



УДК 004.94, 004.057

## ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОШАГОВЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ В ГЕТЕРОГЕННОЙ МОДЕЛЬНОЙ СРЕДЕ

А.А. Павлов<sup>a</sup>, И.О. Датьев<sup>a</sup>, М.Г. Шишаев<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> ФГБУН Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Мурманская область, 184209, Российская Федерация

<sup>b</sup> ФГБОУ ВО «Мурманский арктический государственный университет», г. Апатиты, Мурманская область, 184209, Российская Федерация

Адрес для переписки: [pavlov@iimm.ru](mailto:pavlov@iimm.ru)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 11.07.17, принята к печати 30.10.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1084-1091

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Павлов А.А., Датьев И.О., Шишаев М.Г. Технология автоматизированного имитационного моделирования многошаговых беспроводных сетей в гетерогенной модельной среде // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 6. С. 1084–1091. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1084-1091

### Аннотация

**Предмет исследования.** Имитационное моделирование является основным способом тестирования решений, предлагаемых в области многошаговых беспроводных сетей. Создание имитационной модели многошаговой беспроводной сети – трудоемкая задача, связанная с применением специализированных программных средств, называемых сетевыми симуляторами. В данной работе рассмотрен современный опыт моделирования многошаговых беспроводных сетей и сформулированы основные проблемы. Одной из главных проблем является невозможность сравнительного анализа результатов имитационных экспериментов, проведенных различными исследователями. Это обусловлено причинами, связанными с применяемыми для тестирования моделями, планированием имитационных экспериментов и принципиальными различиями используемых сетевых симуляторов (гетерогенностью модельной среды). **Метод.** Предложена технология, позволяющая в автоматизированном режиме проводить имитационные эксперименты с моделями различных многошаговых беспроводных сетей и с использованием различных сетевых симуляторов. **Основные результаты.** В рамках технологии разработаны обобщенная концептуальная модель многошаговых беспроводных сетей и специализированный программный комплекс, автоматизирующий проведение серий экспериментов в гетерогенной модельной среде. **Практическая значимость.** Программный комплекс позволяет использовать результаты других исследователей посредством воссоздания имитационных экспериментов, максимально приближенных к проведенным этими исследователями. Эффективность применения программного комплекса подтверждается существенным снижением временных затрат и результатами проведенных экспериментов.

### Ключевые слова

многошаговые беспроводные сети, имитационное моделирование, сетевые симуляторы

### Благодарности

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН «Интеллектуальные информационные технологии, системный анализ и автоматизация» по проекту «Развитие технологий информационных систем для информационно-аналитической поддержки задач развития хозяйственной деятельности в Арктической зоне РФ».

## AUTOMATED SIMULATION TECHNOLOGY OF MULTI-HOP WIRELESS NETWORKS IN HETEROGENEOUS MODELING ENVIRONMENT

A.A. Pavlov<sup>a</sup>, I.O. Datyev<sup>a</sup>, M.G. Shishayev<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes of the Kola Science Center RAS, Apatity, 184209, Russian Federation

<sup>b</sup> Murmansk Arctic State University, Apatity, 184209, Russian Federation

Correspondence author: [pavlov@iimm.ru](mailto:pavlov@iimm.ru)

#### Article info

Received 11.07.17, accepted 30.10.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1084-1091

Article in Russian

**For citation:** Pavlov A.A., Datyev I.O., Shishaev M.G. Automated simulation technology of multi-hop wireless networks in heterogeneous modeling environment. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 6, pp. 1084–1091 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1084-1091

#### Abstract

**Subject of Research.** Simulation is the main way for testing technologies in the field of multi-hop wireless networks. Creating a simulation model of multi-hop wireless network is a time-consuming task associated with the use of specialized software tools, called network simulators. This paper presents the modern modeling experience of multi-hop wireless networks and focuses on the main problems. One of the main problems is the impossibility to analyze comparatively the experiment results conducted by various researchers. The reasons for this fact are associated with the models used for testing, imitation experiment planning and the principal differences in the network simulators (heterogeneity of the modeling environment). **Method.** In this regard, a technology is proposed allowing for simulating experiments with models of various multi-hop wireless networks and using various network simulators in an automated mode. **Main Results.** Within the framework of this technology, we have developed a generalized conceptual model of multi-hop wireless networks and a specialized software package that automates the execution of experiment series in a heterogeneous modeling environment. **Practical Relevance.** The software package gives the possibility to use the other researchers' results by reconstruction of simulation experiments most closely approximate the ones carried out by these researchers. The efficiency of software package application is confirmed by a decrease in time costs and the results of conducted experiments.

#### Keywords

multi-hop wireless networks, simulation, network simulators

#### Acknowledgements

This work was supported within the framework of ONIT RAS Basic Research Program "Intellectual Information Technologies, System Analysis and Automation" for the project "Development of Information Systems Technologies for Information and Analytical Support of the Problems of Economic Activity Development of the Russian Federation Arctic Zone"

### Введение

Многошаговые беспроводные сети (МБС) – это радиосети, узлы которых способны выступать в роли ретрансляторов, что увеличивает зону покрытия сети. В настоящее время разработка подобных сетей на базе мобильных устройств является актуальной задачей. Область применения многошаговых беспроводных сетей включает в себя [1] сети для решения различного рода задач: развлекательные, «Умный дом», военного назначения и другие. Главным преимуществом таких сетей является быстрота развертывания и отсутствие необходимости развитой информационно-коммуникационной инфраструктуры. Основными проблемами многошаговых беспроводных сетей на базе мобильных устройств являются [2] сложность маршрутизации данных вследствие нестационарности топологии и ограниченность ресурса источника питания мобильных узлов. Различные решения этих проблем во множестве предлагаются сообществом ученых и разработчиков всего мира [3–7].

Важными с практической точки зрения задачами становятся оценка эффективности различных МБС в идентичных условиях эксплуатации, а также обратная ей – определение сферы наиболее эффективного применения отдельно взятой МБС. Предлагаемые МБС тестируются чаще всего методом имитационного моделирования с помощью специализированных программных средств – сетевых симуляторов. В связи с этим исходным материалом для сравнения или позиционирования новой МБС среди аналогов являются ранее созданные модели и (или) результаты имитационных экспериментов.

При попытке прямого сравнения результатов могут возникнуть следующие сложности.

1. Имеющиеся результаты имитационных экспериментов характеризуют лишь малое количество вариантов использования (соответствующих предполагаемым условиям функционирования сети), недостаточное для выявления преимуществ и слабых мест рассматриваемой МБС в различных условиях («прямая задача»).
2. Ни один из рассматриваемых в имеющихся моделях вариантов использования не соответствует условиям предполагаемого использования сети – невозможно решить «обратную задачу».
3. Проводимые другими исследователями имитационные эксперименты недостаточно подробно документируются.
4. Результаты экспериментов, полученные на различных симуляторах, невозможно сравнить напрямую из-за различий в составе специфицированных параметров модели МБС и условий ее функционирования.

Перечисленные сложности влекут за собой необходимость воспроизводства имитационного эксперимента с использованием других симуляторов или МБС. В связи с этим является актуальной задача создания технологии, позволяющей в автоматизированном режиме проводить имитационные эксперименты с моделями различных МБС и с использованием различных сетевых симуляторов. В данной работе рассматривается современный опыт имитационного моделирования МБС, предлагаются концептуальная модель МБС и решение вышеперечисленных проблем, основанное на автоматизированном проведении серий экспериментов в гетерогенной модельной среде с помощью специализированного программного комплекса.

**Современный опыт исследования многошаговых беспроводных сетей**

Тестирование эффективности решений (метрик, алгоритмов, протоколов маршрутизации и др.), разработанных для многошаговых беспроводных сетей, возможно несколькими способами:

1. натурные эксперименты в реальных условиях;
2. создание испытательных стендов;
3. использование сетевых симуляторов.

Первый и второй способы ресурсоемки, поэтому в качестве основного инструмента применяется имитационное моделирование с использованием сетевых симуляторов. Сетевой симулятор – это специализированное программное средство для имитационного моделирования компьютерных сетей.

Рассмотрим несколько работ разных авторов, связанных с созданием моделей многошаговых беспроводных сетей.

В работе [8] для тестирования предлагаемого технического решения МБС использован сетевой симулятор NS-2 со следующими исходными значениями параметров: модель перемещения узлов – случайная, размер пакета – 512 Б, скорость узлов – 10 м/с. Рассматриваемый в [8] протокол сравнивался с AODV [9] в нескольких сценариях: количество узлов сети – 50, 75, 100; общее время моделирования – 20, 40, 60, 80 и 100 с. Значения других параметров, например, используемый стандарт Wi-Fi, не документированы.

В работах [10, 11] авторы сравнивают производительность нескольких протоколов с использованием пакета MATLAB. При этом в работе [10] указаны значения всего двух параметров, заданных в моделях исследуемых сетевых решений: количество узлов и нагрузка на сеть. В работе [11] число специфицированных параметров несколько шире – модель перемещения (случайная), количество узлов, размеры территории, расстояние и скорость передачи данных. Тем не менее, оперируя только представленными значениями, невозможно в точности воспроизвести имитационный эксперимент, проведенный авторами [10, 11].

В работе [12] для тестирования МБС-решения использован сетевой симулятор Riverbed Modeler (OPNET). Авторы [12] приводят существенно большее количество начальных значений параметров, на основании которого представляется возможным воссоздать представленный имитационный эксперимент. Однако при моделировании применяется лишь один сценарий со случайной моделью перемещения узлов.

В работе [13] авторы используют сетевой симулятор NS-3, реализуют один сценарий и уделяют выбору значений исходных параметров много внимания, представляя их подробное описание. Используется только случайная модель перемещения узлов. Однако самими же авторами отмечается, что применение различных моделей перемещения узлов приводит к существенному изменению результатов имитационного эксперимента.

Таким образом, результаты, полученные в рассмотренных работах, не могут быть напрямую использованы другими исследователями для сравнительного анализа различных МБС.

Для сравнения эффективности технических решений МБС необходим достаточный набор моделей, включающих четко специфицированные сценарии, в том числе варианты использования, соответствующие предполагаемым областям практического применения МБС. В работе [14] предложены модели, реализующие предполагаемые условия функционирования многошаговых беспроводных сетей в реальном мире. Однако, кроме сценариев, на результаты экспериментов существенное влияние оказывает и специфика практической реализации модели МБС для того или иного симулятора. Данный тезис подтверждается результатами проведенных авторами имитационных экспериментов с использованием максимально приближенных моделей одной и той же МБС в сетевых симуляторах Riverbed Modeler и NS-3 (табл. 1).

Термин «максимально приближенных» используется по причине невозможности создания в Riverbed Modeler и NS-3 полностью идентичных моделей (табл. 2). Это обусловлено различиями как алгоритмов, так и программной реализацией самих сетевых симуляторов.

Например, одним из факторов, который оказывает существенное влияние на результаты эксперимента, является модель распространения сигнала Фрииса [15], применяемая в сетевом симуляторе NS-3 и отсутствующая в Riverbed Modeler Academic Edition.

Эксперимент	Riverbed Modeler			NS-3		
	Мин.	Средняя	Макс.	Мин.	Средняя	Макс.
Статичная матрица, 4×4 узла	0,000249	0,0003	0,00094	0,0003	0,000776	0,00753
Статичная линия, 10 узлов	0,000249	0,00028	0,000804	0,001	0,005098	0,03614
Линия, 10 узлов, передающие узлы периодически меняются местами	0,000249	0,00029	0,000896	0,001	0,001739	0,03614

Таблица 1. Результаты моделирования задержки, с, в Riverbed Modeler и NS-3

	Riverbed Modeler	NS-3
Версия	17,5 Academic Edition	3,25
Использованные протоколы	AODV	AODV
Мощность передатчика	0,01 Вт	10 дБм
Битрейт	1 пакет в секунду	1024 бит/с
Размер пакета	1024 бит	128 Б
Физический уровень	Метод прямой последовательности для расширения спектра 11 Мбит/с	Метод прямой последовательности для расширения спектра 11 Мбит/с
Стандарт Wi-Fi	802.11b	802.11b
Модель распространения	Неопределена	Фрииса
Длительность симуляции	100 с	100 с

Таблица 2. Соответствие параметров моделей в Riverbed Modeler и NS-3

**Концептуальная модель многошаговых беспроводных сетей**

В настоящее время существует большое количество сетевых симуляторов: NS-3, OPNET (Riverbed Modeler), OMNET++, NETSIM и другие. В целом рассмотренные в данной работе сетевые симуляторы воплощают дискретно-событийный подход к имитационному моделированию систем [16]. Как правило, симуляторы не совместимы друг с другом – имеют различную программную архитектуру, используют различные наборы параметров МБС [17, 18]. Это затрудняет портирование моделей из одного сетевого симулятора в другой и сравнение результатов экспериментов для оценки эффективности различных МБС в идентичных условиях эксплуатации или для решения обратной задачи – определения наиболее эффективной в некоторых условиях МБС. Становится актуальной задача разработки концептуальной модели, описывающей компоненты МБС и их параметры независимо от используемого сетевого симулятора. Верхний уровень такой концептуальной модели, представленный с использованием нотации диаграммы классов, изображен на рис. 1.

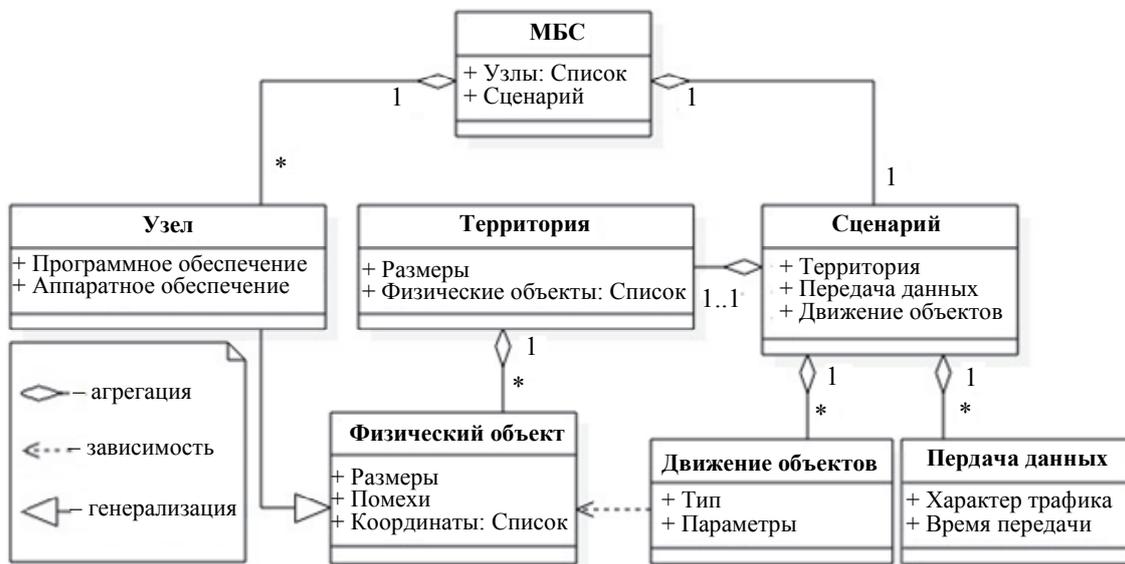


Рис. 1. Концептуальная модель многошаговой беспроводной сети.  
 Классическая нотация диаграммы классов: 1...\* – тип связи один ко многим;  
 1...1 – тип связи один к одному; + – public поле класса

Поясним основные термины, используемые в концептуальной модели.

Параметр модели – относительно постоянный показатель, характеризующий моделируемую сеть или процессы, происходящие в этой сети. Параметры могут быть не только количественными (т.е. показателями), но и качественными (некоторыми свойствами объекта, его названием и т.п.). Применительно к моделям многошаговых беспроводных сетей примерами количественного параметра могут служить раз-

меры территории функционирования сети, количество узлов сети, мощность передатчика, интервал времени, через который осуществляется отправка пакетов данных узлом сети. Примеры качественных параметров – название используемой модели перемещения узлов сети, стандарта беспроводной передачи данных, протокола маршрутизации.

Сценарий – совокупность исходных значений параметров, характеризующих исследуемую МБС и отражающих условия функционирования (применения) МБС. Территория – пространство с определенными границами.

Физический объект – подвижное или статическое физическое тело, которое может оказывать влияние на функционирование сети. Ключевыми параметрами объекта являются его размеры, влияние на распространение сигнала (помехи), маршрут (или координаты размещения в случае, если объект статичен). Маршрут объекта задается в соответствии с моделью движения объектов. Движение объектов – совокупность параметров, характеризующая перемещение некоторых объектов. Модель движения объектов может быть случайной, детерминированной или смешанной. Физический объект может быть «носителем» узла сети или «препятствием». Узел сети – устройство (объект), соединенное с другими устройствами как часть компьютерной сети. Как правило, именно в узле реализуется техническое решение (метрика, протокол, маршрутизация, а также аппаратная конфигурация), эффективность которого необходимо оценить в процессе имитационного моделирования. Передача данных – совокупность параметров, характеризующих процесс передачи данных в сети.

### Программный комплекс моделирования многошаговых беспроводных сетей

В общем виде предлагаемая технологическая цепочка имитационного моделирования МБС изображена в виде диаграммы последовательности действий на рис. 2.

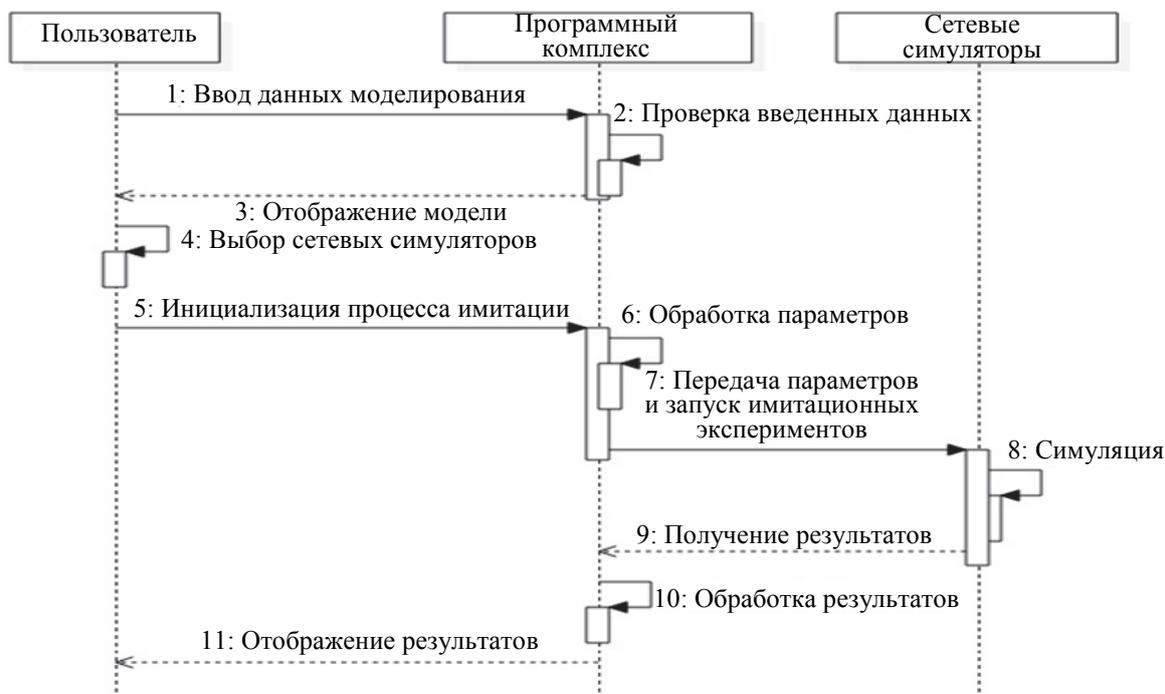


Рис. 2. Последовательность действий предлагаемой технологии

Для автоматизации организации имитационных экспериментов и обеспечения принципиальной возможности совместного использования различных сетевых симуляторов предлагается программный комплекс, который призван повысить эффективность исследований МБС. Разрабатываемый программный комплекс автоматизирует следующие процессы:

- портирование моделей между разными сетевыми симуляторами;
- создание моделей многошаговых беспроводных сетей;
- создание моделей перемещения узлов;
- обработка результатов моделирования;
- программная реализация метрик маршрутизации и их интеграция в протоколы маршрутизации;
- проведение серий имитационных экспериментов с различными значениями параметров в пакетном режиме.

Особенности программной реализации вышеперечисленных процессов рассмотрим на примере сетевых симуляторов Riverbed Modeler (OPNET) и NS-3. Выбор обусловлен их востребованностью среди разработчиков и перспективами развития этих сетевых симуляторов.

*Портирование и создание моделей перемещения узлов между разными сетевыми симуляторами.* В зависимости от используемого сетевого симулятора модель мобильности задается для всех объектов сразу или для каждого по отдельности. Если общая модель мобильности отсутствует, то каждому узлу задается отдельный маршрут. Например, такой способ используется в Riverbed Modeler (OPNET). Большая часть исходного кода Riverbed Modeler является закрытой и не доступна для модификации. Модель мобильности представляет собой набор файлов, в каждом из которых содержится траектория движения узла. Одна траектория может быть применима сразу к нескольким узлам. При создании траектории движения узла присутствует возможность выбора и изменения следующих значений: координаты узла, скорость в разных единицах измерения, высота над уровнем моря, скорость подъема, время ожидания в точке.

В сетевом симуляторе NS-3 модель мобильности хранится в одном файле. Изменяемых значений меньше: это координаты и скорость узла. Однако исходный код открыт и доступен для модификации. Основные различия моделей мобильности NS-3 и Riverbed Modeler, усложняющие портирование, представлены в табл. 3. Одной из особенностей Riverbed Modeler, которую необходимо учитывать при создании и портировании модели, является возможность имитационного моделирования относительно большого отрезка времени (до 12 часов в версии для учебных заведений) за счет ускорения времени моделирования. В NS-3 имитационный эксперимент проводится в близком к реальному времени (скорость его выполнения зависит от производительности ЭВМ). Продолжительность имитационного эксперимента в NS-3, как правило, составляет 100–1000 с модельного времени.

NS-3 (.tcl)	Riverbed (.trj)
Один файл	Несколько файлов
км/ч, м/с	м/с, км/ч, мили/ч
Относительные и абсолютные координаты	Абсолютные координаты
Обычно малое время моделирования вследствие больших нагрузок на систему	Возможность моделировать большие (более 24 ч) промежутки времени

Таблица 3. Различия моделей мобильности Riverbed Modeler и NS-3

В связи с различиями в форматах данных, программной реализации и единицах измерения одновременное использование нескольких симуляторов и портирование моделей между ними затруднительно. Исходя из этого, автоматизированное портирование моделей мобильности узлов может существенно сократить временные затраты разработчиков многошаговых беспроводных сетей.

*Создание моделей МБС и проведение серий экспериментов.* Модель мобильности узлов – это лишь часть имитационной модели многошаговой беспроводной сети. В качестве примера рассмотрим процесс создания всей модели МБС в одном из самых популярных сетевых симуляторов NS-3. Во-первых, для получения навыков работы с сетевым симулятором необходимо изучить большой объем документации (можно затратить нескольких месяцев). Во-вторых, сам процесс создания программного кода одной имитационной модели сети для опытного пользователя занимает более 20 минут. Даже с учетом сокращения временных затрат на каждую последующую создаваемую модель совокупное время подготовки 100 имитационных экспериментов (только с учетом изменения значений параметров модели, но без учета более серьезных модификаций модели и времени проведения экспериментов) составит несколько часов.

По этой причине авторы уделили особое внимание автоматизации процесса создания модели МБС. Создание модели и планирование серии имитационных экспериментов с использованием программного комплекса занимает порядка нескольких минут.

*Программная реализация метрик маршрутизации и их интеграция в протоколы маршрутизации.* Одним из преимуществ сетевого симулятора для разработчиков МБС является полная открытость исходного кода. Это позволяет модифицировать каждый из его элементов, что зачастую используется разработчиками для решения различных задач. Одной из таких задач является разработка новых или модификация существующих метрик маршрутизации. Здесь могут возникнуть трудности из-за сложной программной реализации сетевого симулятора. Разработанный программный модуль позволяет сократить объем модификаций программного кода протоколов маршрутизации, требуемого для встраивания маршрутной метрики, и уменьшить время, затрачиваемое на изучение программной реализации конкретного сетевого симулятора. Эффект достигается за счет использования файла-шаблона, содержащего заготовки необходимых для маршрутной метрики функций, а также автоматизированного внесения изменений в файлы соответствующего протокола маршрутизации.

*Эффективность разработанного программного комплекса* можно оценить на следующем примере. Для создания модели без использования программного комплекса (при условии, что необходимые программные библиотеки уже изучены) в NS-3 потребуются около 22 мин, в том числе 1 мин – подключение библиотек, 5 мин – создание узлов и параметров мобильности сети, 1,5 мин – создание и настройка

физического уровня сети, 1,5 мин – создание и настройка канального уровня сети, 10 мин – организация передачи данных между узлами сети, 3 мин – исправление ошибок. Для создания модели с использованием программного комплекса потребуется порядка 1,5 мин: 1 мин – выбор требуемых параметров, 0,5 мин – запуск модели. Кроме того, при совместном использовании различных сетевых симуляторов улучшается качество исследования МБС в целом. Поскольку наборы параметров моделей МБС в разных симуляторах также могут различаться, возникает возможность повысить адекватность этих моделей за счет учета новых параметров, а также принципиальной возможности сравнительного анализа результатов экспериментов на идентичных моделях МБС в разных сетевых симуляторах.

### Заключение

Различия сетевых симуляторов, недостаточный набор моделей, нечетко специфицированные сценарии (в том числе соответствующие предполагаемым областям практического применения многошаговых беспроводных сетей) существенно затрудняют оценку эффективности решений, предлагаемых в области многошаговых беспроводных сетей. В работе предложена технология, обеспечивающая повышение эффективности имитационного моделирования многошаговых беспроводных сетей и принципиальную возможность сравнения результатов экспериментов, полученных различными исследователями многошаговых беспроводных сетей. Суть технологии заключается в автоматизации таких процессов, как создание и портирование моделей, планирование и проведение имитационного эксперимента, а также анализ результатов при совместном использовании нескольких сетевых симуляторов. В рамках технологии разработана концептуальная модель многошаговой беспроводной сети, позволяющая сформировать независимое от сетевых симуляторов представление исследуемой сети и в дальнейшем использовать это представление при портировании модели в различные сетевые симуляторы.

Технология реализована в виде программного комплекса для анализа эффективности применения той или иной многошаговой беспроводной сети в различных условиях, обеспечивающего возможность использования полученных другими исследователями результатов, посредством воссоздания максимально имитационных экспериментов, приближенных к проведенным этими исследователями. Эффективность применения программного комплекса подтверждается существенным снижением временных затрат и результатами проведенных экспериментов. Кроме того, принципиальная возможность проверки эффективности многошаговой беспроводной сети посредством совместного использования нескольких сетевых симуляторов способствует повышению качества результатов имитационного моделирования.

### Литература

1. Хоров Е.М. Знакомство с современными беспроводными технологиями. Многошаговые беспроводные сети: принципы построения и открытые задачи [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://iitp.ru/upload/publications/6409/paper.pdf>. (Дата обращения: 05.07.2017).
2. Datey S.G., Ansari T. Mobile Ad-hoc networks its advantages and challenges // *International Journal of Electrical and Electronics Research*, 2015. V. 3. N 2. P. 491–496.
3. Sahnoun A., Habbani A., El Abbadi J. EEP-OLSR: an energy efficient and path reliability protocol for proactive mobile Ad-hoc network routing // *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 2017. V. 9. N 1. P. 22–29.
4. Touil H., Fakhri Y. A fuzzy-based QoS maximization protocol for WiFi multimedia (IEEE 802.11e) ad hoc networks // *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 2014. V. 6. N 3. P. 217–225.
5. Gunantara N., Dharma A. Optimal path pair routes through multi-criteria weights in ad hoc network using genetic algorithm // *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 2017. V. 9. N 1. P. 88–94.
6. Nekrasov P., Fakhriev D. Transmission of real-time traffic in TDMA multi-hop wireless ad-hoc networks // *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC)*, London, 2015. P. 6469–6474. doi: 10.1109/ICC.2015.7249355
7. Махмуд А.Ш., Поляков В.М. Оценка производительности протоколов маршрутизации мобильных ad-hoc сетей (manet) // Научный результат. Информационные технологии. 2016. № 4. С. 64–71. doi: 10.18413/2518-1092-2016-1-4-64-71
8. Purohit R., Keswani B. Design and validation of new routing protocol in MANET for optimal performance // *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2017. V. 17. N 2. P. 156–160.
9. RFC 3561. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV)

### References

1. Khorov E.M. Introduction to modern wireless technologies. Multihop wireless networks: principles of construction and open tasks. Available at: <http://iitp.ru/upload/publications/6409/paper.pdf> (accessed: 05.07.2017). (In Russian)
2. Datey S.G., Ansari T. Mobile Ad-hoc networks its advantages and challenges. *International Journal of Electrical and Electronics Research*, 2015, vol. 3, no. 2, pp. 491–496.
3. Sahnoun A., Habbani A., El Abbadi J. EEP-OLSR: an energy efficient and path reliability protocol for proactive mobile Ad-hoc network routing. *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 22–29.
4. Touil H., Fakhri Y. A fuzzy-based QoS maximization protocol for WiFi multimedia (IEEE 802.11e) ad hoc networks. *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 2014, vol. 6, no. 3, pp. 217–225.
5. Gunantara N., Dharma A. Optimal path pair routes through multi-criteria weights in ad hoc network using genetic algorithm. *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 88–94.
6. Nekrasov P., Fakhriev D. Transmission of real-time traffic in TDMA multi-hop wireless ad-hoc networks. *Proc. IEEE International Conference on Communications, ICC*, London, 2015, pp. 6469–6474. doi: 10.1109/ICC.2015.7249355
7. Mahmoud A.S., Polyakov V.M. Performance evaluation of routing protocols in mobile ad-hoc networks (manet). *Research Result, Information Technologies*, 2016, no. 4, pp. 64–71. (In Russian) doi: 10.18413/2518-1092-2016-1-4-64-71
8. Purohit R., Keswani B. Design and validation of new routing protocol in MANET for optimal performance. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 156–160.
9. RFC 3561. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc3561>

- Routing [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/rfc3561> (Дата обращения: 05.07.2017).
10. Kaur Y., Kaur M. An efficient EPAR routing protocol in MANET based upon AACO // *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 2016. V. 6. N 8. P. 254–262.
  11. Tiwari S., Singh P. An energy saving multipath AODV routing protocol in MANET // *International Journal of Engineering and Computer Science*, 2016. V. 5. N 11. P. 19088–19091. doi: 10.18535/ijecs/v5i11.66
  12. Sharma R. A secure and proficient routing protocol in mobile Ad-hoc networks using genetic mechanism // *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 2016. vol. 4. no. 6, pp. 10844–10851. doi: 10.15680/IJIRCCSE.2016.0406093
  13. Lakshman Naik L., Khan R.U., Mishra R.B. Analysis of node velocity effects in MANET routing protocols using network simulator (NS3) // *International Journal of Computer Applications*, 2016. vol. 144. no. 4, pp. 145–150. doi: 10.5120/ijca2016910225
  14. Павлов А.А., Датьев И.О., Шишаев М.Г. Разработка имитационных моделей для тестирования протоколов маршрутизации беспроводных многошаговых сетей // *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 2016. № 7. С. 90–101. doi: 10.21.285/1814-3520-2016-7-90-101
  15. Старцев С.С. Модели распространения радиосигнала Wi-Fi [Электронный ресурс]. 2013. Режим доступа: <http://conf.nsc.ru/files/conferences/MIT-2013/fulltext/146127/151267/Startsev.pdf> (Дата обращения: 05.07.2017).
  16. Дигрис А.В. Дискретно-событийное моделирование: курс лекций [Электронный ресурс]. Минск: БГУ, 2011. Режим доступа: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/48743>. (Дата обращения: 21.06.2017).
  17. Ns-3 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nsnam.org>. (Дата обращения: 05.07.2017).
  18. Riverbed Modeler [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.riverbed.com/ru/products/steelcentral/steelcentral-riverbed-modeler.html> (Дата обращения: 05.07.2017).
  19. (accessed: 05.07.2017).
  10. Kaur Y., Kaur M. An efficient EPAR routing protocol in MANET based upon AACO. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 2016, vol. 6, no. 8, pp. 254–262.
  11. Tiwari S., Singh P. An energy saving multipath AODV routing protocol in MANET. *International Journal of Engineering and Computer Science*, 2016, vol. 5, no. 11, pp. 19088–19091. doi: 10.18535/ijecs/v5i11.66
  12. Sharma R. A secure and proficient routing protocol in mobile Ad-hoc networks using genetic mechanism. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 2016, vol. 4, no. 6, pp. 10844–10851. doi: 10.15680/IJIRCCSE.2016.0406093
  13. Lakshman Naik L, Khan R.U., Mishra R.B. Analysis of node velocity effects in MANET routing protocols using network simulator (NS3). *International Journal of Computer Applications*, 2016, vol. 144, no. 4, pp. 145–150. doi: 10.5120/ijca2016910225
  14. Pavlov A.A, Datiev I.O., Shishaev M.G. Simulation model development for testing multihop wireless network routing protocols. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2016, no. 7, pp. 90–101. (In Russian) doi: 10.21.285/1814-3520-2016-7-90-101
  15. Starcev S.S. *Models of Wi-Fi radio signal propagation*. 2013. Available at: <http://conf.nsc.ru/files/conferences/MIT-2013/fulltext/146127/151267/Startsev.pdf> (accessed: 05.07.2017). (In Russian)
  16. Digris A.V. *Discrete-event modeling: a course of lectures*. Minsk, 2011. Available at: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/48743> (accessed: 21.06.2017). (In Russian)
  17. *Ns-3*. Available at: <http://www.nsnam.org> (accessed: 05.07.2017).
  18. *Riverbed Modeler*. Available at: <http://www.riverbed.com/ru/products/steelcentral/steelcentral-riverbed-modeler.html> (accessed: 05.07.2017).

### Авторы

**Павлов Алексей Андреевич** – аспирант, инженер-исследователь, ФГБУН Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Мурманская область, 184209, Российская Федерация, [pavlov@iimm.ru](mailto:pavlov@iimm.ru)

**Датьев Игорь Олегович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Мурманская область, 184209, Российская Федерация, [datyev@iimm.ru](mailto:datyev@iimm.ru)

**Шишаев Максим Геннадьевич** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГБУН Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского НЦ РАН; проректор по стратегическому развитию, ФГБОУ ВО «Мурманский арктический государственный университет», г. Апатиты, Мурманская область, 184209, Российская Федерация, [shishaev@iimm.ru](mailto:shishaev@iimm.ru)

### Authors

**Alexey A. Pavlov** – postgraduate, research engineer, Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes of the Kola Science Center RAS, Apatity, 184209, Russian Federation, [pavlov@iimm.ru](mailto:pavlov@iimm.ru)

**Igor O. Datyev** – PhD, Senior Scientific Researcher, Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes of the Kola Science Center RAS, Apatity, 184209, Russian Federation, [datyev@iimm.ru](mailto:datyev@iimm.ru)

**Maxim G. Shishaev** – D.Sc., Professor, Chief Scientific Researcher, Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes of the Kola Science Center RAS, Apatity, 184209, Russian Federation; Vice-rector for strategic development, Murmansk Arctic State University, Apatity, 184209, Russian Federation, [shishaev@iimm.ru](mailto:shishaev@iimm.ru)