

## АНАЛИЗ ПРОТОКОЛОВ МАРШРУТИЗАЦИИ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНО-АКТУАТОРНОЙ СЕТИ И МЕТОД ИХ ВЫБОРА

БЕЗРУК В.М., ВЛАСОВА В.А., СКОРИК Ю.В., КОЛТУН Ю.Н., КОСТРОМИЦКИЙ А.И.

Рассматривается процесс выбора эффективного протокола маршрутизации для применения в полевых сенсорных сетях с локализацией элементов методом анализа иерархий. В результате сравнительного анализа выбран энергоэффективный протокол маршрутизации на основе местоположения узлов БСАС.

**Ключевые слова:** сенсорная сеть, маршрутизация, критерии выбора, энергоэффективность, метод анализа иерархий, эксперт.

**Key words:** Sensor network, routing, selection criteria, energy efficiency, hierarchy analysis process, expert.

### 1. Введение

В настоящее время активно развиваются беспроводные сенсорно-актуаторные сети (БСАС), которые эффективно используются для решения прикладных задач распределенного сбора информации о контролируемом параметре в сетях мониторинга и контроля. Такие сети являются гомогенными, самоорганизующимися, одноранговыми, с ячеистой топологией, узлы которых способны к ретрансляции информации. Автономные источники питания в виде батареи в этих сетях накладывают жесткие ограничения по энергоэффективности на все протоколы маршрутизации, применяемые в сенсорных сетях. Поэтому для БСАС важными являются задачи маршрутизации, в частности, поиска оптимальных с точки зрения энергоэффективности и поиска маршрутов, обеспечивающих максимальное время жизни сети. Развитие БСАС привело к появлению большого числа протоколов маршрутизации. Это определяет актуальность выбора предпочтительного протокола маршрутизации для конкретной реализации.

### 2. Обзор протоколов маршрутизации в БСАС

Высоким спросом для приложений беспроводной сенсорно-актуаторной сети пользуются 3 вида алгоритмов:

- централизованные алгоритмы: основаны на том, что один узел обладает знаниями обо всей сети. Эти алгоритмы используются крайне редко из-за значительных энергозатрат на передачу «главному узлу» информации о состоянии всей сети;
- распределенные алгоритмы: в отличие от предыдущего алгоритма, связь поддерживается за счет обмена информацией между узлами;
- алгоритмы, основанные на местоположении: узлы используют информацию об ограниченной области вокруг них для локальной маршрутизации.

Парадигма алгоритма маршрутизации является важным фактором при выборе протокола маршрутизации для использования в конкретной сети. Если применять алгоритмы, предназначенные для работы с ограниченной областью, то необходимо оптимизировать связи между соседними узлами. С другой стороны, для централизованных алгоритмов множество сообщений, передаваемых только на центральный узел, является преимуществом. Использование распределенных алгоритмов требует надежной и эффективной связи между любыми парами узлов. В свою очередь, алгоритмы на основе местоположения, эффективность которых обеспечивается знанием географических координат, например, с помощью GPS, делают решение более дорогим [1,2].

*Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN)* является адаптивным протоколом, который позволяет строить маршруты передачи информации с высокой энергетической эффективностью. Сети, использующие протокол SPIN, работают с высокоуровневыми дескрипторами данных – метаданными. Для того чтобы исключить передачу избыточной информации, в сети используются согласование мета-данных и знания о доступных ресурсах. Это позволяет узлам эффективно распределять информацию между ретрансляторами с ограниченным источником питания.

*Directed Diffusion* – протокол, ориентированный на данные (data-centric). В сетях, использующих этот протокол для маршрутизации, сенсорные узлы применяют связку «атрибут-значение». Для получения данных узел генерирует запрос по определенной схеме, подобно работе базы данных, где узлы выступают в роле ячеек данных. Обычно источником таких запросов является базовая станция (БС). Узлы хранят предыдущие запросы, а при получении нового обновляют кэш запросов, что позволяет определять скорость передачи данных. При получении сообщения с запросом устанавливается связь с отправителем и при этом активизируются датчики сбора данных. Такая связь называется градиентом и характеризуется скоростью передачи данных, продолжительностью и временем окончания сеанса связи. При получении запроса узел старается установить как можно больше градиентов в направлении к БС. Для оптимизации используются положительные и отрицательные подкрепления. Также алгоритм подразумевает работу с двумя видами градиентов: «разведывательный» и градиент данных. Первый предназначен для настройки маршрута, а второй – для отправки данных.

*Rumor Routing.* Этот алгоритм подразумевает использование запросов от БС, которые распространяются по всей сети узлам, наблюдающим события, отраженные в запросе. Для этого узел, который фиксирует изменение контролируемого параметра, передает пакет, который называется агентом. Агенты распространяются по сети, агрегируя данные от других узлов с событиями, в направлении БС. Для избегания образования петель агенты хранят список посещенных узлов. Помимо доставки информации, агенты позволяют поддерживать актуальные знания о сети каждым узлом, обновляя информацию из агента. Тем не менее, некоторые узлы могут не получать эту информацию, так как агент распространяется между некоторыми соседними узлами случайным образом.

*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH).* В алгоритме LEACH роль главы кластера периодически выполняют разные узлы сети для равномерного использования энергии. Преимущество LEACH – в использовании циклов. В каждом цикле заново выбирается глава кластера из числа узлов, которые не были главами кластеров, и для обеспечения процента глав кластеров относительно общего числа узлов сети. Затем глава кластера рассылает расписание для доступа с временным разделением (TDMA) внутри кластера. Это позволяет узлам включать передачу только тогда, когда глава кластера свободен. Также глава кластера отвечает за агрегацию данных, полученных от узлов своего кластера, для устранения избыточности.

*Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol (TEEN)* в отличие от иерархических протоколов используется для реактивных сетей, которые немедленно реагируют на изменение различных параметров. В этом протоколе глава кластера рассылает пороговые значения (hard и soft), при достижении которых узел передает информацию. Если параметр из набора атрибутов достигает жесткого порогового значения, узел включает передатчик и передает данные. Затем другие узлы передают данные в соответствующем временном промежутке при выполнении следующих условий: текущее значение атрибутов больше hard порога и текущее значение атрибута отличается от заданного значения на величину, равную или большую, чем soft порог. Обе стратегии направлены на уменьшение затрат энергии на передачу сообщений.

Основным недостатком этого алгоритма является то, что если контролируемое значение не достигнет порогового уровня, то узлы не будут связываться между собой, пользователь не получит ни-

какой информации и не будет осведомлен о работоспособности сети. Таким образом, данный алгоритм не применим для приложений, где передача информации должна быть регулярна.

*Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS)* считается улучшением алгоритма LEACH. Вместо распределения узлов в кластеры он предусматривает формирование цепочек сенсорных узлов. На основе этой структуры каждый узел передает и принимает информацию только от одного ближайшего соседнего узла. Это позволяет регулировать мощность передачи. Узел выполняет агрегацию данных, пересылает их по цепочке до базовой станции. В каждом цикле только один узел из цепочки взаимодействует с базовой станцией. Цепочка строится с максимальной эффективностью по энергозатратам.

*Self-Organizing Protocol (SOP)* – протокол маршрутизации и самоорганизации, используется в гетерогенных сенсорных сетях с поддержкой как стационарных, так и мобильных узлов. Оконечные датчики, которые собирают информацию об атрибутах окружающей среды, передают данные определенному числу узлов, выполняющих роль маршрутизаторов. Они являются стационарными и образуют основную сеть коммуникации. Собранные данные передаются маршрутизаторами на более мощные базовые станции. Каждый окончательный узел должен иметь возможность связаться хотя бы с одним маршрутизатором, чтобы быть частью данной сенсорной сети. Оконечные узлы могут быть идентифицированы посредством адреса маршрутизатора, которому они передают информацию. Таким образом, формируется иерархическая архитектура, где группы узлов формируются и объединяются по необходимости.

*Geographic Adaptive Fidelity (GAF)* – протокол, направленный на оптимизацию производительности БСАС за счет поиска эквивалентных узлов, с точки зрения передачи информации. Эквивалентными считаются такие узлы, которые могут поддерживать связь одним и тем же множеством соседних узлов. Для определения эквивалентных узлов необходимо знать глобальное (или, по крайней мере, локальное) местоположение узлов сети. Формируется виртуальная сетка с таким размером ячеек, чтобы все узлы ячейки могли взаимодействовать с узлами соседней, и наоборот. Таким образом, узлы в одной ячейке – эквивалентные. Для обеспечения энергоэффективности только один из узлов в ячейке будет обеспечивать связь, в то время как остальные будут резервными.

*Geographical Energy and Aware Routing (GEAR)* – алгоритм маршрутизации, который также основан на знании местоположения узлов. Локализация происходит с помощью систем глобального позиционирования или других систем. Выбор узла-ретранслятора для построения маршрута основывается на эвристическом выборе из множества соседних узлов. Маршруты, построенные с использованием протокола GEAR, образуются за счет рекурсивной географической передачи пакета внутри сенсорного поля. Таким образом, достигается высокая энергоэффективность при использовании в одноранговых сетях.

*Sequential Assignment Routing (SAR)* – один из первых протоколов маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях, который обеспечивает понятие Quality Of Service (QoS – качество услуг) критериев маршрутизации. Он базируется на выставлении

атрибутов уровня приоритета каждого пакета. Кроме того, связи и маршруты имеют метрику, характеризующую их возможность обеспечить качество обслуживания. Эта метрика определяется задержками и энергозатратами. На основе алгоритма создается дерево маршрутов с корнем в одном hop'e от базовой станции. Для этого учитываются несколько параметров, таких как приоритет пакетов, энергетические ресурсы, показатели QoS. Протокол также периодически актуализирует маршруты, чтобы реагировать на выход из строя одного из активных узлов.

*A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks (SPEED)* – протокол, также обеспечивающий QoS. Для его работы требуется, чтобы каждый узел сохранял информацию о своих соседях и использовал данные об их географическом положении для поиска путей. Кроме того, протокол стремится обеспечить определенную скорость доставки каждого пакета. Таким образом,

можно заранее оценить задержку прохождения пакета от отправителя к получателю, разделив расстояние на скорость пакета. Также SPEED позволяет находить обходные маршруты в случае перегрузок сети. Модуль маршрутизации в протоколе SPEED называется Stateless Geographic Non-Deterministic Forwarding (SNFG) и работает с четырьмя другими модулями на сетевом уровне. Оценка задержки на каждом узле основывается на определении времени, которое прошло после запроса подтверждения получения переданного пакета данных. Исходя из значения задержки, SNFG выбирает узел, который отвечает требованиям по скорости обработки. Если такового нет, рассматриваются соседние узлы.

В табл. 1 представлены обобщенные характеристики рассмотренных протоколов маршрутизации.

Таблица 1

№	Протоколы маршрутизации	Мобильность	Потребляемая мощность	Согласованность	Агрегация данных	Локализация	QoS	Сложность структуры	Масштабируемость	Множественность путей
N <sub>1</sub>	SPIN	Возможна	Ограничена	Да	Да	Нет	Нет	Низкая	Ограничена	Да
N <sub>2</sub>	Directed Diffusion	Ограничена	Ограничена	Да	Да	Нет	Нет	Низкая	Ограничена	Да
N <sub>3</sub>	Rumor Routing	Очень ограничена	Не определена	Нет	Да	Нет	Нет	Низкая	Хорошая	Нет
N <sub>4</sub>	LEACH	Фиксированные БС	Максимальна	Нет	Да	Да	Нет	Главные узлы кластера	Хорошая	Нет
N <sub>5</sub>	TEEN	Фиксированные БС	Минимальна	Нет	Да	Нет	Нет	Главные узлы кластера	Хорошая	Нет
N <sub>6</sub>	PEGASIS	Фиксированные БС	Максимальна	Нет	Нет	Да	Нет	Низкая	Хорошая	Нет
N <sub>7</sub>	SOP	Нет	Не определена	Нет	Нет	Нет	Нет	Низкая	Низкая	Нет
N <sub>8</sub>	GAF	Ограничена	Ограничена	Нет	Нет	Да	Нет	Низкая	Хорошая	Нет
N <sub>9</sub>	GEAR	Ограничена	Ограничена	Нет	Нет	Да	Нет	Низкая	Ограничена	Нет
N <sub>10</sub>	SAR	Нет	Не определена	Да	Да	Нет	Да	Средняя	Ограничена	Нет
N <sub>11</sub>	SPEED	Нет	Не определена	Нет	Нет	Да	Да	Средняя	Ограничена	Да

Приведенные в табл. 1 данные использованы при сравнении протоколов маршрутизации методом анализа иерархий, в частности, при формировании матриц парных сравнений протоколов с учетом мнений экспертов.

### 3. Метод анализа иерархий для выбора предпочтительного варианта протокола маршрутизации БСАС

Рассмотрим особенности применения метода анализа иерархий для выбора единственного предпочтительного протокола маршрутизации БСАС с учетом совокупности показателей качества. Были взяты данные по 11 протоколам маршрутизации (табл. 1).

Метод анализа иерархий (МАИ) состоит в декомпозиции проблемы выбора предпочтительного варианта протокола маршрутизации на простые составляющие части и получении суждений экспертов по парным сравнениям элементов проблемы выбора [3, 4], которые представляются в виде матрицы

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} \dots a_{1j} \dots a_{1n} \\ a_{21} \dots a_{2j} \dots a_{2n} \\ \dots a_{ij} \dots \\ a_{n1} \dots a_{nj} \dots a_{nn} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $a_{ij}$  – оценки парных сравнений элементов.

Оценки парных сравнений элементов  $a_{ij}$  находятся с использованием субъективных суждений экспертов, численно определяемых по шкале относительной важности элементов [3, 4].

В результате обработки матрицы (1) получают компоненты собственного вектора  $V_j$  и вектора приоритетов  $P_j$ :

$$P_j = \frac{V_j}{S}, \quad V_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n a_{ij}}, \quad S = \sum_{j=1}^n V_j, \quad (2)$$

где  $n$  – число сравниваемых вариантов протоколов маршрутизации.

С использованием этих данных вычисляются значения компонент вектора глобальных приоритетов  $\vec{C}$  согласно [3,4]:

$$C = \sum_{ij=1}^N P_j P_N, \quad ij = \overline{1, N}. \quad (3)$$

Здесь  $P_N$  – компоненты вектора приоритетов по отношению к каждому показателю качества.

По максимальному значению компонент глобального вектора приоритетов выбирается единственный предпочтительный вариант протокола маршрутизации.

В табл. 2 приведена матрица парных сравнений показателей качества протоколов маршрутизации согласно (1), затем вычислены собственный вектор и вектор приоритетов согласно (2). За показатели качества были взяты следующие характеристики протоколов маршрутизации:  $K_1$  – потребляемая

мощность,  $K_2$  – локализация,  $K_3$  – QoS,  $K_4$  – сложность структуры,  $K_5$  – масштабируемость.

Таблица 2

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$V_1$	$P_1$
$K_1$	1	1/5	6	7	8	2,319	0,271
$K_2$	5	1	7	8	9	4,789	0,56
$K_3$	1/6	1/7	1	3	3	0,734	0,086
$K_4$	1/7	1/8	1/3	1	2	0,4121	0,048
$K_5$	1/8	1/9	1/3	1/2	1	0,296	0,0346

В табл. 3 показаны результаты вычисления значений компонент вектора глобальных приоритетов  $C_j$  согласно соотношению (3).

Таблица 3

Протоколы маршрутизации	Компоненты векторов приоритетов протоколов маршрутизации по отношению к показателям качества $P_N$					$C_j$
	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	
SPIN	0,125	0,026	0,041	0,141	0,043	0,0607
Directed Diffusion	0,1105	0,023	0,036	0,123	0,038	0,0535
Rumor Routing	0,049	0,02	0,033	0,109	0,158	0,0385
LEACH	0,017	0,176	0,028	0,019	0,14	0,1116
TEEN	0,249	0,018	0,046	0,016	0,18	0,0888
<u>PEGASIS</u>	0,016	0,155	0,024	0,096	0,123	0,1025
<u>SOP</u>	0,039	0,016	0,021	0,084	0,012	0,0262
<u>GAF</u>	0,179	0,227	0,062	0,18	0,204	0,1968
<u>GEAR</u>	0,145	0,2	0,052	0,159	0,036	0,1648
<u>SAR</u>	0,036	0,014	0,348	0,037	0,032	0,0507
<u>SPEED</u>	0,032	0,119	0,306	0,032	0,028	0,1046
$P_i, i = \overline{1, 5}$	0,271	0,56	0,086	0,048	0,035	

Из табл. 3 видно, что согласно МАИ предпочтительным вариантом маршрутизации является протокол маршрутизации  $N_8$  – GAF, который соответствует максимальной компоненте глобального вектора приоритетов [1-4].

### 4. Вывод

Проведен сравнительный анализ характеристик 11 протоколов маршрутизации в БСАС. Рассмотрены практические особенности применения метода анализа иерархий для выбора предпочтительного варианта протокола маршрутизации в БСАС. В результате применения МАИ выбран предпочтительный вариант протокола маршрутизации – GAF (протокол маршрутизации, основанный на знании каждым узлом своего местоположения) для применения в полевых БСАС с локализацией элементов.

Достоинством использования метода анализа иерархий для выбора предпочтительного варианта протокола маршрутизации является учет суждений экспертов и последующая формализованная процедура обработки полученных данных для решения такой задачи выбора.

**Литература:** 1. Баскаков С. С. Маршрутизация по виртуальным координатам в беспроводных сенсорных сетях [Текст]: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.13.15 / С. С. Баскаков; [Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана]. М., 2011. 18 с. 2. Иваненко В. Анализ протоколов передачи данных от узлов в беспроводных сенсорных сетях / Виктория Иваненко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. Т. 2, N 10(50). С. 9–12. Режим доступа: DOI: 10.15587/1729-4061.2011.1860. 3. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process [Text] / T.L. Saaty // New York: McGraw Hill, 1980. 270 с. 4. Безрук В. М. Применение метода анализа иерархий при выборе средств телекоммуникаций с учетом совокупности показателей качества [Текст] / В. М. Безрук, Ю. В. Скорик // Радиоэлектроника и информатика. 2013. С. 24-29.

#### **Transliterated bibliography:**

1. Baskakov S.S. (2011). *Marshrutizaciya po virtualnym koordinatam v besprovodnyx sensornyx setyax*. Avtireferat dissertacii. Moskva, 18 p.
2. Ivanenko V.A. (2011). *Analiz protokolov peredachi dannyx otuzlov v besprovodnyx sensornyx setyax*. *Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyx texnologij*, 2/10(50), 9–12.
3. Saaty T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process* New York: McGraw Hill, 270 p.
4. Bezruk V., Skorik Y. (2013). *Primenenie metoda analiza ierarxij pri vybore sredstv telekommunikacij s uchetom sovkupnosti pokazatelej kachestva*. *Radioelektronika i informatika*, 24–29.

Поступила в редколлегию 22.04.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Баранник В.В.

**Безрук Валерий Михайлович**, д-р техн. наук, академик академии связи Украины, профессор, заведующий кафедры «Информационно-сетевая инженерия» ХНУРЭ. Адрес: пр. Науки, 14, Харьков, 61166, Украина. E-mail: valeriy\_bezruk@ukr.net

**Власова Виктория Александровна**, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Информационно-сетевая инженерия» ХНУРЭ. Адрес: пр. Науки, 14, Харьков, 61166, Украина. E-mail: [zlata\\_ne@bk.ru](mailto:zlata_ne@bk.ru)

**Скорик Юлия Валериевна**, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Информационно-сетевая инженерия» ХНУРЭ. Адрес: пр. Науки, 14, Харьков, 61166, Украина. E-mail: [Skorik\\_Y@list.ru](mailto:Skorik_Y@list.ru)

**Колтун Юрий Николаевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационно-сетевая инженерия» ХНУРЭ. Адрес: пр. Науки, 14, Харьков, 61166, Украина. E-mail: [u.koltun@rambler.ru](mailto:u.koltun@rambler.ru)

**Костромитский Андрей Иванович**, канд. техн. наук, доцент, заместитель декана факультета «Телекоммуникаций и измерительной техники», кафедра «Информационно-сетевая инженерия» ХНУРЭ. Адрес: пр. Науки, 14, Харьков, 61166, Украина. E-mail: [a\\_kostromitsky@mail.ru](mailto:a_kostromitsky@mail.ru)

**Bezruk Valeriy**, Doctor of Technical Sciences, professor, academician of the Ukrainian Academy of Telecommunications, Professor, Head of the Department of Information and network engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics. Address: 14, Nauki ave, Kharkiv, 61166, Ukraine. E-mail: [valeriy\\_bezruk@ukr.net](mailto:valeriy_bezruk@ukr.net)

**Vlasova Viktoriya**, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer Department of Information and network engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics. Address: 14, Nauki ave, Kharkiv, 61166, Ukraine. E-mail: [zlata\\_ne@bk.ru](mailto:zlata_ne@bk.ru)

**Skorik Julia**, Candidate of Technical Sciences, Assistant Department of Information and network engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics. Address: 14, Nauki ave, Kharkiv, 61166, Ukraine. E-mail: [valeriy\\_bezruk@ukr.net](mailto:valeriy_bezruk@ukr.net)

**Koltun Yuriy**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Information and network engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics. Address: 14, Nauki ave, Kharkiv, 61166, Ukraine. E-mail: [u.koltun@rambler.ru](mailto:u.koltun@rambler.ru)

**Kostromytskyi Andriy**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor Department of Information and network engineering, Deputy Dean of the Faculty of Telecommunications and measuring technology, Kharkiv National University of Radio Electronics. Address: 14, Nauki ave, Kharkiv, 61166, Ukraine. E-mail: [a\\_kostromitsky@mail.ru](mailto:a_kostromitsky@mail.ru)