

4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 004.75, 004.94

А.М. Заяц, С.П. Хабаров

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ И МОБИЛЬНОСТИ ЕЕ УЗЛОВ

Введение. Одними из требований к современным системам оперативного мониторинга лесных территорий [Вагизов, 2020; Заяц, Хабаров, 2019] на базе сенсорных или локальных беспроводных сетей (WLAN) являются их мобильность и автономность. Однако для возможности выполнения этих требований требуется существенное снижение энергопотребления каждым из узлов такой сети. Для решения этой задачи используют следующие методы:

- определение и оптимизацию времени включения передачи;
- многозвенную передачу, т. е. отправку сообщений через промежуточные узлы вместо прямой дальней передачи;
- предварительную обработку исходной информации для сокращения объема данных, передаваемых по сети.

Узлы таких сетей, имеющие встроенные источники питания, обладают ограниченным сроком работы без подзарядки. Устройства без внутренних источников питания должны получать энергию непосредственно из окружающей среды. Некоторые устройства такого рода снабжены солнечными батареями, другие преобразуют в электроэнергию механические колебания. В беспроводных ZigBee устройствах наиболее перспективно использование энергии радиоволн.

Однако для любого узла таких сетей, имеющего или нет источник питания, актуально повышение его энергоэффективности, так как время жизни узла сети ограничено временем жизни источника питания.

Постановка задачи. Задача анализа потребления энергии узлом сети в процессе его работы становится как никогда важной. Для примера рассмотрим обобщенную схему узла беспроводной сенсорной сети: он содер-

жит датчик параметров внешней среды, микроконтроллер, память, приемопередатчик и автономный источник питания (рис. 1). Энергия источника тратится на питание датчиков, микроконтроллера и памяти, а также на работу приема-передатчика (физический уровень). Микроконтроллер ведет обработку данных, полученных от датчиков (прикладной уровень) и реализует стек сетевых протоколов (сетевой и канальный уровни).

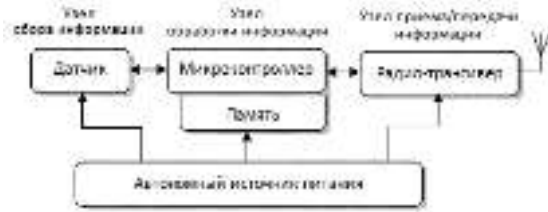


Рис. 1. Обобщенная схема узла беспроводной сенсорной сети

Fig. 1. Generalized schematic of the wireless sensor network node

Основными ресурсами любого беспроводного узла, которые надо особо беречь, являются запас энергии источника питания и пропускная способность этого узла. Из анализа энергопотребления узла на основе трансивера CC2530 фирмы Texas Instrument [Галкин, 2014] следует, что в момент установки адреса и поиска координатора основная часть энергии источника тратится на коммуникацию (прием, прослушивание и передачу данных), а не на обработку или сохранение данных.

При этом особо отмечается тот факт, что потребление тока сенсорным узлом в зависимости от фазы обработки запроса является неравномерным на длительном отрезке времени. Во время внутренней обработки узел потребляет около 15 мА. При прослушивании эфира потребление возрастает до 20 мА, а при передаче сообщения – до 22 мА.

Естественно, что все значения потребления энергии конкретным узлом сети зависят от его внутренней архитектуры. Здесь общим является то, что при исследованиях беспроводных сетей и реализуемых в них протоколов учет энергопотребления каждым из узлов сети является еще одной необходимой составляющей, которую следует учитывать в процессе разработки моделей практически любого класса беспроводных сетей.

Методика исследования. Для решения задачи построения моделей беспроводных сетей, позволяющих исследовать процесс потребления энергии каждым из узлов этой сети, предлагается использовать среду OMNeT++ с

фреймворком INET [Хабаров, 2018]. Выбор данного фреймворка во многом определяется тем, что в его составе присутствуют готовые программные компоненты, которые позволяют в моделях сетей вести учет энергопотребления отдельно каждого из узлов сети. При этом появляется возможность автоматически учитывать изменение энергопотребления в зависимости от того, передает или принимает узел сигналы, работает ли процессор или обрабатывает пакеты сетевого уровня, включен ли дисплей и т. д.

В качестве исходной для дальнейших исследований принята разработанная ранее модель беспроводной сети [Думов, Хабаров, 2019], которая включает пять беспроводных узлов с ограниченным радиусом действия их приемопередатчиков. В этой модели два узла *hostA* и *hostB* находятся на расстоянии большем радиуса действия их приемопередатчиков, что исключает возможность их прямого взаимодействия. Однако обмен UDP сообщениями между ними был организован за счет присутствия в области их радиодоступности еще трех промежуточных узлов (*hostR1*, *hostR2* и *hostR3*), которые могут транслировать и передавать сетевые пакеты. Для обеспечения взаимодействия узлов *hostA* и *hostB* на промежуточных узлах настроены таблицы маршрутизации (рис. 2).

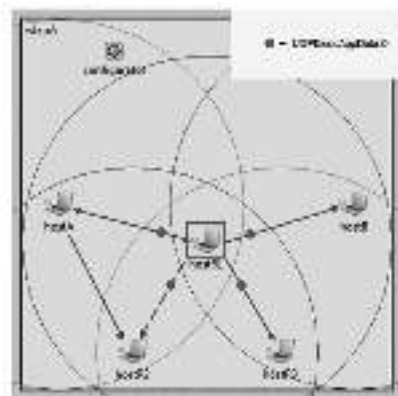


Рис. 2. Модель WLAN с настроенной статической маршрутизацией

Fig. 2. WLAN model with configured static routing

Учитывая интерференционные помехи, эта модель описывает процесс, при котором сформированный на узле *hostA* пакет (*UDPBasicAppData-0*) поступает в радиоканал не по адресу узла *hostB*, а пройдя через сетевой и канальный уровни узла *hostA*, адресуется теперь узлу *hostR1*.

Однако если раскрыть структуру любого узла, выбрать сетевой адаптер wlan(0), в нем физический уровень (radio) и раскрыть последний, то можно обнаружить, что он содержит три компонента, но в нем отсутствует тот, который для нас более всего интересен на данном этапе – это источник питания (рис. 3).



Рис. 3. Состав компонентов модели физического уровня узла
 Fig. 3. Composition of components of the node physical layer model

Результаты исследования. Для исключения отмеченного выше недостатка стандартной конфигурации потребовалось перенастроить модель физического уровня (модуль radio) для всех узлов исследуемой сети. Для подключения в физический уровень одной из нескольких реализованных в INET моделей энергопотребления следует для модуля radio найти параметр energyConsumerType, значение которого и определит тип той модели энергопотребления, которая будет использоваться в дальнейших исследованиях. В качестве примера, для иллюстрации основных подходов к решению задачи учета энергопотребления узлами сети, выбирается простейшая модель «StateBasedEnergyConsumer», которая будет работать в режиме «IdealEnergyStorage».

Для описания этого режима учета энергопотребления каждым из узлов сети следует в файл описания исходной модели wlan5.ini добавить еще одну новую секцию:

```
[Config WLAN-5-4]
description = Modeling energy consumption
extends = WLAN-5-3

*.host*.wlan[0].radio.energyConsumerType =
    "StateBasedEnergyConsumer"
*.host*.energyStorageType = "IdealEnergyStorage"
```

После загрузки нового файла wlan5.ini в среду выполнения, но еще до запуска его на выполнение, раскрыв модуль физического уровня, можно обнаружить, что его структура теперь отличается от рис. 3 тем, что в его составе появился еще один модуль со своим набором параметров (рис. 4).

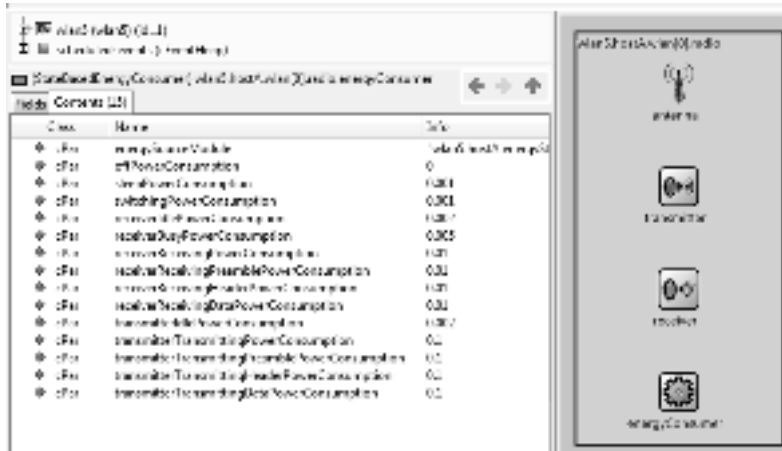


Рис. 4. Измененный состав компонентов модели физического уровня узла
 Fig. 4. The modified composition of the components of the node physical layer model

Модуль StateBasedEnergyConsumer ведет учет потребления энергии на основе текущих состояний сетевого узла: сон, ожидание связи, прием или передача. Причем, каждое из этих состояний описывается соответствующим параметром, который определяет потребляемую от источника питания мощность, задаваемую в ваттах.

Значения, принятые по умолчанию для каждого из состояний работы сетевого узла, можно видеть в левой части рис. 4. В частности, наибольшие затраты энергии ($0.1W=100mW$) наблюдаются в процессе работы передатчика, за исключением периода его простоя ($0.002W=2mW$). Максимальные затраты энергии на прием практически в 10 раз меньше, чем на передачу ($0.01W=10mW$), а в режиме сна узел потребляет всего ($0.001W=1mW$). Все эти значения могут быть изменены соответствующими настройками в файле начальной инициализации.

При этом использование модуля IdealEnergyStorage накладывает некоторые ограничения на модель источника питания – в начальный момент у него бесконечное количество энергии, и он не требует подзарядки. Это до-

пустимо, когда моделируются режимы энергопотребления, а не хранения. Кроме того, в модуле определена переменная `energyBalance`, которая хранит текущее значение потребленной узлом мощности, а потребление энергии в зависимости от времени можно получить, построив `residualCapacity` статистику (остаточная емкость).

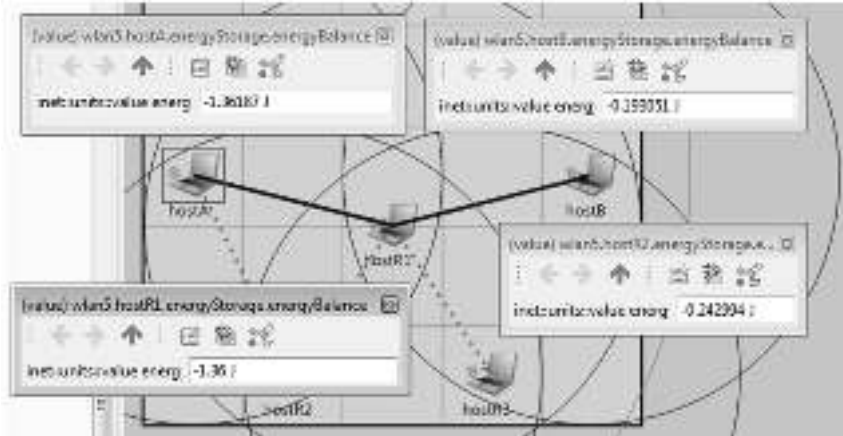


Рис. 5. Результат моделирования энергопотребление узлов WLAN
 Fig. 5. The result of modeling the power consumption of WLAN nodes

На рис. 5 представлены результаты запуска модели исследуемой сети на выполнение. Как и в исходной модели, узел `hostA` сгенерировал 2516 UDP сообщений, часть из которых была передана в сеть и получила подтверждение. На это он затратил 1.36 ватта. Узел `hostB`, получив от узла `hostR1`, как и ранее, 1396 сообщений, затратил на общение с ним 0.19 ватта. Ресурсоемким был и узел `hostR1`, который израсходовал практически такую же мощность, что и узел `hostA`. Из анализа временных рядов следует, что за время работы все узлы сети свою мощность расходовали практически линейно (рис. 6).

Интерес представляет и приводимая ниже статистика, где графа `Count` обозначает число изменений в режимах работы каждого из узлов сети. Это около 11500 переключений, именно столько раз работали физический и канальный уровни, затратив на это в среднем около 0.1 ватт. А вот работа прикладного уровня по генерации сообщений в узле `hostA` и транспорта маршрутизации в узле `hostR1` потребовала подключения процессора, что и вызвало существенное увеличение потребления мощности.

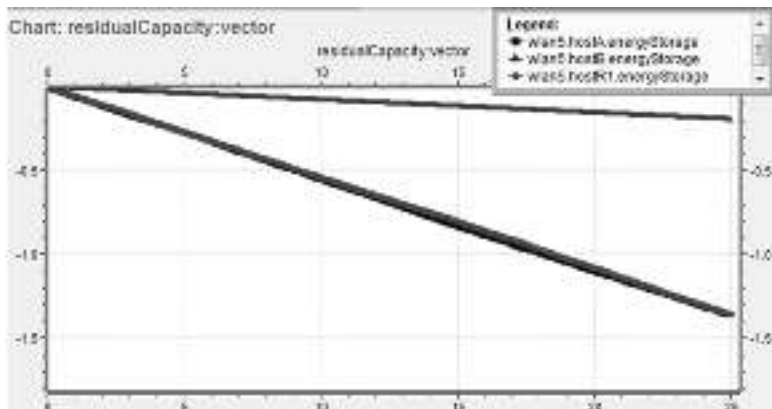


Рис. 6. График потери мощности на трех узлах сети
 Fig. 6. Schedule of power loss at three nodes of the network

Browse Data

Here you can see all data that come from the files specified in the Inputs page.

All (30 / 30) Vectors (5 / 30) Scalars (0 / 0) Histograms (0 / 0)

Module	Name	Count	Mean	StdDev	Variance
wired.hostA.energyStorage	residualCapacity:vector	15429	-0.69683862...	0.2963...	0.1378...
wired.hostB.energyStorage	residualCapacity:vector	15485	-0.673252294...	0.2917...	0.1234...
wired.hostC.energyStorage	residualCapacity:vector	15485	-0.123317780...	0.0705...	0.0048...
wired.hostD.energyStorage	residualCapacity:vector	15485	-0.082328186...	0.0513...	0.0028...
wired.hostE.energyStorage	residualCapacity:vector	15485	-0.096112960...	0.0536...	0.0028...

Рис. 7. График потери мощности источников питания для трех узлов сети
 Fig. 7. The power loss graph of power supplies for three nodes of the network

Беспроводные Ad Hoc [Заяц, Хабаров, 2018a] и Mesh сети часто работают в условиях ограниченных запасов энергии. Поэтому всегда полезно моделировать потребление электроэнергии до включения реальной сети. Активность каждого узла (мота) надо спланировать так, чтобы он мог работать до тех пор, пока батареею необходимо будет перезарядить или заменить.

Следует отметить, что во фреймворке INET присутствуют модули энергопотребления, в наименовании которых имеется аббревиатура либо Cc, либо Ep. В одних из них параметры потребления энергии определяются на основании тока (I), емкости хранения заряда (C) и выходного напряжения (V). В модулях второго типа, т. е. на основе энергии и мощности, – как в рассмотренном выше примере.

Настройка модели перемещений узлов. Одной из особенностей беспроводной связи является то, что она позволяет строить мобильные WLAN, в которых отдельные узлы могут перемещаться друг относительно друга. При этом могут возникать некоторые дополнительные особенности в организации таких сетей. Одна из них будет рассмотрена далее. Для этого предположим, что промежуточные узлы из рассматриваемого примера модели сети обладают некоторой мобильностью. Пусть, для простоты, узлы `hostR*` имеют тенденцию в процессе работы перемещаться на север. Это приведет к тому, что через некоторый интервал времени узел `hostR1` выйдет из диапазонов радиодоступности узлов `hostA` и `hostB`, нарушив тем самым установленный ранее канал для связи этих узлов между собой.

Для моделирования мобильности устройств во фреймворке INET реализован модуль `MovingMobilityBase`. Его особенность в том, что он вызывается путем задания свойства `mobility` для любого компонента из класса хостов, в том числе и для используемого в модели сети компонента `WirelessHost`

Существуют несколько типов модулей мобильности, которые могут быть подключены к компоненту `WirelessHost`. При этом каждый из типов обеспечивает абсолютно разный способ управления перемещениями объектов. Это могут быть:

- предопределенные детерминированные перемещения, такие как прямая линия, прямоугольник или круг;
- вероятностные положения (например, расположение в случайной точке);
- определенные сценариями (например, сценарий черепахи) или управляемые трассировкой.

Существуют также несколько моделей индивидуальной и групповой мобильности.

В рассматриваемом примере выберем простейший тип управления мобильностью – `LinearMobility`, который позволяет определять перемещение узлов вдоль линии путем задания таких свойств этих объектов, как направление (`angle`), скорость (`speed`) и ускорение (`acceleration`). Предположим, что все три узла `hostR*` перемещаются в одном направлении, с одной и той же скоростью и без ускорения. Пусть это будет направление линейного перемещения всех трех промежуточных узлов на север с линейной скоростью 12 м/с.

```
[Config WLAN-5-5]
description = Configuring node movements
extends = WLAN-5-4

*.hostR*.mobilityType = "LinearMobility"
*.hostR*.mobility.speed = 12mps
*.hostR*.mobility.angle = 270deg
```


Сформировав новую секцию ini-файла, можно запустить модель в работу. При этом следует использовать режим FAST, так как в нормальном режиме узлы будут перемещаться очень медленно, и это затянет режим моделирования (рис. 8).

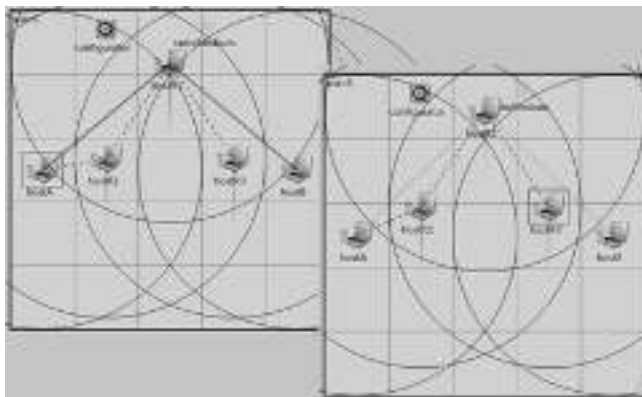


Рис. 8. Работа модели сети на границе выхода узла hostR1 из области радиодоступа с узлами hostA и hostB

Fig. 8. Work of the network model on the border of output of hostR1 node from the radio access area with hostA and hostB nodes

В процессе работы модели можно видеть, как в районе 18–19 с модельного времени узел hostR1 подходит к границе диапазона связи с узлом hostA. После чего канал связи между узлами hostA и hostB теряется. Об этом свидетельствует исчезновение синих линий связи на диаграмме модели. Трафик мог бы маршрутизироваться через узлы hostR2 и hostR3, но сейчас это не происходит, так как таблицы маршрутизации на этих узлах статические и настроены в соответствии с их начальными состояниями.

Чтобы перенастроить маршруты в соответствии с изменяющейся топологией сети, нужно использовать специальный протокол маршрутизации. Он позволит восстановить связь между узлами hostA и hostB путем маршрутизации трафика через узлы hostR2 и hostR3. Одним из таких протоколов может быть протокол AODV, но для его работы необходимо, чтобы уровень MAC формировал сигнал разрыва канала. Однако до сих пор в исследуемой модели сети очереди подуровня L2 (очереди в беспроводных интерфейсах), были неограниченной длины, т. е. пакет не отбрасывался из-за ее перегрузки.

Между тем, мы наблюдали реальную перегрузку в узлах hostA и hostR1 из-за высокой интенсивности генерации дейтаграмм в узле hostA. Начиная с этого шага, очередь L2 на всех узлах будет ограничена всего 10 пакетами. Это, с одной стороны, более соответствует не очень производительным мотам беспроводных сенсорных сетей, а с другой, позволит сети быстрее реагировать на изменения топологии, вызванные перемещениями узлов или их отказом, так как очереди не будут забиты старыми пакетами. Ограничение очереди типа L2 можно описать путем ввода всего лишь одной новой строки в секцию ini-файла.

```
[Config WLAN-5-6]
description = Size Queue equal 10
extends = WLAN-5-5
. . .
*.host*.wlan[0].mac.maxQueueSize = 10
```

Однако совершенно очевидным является тот факт, что вследствие возможных потерь порядковые номера пакетов, принятых узлом hostB, больше не будут непрерывными. Это можно подтвердить результатами моделирования. Если в случае WLAN-5-5 было послано 2529 пакетов, а получено 920 с номерами от 0 до 919, то в случае WLAN-5-6 было послано 2456 пакетов, а получено 891 с номерами от 0 до 1577.

Выводы. Показано, что среда OMNeT++ с фреймворком INET позволяет строить модели беспроводных сетей с учетом энергопотребления и мобильности ее узлов. Такие модели могут использоваться для исследования как систем мониторинга лесных территорий [Заяц, Хабаров, 2018б], так и широкого класса других систем [Хабаров, Шпекторов, 2019].

Результаты исследования энергетических затрат на каждом из узлов WLAN показали отсутствие зависимости расхода мощности на узлах сети от длины очереди, и расход этой мощности в обоих случаях является практически линейным. Исключением является узел hostB, который растрчивает свою мощность лишь в период получения пакета, а в моменты, когда маршрут оборван, затраты энергии снижаются практически до нуля. Однако в момент, когда обнаружен обрыв связи и выполняется поиск нового маршрута для передачи данных, происходят скачки увеличения потребления мощности.

Библиографический список

Вагизов М.Р. Потенциал использования инфокоммуникационных технологий на основе RFID-меток в лесной сфере // Цифровые технологии в лесном секторе: матер. Всерос. науч.-техн. конф. / Санкт-Петербургский государственный

лесотехнический университет имени С.М. Кирова; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2020. С. 26–29.

Заяц А.М., Хабаров С.П. Исследование алгоритма работы распределенной системы мониторинга лесных территорий. // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2019. Вып. 229. С. 243–254. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.229.243-254

Галкин П.В. Анализ энергопотребления узлов беспроводных сенсорных сетей // *ScienceRise*. 2014. № 2 (2). С. 55–61. DOI: 10.15587/2313-8416.2014.27246

Хабаров С.П. Моделирование Ethernet сетей в среде OMNET++ INET FRAMEWORK // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 18. № 3. С. 462–472.

Думов М.И., Хабаров С.П. Моделирование беспроводных сетей в среде OMNET++ с использованием INET FRAMEWORK // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2019. Т. 19. № 6. С. 1151–1161.

Заяц А.М., Хабаров С.П. Организация доступа к беспроводным AD HOC сетям информационных систем мониторинга лесных территорий из среды Windows 10. // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2018а. Вып. 223. С. 285–299.

Заяц А.М., Хабаров С.П. Настройка беспроводных соединений в системах мониторинга лесных территорий // *Леса России: [матер. третьей МНТК]*. СПб., 2018б. С. 80–83.

Хабаров С.П., Шнекторов А.Г. Проектирование и исследование распределенных судовых систем управления техническими средствами в среде SimInTech // *Морские интеллектуальные технологии*. 2019. № 4-2 (46). С. 181–187.

References

Vagizov M.R. Potencial ispol'zovaniya infokommunikacionnyh tekhnologij na osnove RFID-metok v lesnoj sfere. *Cifrovye tekhnologii v lesnom sektore: materialy Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoi konferencii*. Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet imeni S.M. Kirova; Sankt-Peterburgskij politekhnicheskij universitet Petra Velikogo, 2020, pp. 26–29.

Zayac A.M., Habarov S.P. Research of the operation algorithm of a distributed forest territory monitoring system. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoi akademii*, 2019, is. 229, pp. 243–254. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.229.243-254

Galkin P.V. Analiz energopotrebleniya uzlov besprovodnyh sensor-nyh setej. *ScienceRise*, 2014, no. 2 (2), pp. 55–61. DOI: 10.15587/2313-8416.2014.27246

Habarov S.P. Modelirovanie Ethernet setej v srede OMNET++ INET FRAMEWORK. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 462–472.

Dumov M.I., Habarov S.P. Modelirovanie besprovodnyh setej v srede OMNET++ s ispol'zovaniem INET FRAMEWORK. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*, 2019, vol. 19, no. 6, pp. 1151–1161.

Zayac A.M., Habarov S.P. Organizaciya dostupa k besprovodnym AD HOC setyam informacionnyh sistem monitoringa lesnyh territorij iz srede Windows 10. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2018, is. 223, pp. 285–299.

Zayac A.M., Habarov S.P. Nastrojka besprovodnyh soedinenij v sistemah monitoringa lesnyh territorij, *Lesa Rossii: materialy tret'ej MNTK*, 2018a, pp. 80–83.

Habarov S.P., SHpektorov A.G. Proektirovanie i issledovanie ras-predeleennyh sudovyh sistem upravleniya tekhnicheskimi sredstvami v sre-de SimInTech. *Morskije intellektual'nye tekhnologii*, 2019b, no. 4-2 (46), pp. 181–187.

Материал поступил в редакцию 22.06.2020

Зяец А.М., Хабаров С.П. Построение моделей беспроводных сетей с учетом энергопотребления и мобильности ее узлов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 232. С. 252–264. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.252-264

Рассмотрен подход к построению в среде OMNeT++ с использованием фреймворка INET расширенных моделей беспроводных сетей, позволяющих проводить исследование затрат энергии на каждом из узлов сети в процессе их сетевой работы и учитывать особенности сетевого взаимодействия узлов в условиях их мобильности. Показана возможность организации связи между двумя беспроводными узлами, находящимися вне зоны прямой радиодоступности, через ряд промежуточных узлов.

Ключевые слова: распределенные системы, беспроводные сети, сетевое программирование.

Zayats A.M., Khabarov S.P. Using the GNU Octave system to process data coming in over the network. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoy Akademii*, 2020, is. 232, pp. 252–264 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.252-264

An approach to building in the OMNeT ++ environment using the INET framework of advanced models of wireless networks is considered, which makes it possible to study both the energy costs of each of the network nodes during their network operation and take into account the features of network interaction of nodes in the conditions of their mobility. The possibility of organizing communication between two wireless nodes located outside the direct radio accessibility zone through a series of intermediate nodes is shown.

Key words: distributed systems, wireless networks, network programming.

ЗАЯЦ Анатолий Моисеевич – заведующий кафедрой информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, кандидат технических наук, профессор.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: zamfta@yandex.ru

ZAYATS Anatoliy M. – PhD (Technical), Professor, Head of department of Information Systems and Technology of St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: zamfta@yandex.ru

ХАБАРОВ Сергей Петрович – доцент кафедры информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук, доцент.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: Serg.Habarov@mail.ru

KHABAROV Sergey P. – PhD (Technical), Associate Professor, Associate Professor of department of Information Systems and Technology of St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: Serg.Habarov@mail.ru