

УДК 621.392

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТИ MANET В СИМУЛЯТОРЕ NS-3

В.А. БЕЛАН, М.М. ШАКИР, М.Ю. ХОМЕНОК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 10 ноября 2018*

**Аннотация.** Проанализированы системные характеристики самоорганизующейся сети с динамически изменяющейся топологией, использующей технологию Manet, на базе симулятора NS-3. Представлен обзор возможностей симулятора как в исследовательских, так и в образовательных целях.

*Ключевые слова:* сетевой симулятор, NS-3, NetAnim, Flow Monitor, моделирование, Manet.

### Введение

Для моделирования сетей используются множество сетевых симуляторов, таких как OMNet++, OPNET, NetSim, NS-2 и NS-3. Также существуют и узко специализированные симуляторы для моделирования определенного оборудования. Одним из широко распространенных симуляторов со свободным программным обеспечением в течение более трех десятков лет является NS-2, ориентированный на исследовательское применение, а также на применение в образовательных целях.

Network Simulator 3 (NS-3) – это сетевой симулятор дискретного события с открытым исходным кодом, распространяемый под лицензией GNU GPLv2 и ориентированный на устранение ограничений NS-2. Исходные коды NS-3 открыты для исследования, модификации и использования и доступны на сайте проекта <http://www.nsnam.org>.

NS-3 является гибким и в то же время мощным средством моделирования за счет использования C++ в качестве встроенного языка описания модулей. Помимо C++ может использоваться Python. Оба языка в симуляторе равноправны и применяются для описания моделей телекоммуникационных систем. Программа реализована под операционную систему на базе ядра Linux [1]. Наиболее используемые дистрибутивы – Ubuntu (рис. 1), CentOS, Linux Mint, Debian, Fedora, XUBUNTU, openSUSE.

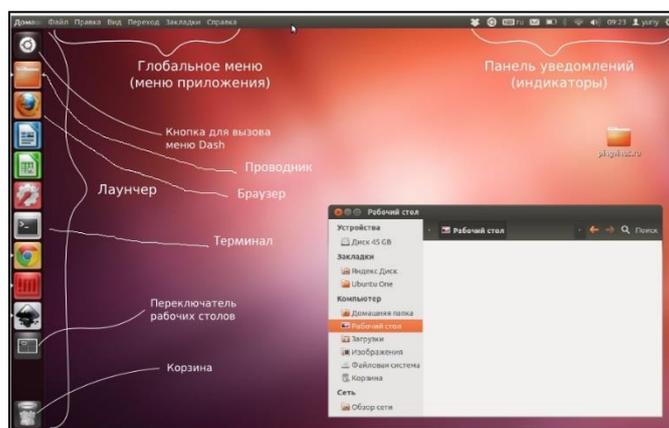


Рис. 1. Интерфейс ОС Ubuntu

Для сетей с динамически изменяющимися топологиями в NS-3 предусмотрены различные модели подвижности объектов в пространстве, например, с движущимися объектами

в трехмерном пространстве, что актуально для самоорганизующихся сетей с динамически изменяющейся топологией, таких как Manet, Vanet и Fanet. Одним из преимуществ NS-3 по сравнению с другими симуляторами является также реализация различных типов Mesh-сетей на основе стека протоколов 802.11s. NS-3 поддерживает множество протоколов маршрутизации, таких как AODV, DSDV, DSR, OLSR.

Симулятор не имеет собственного графического интерфейса, однако для средств визуализации моделей используются модули NetAnim и PyViz. Наиболее функциональным является модуль NetAnim, который помимо визуализации топологии позволяет выполнить пошаговую симуляцию, вывод таблиц маршрутизации во времени, просмотреть информацию о передаваемых пакетах и их трейсы взаимодействия. Модуль позволяет построить графики зависимостей переданных и полученных пакетов на физическом, канальном и сетевом уровнях за отведенное время симуляции [2].

NetAnim позволяет работать с модулем Flow Monitor, предоставляющем очень гибкие методы сбора самых различных показаний с моделируемых активных сетевых устройств и каналов связи. Модуль позволяет оценить характеристики сети и построить гистограммы для визуализации полученных данных. Оба модуля представляют собой XML-файлы.

На рис. 2 представлена топология расположения узлов в начальный момент симуляции Ad-Hoc сети (технология Manet) в окне аниматора NetAnim. В заданной области мобильности [1000×1000] располагаются 10 узлов, 5 из которых являются источниками, а остальные – приемниками информации, с установленными IP адресами и с ID нумерацией 0..9. Линиями показаны траектории движения узлов за время симуляции сети.

### Визуализация сетевой топологии в окне аниматора NetAnim

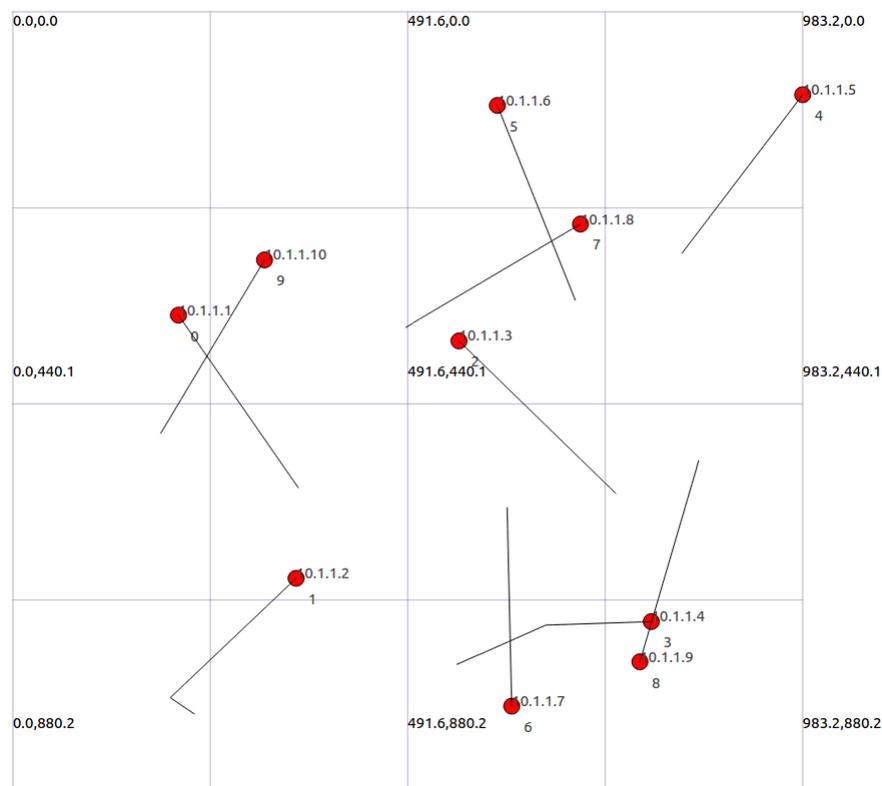


Рис. 2. Исходная топология исследуемой сети MANET: 10 узлов, модель трафика CBR, модель мобильности RWM, формат пакетов UDP, протокол маршрутизации DSDV.

Мобильность узлов соответствует случайному перемещению точки на плоскости в соответствии с моделью RWP (Random WayPoint Mobility Model) со скоростью 10 м/с и временем обновления 2 с. Узлы передают UDP потоки с постоянной скоростью передач 8 кбит/с, что соответствует типу трафика CBR (Constant Bit Rate). Протокол маршрутизации DSDV (Destination-Seqenced Distance Vector). Время симуляции проекта – 30 с.

Результат симуляции с радиусами мощностей и передаваемыми пакетами представлен на рис. 3.

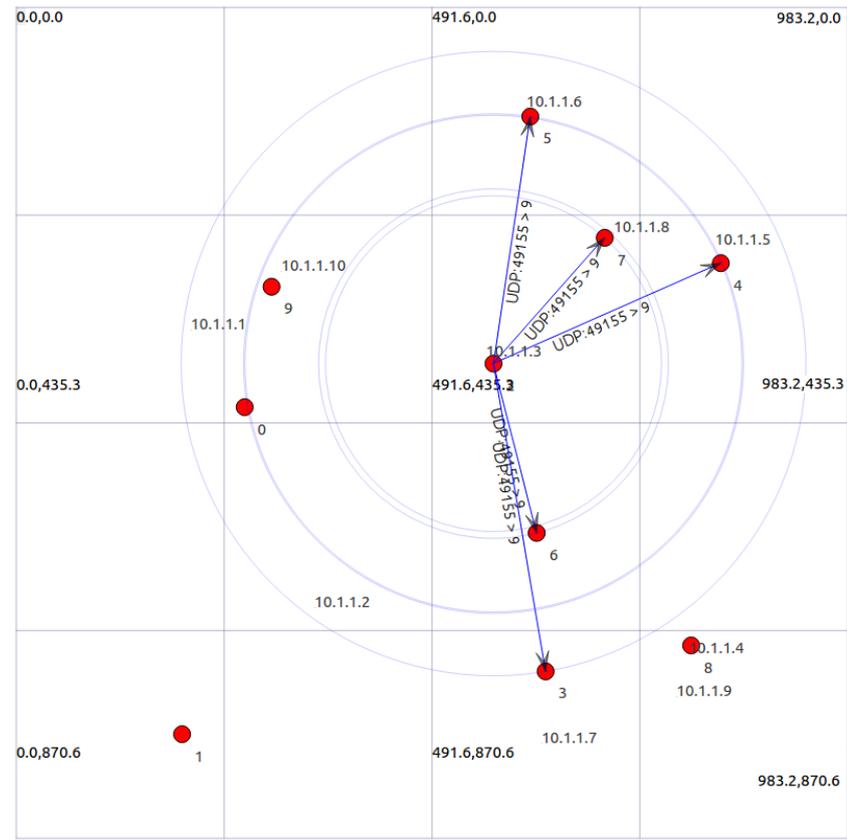


Рис. 3. Топология расположения узлов сети MANET после окончания времени моделирования

На рис. 4 представлена таблица маршрутизации для двух узлов сети.

Node: 1, Time: +29.0s, Local time: +29.0s, DSDV Routing table							Node: 2, Time: +29.0s, Local time: +29.0s, DSDV Routing table						
DSDV Routing table							DSDV Routing table						
Destination	Gateway	Interface	HopCount	SeqNum	LifeTime	SettlingTime	Destination	Gateway	Interface	HopCount	SeqNum	LifeTime	SettlingTime
10.1.1.1	10.1.1.1	10.1.1.2	1	12	3.905s	5.000s	10.1.1.1	10.1.1.7	10.1.1.3	2	12	3.931s	0.000s
10.1.1.3	10.1.1.1	10.1.1.2	3	12	3.934s	0.000s	10.1.1.2	10.1.1.4	10.1.1.3	3	12	3.938s	0.000s
10.1.1.4	10.1.1.1	10.1.1.2	2	12	3.934s	0.000s	10.1.1.4	10.1.1.4	10.1.1.3	1	12	3.901s	0.000s
10.1.1.5	10.1.1.1	10.1.1.2	3	12	3.905s	0.000s	10.1.1.5	10.1.1.9	10.1.1.3	2	12	3.902s	0.000s
10.1.1.6	10.1.1.1	10.1.1.2	3	10	8.933s	0.000s	10.1.1.6	10.1.1.6	10.1.1.3	1	12	3.922s	0.000s
10.1.1.7	10.1.1.1	10.1.1.2	2	12	3.934s	0.000s	10.1.1.7	10.1.1.7	10.1.1.3	1	12	3.904s	0.000s
10.1.1.8	10.1.1.10	10.1.1.2	2	12	3.961s	0.000s	10.1.1.8	10.1.1.8	10.1.1.3	1	12	3.905s	0.000s
10.1.1.9	10.1.1.1	10.1.1.2	4	12	3.931s	0.000s	10.1.1.9	10.1.1.9	10.1.1.3	1	12	3.902s	0.000s
10.1.1.10	10.1.1.10	10.1.1.2	1	12	3.924s	0.000s	10.1.1.10	10.1.1.7	10.1.1.3	3	12	3.931s	0.000s
10.1.1.255	10.1.1.255	10.1.1.2	0	12	-9223.855s	0.000s	10.1.1.255	10.1.1.255	10.1.1.3	0	12	-9223.855s	0.000s
127.0.0.1	127.0.0.1	127.0.0.1	0	0	-9223.855s	0.000s	127.0.0.1	127.0.0.1	127.0.0.1	0	0	-9223.855s	0.000s

Рис. 4. Таблица маршрутизации узлов 1 и 2 в момент времени окончания симуляции

По таблицам маршрутизации можно определить адрес назначения, узел, через который направлен пакет, и количество скачков до узла назначения, если между узлами нет прямой связи.

### Визуализация результатов моделирования анализатором потока FlowMonitor и анализатором пакетов Wireshark

Для вывода результатов симуляции проекта используется модуль Flow Monitor. Это модуль мониторинга потоков, который упрощает сбор и сохранение в постоянном

хранилище общего набора показателей производительности сети. Модуль автоматически обнаруживает все потоки, проходящие через сеть, и сохраняет о них сведения, которые могут потребоваться исследователю для их анализа (битрейты, продолжительность передачи, задержки, размеры пакетов и коэффициент потери пакетов и т. п.). На рис. 5 представлены структура модуля Flow Monitor и собираемые им данные.

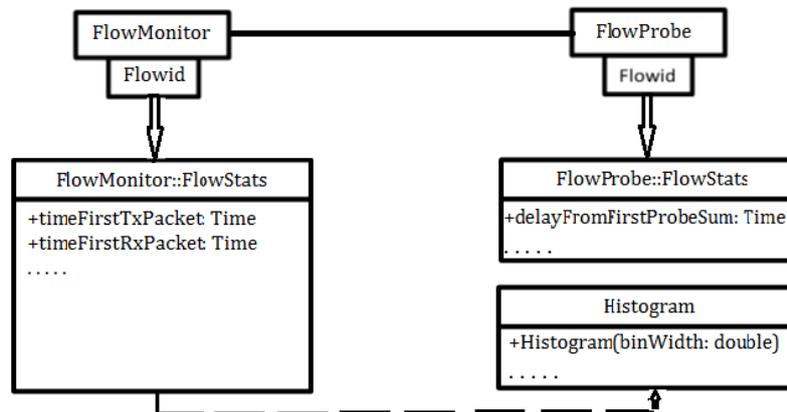


Рис. 5. Структура анализатора потоков Flow Monitor

Модуль Flow Monitor состоит из трех групп классов. Группа из основных классов включает классы FlowMonitor, FlowProbe и FlowClassifier. Класс FlowMonitor отвечает за координацию действий в отношении зондов и собирает статистику из конца в конец для потоков. Класс FlowProbe отвечает за прослушивание событий пакета в определенной точке, сообщает классу FlowMonitor сведения об этих событиях, касающиеся только пакетов, которые проходят через данный зонд. Класс FlowClassifier предоставляет методы перевода необработанных пакетных данных в параметры с идентификаторами потоков [2].

Каждый зонд будет классифицировать пакеты в следующие моменты:

- отправка пакета (трассировка SendOutgoing IPv);
- пересылка пакета (трассировка UnicastForward IPv);
- прием пакета (LocalDeliver IPv);
- отбрасывание пакета (Drop IPv).

Согласно рис. 5, модуль определяет следующие данные, собранные для каждого потока:

- timeFirstTxPacket: когда был передан первый пакет в потоке;
- timeLastTxPacket: когда был передан последний пакет в потоке;
- timeFirstRxPacket: когда первый пакет в потоке был получен конечным узлом;
- timeLastRxPacket: когда был получен последний пакет в потоке;
- delaySum: сумма всех сквозных задержек для всех принятых пакетов потока;
- jitterSum: сумма всех сквозных значений задержки для всех принятых пакетов потока, как определено в RFC 3393;
- txBytes, txPackets: общее количество переданных байтов / пакетов для потока;
- rxBytes, rxPackets: общее количество полученных байтов / пакетов для потока;
- lostPackets: общее количество пакетов, которые считаются потерянными (не сообщается более 10 с);
- timesForwarded: количество пересылок пакета;
- delayHistogram, jitterHistogram, packetSizeHistogram: версии данных для гистограмм задержки, дрожания и размеров пакетов соответственно;
- packetsDropped, bytesDropped: количество потерянных пакетов и байтов.

Статистика собирается для каждого потока, который может быть экспортирован в формате XML. Кроме этого имеется возможность напрямую обращаться к зондам, чтобы запросить конкретную статистику о каждом потоке.

Часть результатов Flow Monitor для исследуемого сетевого фрагмента представлены на рис. 6 в виде таблиц статистических данных. Поток с идентификатором ID 1 передает 25 UDP пакетов от узла с IP адресом 10.1.1.7 на узел 10.1.1.3. В результате симуляции 5 пакетов было

принято напрямую, 10 пакетов были переадресованы на другие узлы и 10 пакетов были потеряны. Соответственно, потеря пакетов Packet Loss ratio составляет около 66 %.

Анализатор потоков Flow Monitor также определяет время отправки и получения первого и последнего пакетов для определения задержки, джиттера и скорости передачи/приема пакетов.

Flow Id:1 =====	Flow Id:2 =====
UDP 10.1.1.7/49153---->10.1.1.3/9	UDP 10.1.1.5/49153---->10.1.1.1/9
Tx bitrate:8.56667kbps	Tx bitrate:8.56667kbps
Rx bitrate:10.3404kbps	Rx bitrate:8.58815kbps
Mean delay:8.77185ms	Mean delay:12.5743ms
Packet Loss ratio:66.6667%	Packet Loss ratio:0%
timeFirstTxPacket= 5.01263e+09ns	timeFirstTxPacket= 5.05748e+09ns
timeFirstRxPacket= 5.03986e+09ns	timeFirstRxPacket= 5.07754e+09ns
timeLastTxPacket= 2.90126e+10ns	timeLastTxPacket= 2.90575e+10ns
timeLastRxPacket= 9.0165e+09ns	timeLastRxPacket= 2.80599e+10ns
delaySum= 4.38593e+07ns	delaySum= 3.01784e+08ns
jitterSum= 2.37225e+07ns	jitterSum= 4.32464e+08ns
lastDelay= 4.38593e+07ns	lastDelay= 3.01784e+08ns
txBytes= 25700	txBytes= 25700
rxBytes= 5140	rxBytes= 24672
txPackets= 25	txPackets= 25
rxPackets= 5	rxPackets= 24
lostPackets= 10	lostPackets= 0
timesForwarded= 10	timesForwarded= 35

Рис. 6. Статистические данные анализатора потоков Flow Monitor

С целью анализа процесса межузловое взаимодействия аниматор NetAnim позволяет просмотреть трейсы между узлами, а также передаваемые пакеты в анализируемый промежуток времени. Трейс-граф сети иллюстрирован на рис. 7.

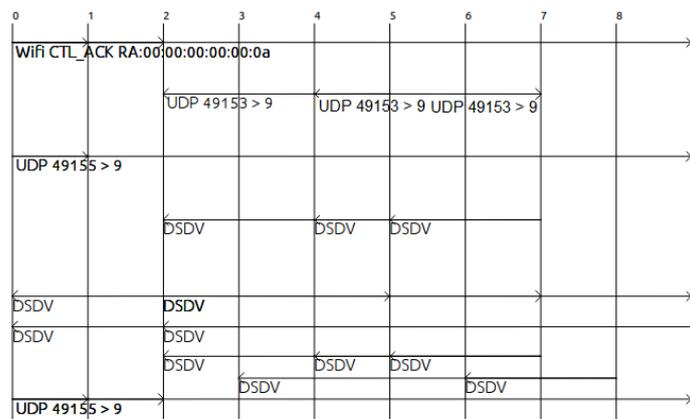


Рис. 7. Трейсы взаимодействия узлов 0–9

Вертикальными линиями представлены узлы сети, горизонтальными стрелками показано взаимодействие узлов и тип передаваемых пакетов. Кроме этого есть возможность изменения типов передаваемых пакетов между узлами на графе трейсов путем установки параметров фильтра, например, UDP, TCP, IPv4, ICMP, DSDV, AODV и т. д.

Вспомогательные объекты в NS-3 могут использоваться для создания файлов трассировки в формате pcap либо tr. Pcap означает захват и анализ структуры пакетов. Самой популярной программой, которая может читать и отображать этот формат, является Wireshark.

Это позволяет проанализировать информацию о структуре передаваемых пакетах на физическом, канальном, сетевом и транспортном уровнях. Вывод результатов в программе Wireshark представлен на рис. 8.

Первая колонка данных соответствует нумерации пакетов, вторая – определяет время симуляции, третья и четвертая соответственно исходящий адрес и адрес назначения, в пятой колонке прописывается тип передаваемого протокола, в следующей – длина пакета, а в последней колонке прописывается общая информация об анализируемом пакете.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1	0.000000	10.1.1.1	10.1.1.255	packetbb	76	
2	5.092522	00:00:00_00:00:02	00:00:00_00:00:05	ARP	64	10.1.1.2 is at 00:00:00:00:00:02
3	5.094145		00:00:00_00:00:05 (00:00:00:00:00:05) (RA)	802.11	14	Acknowledgement, Flags=0.....
4	5.245621	00:00:00_00:00:02	00:00:00_00:00:04	ARP	64	10.1.1.2 is at 00:00:00:00:00:02
5	5.247225		00:00:00_00:00:04 (00:00:00:00:00:04) (RA)	802.11	14	Acknowledgement, Flags=0.....
6	5.273275	00:00:00_00:00:02	Broadcast	ARP	64	Who has 10.1.1.5? Tell 10.1.1.2
7	5.274077		00:00:00_00:00:05 (00:00:00:00:00:05) (RA)	802.11	14	Acknowledgement, Flags=0.....
8	5.275393	10.1.1.2	10.1.1.5	UDP	1064	49154 → 9 Len=1000
9	5.775307	00:00:00_00:00:02	Broadcast	ARP	64	Who has 10.1.1.4? Tell 10.1.1.2
10	5.776111		00:00:00_00:00:04 (00:00:00:00:00:04) (RA)	802.11	14	Acknowledgement, Flags=0.....
11	5.777427	10.1.1.2	10.1.1.4	UDP	1064	49156 → 9 Len=1000
12	6.086013		00:00:00_00:00:05 (00:00:00:00:00:05) (RA)	802.11	14	Acknowledgement, Flags=0.....
13	6.245692		00:00:00_00:00:04 (00:00:00:00:00:04) (RA)	802.11	14	Acknowledgement, Flags=0.....
14	6.270002	10.1.1.2	10.1.1.5	UDP	1064	49154 → 9 Len=1000
15	6.769034	10.1.1.2	10.1.1.4	UDP	1064	49156 → 9 Len=1000
16	7.086013		00:00:00_00:00:05 (00:00:00:00:00:05) (RA)	802.11	14	Acknowledgement, Flags=0.....
17	7.245478	10.1.1.4	10.1.1.2	UDP	1064	49154 → 9 Len=1000

```

▶ Frame 11: 1064 bytes on wire (8512 bits), 1064 bytes captured (8512 bits)
▶ IEEE 802.11 Data, Flags: 0.....
▶ Logical-Link Control
▶ Internet Protocol Version 4, Src: 10.1.1.2, Dst: 10.1.1.4
▶ User Datagram Protocol, Src Port: 49156, Dst Port: 9
  Source Port: 49156
  Destination Port: 9
  Length: 1000
  [Checksum: [missing]]
  [Checksum Status: Not present]
  [Stream index: 2]
▶ Data (1000 bytes)

```

Рис. 8. Пакеты данных Frames 2-17 и формат пакета Frame 11

Кроме анализатора пакетов Wireshark, симулятор NS-3 позволяет создавать файлы трассировки ASCII в формате `tr`, содержащие данные о типе передаваемых пакетов и информацию о доставке пакетов. Для визуализации результатов, кроме анализатора потоков Flow Monitor, может быть использована утилита `gnuplot`. `Gnuplot` предназначена для представления результатов расчета в графической форме, а расчет может проводиться как самой утилитой по формулам, так и независимо, например, программами C++. При этом утилита `gnuplot` предоставляет возможность выборки данных из файлов.

В процессе имитационного моделирования фрагмента сети Manet модулем Flow Monitor сформировано 45 потоков. Результаты статистической оценки системных параметров анализируемой сети представлены на рис. 9 в виде гистограмм скоростей передачи (Flow\_bitrates), количества потерянных пакетов (Number\_of\_lost\_packets) и задержки (Delay) по каждому направлению потоков (Number\_of\_flows).

Общее число переданных пакетов за время моделирования составило 1125, количество полученных – 838, а процент доставки пакетов – 82. Соответственно средняя пропускная способность сети – 6,77 кбит/с, средняя задержка – 0,064 с, а среднее значение джиттера – составляет 0,05 с.

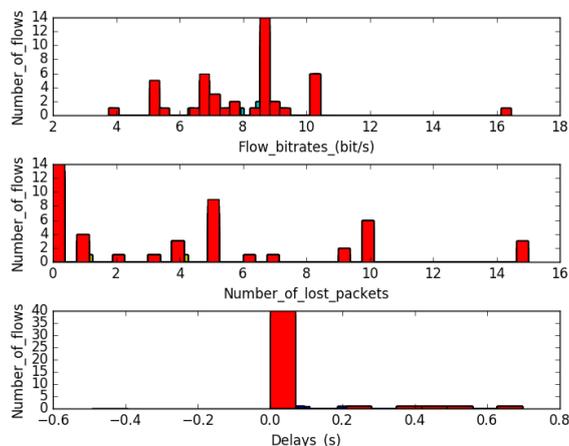


Рис. 9. Результаты статистической обработки по всем потокам

Из гистограмм видно, что для проектируемой сети для большинства потоков характерны минимальная задержка и потеря пакетов, а пропускная скорость варьируется от 4 до 10 кбит/с.

## Заключение

Беспроводные сети резко расширили область своего применения, благодаря актуальности двух задач: последней мили и построения децентрализованных сетей. Задача последней мили заключается в организации доступа к сервисам традиционной проводной инфраструктурной сети для конечных пользователей. В рамках архитектуры «клиент-сервер» доступ к среде может осуществляться централизованным или распределенным методами.

В первом случае точка доступа монополюно управляет доступом к среде, предотвращая одновременную передачу пакетов разными станциями, а во втором – доступ к среде осуществляется на конкурентной основе, когда все клиентские станции, а также сама точка доступа соревнуются за право передать пакеты. Децентрализованные сети, или сети класса ad hoc, – это самоорганизующиеся сети, создаваемые из равнозначных станций, и когда это необходимо – без проводной инфраструктуры.

Отказ от архитектуры «клиент-сервер» при построении сетей класса ad hoc делает решения обеих задач существенно разными, а развертывание таких сетей независимо от их применения требует проведения изыскательских и исследовательских программ с целью расширения зоны покрытия сети и обеспечения бесперебойной работы движущихся станций, выполнение которых предполагает владение навыками компьютерного моделирования. Эффективность такого подхода иллюстрируется результатами, представленными в статье.

## MODELING MANET NETWORK IN SIMULATOR NS-3

V.A. BELAN, M.M. SHAKIR, M.Yu. HOMENOK

**Abstract.** The system characteristics of a self-organizing network with a dynamically changing topology which use the Manet technology on base of the NS-3 simulator were analyzed. A review of the capabilities of the simulator for both research and educational purposes was performed.

*Keywords:* modeling, NS-3, simulator, Manet, NetAnim, flow monitor.

### Список литературы

1. NS-3 [Электронный ресурс]. URL: <http://clone.nsnam.org/ns-3-allinone> (дата обращения: 10.11.2018).
2. NetAnim [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nsnam.org/wiki/NetAnim> (дата обращения: 10.11.2018).