

УДК 004.724

А.Е. Ефремова, А.В. Парацинец

Протокол маршрутизации RASeR для беспроводных самоорганизующихся сенсорных сетей

Рассматривается одно из перспективных направлений развития беспроводных сетей – это сеть на основе беспилотных летательных аппаратов. Использование самоорганизующихся сетей на основе БПЛА требует решения множества прикладных задач, связанных с качеством обслуживания сети с высокоподвижными узлами. В рамках данной работы представлен сравнительный анализ известных протоколов маршрутизации с протоколом RASeR, в соответствии с заданными критериями оценки.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, протокол маршрутизации, RASeR, БПЛА.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-40-46

Беспроводные сенсорные сети (БСС) представляют собой множество распределенных приемо-передающих устройств, называемых узлами сенсорной сети, способных самостоятельно организовывать устойчивую сеть [1]. Сенсорные сети являются перспективным инструментом, позволяющим наблюдать за различными явлениями и процессами без непосредственного присутствия человека. Беспроводная связь между узлами устраняет необходимость использования проводов и позволяет размещать сенсоры как в случайном порядке, так и детерминированным образом в пространстве. Также концепция БСС подразумевает, что узлы, входящие в ее состав, должны иметь невысокую стоимость. Вышеперечисленные факторы делают БСС привлекательной технологией для использования в промышленности [2], популярность БСС растет на потребительском рынке, в частности, в сфере «Умный дом» и «Интернет вещей» [3, 4]. Кроме того, внедрение мобильности узлов в БСС является открытой исследовательской задачей [5] и может дать толчок к созданию новых приложений данной технологии.

В связи с этим мировым научным сообществом с недавнего времени исследуется идея использования группы относительно недорогих беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для согласованного выполнения миссий. При этом, в случае выхода из строя одного или нескольких узлов, сеть будет продолжать функционировать. Применение самоорганизующейся сети на основе роя БПЛА позволяет за счет передачи данных через другие узлы, расширить территорию покрытия сети, а также с помощью замены дронов с разрядившимися аккумуляторами повысить длительность проведения операции.

Однако использование самоорганизующихся сетей для обеспечения связи между беспилотными летательными аппаратами предполагает множество технических задач [6], к решению которых в последнее время присоединяется все больше научных коллективов. Одной из основных проблем является низкое качество обслуживания [7]. Это связано с тем, что узлы в такой сети высокоподвижны как относительно друг друга, так и относительно земли. Помимо этого, некоторые узлы в сети могут выйти из строя, и вместо

них могут подключиться новые узлы во время выполнения операции. Таким образом, сеть подвержена частому и быстрому изменению топологии и как следствие постоянным изменениям маршрута доставки данных от источника до получателя. Процесс поиска подходящего пути для передачи данных от источника к месту назначения называется маршрутизацией и является задачей сетевого уровня. Адекватность получаемых данных в беспроводной сенсорной сети непосредственно зависит от протокола маршрутизации, который обеспечивает эффективную работу БСС при определенных параметрах, в заданных условиях и в зависимости от измеряемых величин. Основываясь на опыте зарубежных и отечественных исследователей и разработчиков [8–19], выбран наиболее подходящий для данного применения протокол маршрутизации RASeR.

Цели и задачи

Целью работы является сравнительный анализ протокола маршрутизации RASeR (Robust Ad-hoc Sensor Routing) с такими известными протоколами, как MACRO (MAC/Routing protocol), OLSR (Optimized Link-State Routing) и AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector), применительно к беспроводной сенсорной сети с мобильными узлами.

В соответствии с поставленной целью были определены следующие задачи:

- описание принципа работы протокола RASeR;
- формулировка критериев оценки методов маршрутизации сенсорных сетей с подвижными узлами;
- анализ методов маршрутизации сенсорных сетей в соответствии с критериями оценки;
- приведение результатов сравнительного анализа протоколов маршрутизации.

Описание принципа работы протокола RASeR. Управление доступом к среде

Предполагается, что данный протокол будет использоваться в беспроводной сенсорной сети для обеспечения связи группы беспилотных летательных аппаратов. Сеть должна быть развернута с такой мощностью, чтобы узлы по окончании выполнения задачи могли вернуться на базу. Это значит, что ни один из узлов не должен выходить из сети, за исклю-

чением случаев отказа узла, а, следовательно, количество узлов сети остается фиксированным на протяжении выполняемой ими задачи.

RASeR использует технику слепой пересылки в БСС для передачи пакетов приемнику, а также протоколы управления доступом к среде (MAC уровень) с временным разделением каналов (TDMA) для решения проблемы поддержания актуального градиента в изменяющейся топологии без риска возникновения ширококвещательного шторма. Таким образом, каждый узел осуществляет ширококвещательную рассылку в определенном порядке в соответствии с временным интервалом – слотом, длительность которого рассчитана для передачи одного пакета. Порядок временных интервалов для каждого узла фиксирован и циклический. Время, которое требуется для каждого узла, чтобы передать соответствующий пакет, называется циклом. На рис. 1 представлена структура цикла TDMA, который состоит из n слотов S_{n-1} , где n – количество узлов в сети.



Рис. 1. Структура цикла TDMA

Длительность временных интервалов и номера узлов устанавливаются до развертывания сети, что делает протокол RASeR адаптируемым. Также протокол масштабируется с сохранением уровня надежности доставки пакетов, однако увеличение количества узлов приводит к увеличению уровня задержки.

Применение протокола TDMA на уровне MAC позволяет узлам прослушивать остальные узлы в пределах видимости на протяжении длительности слота, что позволит ему рассчитывать свой градиент с высокой степенью точности.

Однако одной из основных проблем протокола TDMA является уровень сквозной задержки, обусловленный тем, что узлам необходимо ждать выделенных временных интервалов для передачи пакетов. Тем не менее значение сквозной задержки остается низким ввиду того, что отсутствует механизм предотвращения столкновений и повторных передач. Кроме того, в случаях, когда требуются небольшие размеры пакетов, длительность цикла будет низкой.

Для использования протокола TDMA необходимо наличие синхронизации между устройствами сети, ряд доступных методов рассмотрен в [21]. Одним из них является метод RBS (Reference broadcast synchronization), который подразумевает, что все узлы будут получать пакет-маяк одновременно по ширококвещательной рассылке, а затем узлы будут синхронизироваться в зависимости от времени прибытия эталонного пакета-маяка. Другим методом может быть использование детерминированного характера протокола TDMA. Поскольку каждый узел знает, когда ожидается запуск каждого слота во время прослушивания ширококвещательной передачи другого узла, он сравнивает время прибытия пакета с началом отсчета ожидаемого запуска. Кроме того, если для получения

информации о местоположении используется система навигации, как, например, ГЛОНАСС, каждый узел может синхронизировать свои часы с полученным временем со спутников.

Нормальный режим работы протокола

Протокол RASeR использует метод слепой пересылки, при этом решение о пересылке данных производится принимающим узлом на основе значения количества переходов до приемного узла. Таким образом, когда узел производит ширококвещательную рассылку, пакет принимается всеми соседями в зоне радиовидимости. Затем каждый соседний узел сравнивает количество переходов, которое известно из принятого пакета, со своим собственным. Затем, если количество переходов узла меньше, чем количество переходов в принятом пакете, пакет должен быть переадресован. Если собственное количество переходов узла больше, чем количество переходов в принятом пакете, пакет удаляется, а если эти величины равны, необходимо учитывать приоритет пакетов.

Приоритеты используются для управления количеством маршрутов, тем самым чрезмерное избыточное дублирование пакетов в сети сводится к минимуму и в то же время повышается надежность протокола из-за разнообразия маршрутов. Каждый пакет имеет бит приоритета, его отсутствие обозначает, что этот пакет является пакетом ветвления. Когда узел получает пакет, он сохраняет его в очереди, поэтому перед наступлением соответствующего слота узел должен решить, какой пакет передать и при этом пакеты с высоким приоритетом имеют преимущество перед пакетами ветвления.

Общий алгоритм работы в каждом временном интервале для узлов сети, построенной на основе протокола маршрутизации RASeR, показан на рис. 2 в виде блок-схемы.

На первом этапе в начале нового временного интервала узлу необходимо определить, является ли данный слот выделенным для него в цикле TDMA. Это делается путем сравнения идентификатора узла с номером временного интервала. Если они не равны, то узел будет прослушивать передачу соседних узлов.

Если узел услышит передачу, тогда он сначала обновит свое значение количества переходов до базовой станции, если это необходимо, а затем, при наличии данных, сохранит их в очереди. Иначе если соседние узлы не осуществляют ширококвещательную рассылку, тогда узел переходит в «спящий режим» в течение оставшейся части временного интервала. В случае, когда идентификатор узла совпадает с номером временного интервала, узел проверяет, есть ли у него данные для передачи. Если есть, то пакет передается в порядке метода организации очереди FIFO («первым пришел – первым ушел») и отправляется с битом приоритета.

В случае, когда узел не имеет данных для пересылки, отправляется пакет-маяк – это первые два поля пакета данных, в составе которого идентификатор узла и количество переходов до базовой станции, и алгоритм повторяется.

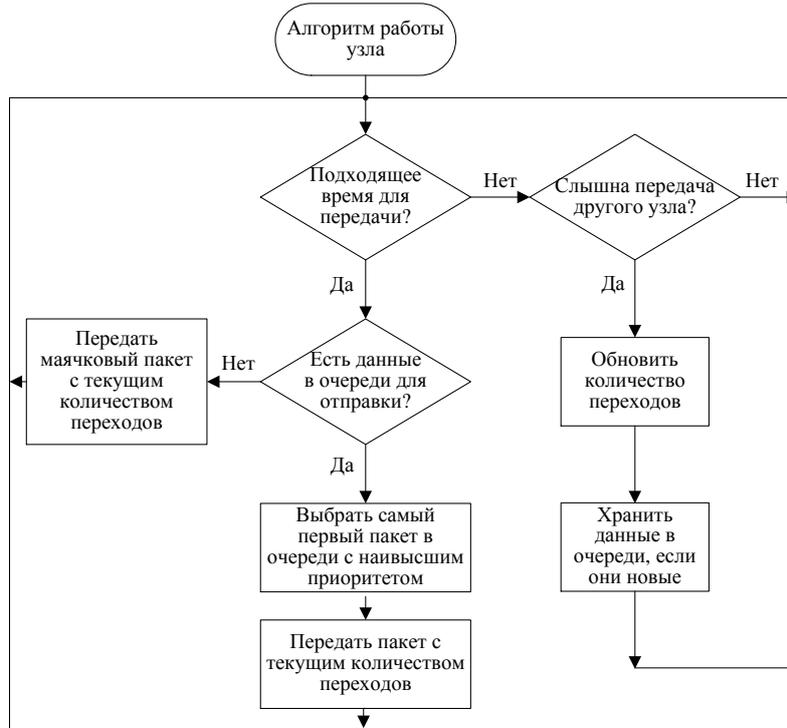


Рис. 2. Алгоритм работы узла протокола RASeR

Ключевыми характеристиками протокола RASeR, которые делают его надежным, является то, что каждый узел может выступать маршрутизатором, осуществляющим ветвление маршрута передачи пакета. Из этого следует, что возможна реализация одновременно нескольких направлений до базовой станции, что значительно снижает потерю пакетов при частых изменениях топологии сети. Кроме того, поскольку каждый узел ведет себя одинаково, это позволяет поддерживать протокол простым и может позволить организовать сеть с большим количеством узлов.

Критерии оценки протокола маршрутизации.

Анализ методов маршрутизации сенсорных сетей

Ввиду аппаратных ограничений приемопередающих узлов по мощности, протоколы должны иметь низкую вычислительную сложность и низкое энергопотребление, поскольку иначе снижается производительность сети и может значительно сократиться срок службы сети.

Таким образом, можно выделить критерии, которые позволят оценить протокол маршрутизации:

- доля успешно полученных пакетов из всех созданных пакетов является одним из ключевых показателей в любой схеме маршрутизации, поскольку отражает качество протокола;
- затрачиваемое время на передачу между узлом, который генерирует данные, и принимающим узлом/ шлюзом;
- пропускная способность, которая характеризуется объемом передаваемой информации в единицу времени;
- непроизводительные издержки, которые включают в себя как объем служебной информации, так и долю потерянных пакетов при передаче;
- энергопотребление.

Для оценки производительности протокола RASeR далее представлены сравнительные характеристики с другими протоколами в соответствии с заданными критериями при разных скоростях передвижения узлов, масштабируемости, а также при различных нагрузках трафика сети. Характеристики протокола маршрутизации RASeR получены в результате моделирования в программной среде MATLAB [21]. Исходные данные, которые использовались при моделировании, представлены в табл. 1. Данные протоколов AODV, OLSR, MACRO были получены в [22] путем моделирования в программной среде OPNET Modeler [23]. Протокол маршрутизации AODV – это реактивный протокол, который наиболее часто используется в сенсорных сетях. Протокол OLSR является проактивным и приведен для полноты сравнения. MACRO-протокол – это один из новых протоколов маршрутизации, который направлен на использование в сенсорных сетях с подвижными узлами.

Результаты сравнительных характеристик протоколов в табл. 2 продемонстрировали, что протокол RASeR имеет превосходство над остальными в случае изменения скорости передвижения узлов сети. Однако уровень среднего потребления энергии данного протокола незначительно уступает протоколу MACRO.

В табл. 3 следует обратить внимание на такие характеристики, как средние непроизводительные издержки и среднее потребление энергии. По мере увеличения количества узлов протокол RASeR становится более энергоэффективным, что связано с тем, что время слота одинаково для каждого сценария. Это объясняется тем, что количество слотов за один период времени остается неизменным, позволяя осуществлять только фиксированное количество передач.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования		
Количество узлов в сети	n	25
Длина одной стороны квадратной области сети, м	L	600
Радиус покрытия узлов, м	r	200
Скорость передачи, бит, кбит/с	R_b	250
Максимальная скорость передвижения узлов, м/с	V_{max}	25
Скорость генерации пакета, пакет/с	f_p	1
Размер генерируемых данных, бит	L_{data}	32
Общий размер пакета, бит	L_p	47
Напряжение питания, В	V_{batt}	3
Потребляемый ток при передаче данных, мА	I_x	16,5
Потребляемый ток при приеме данных, мА	I_{rx}	15,5

Таблица 2

Мобильность					
	Скорость передвижения узлов, м/с	MACRO	OLSR	AODV	RASeR
Коэффициент доставки пакетов (PDR)	3	1	0,46	0,74	1
	10	0,99	0,5	0,77	0,99
	20	0,98	0,51	0,74	0,98
	40	0,97	0,53	0,73	0,98
Средняя сквозная задержка (D_{av}), с	3	0,05	0,138	1,2	0,01
	10	0,065	0,131	1,18	0,01
	20	0,075	0,125	1,21	0,01
	40	0,06	0,121	1,23	0,01
Средние непроизводительные издержки (ОН), бит	3	112	480	640	77
	10	119	460	505	77,6
	20	120	464	479	77,8
	40	123	465	466	78
Пропускная способность (TP), бит/с	3	641	300	499	718
	10	640	349	511	718,4
	20	639	358	510	718,2
	40	639	359	506	717
Среднее потребление энергии (ЕС), Дж/с	3	0,0017	0,0146	0,0163	0,0036
	10	0,0018	0,0149	0,0174	0,0036
	20	0,0019	0,0142	0,0178	0,0037
	40	0,0021	0,0141	0,0176	0,0037

Таблица 3

Масштабируемость						
	Количество узлов	Длина стороны, м	MACRO	OLSR	AODV	RASeR
Коэффициент доставки пакетов (PDR)	15	400	1	0,81	0,88	1
	50	1000	0,95	0,34	0,63	0,998
	100	1500	0,77	0,16	0,38	0,97
Средняя сквозная задержка (D_{av}), с	15	400	0,01	0,07	4,8	0,01
	50	1000	0,69	0,2	5,13	0,03
	100	1500	1,46	0,24	5,15	0,12
Средние непроизводительные издержки (ОН), бит	15	400	5	252	256	104
	50	1000	142	1211	509	49
	100	1500	245	2498	1162	41
Пропускная способность (TP), бит/с	15	400	384	351	397	418
	50	1000	1408	363	755	1413
	100	1500	2161	372	952	2784
Среднее потребление энергии (ЕС), Дж/с	15	400	0,001	0,0072	0,0125	0,0045
	50	1000	0,0051	0,0169	0,0199	0,0028
	100	1500	0,0074	0,0178	0,016	0,0021

При этом если узлов много, все равно существует лишь ограниченное количество временных интервалов, в пределах которых происходит передача данных. Таким образом, увеличение количества узлов приводит к снижению потребления энергии.

Результурующие значения средних непроизводительных издержек протокола RASeR в табл. 4 уменьшаются по мере увеличения скорости генерации пакетов, что связано с увеличением объема передаваемых данных. Также при низком уровне трафика

значения непроизводительных издержек сравнительно велики. Однако, когда скорость генерации данных возрастает, значение непроизводительных издержек пропорционально уменьшается.

Так происходит потому, что при увеличении трафика объем успешно переданных данных больше, чем количество генерируемых непроизводительных издержек.

Таблица 4

Уровень трафика					
	Скорость генерации данных, пк/с	MACRO	OLSR	AODV	RASeR
Коэффициент доставки пакетов (PDR)	1	1	0,52	0,74	1
	4	0,99	0,43	0,6	0,998
	8	0,7	0,32	0,46	0,997
	10	0,51	0,27	0,39	0,995
Средняя сквозная задержка (D_{av}), с	1	0,07	0,14	12,2	0,01
	4	0,16	0,26	14,7	0,01
	8	3,8	1,63	17,4	0,015
	10	5,02	2,53	18,88	0,016
Средние непроизводительные задержки (ОН), бит	1	7	501	498	9
	4	46	298	195	26
	8	92	209	126	87
	10	103	201	119	98
Пропускная способность (TP), бит/с	1	794	97	453	802
	4	2685	1023	1205	3098
	8	3292	1431	1997	6296
	10	3298	1469	2031	7991
Среднее потребление энергии (EC), Дж/с	1	0,001	0,0147	0,0171	0,0042
	4	0,0048	0,0256	0,0238	0,0064
	8	0,0079	0,0284	0,0286	0,0091
	10	0,0088	0,029	0,0291	0,014

Таким образом, по совокупности сравнительных данных можно сделать вывод, что протокол RASeR способен адаптироваться к масштабированию сети, высокому уровню трафика, мобильности узлов сети и может применяться в сетях на основе БПЛА.

Заключение

В настоящей работе рассматривается сеть на основе беспилотных летательных аппаратов, для которой характерна такая особенность, как постоянное изменение местоположения каждого узла. В результате сравнительного анализа протоколов маршрутизации выбран наиболее подходящий для данного применения протокол RASeR. Использование протокола RASeR циклического характера управлением доступа к среде исключает широкоэвентуальный шторм, а также, несмотря на отсутствие механизма предотвращения столкновений и повторных передач, сохраняет надежность доставки пакетов даже при высокой частоте изменения топологии. В случае выхода из строя какого-либо из узлов сети существует возможность его замены работоспособным узлом с таким же идентификационным номером, что не повлияет на качество обслуживания сети.

Литература

1. Киричек Р.В. Эволюция исследований в области беспроводных сенсорных сетей / Р.В. Киричек, А.И. Парамонов, А.В. Прокопьев, А.Е. Кучерявый [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sut.ru/doci/nauka/review/4-14.pdf>, свободный (дата обращения: 26.12.2019).
2. The Dynamic Demands of IoT in a Connected World [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.adventone.com/wp-content/files_mf/1464326780_WhitepaperThe

DynamicDemandsOfIoTinaConnectedWorld.pdf, свободный (дата обращения: 05.04.2018).

3. That «Internet of Things» Thing [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rfidjournal.com/articles/pdf?4986>, свободный (дата обращения: 13.01.2020).
4. Интернет вещей / А.В. Росляков, С.В. Ваняшин, А.Ю. Гребешков, М.Ю. Самсонов. – Самара: Изд-во Ас Гард, 2014. – 342 с.
5. Conti M. Mobile Ad Hoc networking: milestones, challenges and new research directions / M. Conti, S. Giordano // IEEE Commun. Mag. – 2014. – № 52 (1). – P. 85–96.
6. Шамонов М.Ю., Абилов А.В. Мобильные самоорганизующиеся сети беспилотных летательных аппаратов Flying Ad Hoc Networks (FANETS) / М.Ю. Шамонов, А.В. Абилов // Приборостроение в XXI веке. – 2016. Интеграция науки, образования и производства: сб. матер. XII Междунар. науч.-техн. конф. – 2017. – С. 542–550.
7. Дорохова А.А. Исследование трафика и качества обслуживания в самоорганизующихся сетях на базе БПЛА / А.А. Дорохова, А.И. Парамонов // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2016. – Т. 4, № 2. – С. 12–25.
8. Clausen T. Optimized Link State Routing Protocol / T. Clausen, P. Jacquet, C. Adjih, A. Laouiti, P. Minet, P. Muhlethaler, A. Qayyum, L. Viennot [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://datatracker.ietf.org/doc/rfc3626/?include_text=1, свободный (дата обращения: 26.12.2019).
9. Perkins C. Ad-hoc on-demand distance vector routing / C. Perkins, E. Belding-Royer, S. Das // Proc. Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA '99). – 1999. – P. 90–100.
10. Heinzelman W. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks / W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan // Proc. 33rd Hawaii Int. Conf. System Sciences (HICSS 00). – 2000. – P. 8020.

11. Kumar G. Routing protocol enhancement for handling node mobility in wireless sensor networks / G. Kumar, M. Vinu, P. Athithan // Proc. IEEE Region 10 Conf. (TENCON). – 2008. – P. 1–6.

12. Directed diffusion for wireless sensor networking / C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, F. Silva // IEEE ACM Trans. Netw. – 2003. – № 11 (1). – P. 2–16.

13. Cakici S. A novel cross-layer routing protocol for increasing packet transfer reliability in mobile sensor networks / S. Cakici, I. Erturk, S. Atmaca, A. Karahan // Wirel. Pers. Commun. J. – 2014. – № 77 (3). – P. 2235–2254.

14. Shurgers C. Energy efficient routing in wireless sensor networks / C. Shurgers, M. Srivastava // IEEE military Communications Conf. (MILCOM'01). – 2001. – P. 357–361.

15. Hayes T. Proactive highly ambulatory sensor routing (PHASeR) protocol for mobile wireless sensor networks / T. Hayes, F. Ali // Pervasive Mob. Comput. – 2015. – Vol. 21. – P. 47–61.

16. Кайсина И.А. Анализ эффективности протоколов маршрутизации OLSR и AODV в летающей сети FANET / И.А. Кайсина, Д.С. Васильев, А.В. Абилов // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова (Ижевск). – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 87–90.

17. Зацепин Э.С. Обзор характеристик протоколов маршрутизации в mesh-сетях // Международный журнал экспериментального образования. – Пенза: ИД «Академия естествознания», 2013. – № 10-2. – С. 342–345.

18. Метелёв А.П. Протоколы маршрутизации в беспроводных самоорганизующихся сетях / А.П. Метелёв, А.В. Чистяков, А.Н. Жолобов // Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского (Нижний Новгород). – 2013. – № 3–1. – С. 75–78.

19. Павлов А.А. Протоколы маршрутизации в беспроводных сетях / А.А. Павлов, И.О. Датъев // Труды Кольского научного центра РАН (Апатиты: Кольский научный центр РАН). – 2014. – № 5 (24). – С. 64–75.

20. Sivrikaya F. Time synchronization in sensor networks: a survey / F. Sivrikaya, B. Yener // IEEE Network. – 2014. – Vol. 18, No. 4. – P. 45–50.

21. MATLAB Analyze data, develop algorithms, and create mathematical model [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/>, свободный (дата обращения: 05.04.2018).

22. Hayes T., Ali F.H. Robust Ad-hoc Sensor Routing (RASeR) protocol for mobile wireless sensor networks // Ad Hoc Networks. – 2016. – P. 128–144.

23. OPNET is now part of Riverbed [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.riverbed.com/gb/products/steelcentral/opnet.html?redirect=opnet?redirect=opnet>, свободный (дата обращения: 05.04.2018).

Efremova A.E., Parashchinec A.V.

Routing protocol RASeR for wireless self-organizing sensor network

This article is considering one of the promising directions of wireless sensory networks development - a network based on unmanned aerial vehicles. Use of self-organizing networks on the basis of UAVs requires solving a set of the applied problems connected with quality of service of a network with high-speed knots. This paper presents a comparative analysis of known routing protocols with the RASeR protocol, in accordance with given evaluation criteria.

Keywords: wireless sensor networks, routing protocol, RASeR, UAV.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-40-46

References

1. Kirichek R.V., Paramonov A.I., Prokop'ev A.V., Kucheryavyi A.E. [The investigation evolution in the wireless sensor networks area]. *Telecom IT Electronic Scientific Journal*, 2014, vol. 8, no. 4 (in Russ.). Available at: <http://www.sut.ru/doci/nauka/review/4-14.pdf> (Accessed: December 26, 2019).

2. The Dynamic Demands of IoT in a Connected World. ADVENT ONE Publ. Available at: https://www.adventone.com/wp-content/files_mf/1464326780WhitepaperTheDynamicDemandsfloTinaConnectedWorld.pdf (Accessed: April 5, 2018).

3. That «Internet of Things» Thing. RFID JOURNAL Publ. Available at: <http://www.rfidjournal.com/articles/pdf?4986> (Accessed: April 5, 2018).

4. Roslyakov A.V., Vanyashin S.V., Grebeshkov A.Yu., Samsonov M.Yu. *Internet Veshchei: monografiya* [Internet of Things: a monograph]. Samara, Izdatel'stvo As Gard Publ., 2014, 342 p. (in Russ.).

5. Conti M., Giordano S. Mobile Ad Hoc networking: milestones, challenges and new research directions. *IEEE Commun. Mag.* 2014, vol. 52, no. 1, pp. 85–96.

6. Shamonov M.Yu., Abilov A.V. [Mobile self-organizing networks of unmanned aerial vehicles Flying Ad Hoc Networks (FANETS)]. *Instrument making in the XXI century - 2016. Integration of science, education and production. Collection of materials 22nd International Sci. and Technical Conf.* 2017, pp. 542–550 (in Russ.).

7. Dorokhova A., Paramonov A. *Issledovanie trafika i kachestva obsluzhivaniya v samoorganizuyushchikhsya setyakh na baze BPLA* [Traffic and Quality of Service Research in a Flying Ad-Hoc Network]. *Telecom IT Publ.*, St. Petersburg, 2016, vol. 4, iss. 2, pp. 12–25 (in Russ.).

8. Clausen T., Jacquet P., Adjih C., Laouiti A., Minet P., Muhlethaler P., Qayyum A., Viennot L. Optimized Link State Routing Protocol, 2003. Available at: https://datatracker.ietf.org/doc/rfc3626/?include_text=1 (Accessed: December 26, 2019).

9. Perkins C., Belding-Royer E., Das S. Ad-hoc on-demand distance vector routing, Proc. Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA '99), 1999, pp. 90–100.

10. Heinzelman W., Chandrakasan A., Balakrishnan H. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks, Proc. 33rd Hawaii Int. Conf. System Sciences (HICSS 00), 2000, 8020 p.

11. Kumar G., Vinu M., Athithan P. Routing protocol enhancement for handling node mobility in wireless sensor networks, Proc. IEEE Region 10 Conf. (TENCON), 2008, pp. 1–6.

12. Intanagonwiwat C., Govindan R., Estrin D., Heidemann J., Silva F. Directed diffusion for wireless sensor networking, *IEEE ACM Trans. Netw.* 2003, vol. 11, iss. 1, pp. 2–16.

Ефремова Алёна Евгеньевна

Разработчик ООО «САПЛ-БИЗ»

Нахимова пер., д. 12/1, г. Томск, Россия, 634012

Тел.: +7-923-403-62-68

Эл. почта: alena.e.efremova@gmail.com

Паращинец Александр Викторович

Аспирант каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского университета

систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Ленина пр-т, д.40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-923-403-62-84

Эл. почта: alexandrparashchinec@gmail.com

13. Cakici S., Erturk I., Atmaca S., Karahan A. A novel cross-layer routing protocol for increasing packet transfer reliability in mobile sensor networks, *Wirel. Pers. Commun. J.*, 2014, vol. 77, iss. 3, pp. 2235–2254.
14. Shurgers C., Srivastava M. Energy efficient routing in wireless sensor networks, *IEEE military Communications Conf. (MILCOM'01)*, 2001, pp. 357–361.
15. Hayes T., Ali F. Proactive highly ambulatory sensor routing (PHASeR) protocol for mobile wireless sensor networks, *Pervasive Mob. Comput.*, 2015 vol. 21, pp. 47–61.
16. Kaysina I.A., Vasiliev D.S., Abilov A.V. [Analysis of Efficiency for AODV and OLSR Routing Protocols in Flying Ad Hoc Networks]. *Kalashnikov ISTU*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 87–90 (in Russ.).
17. Zatsepin E.S. [Characteristics of protocols in mesh-networks]. *Voronezh Institute of High Technologies*, 2013, no. 10–2, pp. 342–345 (in Russ.).
18. Metelyov A.P., Chistyakov A.V., Zholobov A.N. [Routing protocols in wireless Ad hoc networks]. *Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*, 2013, no. 3–1, pp. 75–78 (in Russ.).
19. Pavlov A.A., Datyev I.O. [Routing protocols in wireless networks]. *Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, no. 5 (24), pp. 64–75 (in Russ.).
20. Sivrikaya F., Yener B. Time synchronization in sensor networks: a survey, *IEEE Network*, 2014, vol. 18, no. 4, pp. 45–50.
21. MATLAB Analyze data, develop algorithms, and create mathematical model, available at: www.mathworks.com, 2018.
22. Hayes T., Ali F.H. Robust Ad-hoc Sensor Routing (RAsER) protocol for mobile wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2016, pp. 128–144.
23. OPNET is now part of Riverbed. Available at: <https://www.riverbed.com/gb/products/steelcentral/opnet.html?redirect=opnet?redirect=opnet> (Accessed: April 5, 2018).

Alena E. Efremova

Backend Developer, LLC «SUPL-BIZ»
12/1, Nakhimova per., Tomsk, Russia, 634012
Phone: +7-923-403-62-68
Email: alena.e.efremova@gmail.com

Alexander V. Parashchinec

Post-graduate student, Department of Automated Control Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-403-62-84
Email: alexandrparashchinec@gmail.com