

УДК 654.195.6:004

## АНАЛИЗ ЦЕЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ БЕСПРОВОДНОГО ПРОТОКОЛА RPL

ЛАВШУК О. А., ЛИСТОПАД Н. И.

*Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»  
Белорусская государственная академия связи и радиотехники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

**Аннотация.** Рассмотрены принципы работы протокола RPL для сетей с низким энергопотреблением. Выполнено моделирование и анализ параметров целевых функций протокола для различных топологий беспроводных сенсорных сетей.

**Abstract.** The principles of operation of the RPL protocol for networks with low power consumption are considered. Modeling and analysis of the parameters of the objective functions of the protocol for various topologies of wireless sensor networks has been carried out.

### Введение

Развитие концепции Интернета Вещей приводит к интенсивному росту различных устройств, подключаемым к сетям связи. Существует множество областей, в которых используются сенсорные сети, например, военная область использует сенсорные сети для наблюдения и разведки, здравоохранение – для контроля и помощи пациентам. Также сенсорные сети используются в умных домах в качестве сигнализации или управляющих устройств.

Беспроводная сенсорная сеть состоит из небольших устройств, соединенных по радиоканалу. Сенсорные устройства имеют ограниченные ресурсы такие как энергия, память и вычислительная мощность. В этой области проводится множество исследований, например, какие протоколы связи являются наиболее энергоэффективными и обеспечивают наибольший срок службы. [1]

### Моделирование в операционной системе Contiki

Contiki – это операционная система, предназначенная для моделирования сетей с низким энергопотреблением. Специалистами прогнозируется Contiki как основная операционная система, которая будет использоваться для соединения триллионов устройств (или “вещей”) Интернета Вещей. Различные функции ОС включают управление программами/процессами, управление ресурсами, управление памятью и коммуникационное управление. Contiki является операционной системой с открытым кодом, она предназначена для встроенных сетевых систем, в частности, для умных устройств.

Одним из протоколов беспроводных сенсорных сетей является RPL (Routing Protocol for Low energy and Lossy networks) – это протокол для сетей с низким потреблением энергии, в основе которого лежат направленные ациклические графы DODAG (Destination Oriented Directed Acyclic Graph). Протокол RPL образует древовидную топологию (рисунок 1), также называемую DAG (Directed Acyclic Graph). У каждого узла в сети RPL есть предпочтительный родитель, который действует для этого узла как шлюз. Если узел не имеет записи в своей таблице маршрутизации для пакета, узел просто пересылает его своему предпочтительному родителю и так далее, пока он не достигнет пункта назначения или общего родителя, который пересылает его вниз по дереву к месту назначения. Узлы в сети RPL имеют маршруты для всех узлов вниз по дереву. Это означает, что узлы, расположенные ближе к корневому узлу, имеют большие таблицы маршрутизации. [2]

RPL использует три типа управляющих сообщений для создания и поддержки топологии RPL и таблицы маршрутизации. Этими сообщениями являются: информационный объект DODAG (DIO), запрос информации DODAG (DIS) и объект объявления пункта назначения DODAG (DAO). Сообщения DIO используются RPL для формирования, поддержки и обнаружения DODAG.

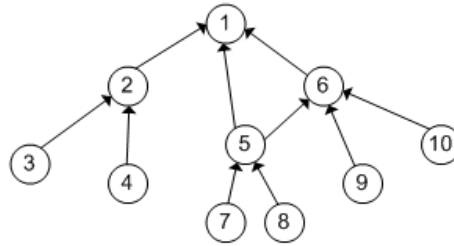


Рис. 1. Топология сети RPL

Протокол RPL поддерживает две целевые функции: объективная функция OF0 для нахождения оптимального пути использует количество переходов минимального ранга целевая функция с гистерезисом MRHOF (Minimum Rank Objective Function with Hysteresis) для нахождения оптимального пути использует метрику ETX. Целевая функция определяет, как тот или иной узел выбирает и оптимизирует маршруты в с помощью протокола RPL на основе доступных информационных объектов.

ETX – эта метрика подсчитывает количество переходов от источника к месту назначения. ETX канала – это ожидаемое количество передач, которые узел рассчитывает произвести, чтобы успешно доставить пакет к месту назначения. ETX пути – это сумма метрик ETX всех каналов, входящих в данный путь. Например, ETX пути с 3 переходами со 100-процентной доставкой равен 3, тогда как ETX пути с 2 переходами с 50-процентной доставкой равен 4.

Таким образом, ETX отражает потерю пакетов, учитывает качество беспроводного канала и возможные коллизии пакетов. ETX зависит от расстояния между двумя узлами, так как вероятность успешной передачи уменьшается с увеличением расстояния. ETX можно снизить за счет увеличения мощности передачи узлов, но это увеличит диапазон помех в беспроводной среде. ETX можно представить следующей формулой:

$$ETX = \frac{1}{D_f \times D_r} \quad (1)$$

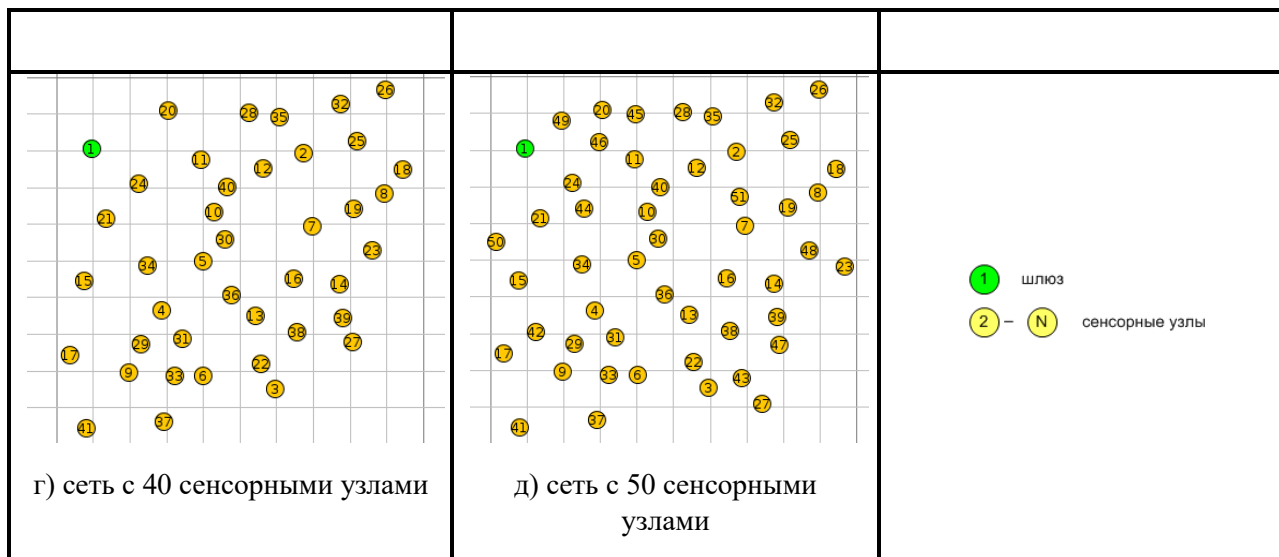
где  $D_f$  – вероятность успешного получения пакетов соседним узлом;

$D_r$  – вероятность успешного получения подтверждения.

В ОС Contiki ETX основан на обратных вызовах протоколов CSMA, которые предоставляют информацию о том, сколько попыток потребовалось для передачи пакета. [3]

Для анализа протокола RPL выбран симулятор COOJA. При проведении исследования использован сенсорный узел на базе платформы Sky-mote, выступающий в роли пограничного маршрутизатора в сети IPv6 и сенсорные сети содержащие 9, 20, 30, 40, и 50 сенсорных узлов (рисунок 2), выступающих в качестве отправителя. Пограничный маршрутизатор (шлюз) выполняет настройку префикса сети и инициирует создание дерева маршрутизации RPL.





**Рис.2.** Топологии беспроводных сенсорных сетей с разным количеством узлов

Протокол RPL поддерживает несколько типов сообщений: точка-точка, точка-многоточка, многоточка-точка, также поддерживается множественный граф. В сети можно создать несколько графов и узел выбирает граф, подходящий для передачи данных в зависимости от типа данных или приложения.

Время моделирования сценария в симуляторе COOJA для каждой сети 10 минут. Среднее время конвергенции сети 1 минута, которое определяется как количество времени, необходимое, чтобы все узлы присоединились к сети. При увеличении плотности узлов увеличивается время конвергенции.

Было выполнено моделирование протокола для двух вышеназванных целевых функций и сравнение основных показателей.

В таблице 1 приведено количество переданных данных для восходящего (от сенсорного узла к шлюзу) и нисходящего трафика (от шлюза к сенсорному узлу).

**Таблица 1.** Восходящий и нисходящий трафик

Количество сенсорных узлов	9	20	30	40	50	Функция
Восходящий трафик, байт	7960	19025	28973	37338	46487	OF0
	8100	20330	27762	37143	44402	MRHOF
Нисходящий трафик, байт	140	140	140	140	140	OF0
	140	140	140	140	140	MRHOF

Проанализировав результат можно сделать следующие выводы: при восходящем трафике при увеличении количества сенсорных узлов увеличивается количество пересылаемых пакетов, при нисходящем трафике от шлюза к сенсорной сети передавалась только управляющая информация, необходимая для установления связи в беспроводной сенсорной сети и количество переданных пакетов.

В таблице 2 приведено сравнение целевых функций OF0 и MRHOF по среднему количеству переданных и потерянных пакетов и максимальном количестве переходов за время моделирования.

**Таблица 2.** Сравнение целевых функций OFO и MRHOF

Количество сенсорных узлов	9	20	30	40	50	Целевая функция
Среднее количество переданных пакетов	9,125	9,05	9,267	9	8,96	OFO
Среднее количество потерянных пакетов	0	0	0	0	0,06	
Максимальное количество переходов	2	2	2	2	3	
Среднее количество переданных пакетов	9,25	9,2	8,8	8,925	8,48	MRHOF
Среднее количество потерянных пакетов	0	0	0,1	0,05	0,2	
Максимальное количество переходов	2	2	6	2	3	

Из полученных результатов можно заметить, что с увеличением количества и плотности сенсорных узлов уменьшается среднее количество переданных пакетов и увеличивается количество потерянных пакетов. Значительно отличается количество максимальных переходов для сети содержащей 30 сенсорных узлов. Выполним анализ сенсорной карты для этих сетей (рисунок 4).

Энергия является важным параметром в сенсорной сети. Выполним анализ основных показателей энергопотребления для рассматриваемых сетей (таблица 3).

**Таблица 3.** Энергопотребление в исследуемых сенсорных сетях

Количество сенсорных узлов	9	20	30	40	50	Целевая функция
CPU Power, мВт	0,347	0,426	0,487	0,518	0,533	OFO
LPM Power, мВт	0,153	0,151	0,149	0,148	0,147	
Listen Power, мВт	0,403	0,453	0,490	0,529	0,528	
Transmit Power, мВт	0,060	0,072	0,091	0,089	0,083	
Power, мВт	0,964	1,101	1,217	1,284	1,292	
CPU Power, мВт	0,344	0,428	0,489	0,527	0,558	MRHOF

LPM Power, мВт	0,153	0,151	0,153	0,148	0,147
Listen Power, мВт	0,413	0,457	0,569	0,718	1,016
Transmit Power, мВт	0,068	0,073	0,126	0,129	0,203
Power, мВт	0,978	1,109	1,211	1,519	1,924

В таблице представлены следующие обозначения.

LPM - это режим низкого энергопотребления, когда сигнал на радиочастоте отсутствует (высокочастотный блок выключен), а микроконтроллер находится в режиме ожидания. Энергопотребления в режиме LPM практически одинаково в двух функциях OF0 и MRHOF и с увеличением количества и плотности сенсорных узлов снижается.

CPUPower -это энергопотребление процессором.При этом необходимо заметить, что когда количество узлов относительно небольшое, энергопотреблении ниже у функции MRHOF, чем у OF0. С увеличение плотности узлов и энергопотребление увеличивается для функции MRHOF.

Анализируя энергопотребление, используемое в режимах прослушивания и передачи, можно заметить, что с увеличением количества узлов и плотности увеличивается энергопотребление (рисунок 3). Энергопотребление выше в режиме прослушивания чем в режиме передачи, для уменьшения энергопотребления в режиме прослушивания устройства периодически отключаются.

Power это общее энергопотребление для всех режимов.

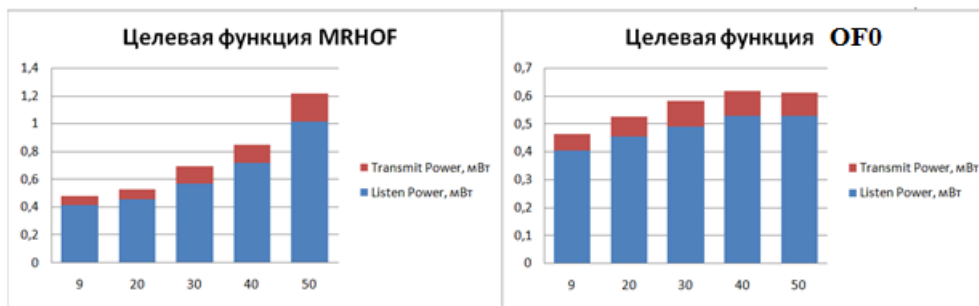


Рис. 3. Энергопотребление в режиме прослушивания и передачи

Сенсорная карта изображенная на рисунке 4 отображает все пути от каждого сенсорного узла до пограничного маршрутизатора.

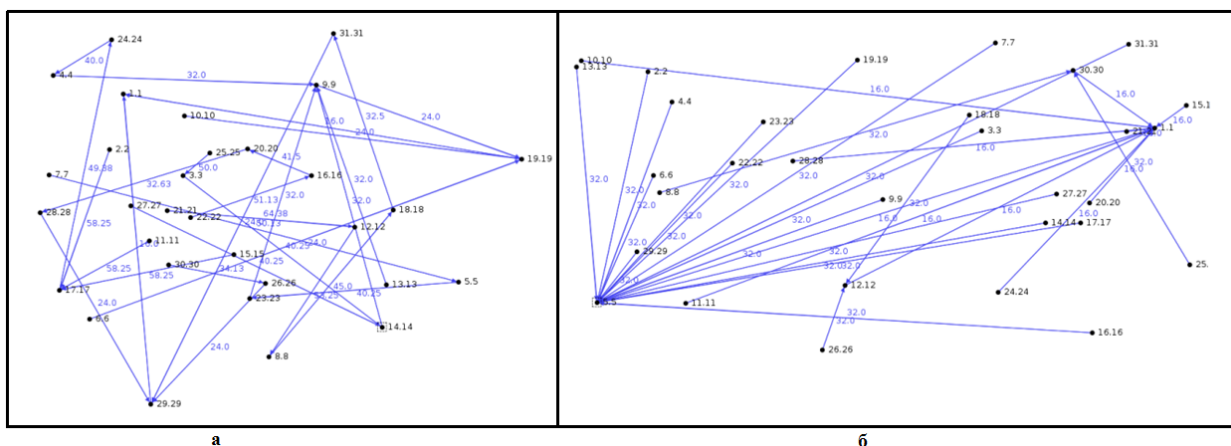


Рис.4. Сенсорная карта RPL по целевой функции: а – MRHOF; б – OF0 для сети с 30 сенсорными узлами

Можно заметить, что максимальная нагрузка по целевой функции MRHOF у узлов 9, 17 и 19 (рисунок 4а), что сказывается на более высоком энергопотреблении в среднем для этих узлов - 1,544 мВт, что на 22% выше, чем у остальных. Количество переходов до пограничного маршрутизатора от узлов 2, 11, 15 и 21 по целевой функции MRHOF равно 6, что увеличивает размеры таблицы маршрутизации. Максимальная нагрузка по целевой функции OF0 у узла 5 (рисунок 4б) и энергозатраты для этого узла составляют 1,686 мВт, что на 30 % выше, чем у остальных сенсорных узлов. Таким образом, для обеспечения эффективного и надежного функционирования для этих узлов необходимо использовать более мощное устройство, либо изменять положение сенсорных узлов и пограничного маршрутизатора.

### **Заключение**

В ходе выполненного исследования был проведен анализ функционирования протокола RPL в беспроводных сетях для двух целевых функций: OF0 и MRHOF. Были проанализированы такие показатели качества беспроводных сетей, как среднее количество переданных пакетов, среднее количество потерянных пакетов, максимальное количество переходов, различные режимы энергопотребления как важнейшие показатели для беспроводных сенсорных сетей.

Представлена сенсорная карта протокола RPL по целевой функции MRHOF и OF0 для сети с 30 сенсорными узлами.

Установлено, что при использовании целевой функции OF0 при малом количестве узлов получены лучшие результаты по многим показателям по сравнению с функцией MRHOF, но при увеличении плотности и количества узлов вышеназванные показатели качества у целевой функций OF0 ухудшаются.

Целевая функция MRHOF в отличие от OF0 позволяет находить наилучшие решения за счет анализа и внесения соответствующих ограничений для различных параметров: относительной влажности, потребляемой мощности узлами, количества отправленных и потерянных пакетов, задержки, метрики качества каналов связи и количества соседей.

### **Список использованных источников**

1. Кучерявый А. Е. Метод маршрутизации трафика в сети Интернета Вещей на основе минимума вероятности коллизий / А. Е. Кучерявый, О. А. Махмуд, А. И. Парамонов // Труды учебных заведений связи / Санкт-Петербург, 2019. Т. 5. № 3. С. 37–44.
2. Мутханна А.С. Сравнительный анализ протоколов маршрутизации RPL и AODV / А. С. Мутханна, А. В Прокопьев., А. Е.Кучерявый // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании II Международная научно-техническая и научно-методическая конференция / Санкт-Петербург, 2013. С. 167-171
3. Routing protocol for Low-Power and Lossy Networks for heterogeneous traffic network / A. Musaddiq[et al.]:EURASIP J Wireless Communications and Networking, 2020, 21 (2020). <https://doi.org/10.1186/s13638-020-1645-4>
4. RPL objective function modification and simulation in cooja [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://anrg-usc-edu./contiki/>. – Дата доступа : 20.08.2022.