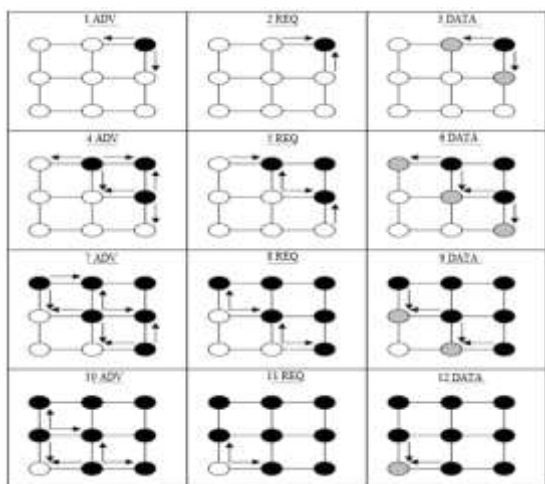


Рис. 1. Иллюстрация метода SPIN

Метаданные в протоколах семейства SPIN играют ключевую роль, выступая в качестве уникального идентификатора каждого набора данных. По сути, именно метаданные позволяют узлам «понимать», сталкивались ли они с определённой информацией ранее. Такой механизм предотвращает избыточную циркуляцию сообщений по сети, которая характерна для традиционного лавинного распространения (flooding), где один и тот же пакет может раз за разом передаваться всеми соседними узлами без какой-либо проверки. Благодаря этому SPIN существенно снижает уровень сетевой загрузки, уменьшает количество коллизий, продлевает время автономной работы узлов и делает процесс маршрутизации гораздо более экономичным.

Кроме того, использование метаданных обеспечивает гибкость и адаптивность работы сети: узлы передают только те данные, которые действительно нужны соседям, что особенно важно для сетей с ограниченной пропускной способностью и ограниченными энергетическими ресурсами. Такая схема обмена делает коммуникацию «осознанной», поскольку каждый узел принимает решения о передаче не вслепую, а на основе предварительного согласования.

Семейство SPIN включает широкий спектр модификаций, ориентированных на разные условия эксплуатации беспроводных сенсорных сетей. Базовые протоколы SPIN-1 и SPIN-2 реализуют фундаментальные принципы обмена метаданными и

централизованную процедуру «переговоров», позволяя минимизировать повторяющиеся передачи.

Также существуют дополнительные модификации, которые адаптируют семейство SPIN под разные модели мобильности узлов, под динамическую топологию или под повышенные требования к надёжности или быстродействию. Такое разнообразие вариантов делает SPIN одним из наиболее гибких и хорошо масштабируемых семейств протоколов, способных эффективно работать в широком диапазоне приложений WSN — от мониторинга окружающей среды до ситуационных систем реагирования.

DD (Directed Diffusion)

Основные свойства метода Directed Diffusion (DD) заключаются в его ориентированности на централизованную модель сбора информации (data-centric) и передачу данных по запросу (query-driven). Взаимодействие между узлами осуществляется локально, а идентификация данных основана на использовании высокоуровневых атрибутов [2].

Централизованная модель предполагает наличие в сети центрального узла-сборщика (sink), к которому направляется информация от множества источников. Процесс маршрутизации инициируется тем, что центральный узел рассылает запрос (interest) по сети. Поскольку данные представлены в виде пар «атрибут–значение», запрос определяет нужные параметры и их значения (или диапазоны значений). Каждый узел поддерживает локальный кэш запросов, где хранится состояние всех активных запросов.

Для каждого запроса кэш содержит дополнительную служебную информацию:

- timestamp — время получения запроса;
- градиенты (gradients) для каждого соседа, включающие скорость передачи данных (data rate), время действия (duration) и срок жизни (expiresAt).

Градиент определяет возможное направление маршрутизации и может иметь вес, влияющий на выбор пути в зависимости от требований протокола. Эта

структура кэша играет ключевую роль в оптимизации маршрутизации.

Когда в узле фиксируется событие, удовлетворяющее условиям запроса, начинается обратная передача данных к центру. Узел формирует поток ответов, который может поступать в центральный узел с определенной частотой на протяжении всего срока «жизни» запроса. Для построения обратного маршрута используется информация о ранее сформированных градиентах, что позволяет определить оптимальное направление передачи.

В результате для каждого потока данных выбирается наиболее подходящий маршрут и режим трансляции согласно заданным критериям (например, минимальная длина пути, минимальное энергопотребление и др.) (см. рис. 2).

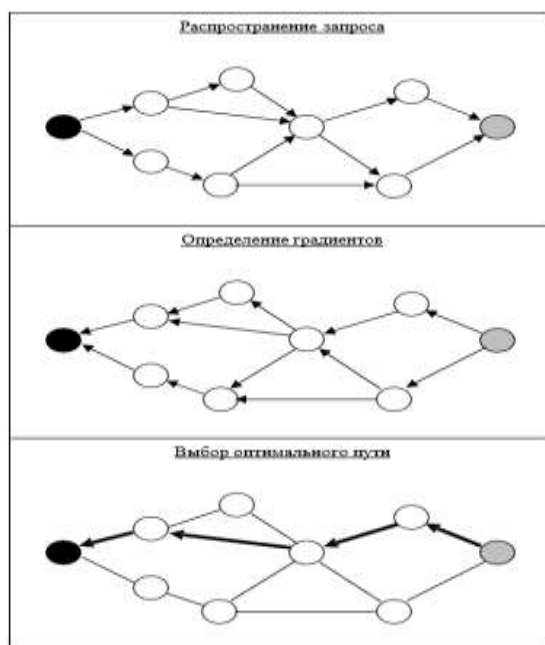


Рис. 2. Иллюстрация метода DD

RR (Rumor Routing)

Протокол Rumor Routing (RR) является модификацией алгоритма Directed Diffusion [3] и предназначен для оптимизации маршрутизации в сетях, где число реальных событий мало, а количество запросов чрезвычайно велико. Основная идея RR заключается в распространении информации о событиях заранее, что снижает необходимость широковещательной рассылки запросов.

Каждый узел сети поддерживает собственную таблицу событий. Когда в узле происходит событие, оно заносится в эту таблицу, после чего создаются специальные сообщения — агенты (agents). Агент содержит сведения о произошедшем событии и начинает «путешествовать» по сети, передавая эту информацию другим узлам. Каждый узел, получивший агента, обновляет свою таблицу событий и отправляет агента дальше своим соседям. Распространение продолжается до тех пор, пока не истечёт время жизни агента (TTL — Time To Live).

Когда центральный узел рассылает запрос, относящийся к событию, о котором уже известно благодаря агентам, узлы, через которые проходит запрос, проверяют свои таблицы событий. Если в таблице имеется запись, соответствующая условиям запроса, узел немедленно отправляет ответ в центр. Благодаря этому информация о событии может достигнуть инициатора запроса раньше, чем сам запрос достигнет истинного источника данных.

Если агент сохраняет в таблице событий полный маршрут, по которому он передвигался, то это дополнительно облегчает определение точного расположения узла-источника. В этом случае центр или промежуточные узлы могут легко восстановить путь к узлу, где произошло событие, что делает процесс маршрутизации более эффективным.

GBR (Gradient-based routing)

Еще один вариант алгоритма Directed Diffusion [4]. Данная модификация имеет следующие особенности. В процессе распространения запроса из центра по всей сети учитывается количество ретрансляций от узла к узлу (hops). В каждом узле вычисляется параметр, названный «высотой» узла (height), который указывает на минимально возможное число звеньев (hops) в цепочке маршрута от данного узла к центральному. Градиентом для каждого из соседних направлений в узле обозначается разность между высотой исходного узла и высотой его соседа. Для маршрутизации выбирается направление с наибольшим значением градиента. В тех

случаях, когда градиенты для разных направлений равны, выбор осуществляется случайным образом.

Приведенная схема маршрутизации может дополняться правилами, обеспечивающими учет экономии энергии. Так, при падении текущего уровня запаса энергии в узле ниже определенного значения узел может самостоятельно автоматически увеличить свою «высоту» с целью уменьшения нагрузки со стороны других узлов. Соседние узлы «видят», что использовать для передачи сообщений данный узел становится все более невыгодно, и обходят его направление, оказывая предпочтение более оптимальным направлениям. Такой механизм обеспечивает хорошую адаптивность алгоритма в плане балансировки энерго-нагрузки.

Кроме того, алгоритм может обеспечивать балансировку трафиковой нагрузки посредством анализа уже использующихся маршрутов для доставки потоков сообщений о событиях. Соответственно для новых потоков составляется маршрут таким образом, чтобы в него входили только те узлы, которые не участвуют в доставке других потоков.

GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing)

Алгоритм GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) относится к группе методов маршрутизации, использующих географическое положение узлов в пространстве [5]. Каждый узел обладает информацией о собственных координатах и координатах ближайших соседей. Передача сообщения осуществляется по принципу «жадной» маршрутизации: пакет пересылается тому соседнему узлу, который расположен ближе всех к целевому адресу.

Если же сообщение попадает в область, где дальнейшая передача по «жадному» правилу невозможна — например, из-за отказавших узлов или разреженности сети — возникает так называемая «дыра» или «тупик» (hole, dead-end). В таких случаях GPSR переключается на периметрную маршрутизацию. На этом этапе используется правило «правой руки», согласно которому выбираются узлы, находящиеся дальше

от адресата, чем текущий, но позволяющие обойти препятствие (см. рис. 3).

Для корректной работы механизма обхода необходимо, чтобы сеть была представлена в виде планарного графа, что обеспечивает непротиворечивость выбора узлов при движении по периметру. Следует отметить, что алгоритм не учитывает энергопотребление узлов, поскольку ориентирован прежде всего на географическую близость и топологическую корректность передачи данных.

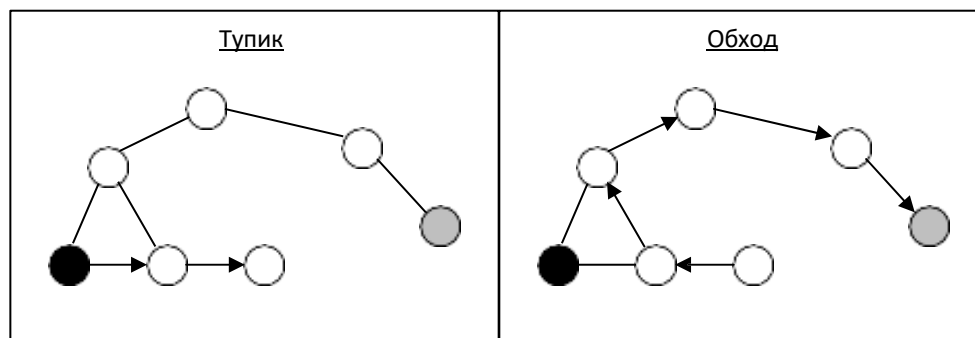


Рис. 3. Иллюстрация метода GPSR

MCF (Minimum Cost Forwarding)

Алгоритм MCF (Minimum Cost Forwarding) [6] основывается на предположении, что направление маршрутизации всегда заранее известно — например, от узла-источника к центральному узлу сбора данных (базовой станции). Благодаря этому отпадает необходимость в адресной схеме с уникальными идентификаторами узлов. Вместо идентификаторов каждый узел хранит лишь значение минимальной цены доставки (least cost), показывающее минимальное «расстояние» до центрального узла в выбранной метрике.

Цена доставки может выражаться в различных единицах: затраченной энергии, количестве переходов (hops), физическом расстоянии и др. При получении сообщения узел ретранслирует его дальше только в том случае, если он сам лежит на маршруте минимальной стоимости. Это означает, что сумма накопленной цены доставки сообщения до текущего узла и минимальной цены следующего узла

должна совпадать с минимальной ценой узла-источника. Таким образом формируется путь от источника к центру, включающий только узлы, удовлетворяющие этому критерию оптимальности.

Перед тем как приступить к маршрутизации, в сети проводится предварительный этап вычисления параметров минимальной цены для каждого узла (см. рис. 4). В начале работы базовая станция присваивает своему параметру значение 0, в то время как все остальные узлы получают значение «бесконечность». Затем центральный узел передает своё значение всем соседям. Получив значение, соседний узел увеличивает его на величину стоимости перехода (например, добавляет один hop) и сравнивает с тем значением, которое хранит у себя. Если новое значение меньше хранящегося, оно обновляет параметр; только в этом случае сообщение пересылается дальше соседним узлам.

Таким образом, этап обновления минимальных цен распространяется по сети до тех пор, пока параметры узлов не перестанут изменяться. После завершения этой процедуры каждый узел обладает минимальной оценкой стоимости маршрута до центрального узла, что позволяет выполнять маршрутизацию эффективно и без необходимости хранения явных адресов.

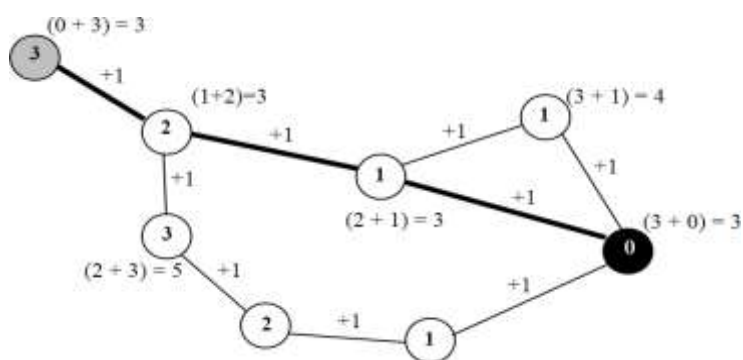


Рис. 4. Иллюстрация метода MCF

LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

Протокол LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) относится к классу иерархических методов маршрутизации, ориентированных на балансировку энергопотребления узлов сети [7]. В рамках данной модели предполагается

разделение сети на группы — кластеры, которые образуются из узлов, расположенных в пределах одной зоны радиодоступа.

Каждый кластер включает:

- обычные узлы (Cluster Members, CM), выполняющие измерения и передачу данных;
- главу кластера (Cluster Head, CH) — узел, который принимает данные от всех участников кластера и обеспечивает их дальнейшую отправку в сторону базовой станции.

Совокупность всех узлов–СН формирует коммуникационный «каркас» сети, через который осуществляется передача данных между кластерами. Взаимодействие устроено следующим образом: обычные узлы обмениваются информацией только со своей главой кластера, а СН уже отвечает за маршрутизацию сообщений к другим кластерам или непосредственно к базовой станции (см. рис. 5).

Выбор главы кластера выполняется случайным образом, причём роль СН регулярно передаётся другому узлу. Такой механизм ротации необходим для равномерного распределения энергозатрат, поскольку узлы, выполняющие функции главы, расходуют гораздо больше энергии из-за необходимости обрабатывать и ретранслировать данные от всех узлов своего кластера. Периодическая смена СН позволяет существенно продлить срок службы сети и предотвратить преждевременный выход из строя отдельных узлов.

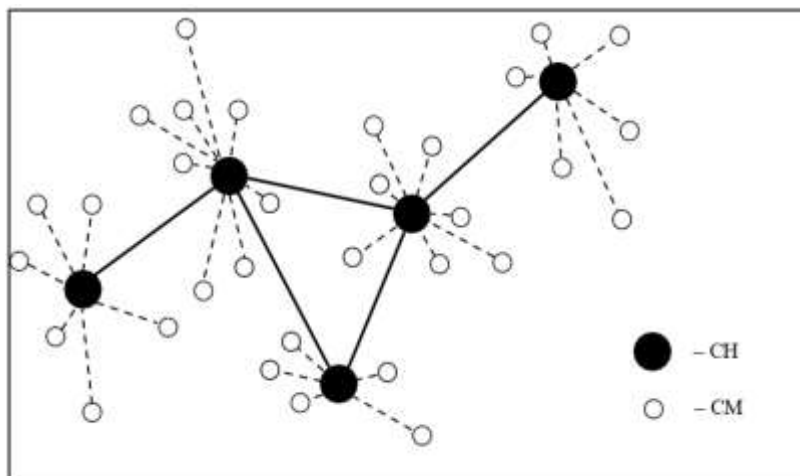


Рис. 5. Иллюстрация метода LEACH.

TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient Sensor Network)

Протокол TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient Network Protocol) основан на принципах кластеризации, применяемых в LEACH, и также формирует иерархическую структуру на базе кластерной организации [8]. Основной особенностью TEEN является использование пороговых значений измеряемых параметров.

Вместо того чтобы постоянно собирать и пересылать данные, сенсорные узлы лишь отслеживают изменения контролируемой величины. Передача данных осуществляется только в том случае, если измеренное значение выходит за установленные пороговые границы. Такой механизм существенно снижает объем передаваемой информации, уменьшая нагрузку на сеть и энергопотребление узлов, а также обеспечивает более адаптивную реакцию системы на важные изменения среды.

Усовершенствованная версия протокола — APTEEN (Adaptive Periodic TEEN) — расширяет функциональность TEEN. Помимо передачи данных по пороговым событиям, узлы могут отправлять информацию периодически, через заранее заданные интервалы времени. Это добавляет гибкость, позволяя учитывать как критические изменения параметров, так и регулярные обновления данных.

Заклучение

Таким образом, рассмотренные подходы к маршрутизации позволяют сформировать общее представление о многообразии и особенностях способов передачи данных в беспроводных сенсорных сетях. Выбор конкретной стратегии определяется прежде всего задачами системы, архитектурой и организацией сети; в ряде случаев существующие алгоритмы адаптируются или модифицируются с учётом специфических требований. При этом универсального решения для маршрутизации в БСС не существует: в каждом отдельном случае подбирается наиболее подходящий метод, обеспечивающий достижение требуемых показателей с учётом заданных технических условий и ограничений.

Список использованной литературы

1. **Kulik, J.** Negotiation-Based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks / J. Kulik, W. R. Heinzelman, H. Balakrishnan // *Wireless Networks*, 2002. – V. 8. – P. 169–185.
2. **Intanagonwiwat, C.** Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking / C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, F. Silva // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. – 2003. – V. 11, № 1. – P. 2–16.
3. **Braginsky, D.** Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks / D. Braginsky, D. Estrin // *Proceedings of the First ACM International Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA)*, October 2002. – Atlanta GA, 2002. – P. 22–31.
4. **Schurgers, C.** Energy Efficient Routing in Sensor Networks / C. Schurgers, M. Srivastava // *The MILCOM Proceedings on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force*, McLean VA, 2001. – P. 357–361.
5. **Karp, B.** **GPSR:** Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Sensor Networks / B. Karp, H. T. Kung // *Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE*

International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00), August 2000. – Boston MA, 2000. – P. 243–254.

6. **Ye, F.** A Scalable Solution to Minimum Cost Forwarding in Large Scale Sensor Networks / F. Ye, A. Chan, S. Lu, L. Zhang // Proceedings of the 10th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), October 2001. – Scottsdale, Arizona, 2001. – P. 304–309.

7. **Biradar, R.** Inter-Intra Cluster Multihop-LEACH Routing In Self-Organizing Wireless Sensor Networks / R. Biradar, S. R. Sawant, R. Mudholkar, V. C. Patil // International Journal of Research and Reviews in Computer Science (IJRRCS). – 2011. – March. – V. 2, № 1. – P. 124–130.

8. **Manjeshwar, A.** TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks / A. Manjeshwar, D. P. Agarwal // Proceedings of the 15th International Symposium on Parallel and Distributed Processing. – 2001. – April. – P. 2009–2015.