

УДК 004.77

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1151-1161

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ В СРЕДЕ OMNeT++ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ INET FRAMEWORK

М.И. Думов, С.П. Хабаров

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

Адрес для переписки: dumov.maksim@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 19.08.19, принята к печати 23.10.19

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: 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. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1151-1161

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрен один из возможных подходов к проектированию и исследованию беспроводных сетей в среде имитационного моделирования OMNeT++ с использованием фреймворка INET. Показан процесс моделирования как самих моделей, так и различных режимов их работы. Также рассмотрена методология анализа работы модели на примере временной диаграммы. **Метод.** При рассмотрении подхода использован метод последовательного усложнения моделируемых беспроводных сетей с учетом особенностей режимов их работы. Показана простота реализации подхода, в котором для моделирования беспроводных сетей используются готовые компоненты из состава фреймворка INET. На примере проблемной ситуации продемонстрирован процесс исследования файла временной диаграммы и объяснение поведения имитационной модели. **Основные результаты.** Представлена методика проектирования беспроводных сетей с использованием готовых компонентов из состава фреймворка INET. Продемонстрирована возможность переопределения встроенных компонентов составного модуля для создания модели устройства, отвечающего необходимым требованиям. Рассмотрены возможные режимы работы беспроводных сетей как при прямом взаимодействии узлов, так и при косвенном через промежуточные узлы. Продемонстрирован подход к моделированию физического уровня и явления интерференции. Рассмотрен подход исследования проблемной ситуации, заключающийся в анализе временной диаграммы. **Практическая значимость.** Предложенная среда имитационного моделирования позволяет проводить исследование проектных решений при проектировании беспроводных сетей. Обоснована целесообразность применения разработанных проектов в проектной деятельности.

Ключевые слова

беспроводные сети, компьютерные сети, Wi-Fi, имитационное моделирование, интерференция, OMNeT++, INET framework

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1151-1161

MODELING OF WIRELESS NETWORKS IN OMNeT ++ ENVIRONMENT INVOLVING INET FRAMEWORK

M.I. Dumov, S.P. Khabarov

Saint Petersburg State Forest Technical University, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

Corresponding author: dumov.maksim@yandex.ru

Article info

Received 19.08.19, accepted 23.10.19

Article in Russian

For citation: Dumov M.I., Khabarov S.P. Modeling of wireless networks in OMNeT ++ environment involving INET framework. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 6, pp. 1151–1161 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1151-1161

Abstract

Subject of Research. The paper studies one of the possible design and research approaches relating to wireless networks in the OMNeT ++ simulation environment by applying the INET framework. We show the modeling process of both the models themselves and their various operation modes. The model analysis methodology is considered on the example of a time diagram. **Method.** When considering the approach, the method of serial complication of the modelled wireless networks is used with

reference to their operation features. The simplicity of the approach implementation is shown, as it uses ready-made components from the INET framework for models of wireless networks. The process of the time diagram research and the explanation of the simulation model behavior are demonstrated on the problem situation example. **Main Results.** We present the design method for wireless networks with the use of ready-made components from the INET framework. The redefining possibility of the composite module embedded components is demonstrated to create a model of the device that meets the necessary requirements. Possible operation modes of wireless networks are considered, both at the direct and indirect interaction of nodes through intermediate ones. The modeling approach for physical level and phenomena of interference is demonstrated. The approach for the problem situation research is considered involving the time diagram analysis. **Practical Relevance.** The proposed simulation environment allows for the study of design decisions in the design of the wireless networks. The applicability of the developed projects in real life is proved.

Keywords

wireless networks, computer networks, Wi-Fi, simulation modeling, interference, OMNeT ++, INET Framework

Введение

Проектирование любой современной информационной системы, имеющей сложную структуру с широким набором протоколов, всегда начинается с построения и исследования ее имитационной модели [1]. Целью моделирования является определение оптимальной топологии, адекватный выбор сетевого оборудования, определение рабочих характеристик сети и возможное будущее развитие. Одним из преимуществ имитационного моделирования является возможность проведения ряда исследований, позволяющих определить надежность системы и ее устойчивость при отказах оборудования [2, 3]. Проведение подобных исследований на работающей сети невозможно, так как это может негативно сказаться на стабильности ее работы, к тому же при выходе из строя применяемого оборудования есть риск понести финансовые потери. Точное моделирование исследуемого оборудования позволяет получить такие же результаты работы, как и при реальном использовании этого оборудования, при этом позволяет сэкономить денежные средства на его покупке.

На сегодняшний день существует множество средств имитационного моделирования, к которым применяются достаточно жесткие требования, такие как: детальная реализация протоколов всех уровней, возможность подключения собственных модулей, гибкая возможность изменения параметров имитационной модели, платформенная независимость, развитый графический интерфейс, а также доступность продукта и его цена. Одним из таких инструментов, который отвечает перечисленным требованиям, является среда имитационного моделирования OMNeT++ [4], обладающая развитым графическим интерфейсом как для построения моделей, так и для анализа полученных результатов. Еще одним важным преимуществом является ее доступность, при этом функционал среды не уступает другим платным средствам имитационного моделирования.

Постановка задачи и объект исследования

В данной статье рассмотрен один из возможных подходов к проектированию и анализу беспроводных локальных сетей (Wireless Local Area Network — WLAN) с использованием среды имитационного моделирования OMNeT++^{1,2}. Поставлена задача всестороннего исследования имитационной модели простейшей мобильной WLAN путем ее последовательного усложнения для учета особенностей различных режимов работы беспроводной сети. В качестве основы для разработки моделей предлагается использовать типовые компоненты фреймворка INET, изменение конфигурации которых позволяет моделировать устройства, отвечающие необходимым требованиям.

Объектом исследования являются WLAN, которые полностью соответствуют стандарту таких беспроводных сетей, как Ethernet [5], но используют иную среду передачи данных: инфракрасное излучение или радиоволны СВЧ-диапазона. Эти сети могут быть стационарными, мобильными и мобильно странствующими. Стационарные узлы сети жестко привязаны к определенной точке пространства. Мобильные допускают перемещение узлов сети в пределах зоны действия одной точки доступа или одного сегмента сети, а мобильно странствующие допускают не только перемещение узлов сети, но обеспечивают их роуминг за счет автоматического переподключения от одной точки доступа к другой. По характеру подключения WLAN могут поддерживать два основных режима работы:

- точка-точка (point-to-point), или режим Ad-Нос [6, 7], при котором связь между узлами устанавливается напрямую, без использования специальных точек доступа;
- точка-многоточка (point-to-multipoint), или режим инфраструктуры, при котором сеть состоит как минимум из одной точки доступа, подключенной к проводной сети и некоторого набора беспроводных узлов.

¹ OMNeT++ User Guide Version 5.3 [Электронный ресурс]. URL: <https://omnetpp.org/doc/omnetpp/UserGuide.pdf> (дата обращения: 15.05.2019).

² Simulation Manual OMNeT++ version 5.3 [Электронный ресурс]. URL: https://omnetpp.org/doc/omnetpp/manual/#toc_1 (дата обращения: 15.05.2019).

В данной статье основное внимание уделено анализу моделей мобильных Ad-Нос сетей, работающих как при прямом взаимодействии узлов, так и при косвенном через промежуточные узлы. Это позволило исследовать работу самоорганизующихся WLAN с динамической маршрутизацией сообщений до узлов, находящихся вне зоны радиодоступа конкретного маломощного трансивера узла, используя для этого промежуточные узлы и существенно расширив зону работы конкретного сегмента WLAN [8, 9].

Для имитационного моделирования такого рода сетей предлагается использовать входящий в поставку OMNeT++ фреймворк INET^{1,2}. Он содержит большой набор компонентов для моделирования как сети в целом, так и отдельных ее элементов, а именно: физической среды и режимов распространения сигнала в ней, разного типа антенн, приемников, передатчиков и сетевых карт с возможностью учета их энергопотребления [10].

Первым этапом на пути решения поставленной задачи явилась разработка технологии процесса построения и исследования простейшей WLAN, состоящей всего из двух узлов, связанных между собой радиоканалом для передачи UDP-дейтаграмм. Для проектирования имитационной модели такой сети достаточно использовать всего три компонента фреймворка INET, а именно:

- составной модуль WirelessHost,
- составной модуль IdealRadioMedium,
- простой модуль IPv4NetworkConfigurator.

Составной модуль WirelessHost представляет собой модель хоста беспроводной сети и является одним из расширений модуля StandartHost, на котором базируются все другие модели хостов TCP/IP. Внутренняя структура этого модуля (рис. 1) состоит из четырех уровней: прикладного, транспортного, сетевого и канального, который представлен сетевым интерфейсом.

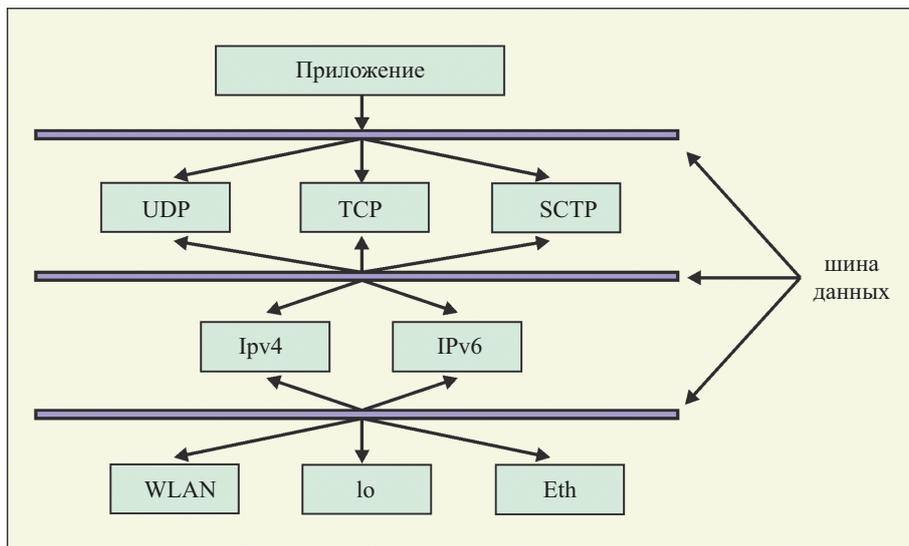


Рис. 1. Внутренняя структура хоста WirelessHost

Каждый из уровней включает в свой состав набор predetermined компонентов из состава фреймворка INET, тип которых может быть изменен через файл конфигурации. В частности, прикладной уровень содержит безразмерный массив компонентов типа «приложение», каждый из которых моделирует работу приложения на модели хоста. Данный модуль может как генерировать исходящий трафик, передавая его на расположенные ниже уровни, так и принимать входящий трафик. Транспортный уровень включает в свой состав три компонента, которые моделируют протокол пользовательских датаграмм (User Datagram Protocol — UDP), протокол управления передачей (Transmission Control Protocol — TCP) и протокол передачи с управлением потоком (Stream Control Transmission Protocol — SCTP). В составе сетевого уровня присутствуют два компонента: интернет-протокол четвертой версии (Internet Protocol version 4 — IPv4) и интернет-протокол шестой версии (Internet Protocol version 6). Канальный уровень содержит компоненты, реализующие сетевые интерфейсы, такие как проводной Ethernet (Eth), беспроводной (wlan), внутренний петлевой интерфейс (Loopback — lo) и др. Каждый из уровней соединяются между собой через общие шины данных.

¹ INET Framework for OMNeT++. Manual [Электронный ресурс]. URL: <https://omnetpp.org/doc/inet/api-current/inet-manual-draft.pdf> (дата обращения: 15.06.2019).

² INET Framework for OMNeT++/OMNEST. Release 3.6.0 [Электронный ресурс]. URL: <https://omnetpp.org/doc/inet/api-current/neddoc/index.html?p=src-inet-linklayer-common-WirelessNic.ned.html> (дата обращения: 15.05.2019).

Для имитации физической среды, в которой происходит беспроводная связь, используется составной модуль *IdealRadioMedium*. Он отвечает за моделирование распространения сигнала, его ослабление по мере удаления, учет помех и других физических явлений. Модель физической среды описывает, когда, где и как передача и посторонний шум поступают на приемники. Модуль *IdealRadioMedium* имеет сложную структуру (рис. 2) и включает в свой состав другие предопределенные компоненты, моделирующие следующие физические явления и процессы:

- распространение радиосигнала в пространстве (*propagation*) — компонент описывает, как радиосигнал распространяется через пространство во времени;
- аналоговое представление радиосигнала (*analogModel*) — моделирует процесс, как аналоговое представление передач превращается в аналоговое представление приемов;
- фоновый шум (*backgroundNoise*) — представляет собой модель фонового шума и описывает тепловой шум, космический фоновый шум и другие случайные колебания электромагнитного поля, которые влияют на качество канала связи;
- уменьшение мощности от расстояния (*pathLoss*) — описывает уменьшение мощности по мере распространения сигнала через пространство;
- уменьшение радиосигнала при прохождении через препятствия (*obstacleLoss*) — представляет собой модель потерь и описывает уменьшение мощности сигнала при его прохождении через препятствия и физические объекты.

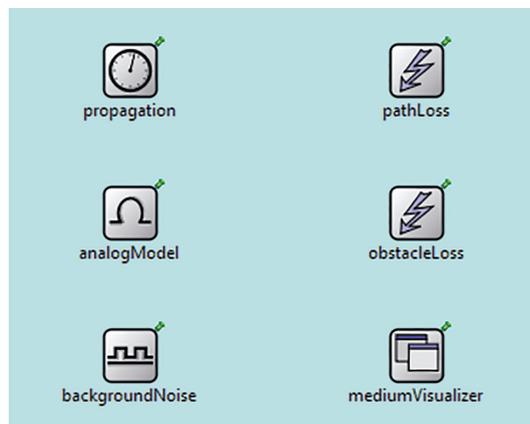


Рис. 2. Внутренняя структура составного модуля *IdealRadioMedium*:

propagation — распространение, **analogModel** — аналоговая модель, **backgroundNoise** — фоновый шум, **pathLoss** — потеря мощности, **obstacleLoss** — потеря мощности через препятствия, **mediumVisualizer** — визуализатор распространения радиосигналов

В общем случае реализованные в INET модели физической среды описывают физическое устройство, которое способно передавать и принимать сигналы. В их состав входят: модель антенны, модели приемника и передатчика, а также модель потребления энергии. Модель антенны распределяется между моделью передатчика и моделью приемника. Разделение модели передатчика и модели приемника позволяет использовать асимметричные конфигурации.

Модель взаимодействия двух беспроводных узлов по протоколу UDP

Подход к построению данной модели будет рассмотрен на примере беспроводной сети, состоящей из двух узлов, взаимодействующих друг с другом по протоколу UDP. В данной модели узлы будут располагаться на расстоянии 400 м друг от друга, при этом радиус действия приемопередатчика каждого из узлов будет равен 500 м. Использование в качестве протокола передачи данных UDP означает, что узлы должны функционировать не только на транспортном уровне, но и на уровне пользовательских приложений. Фреймворк INET содержит два типа модулей, работающих по протоколу UDP:

- *UDPBasicApp* — модуль, обеспечивающий генерацию UDP-пакетов заданной длины на заданный IP-адрес с заданным временным интервалом;
- *UDPSink* — модуль, имитирующий приложение, которое выполняет прием поступивших с уровня UDP сообщений, подсчета их количества и прекращения их дальнейшей обработки.

В исследуемой модели необходимо, чтобы узел *hostA* генерировал UDP-сообщение длиной 1 КБ и передавал его на узел *hostB* через случайный промежуток времени. Используемая модель беспроводного узла *WirelessHost* из состава фреймворка INET уже имеет модуль интерфейса приложения, поэтому для реализации поставленной задачи необходимо только переопределить тип используемого модуля в файле конфигурации, который может иметь следующий вид:

```

*.hostB.numUdpApps = 1
*.hostB.udpApp[0].typename = "UDPSink"
*.hostB.udpApp[0].localPort = 5000

*.hostA.numUdpApps = 1
*.hostA.udpApp[0].typename = "UDPBasicApp"
*.hostA.udpApp[0].destAddresses = "hostB"
*.hostA.udpApp[0].destPort = 5000
*.hostA.udpApp[0].messageLength = 1000B
*.hostA.udpApp[0].sendInterval = exponential(10ms)
    
```

Данная настройка сообщает, что на узле hostA используется модуль UDPBasicApp, который формирует UDP-сообщения длиной 1 КБ и отправляющий их через случайный интервал времени, описываемый экспоненциальным распределением со средним значением 10 мс. Для того чтобы сформированные сообщения доходили до адресата, в файле конфигурации указывается наименование узла, которому предназначено передаваемое сообщение, а также номер порта, например, 5000. Узел hostB использует модуль UDPSink и также работает на порту 5000.

Помимо уровня приложения, файл конфигурации должен содержать определение физического уровня, который представляется в модели хоста WirelessHost как сетевой адаптер, в состав которого входит антенна и радиотрансивер. В среде INET существует большое разнообразие радиомодулей, поддерживающих различные протоколы физического уровня, однако в данном примере будет использоваться идеализированная модель физической среды, хосты которого содержат модуль IdealRadio как часть IdealWirelessNic. На основании изложенного, конфигурация физического уровня будет иметь вид:

```

*.host*.wlan[*].typename = "IdealWirelessNic"
*.host*.wlan[*].radio.transmitter.CommunicationRange = 500m
*.host*.wlan[*].radio.receiver.ignoreInterference = true
**.*.bitrate = 1Mbps
    
```

После запуска созданной имитационной модели на выполнение откроется графическое окно среды выполнения, где будет представлена вся сеть и входящие в ее состав модули. Среда позволяет в любой момент отобразить внутреннюю структуру составного модуля, дважды щелкнув по его пиктограмме. Надо обратить внимание, что отобразившаяся структура модуля будет отличаться от той, что была представлена на рис. 1. Это связано с тем, что после запуска модели на выполнение среда имитационного моделирования обработала файл конфигурации и настроила параметры компонентов WirelessHost.

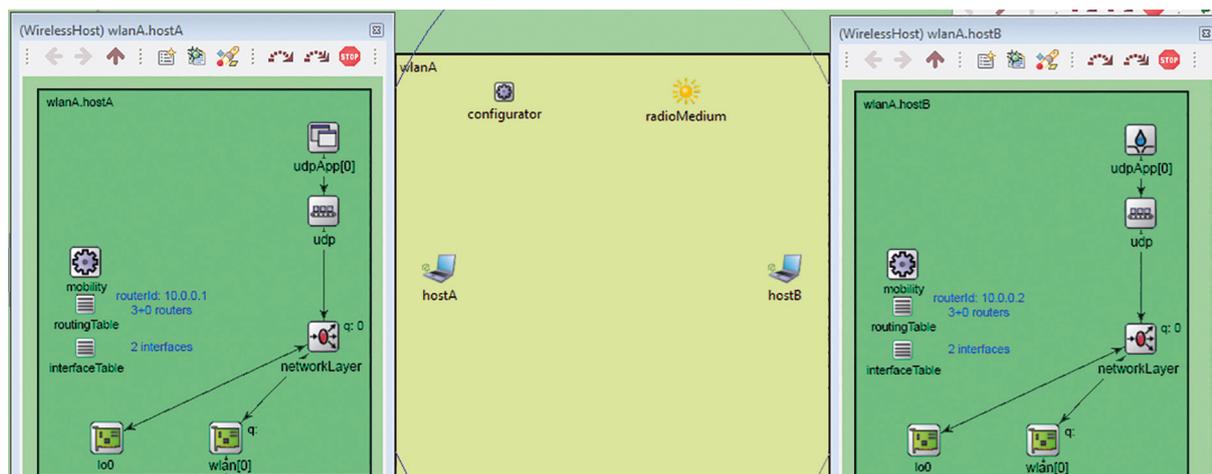


Рис. 3. Модель WLAN и внутренняя структура составных модулей узлов hostA и hostB:
udpApp[0] — модуль приложения, **udp** — модуль протокола UDP, **networkLayer** — сетевой уровень,
Io0 — сетевой петлевой интерфейс Loopback, **wlan[0]** — беспроводной сетевой интерфейс,
mobility — модуль положения узла в пространстве, **routingTable** — таблица маршрутизации,
interfaceTable — таблица сетевых интерфейсов

На рис. 3 видно, что теперь каждый хост имеет только по одному сетевому адаптеру, но с двумя сетевыми интерфейсами каждый. При этом один из них является внутренним петлевым (Io), а второй является внешним (wlan) и подключенным к беспроводной сети через внутренний трансивер. Оба узла имеют оди-

наковую структуру не только на физическом уровне, но и на канальном, сетевом и транспортном уровнях. Отличие наблюдается только на уровне приложений, а именно, в типе используемого приложения.

Запустив модель на выполнение, можно наблюдать, как приложение UDPBasicApp, работающее на узле hostA, формирует UDP-пакеты со случайной временной скважностью. После чего эти пакеты, пройдя через уровни UDP и IPv4, поступают в сетевой интерфейс wlan, который ставит поступившие пакеты в очередь и осуществляет их передачу, как только возникает такая возможность. Использование стековой реализации в сетевом интерфейсе позволяет согласовать скорости поступления пакетов с верхнего уровня с пропускной способностью канала, а также скоростью работы передающей среды. Это означает, что пока в стековой очереди есть пакеты, они будут передаваться друг за другом без пробелов между ними.

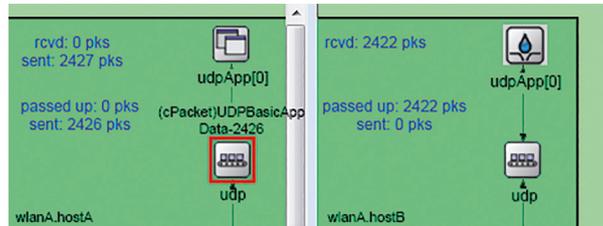


Рис. 4. Результаты прогона имитационной модели:

rcvd — количество полученных пакетов; **sent** — количество отправленных пакетов, **passed up** — количество переданных в приложение пакетов

По результатам имитационного моделирования (рис. 4) видно, что UDP-приложение на узле hostA за 25 с сформировало 2427 пакетов. При этом 2426 пакетов было обработано на транспортном уровне UDP. Из них 2422 пакета было передано по радиоканалу и поступило на узел hostB. Здесь они прошли через канальный, сетевой и транспортный уровни этого узла и поступили в UDP-приложение хоста hostB. Таким образом, счетчик количества пакетов указывает, что за 25 с было принято 2422 пакета длиной 1028 Б (1000 Б сообщение + 8 Б UDP + 20 Б IP) каждый, а это означает, что скорость передачи составила около 800 кбит/с.

Модель статической маршрутизации для взаимодействия удаленных узлов

Возможности применения имитационной среды OMNet++ не ограничиваются процессом проектирования и исследования только простых моделей. Она позволяет также исследовать более сложные модели и ситуации, такие как в работе [11], где на примере созданной имитационной модели проводной компьютерной сети была проанализирована эффективность использования резервирования передач. Другой пример, который будет рассмотрен ниже, демонстрирует подход к проектированию и исследованию более сложной структуры, но уже беспроводной сети [12, 13].

Допустим, что имеется необходимость в обеспечении беспроводной связи и передачи UDP-сообщений от узла hostA к узлу hostB с радиусом действия их приемопередатчиков всего 250 м. При этом расстояние между этими узлами составляет 400 м, что исключает возможность их прямого взаимодействия. Дополнительно между узлами расположены еще три узла hostR1, hostR2 и hostR3, которые в процессе своей работы могут оказывать интерференционные помехи на работу соседних узлов. Особенность исследуемой модели состоит в том, что приемопередатчики сетевых адаптеров, обладая малой мощностью, ограничивают радиус их действия, что приводит к невозможности прямой связи между двумя узлами. Однако соединение может быть установлено, если между этими узлами будут располагаться другие узлы, которые могут транслировать и передавать сетевые пакеты. Для этого все или часть промежуточных узлов должны поддерживать маршрутизацию.

Если в исходную модель (рис. 3) добавить еще три узла, ограничить мощность всех приемопередатчиков до 250 м и запустить модель на выполнение, то можно увидеть, что узел hostA отправляет UDP-пакеты на соседние узлы, однако последние не принимают их, так как данные пакеты им не предназначены. Для того чтобы соседние узлы не отбрасывали полученные пакеты, а передавали их на другой узел, необходимо, чтобы на промежуточных узлах была настроена таблица маршрутизации [14]. В данном простейшем случае рассмотрен пример статической маршрутизации, которая настраивается через простой модуль IPv4NetworkConfiguration в файле конфигурации, который имеет следующий вид:

```
#Автоматическая настройка статических маршрутов
*.configurator.config = xml("<<config>
<interface host='**' address='10.0.0.x' netmask='255.255.255.0' />
<autoroute metric='errorRate' />
</config>")
#Отключение оптимизации записей таблицы маршрутизации
```

```
*.configurator.optimizeRoutes = false
#Отключение записей таблицы маршрутизации, созданных из сетевой маски
**.RoutingTable.netmaskRoutes = ""
```

Данная настройка осуществляется с помощью строки XML, параметры которой сообщают конфигуратору, чтобы он назначал IP-адреса в диапазоне 10.0.0.x и использовал оценочную частоту ошибок передач между узлами сети для настройки статических маршрутов. Таким образом, маршруты будут формироваться так, чтобы минимизировать суммарные ошибки, что приводит к созданию правильно настроенной сети IPv4 без каких-либо дополнительных ручных настроек. Сформированные таблицы маршрутизации хранятся в параметре routingTable каждого из хостов, которая доступна для просмотра в графической среде выполнения (рис. 5).

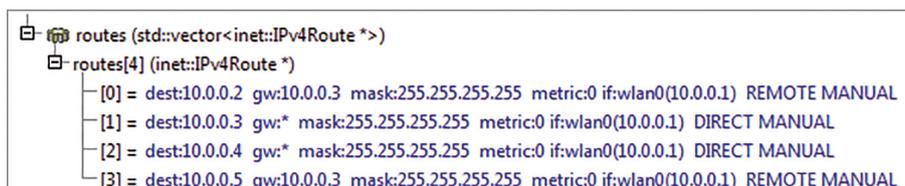


Рис. 5. Таблица маршрутизации узла hostA:

dest — адрес назначения, **gw** — шлюз; **mask** — маска подсети; **metric** — метрика сети, **REMOTE MANUAL** — удаленных доступ; **DIRECT MANUAL** — прямой доступ

Из приведенной таблицы видно, что узел hostA (10.0.0.1) имеет прямой интерфейс для связи с узлами hostR1(10.0.0.3) и hostR2 (10.0.0.4). Также в таблице есть маршрут, который информирует, что до узла hostB (10.0.0.2) можно добраться через узел hostR1, используя последний в качестве шлюза, а узел hostR3 (10.0.0.5) может быть доступен через шлюз hostR2. Окончив конфигурирование модели сети и запустив ее на исполнение, можно в динамике увидеть, как сгенерированный узлом hostA пакет UDP поступает на вход узла hostR1, однако теперь он не отбрасывает этот пакет, а принимает его и осуществляет его пересылку другому узлу.

Данный процесс происходит в соответствии с настройками статической маршрутизации, при которой промежуточные узлы данного сегмента WLAN играют роль шлюзов, увеличивая практически в два раза диапазон возможного беспроводного взаимодействия узлов hostA и hostB. Основное отличие этой модели состоит в том, что она моделирует процесс, при котором сформированный узлом hostA пакет (UDPBasicAppData-0) поступает в радиоканал не напрямую к узлу hostB, а проходя через сетевой и канальный уровни узла hostA, адресуется теперь узлу hostR1 (рис. 6).

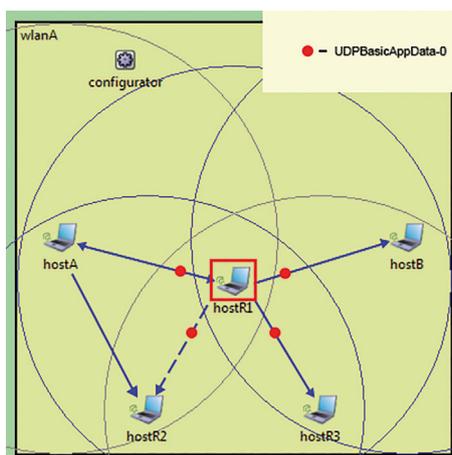


Рис. 6. Модель WLAN с настроенной статической маршрутизации.

configurator — конфигуратор сети, **hostA** — узел A, **hostR1** — узел R1, **hostB** — узел B, **hostR2** — узел R2, **hostR3** — узел R3

Этот процесс выполняется на базе, хранимой в памяти узла hostA, таблице маршрутизации, на основе которой все пакеты, предназначенные для доставки на узел hostB, адресуются для передачи на вход узла hostR1. Поступившие на его вход пакеты будут подниматься до сетевого уровня и тут же отправляться обратно в сеть в соответствии с хранимой в памяти узла hostR1 таблицей маршрутизации. Так как узел hostR1 имеет прямой маршрут доступа к узлу hostB, то поступивший на его вход UDP-пакет будет непосредственно транслирован узлу hostB.

Модель учета взаимных помех

В предыдущей модели WLAN были реализованы идеализированные условия работы сети, в которой не учитывалось такое физическое явление как интерференция радиоволн, возникающее при поступлении на вход радиоприемника двух и более радиосигналов, из-за чего они сталкиваются, искажаются и сбивают нормальную работу приемника радиосигнала [1]. До настоящего момента этот эффект не учитывался, и по существу моделировались устройства с полной дуплексной связью [15]. При этом в среде OMNeT++ в качестве базовых реализовано четыре способа описания и представления сигналов.

Первое представление называется range-based (основанное на диапазонах). Именно оно реализовано в компоненте IdealRadioMedium. Преимуществом этой структуры является компактность, предсказуемость и высокая производительность. Однако ее недостаток заключается в том, что она не точно отражает реальное поведение физической среды.

Вторая структура представляет собой узкополосный сигнал со скалярной мощностью сигнала, несущей частотой и полосой пропускания. Его преимущество в том, что он позволяет вычислять отношение сигнала/шума, а также то, что в большинстве случаев его достаточно для моделирования сетей стандарта IEEE 802.11.

Третья структура данных описывает сигнал, мощность которого изменяется со временем. В этом случае мощность сигнала представлена одномерным временным значением, которое точно следует за переданными импульсами. Данное представление используется при моделировании радиоволн стандарта IEEE 802.15.4a UWB.

Четвертое представление использует многомерные значения для описания мощности сигнала, который изменяется как по времени, так и по частоте. Данное представление может быть использовано при моделировании радиоволн стандарта IEEE 802.11b.

Во всех рассмотренных примерах использовалась простейшая модель физической среды на основе модуля IdealRadioMedium, который использует диапазонное представление, где степень влияния сигнала на соседние узлы зависит от расстояния, на котором они находятся. При работе с данным модулем и его конфигурацией выделяется всего три основных диапазона.

1. Communication range — диапазон уверенного приема и передачи радиосигнала;
2. Interference Range — диапазон, в котором нормальная связь уже невозможна, но он еще оказывает существенные воздействия на приемопередатчики других устройств;
3. Detection range — диапазон, где нет воздействий узла на приемопередатчики других устройств, но есть возможность обнаружить факт наличия и работы этого устройства.

Для исследования степени взаимного влияния радиоволн в конфигурационном файле компонент IdealRadioMedium был настроен на интерференционный диапазон с расстоянием 500 м. Присвоенные параметры описывают тот факт, что радиосигналы становятся слабее с расстоянием, но существует диапазон, в котором они больше не могут быть правильно приняты, но они все еще достаточно сильны, чтобы оказывать влияние на другие сигналы, что приводит к сбою приема.

```
# Допускаем учет помех в радиоприемнике от работы соседних узлов
*.host*.wlan[*].radio.receiver.ignoreInterference = false
# Делаем интерференционный диапазон равным двойному диапазону связи *.host*.wlan[*].radio.transmitter.maxInterferenceRange = 500m
# Отображение на схеме интерференционного диапазона узла hostA
*.hostA.wlan[0].radio.displayInterferenceRange = true
```

Для исследования этого режима в файле конфигурации был включен режим регистрации и записи событий, которые происходят в модели за время ее прогона. По окончании работы модели были сформированы файлы отчетов, согласно которым за время работы модели:

- узел hostA сформировал 92 UDP-сообщения размером 1 КБ каждый;
- уровень UDP узла hostA прошла 91 дейтаграмма размером 1008 Б;
- в сеть, пройдя уровень MAC, отправлено 89 пакетов размером 1028 Б;
- однако на узел hostB поступил всего 1 пакет за 1 с модельного времени.

Если теперь проанализировать временную диаграмму зарегистрированного процесса моделирования сети, то можно обнаружить, что только на 800 мс модельного времени на вход wlanB.hostB.udpApp(0) поступило одно из первых сообщений, которое было сгенерировано узлом hostA и ретранслировано узлом hostR1.

Высокая интенсивность (среднее время 10 мс) случайной генерации UDP-пакетов узлом hostA, наличие интерференционных помех и борьба за доступ к беспроводной среде передачи данных, привели к тому, что отправка сообщения с узла hostA на узел hostB была осуществлена только в момент значительной паузы на узле hostA. При этом борьба за доступ к беспроводной среде передачи данных велась между узлами hostA и hostR1, которые хотели передать узлу hostB как прямые, так и ретранслируемые UDP-пакеты.

Но если на узел hostB поступило одно из первых, отправленных с узла hostA сообщений, то это говорит о том, что оно в сети не пропало и смогло где-то сохраниться. На этот вопрос дает ответ график

зависимости от времени (T) длины очереди (L), формируемой в буфере сетевого адаптера шлюза hostR1, который ретранслирует пакеты между узлами hostA и hostB. Из приведенного на рис. 7 графика видно, что за 1 с модельного времени в этом буфере сохранилось почти 80 отправленных узлом hostA пакетов, которые узел hostR1 не успел ретранслировать на узел hostB. На данный момент значение максимальной длины очереди буфера адаптера определено по умолчанию в соответствующем модуле фреймворка INET. В реальной беспроводной сети длина буфера или его объем имеют большое значение для работы сети, особенно если этот адаптер используется в таком устройстве, как шлюз.

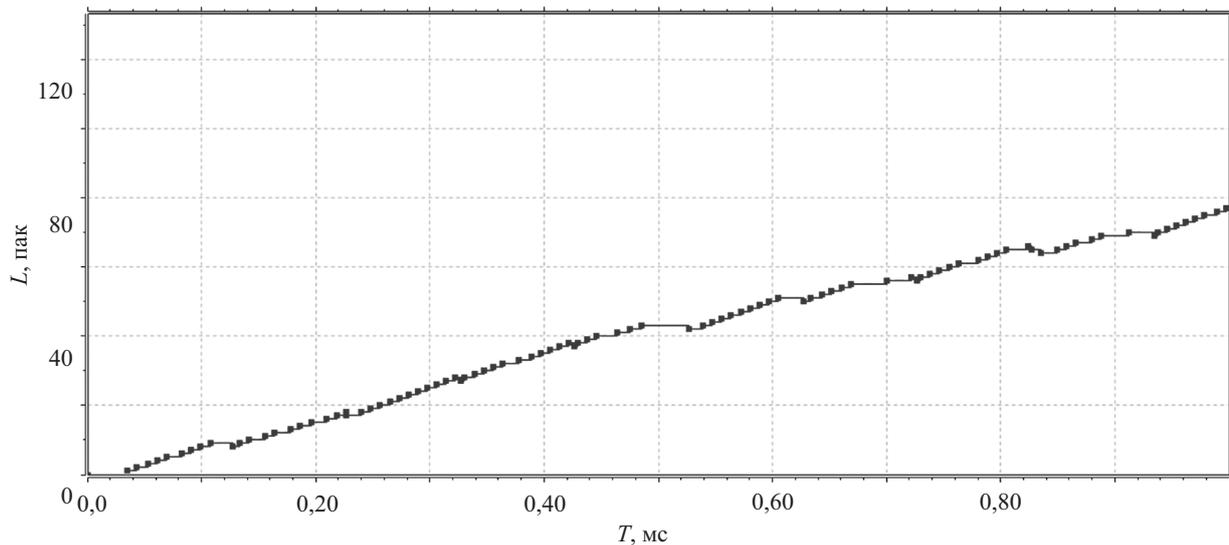


Рис. 7. График длины очереди в буфере сетевого шлюза узла hostR1

Что мешало в моделируемой сети UDP-пакету из буфера шлюза hostR1 дойти до узла hostB раньше? Ответ на этот вопрос дает анализ зарегистрированных в сети событий, происходящих в процессе ее работы [16]. На рис. 8 представлена временная диаграмма работы всех элементов для всех узлов беспроводной сети, откуда видно, что:

- первый пакет (UDPData-0) поступает в сеть (событие #22) и через некоторый интервал времени достигает узлов hostR1 (#23) и hostB (#26). Причем второе событие происходит позже, так как узел hostB расположен дальше;

- узел hostB принимает радиосигналы от узла hostA (#26 – #45), но не распознает их ввиду значительной удаленности от источника передачи;

- узел hostR1 начинает успешный прием пакета от узла hostA (#23 – #32);

- в процессе передачи первого пакета, приложение wlanB.hostA.udpApp(0) (#27) генерирует второе сообщение UDPBasicAppData-1, которое сразу не может быть отправлено в сеть. Оно помещается в буфер сетевого адаптера и будет находиться там до конца работы сетевого адаптера с первым пакетом. Этот момент описывает событие #36 и зеленая пунктирная стрелка, связывающая его с событием #27;

- узел hostR1, успешно закончив прием первого пакета (#32), обращается к своей таблице маршрутизации (#35). На ее основе он переадресует принятый пакет на узел hostB и отправляет его в сеть (#39);

- однако чуть раньше (#32) узел hostA начал передачу второго пакета, который до этого хранился в буфере его сетевого адаптера;

- на вход приемника узла поступают одновременно два радиосигнала (#48 и #51), которые интерферируют между собой, не позволяя узлу hostB распознать UDP-пакет, идущий от шлюза.

Подводя итог исследованию модели WLAN с учетом интерференционных помех от работы соседних устройств, следует отметить, что наблюдается существенное снижение производительности их работы. Большую часть времени передающий узел и шлюз работают одновременно, что вызывает приход на трансивер принимающего узла сразу двух сигналов и их «столкновение» между собой.

Такой подход к организации беспроводных сетей является неприемлемым, и чтобы свести к минимуму помехи, необходим некоторый протокол доступа к мультимедиа среде, что позволит определять, какой хост и когда имеет право на передачу данных [17, 18]. Одним из таких протоколов может быть работающий на уровне MAC протокол на основе CSMA/CA с дополнительными подтверждениями и механизмом повтора, которой в среде OMNeT++ реализует модуль CsmaCaMac, который при соответствующих настройках может успешно аппроксимировать базовый режим 802.11b Ad-Нос [19].

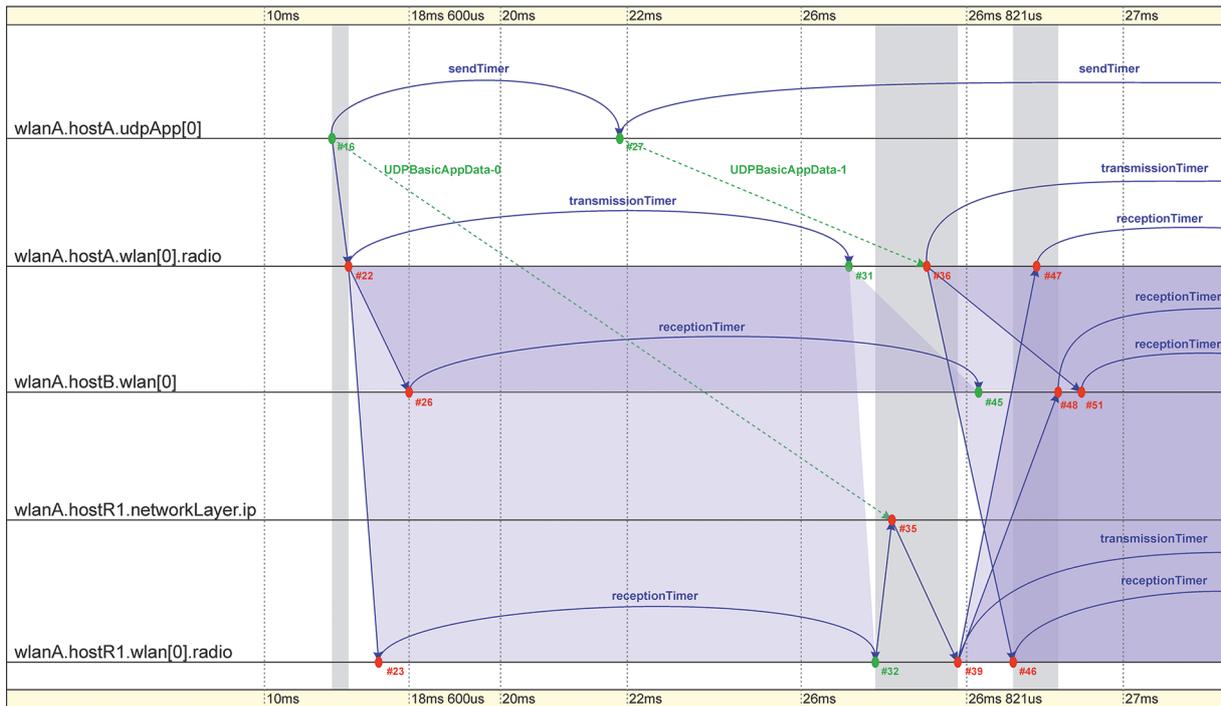


Рис. 8. Временная диаграмма работы беспроводной сети:
sendTimer — время отправки сообщения; **receptionTimer** — время приема пакета;
transmissionTimer — время передачи; **UDPBasicAppData-0** — первый, генерируемый приложением udpApp, пакет;
UDPBasicAppData-1 — второй, генерируемый приложением udpApp, пакет

Заключение

Приведенные исследования позволяют продемонстрировать, как имитационное моделирование используется при проектировании и изучении работы реальных беспроводных сетей. Показана возможность создания имитационных моделей беспроводных сетей с использованием готовых компонентов из состава фреймворка INET, которые помогают описывать различные элементы сети, а также производить их гибкую настройку для моделирования необходимого поведения.

Продемонстрирован подход моделирования различных режимов работы беспроводных сетей на примере реализации прямого взаимодействия при проектировании режима Ad-Hoc, а также косвенного, при котором реализуется процесс маршрутизации через промежуточные узлы. Исследование в статье такого физического явления, как интерференция, позволило выявить факт негативного влияния друг на друга расположенных рядом узлов, которые ухудшают качество радиосвязи и могут приводить к снижению скорости передачи данных или их полной потери.

В статье также продемонстрирован подход исследования работы беспроводной сети путем анализа файла временной диаграммы, изучение которого позволило объяснить причину существенных задержек в ретрансляции сетевых пакетов.

Литература

1. 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. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-462-472
2. Богатырев В.А. Оптимальное резервирование системы разнородных серверов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2007. № 12. С. 30–36.
3. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Объединение резервированных серверов в кластеры высоконадежной компьютерной системы // Информационные технологии. 2009. № 6. С. 41–47.
4. Хабаров С.П. Основы моделирования беспроводных сетей. Среда OMNeT++: Учебное пособие. СПб: Издательство «Лань», 2019. 260 с.: ил.
5. Думов М.И., Хабаров С.П. Использование OMNeT++ для моделирования беспроводных Wi-Fi сетей // Информа-

References

1. Khabarov S.P. Modeling of Ethernet networks in OMNeT++ INET framework medium. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 462–472. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-462-472
2. Bogatyrev V.A. An optimum backup execution for the heterogeneous server system. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2007, no. 12, pp. 30–36. (in Russian)
3. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. Association Reservation Servers in Clusters Highly Reliable Computersystem. *Information technologies*, 2009, no. 6, pp. 41–47. (in Russian)
4. Khabarov S.P. *The basics of modeling wireless networks. OMNeT++ environment: Tutorial*. St. Petersburg, Lan' Publ., 2019, 260 p. (in Russian)

- онные системы и технологии: теория и практика: сборник научных трудов. Вып. 10. Ч. 1. СПб.: СПбГЛТУ, 2018. С. 44–53.
6. Заяц А.М., Хабаров С.П. Организация доступа к беспроводным Ad Hoc сетям информационных систем мониторинга лесных территорий из среды ОС Windows 10 // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. № 223. С. 285–299. doi: 10.21266/2079-4304.2018.223.285-299
 7. Slastikhin I.A., Bogatyrev V.A. Redundant priority maintenance in the multi-channel systems // Proc. 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2018. P. 8604301. doi: 10.1109/WECONF.2018.8604301
 8. Arustamov S.A., Bogatyrev V.A., Polyakov V.I. Back up data transmission in real-time duplicated computer systems // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2016. V. 451. P. 103–109. doi: 10.1007/978-3-319-33816-3_11
 9. Bogatyrev V.A., Aleksankov S.M., Derkach A.N. Model of cluster reliability with migration of virtual machines and restoration on certain level of system degradation // Proc. 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2018. P. 8604317. doi: 10.1109/WECONF.2018.8604317
 10. Slastikhin I.A., Bogatyrev V.A., Noskov I.I. The simulation model of the system with aggregated channels and redundant transmissions on the multiple access level // CEUR Workshop Proceedings. 2019. V. 2344.
 11. Носков И.И., Богатырев В.А., Сластихин И.А. Имитационная модель локальной компьютерной сети с агрегированием каналов и случайным методом доступа при резервировании передач // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 1047–1053. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1047-1053
 12. Kolomoitcev V.S., Bogatyrev V.A. A Fault-tolerant Two-tier Pattern Of Secure Access “Connecting Node” // ACSR-Advances in Computer Science Research. 2017. V. 72. P. 271–274. doi: 10.2991/itsmssm-17.2017.56
 13. Kolomoitcev V.S., Bogatyrev V.A. The fault-tolerant structure of multilevel secure access to the resources of the public network // Communications in Computer and Information Science. 2016. V. 678. P. 302–313. doi: 10.1007/978-3-319-51917-3_27
 14. Хабаров С.П. Организация программных точек доступа средствами ОС Windows 10 // Информационные системы и технологии: теория и практика: сборник научных трудов. Вып. 10. Ч. 2. СПб.: СПбГЛТУ, 2018. С. 60–73.
 15. Bogatyrev V.A., Slastikhin I.A. The models of the redundant transmission through the aggregated channels // ACSR-Advances in Computer Science Research. 2017. V. 72. P. 294–299. doi: 10.2991/itsmssm-17.2017.60
 16. Bogatyrev S.V., Bogatyrev V.A. Analysis of the Timeliness of Redundant Service in the System of the Parallel-Series Connection of Nodes with Unlimited Queues // Proc. 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2018. P. 8604379. doi: 10.1109/WECONF.2018.8604379
 17. Пролетарский А.В., Баскаков И.В., Чирков Д.Н., Федотов Р.А., Бобков А.В., Платонов В.А. Беспроводные сети Wi-Fi. М.: Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ», 2016. 284 с.
 18. Рошан П., Лиэри Д. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. 304 с.
 19. Гольдштейн Б.С., Кучерявый А.Е. Сети связи пост-NGN. СПб.: БХВ-Петербург, 2014. 160 с.
 5. Dumov M.I., Khabarov S.P. Using OMNET++ for wireless Wi-Fi networks simulation. *Information Systems and Technologies: Theory and Practice*, no. 10, part 1. St. Petersburg, SPbSFTU, 2018, pp. 44–53. (in Russian)
 6. Zayats A.M., Khabarov S.P. Organization of access to wireless ad hoc networks of information systems for monitoring forest territories from the environment of OS Windows 10. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii*, 2018, no. 223, pp. 285–299. (in Russian). doi: 10.21266/2079-4304.2018.223.285-299
 7. Slastikhin I.A., Bogatyrev V.A. Redundant priority maintenance in the multi-channel systems. *Proc. 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. 2018, pp. 8604301. doi: 10.1109/WECONF.2018.8604301
 8. Arustamov S.A., Bogatyrev V.A., Polyakov V.I. Back up data transmission in real-time duplicated computer systems. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2016, vol. 451, pp. 103–109. doi: 10.1007/978-3-319-33816-3_11
 9. Bogatyrev V.A., Aleksankov S.M., Derkach A.N. Model of cluster reliability with migration of virtual machines and restoration on certain level of system degradation. *Proc. 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2018, pp. 8604317. doi: 10.1109/WECONF.2018.8604317
 10. Slastikhin I.A., Bogatyrev V.A., Noskov I.I. The simulation model of the system with aggregated channels and redundant transmissions on the multiple access level. *CEUR Workshop Proceedings*, 2019, vol. 2344.
 11. Noskov I.I., Bogatyrev V.A., Slastikhin I.A. Simulation model of local computer network with channel aggregation and random access method at redundant transfer. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 1047–1053. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1047-1053
 12. Kolomoitcev V.S., Bogatyrev V.A. A Fault-tolerant Two-tier Pattern Of Secure Access “Connecting Node”. *ACSR-Advances in Computer Science Research*, 2017, vol. 72, pp. 271–274. doi: 10.2991/itsmssm-17.2017.56
 13. Kolomoitcev V.S., Bogatyrev V.A. The fault-tolerant structure of multilevel secure access to the resources of the public network. *Communications in Computer and Information Science*, 2016, vol. 678, pp. 302–313. doi: 10.1007/978-3-319-51917-3_27
 14. Khabarov S.P. Setting up software access points using Windows 10. *Information Systems and Technologies: Theory and Practice*, no. 10, part 2. St. Petersburg, SPbSFTU, 2018, pp. 60–73. (in Russian)
 15. Bogatyrev V.A., Slastikhin I.A. The models of the redundant transmission through the aggregated channels. *ACSR-Advances in Computer Science Research*, 2017, vol. 72, P. 294–299. doi: 10.2991/itsmssm-17.2017.60
 16. Bogatyrev S.V., Bogatyrev V.A. Analysis of the Timeliness of Redundant Service in the System of the Parallel-Series Connection of Nodes with Unlimited Queues. *Proc. 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2018, pp. 8604379. doi: 10.1109/WECONF.2018.8604379
 17. Proletarskii A.V., Baskakov I.V., Chirkov D.N., Fedotov R.A., Bobkov A.V., Platonov V.A. *Wi-Fi wireless networks*. Moscow, INTUIT Publ., 2016, 284 p. (in Russian)
 18. Roshan P., Leary J. *802.11 Wireless LAN fundamentals*. Cisco Press, 2004, 281 p.
 19. Goldshtein B.S., Kucheriavyi A.E. *Post-NGN communication networks*. St. Petersburg, BHV Publ., 2014, 160 p. (in Russian)

Авторы

Думов Максим Иннокентьевич — инженер, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-0737-182X, dumov.maksim@yandex.ru

Хабаров Сергей Петрович — кандидат технических наук, доцент, доцент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-1337-0150, Serg.Habarov@mail.ru

Authors

Maksim I. Dumov — Engineer, Saint Petersburg State Forest Technical University, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-0737-182X, dumov.maksim@yandex.ru

Sergey P. Khabarov — PhD, Associate Professor, Associate Professor, Saint Petersburg State Forest Technical University, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-1337-0150, Serg.Habarov@mail.ru