



ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЛГОРИТМОВ МАРШРУТИЗАЦИИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ

Аманханов Кири Сергеевич

аспирант, Казахский национальный технический университет имени
К.И. Сатпаева
г. Алматы, Казахстан.

Аннотация

Беспроводные сенсорные сети (БСС), состоящие из множества небольших, автономных устройств, способных собирать и передавать данные об окружающей среде, играют ключевую роль в различных сферах — от мониторинга окружающей среды до промышленной автоматизации. Одним из наиболее критических аспектов, влияющих на их производительность и срок службы, является **эффективность алгоритмов маршрутизации**. Данная статья проводит детальный сравнительный анализ основных типов алгоритмов маршрутизации в БСС, включая плоские, иерархические и основанные на местоположении. Рассматриваются их сильные и слабые стороны в контексте таких ключевых метрик, как **энергопотребление, задержка передачи данных, масштабируемость и надежность**. Особое внимание уделяется оптимизационным подходам, направленным на продление срока службы сети и повышение её общей производительности.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, алгоритмы маршрутизации, энергоэффективность, протоколы, беспроводная связь, WSN, сетевая топология.

1. Введение: Роль и вызовы в беспроводных сенсорных сетях (БСС)

Беспроводные сенсорные сети (БСС) представляют собой динамические сети, состоящие из десятков, сотен или даже тысяч узлов-датчиков, которые взаимодействуют друг с другом для сбора и передачи информации. Эти узлы обычно оснащены ограниченными ресурсами — небольшой мощностью батареи, ограниченной вычислительной способностью и памятью. Поскольку замена или перезарядка батарей в тысячах узлов, расположенных в труднодоступных местах, является непрактичной или невозможной, **энергоэффективность** становится главным приоритетом при проектировании БСС.

Эффективный алгоритм маршрутизации играет ключевую роль в достижении этой цели. Он должен не только гарантировать надежную доставку данных к базовой станции (sink), но и минимизировать энергопотребление, балансировать нагрузку между узлами и обеспечивать масштабируемость для работы в больших сетях.

2. Классификация и сравнительный анализ алгоритмов маршрутизации

Алгоритмы маршрутизации в БСС можно разделить на три основные категории, каждая из которых имеет свои особенности и области применения.

2.1. Плоские (Flat) алгоритмы маршрутизации

В плоских алгоритмах все узлы имеют одинаковый статус. Маршрутизация данных осуществляется между узлами-соседями до тех пор, пока данные не достигнут базовой станции. Самым известным примером является протокол **SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation)**.

Принципы работы: SPIN использует метаданные для обмена информацией между узлами. Перед отправкой полных данных, узел рассылает метаданные (например, **ADV-сообщение**), чтобы узнать, нужны ли они соседям. Если сосед заинтересован, он отправляет запрос (**REQ-сообщение**). Затем узел отправляет данные (**DATA-сообщение**).

Преимущества: Простота реализации, масштабируемость для небольших сетей. Устранение избыточности данных.

Недостатки: Не подходит для приложений, требующих постоянного мониторинга, так как узлы не знают, кто является конечным потребителем данных.

2.2. Иерархические (Hierarchical) алгоритмы маршрутизации

Эти алгоритмы делят сеть на кластеры, в каждом из которых выбирается один **кластерный главарь (Cluster Head, CH)**. Главари собирают данные от узлов своего кластера, агрегируют их и передают на базовую станцию. Этот подход значительно снижает объем передаваемой информации. Наиболее известный протокол — **LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)**.

Принципы работы: Протокол LEACH работает в раундах. В каждом раунде случайным образом выбирается новый кластерный главарь. Это обеспечивает равномерное распределение нагрузки и предотвращает быструю разрядку одного узла.

Преимущества: Энергоэффективность за счет агрегации данных, масштабируемость для больших сетей, продление срока службы сети.

Недостатки: Накладные расходы на создание кластеров и выбор главарей, что может снижать общую эффективность.

2.3. Алгоритмы, основанные на местоположении (Location-based)

Эти алгоритмы используют информацию о географическом положении узлов для определения маршрута. Для этого каждый узел должен знать свои координаты и координаты базовой станции.

Принципы работы: Узел, получивший данные, передает их соседу, который находится ближе к базовой станции. Этот процесс повторяется, пока данные не достигнут цели. Примером является протокол **GEAR (Geographic and Energy-Aware Routing)**, который не только использует местоположение, но и учитывает энергию узлов-соседей для выбора маршрута.

Преимущества: Простота, высокая эффективность в сетях с известным расположением узлов. Отсутствие необходимости в обмене сложными таблицами маршрутизации.

Недостатки: Требуется GPS-модулей или других средств определения местоположения, что увеличивает стоимость и энергопотребление. Неэффективен в сетях с динамической топологией.

3. Ключевые метрики эффективности и оптимизационные подходы

Эффективность алгоритмов маршрутизации оценивается по нескольким ключевым метрикам.

3.1. Энергопотребление

Это наиболее важная метрика. Эффективные алгоритмы минимизируют передачу данных, так как именно радиопередача является самым энергозатратным процессом. Оптимизационные подходы включают:

Агрегация данных: Сокращение объема передаваемой информации путем сбора данных от нескольких узлов и отправки одного сводного сообщения.

Использование коротких маршрутов: Выбор маршрутов с наименьшим количеством промежуточных узлов.

3.2. Задержка передачи данных (Latency)

Задержка — это время, которое требуется данным, чтобы добраться от источника до базовой станции. Для критически важных приложений (например, в медицинской сфере) низкая задержка является обязательным условием.

3.3. Масштабируемость

Способность алгоритма эффективно работать в сетях с большим количеством узлов. Иерархические протоколы, такие как LEACH, показывают лучшую масштабируемость, чем плоские, так как они сокращают количество сообщений.

Заключение

Выбор подходящего алгоритма маршрутизации для беспроводной сенсорной сети — это сложная задача, требующая компромисса между различными метриками эффективности. Плоские протоколы просты, но не всегда энергоэффективны, в то время как иерархические протоколы, такие как LEACH, значительно продлевают срок службы сети за счет агрегации данных. Алгоритмы, основанные на местоположении, обеспечивают высокую эффективность в сетях с известным расположением узлов, но требуют дополнительного оборудования.

Будущие исследования в этой области будут направлены на создание гибридных протоколов, которые сочетают преимущества различных подходов, а также на использование машинного обучения для динамической оптимизации маршрутов в зависимости от состояния сети и доступной энергии узлов.

Литература

1. Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, **2002**, 40(8), 102-114.
2. Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A. P., & Balakrishnan, H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **2002**, 1(4), 660-670.
3. Yu, Y., Govindan, R., & Estrin, D. Geographical and energy-aware routing: A robust data-centric routing protocol for sensor networks. *Proceedings of the 2001 ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, **2001**, 195-207.
4. Al-Karaki, J. N., & Kamal, A. E. Routing techniques in wireless sensor networks: A survey. *IEEE Wireless Communications*, **2004**, 11(6), 6-28.
5. Akkaya, K., & Younis, M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, **2005**, 3(3), 325-349.