ТУЗС

ISSN: 1813-324X

Труды Учебных Заведений Связи

Том 3. № 2

2017

Темы номера

- Оптические волокна и оптические сигналы
- Исследование мультиплексирования и диспетчеризации трафика
- Перспективы развития систем связи на базе технологий Li-Fi и SDN

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

Научный журнал

ТРУДЫ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ СВЯЗИ

Том 3

№ 2

Санкт-Петербург

2017

Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 2. ISSN: 1813-324X.

Описание журнала

Научный журнал. Публикуются материалы научных работ, выполненных в области телекоммуникаций, телевидения и радиовещания, сетей связи и систем коммутации, систем связи с подвижными объектами, аудиовизуальной техники, почтовой связи, информатики, экономики и менеджмента в связи.
Выпускается с 1960 года. Выходит 4 раза в год.

Редакционный совет

Розанов Н.Н., д.ф.-м.н., проф., член-кор. РАН, начальник отдела теоретических исследований Института лазерной физики «ГОИ им. С.И. Вавилова»
Koucheryavy Y., PhD, Tampere University of Technology, Finland
Hošek I., PhD, Brno University of Technology, Czech Republic
Tiamiyu O.A., PhD, University of Ilorin, Nigeria
Козин И.Д., д.ф.-м.н., проф., профессор кафедры телекоммуникационных систем Алматинского университета энергетики и связи, Республика Казахстан
Самуйлов К.Е., д.т.н., проф., заведующий кафедрой прикладной информатики и теории вероятностей РУДН
Степанов С.Н., д.т.н., проф., заведующий кафедрой «Сети связи и системы коммутации» МТУСИ
Росляков А.В., д.т.н., проф., заведующий кафедрой автоматической электросвязи ПГУТИ
Кучерявый А.Е., д.т.н., проф., заведующий кафедрой сетей связи и передачи данных СПбГУТ
Канаев А.К., д.т.н., доц., заведующий кафедрой «Электрическая связь» ПГУПС
Новиков С.Н., д.т.н., проф., заведующий кафедрой безопасности и управления в телекоммуникациях СибГУТИ
Дворников С.В., д.т.н., проф., профессор кафедры радиосвязи ВАС
Коржик В.И., д.т.н., проф., профессор кафедры защищенных систем связи СПбГУТ
Ковалгин Ю.А., д.т.н., проф., профессор кафедры радиосвязи и вещания СПбГУТ
Владыко А.Г., к.т.н., директор НИИ «Технологии связи» СПбГУТ

Редакционная коллегия

Главный редактор – **Бачевский С.В.**, д.т.н., проф., ректор СПбГУТ
Зам. главного редактора – **Буйневич М.В.**, д.т.н., проф., профессор кафедры безопасности информационных систем СПбГУТ
Ответственный редактор – **Аникевич Е.А.**, к.т.н., начальник отдела организации НИР и интеллектуальной собственности СПбГУТ
Выпускающий редактор – **Яшугин Д.Н.**

Регистрационная информация

Свидетельство о регистрации СМИ: № 77-17986 от 07.04.2004.
Подписной индекс по каталогу «Межрегионального агентства подписки»: 12073.
Размещение в РИНЦ (elibrary.ru) по договору от 20.02.2013 № 59-02/2013R.

Контактная информация

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ).
Адрес редакции: 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, корп. 1, каб. 334/2.
Тел. +7 (964) 375-9970 E-mail: tuzs@spbgut.ru Web: http://tuzs.sut.ru ВК: http://vk.com/spbtuzs

Подписано в печать 26.06.2017. Формат 60×841/8.
Усл.-печ. л. 14,25. Тираж 1000 экз. Заказ № 2463.
Отпечатано в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России.
196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149.

© СПбГУТ
Дизайн обложки – Израилов К.Е.

СОДЕРЖАНИЕ

Абазина Е.С., Ерунов А.А.
Применение асинхронного мультиплексирования скрытых каналов передачи данных в одном видеопотоке систем спутниковой связи ……..……..5

Альшаев И.А., Красов А.В., Ушаков И.А.
Исследование принципов протокола OPENFLOW в программно-конфигурируемых сетях……..……..……16

Ахрамеева К.А., Попов Л.Г.
Исследование метода стегоанализа цифровых видеопоследовательностей, основанного на феномене линейной коллизии ……..…..…….....28

Бурдин А.В., Василец А.А., Кафарова А.М., Минаева А.Ю., Морозов О.Г., Севрук Н.Л.
Экспериментальная апробация квази-интерферометрической схемы регистрации внешних механических воздействий на основе анализа отклика маломодового оптического сигнала …….....37

Былина М.С., Халилов М.Н.
Теоретическое и экспериментальное исследование потерь в изогнутых оптических волокнах …….....51

Ганбаев А.А., Филин В.А.
Режимы возбуждения и методы управления ВЧ-колебаниями в транзисторных резонансных ключевых устройствах……..….....60

Гришин И.В., Хричков В.А., Ялунина Т.Р.
Перспективы развития беспроводных систем передачи данных на базе светодиодов видимого излучения…….....….68

Киреев А.В., Федоренко И.В., Фокин Г.А.
Оценка точности позиционирования объекта с помощью границы Крамера-Рао ……..…….....…..77

Ковальский А.А.
Исследование адаптивного мультиплексирования и диспетчеризации мультисервисного трафика в каналообразующей аппаратуре земных станций спутниковой связи. Часть 2. Модели адаптивного мультиплексирования трафика ……..…...84

Ушанев К.В.
Расчет операторов преобразования трафика для преднамеренного повышения структурной сложности информационного потока …….....93

Lavrukhin V., Lezhepekov A., Vladyko A.
Experimental testbed for access point selection in IoT WiFi networks ...…...……..102

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ……..…….113

CONTENS

Abazina E., Erunov A.
Application of asynchronous multiplexing for hidden channels in one video stream of satellite communication systems……...……..…….……5

Alshaev I., Krasov A., Ushakov I.
Research of the working principles of the OPENFLOW protocol in the software-defined networks……...……..……..16

Ahrameeva K., Popov L.
Research of digital video steganalysis method founded on the phenomenon of linear collusion…….……..…..…..…….....28

Bourdine A., Vasilets A., Kafarova A., Minaeva A., Morozov O., Sevruk N.
Experimental approbation of quasi-interferometric scheme for outer mechanical stress detection based on few-mode optical signal response analysis …….…....37

Bylina M., Halilov M.
Theoretical and experimental research of loss in optical fibers ……...51

Ganbaev A., Filin V.
Drive modes and methods of controlling HF oscillations in transistor resonant switching mode devices.....60

Grishin I., Hrichkov V., Yalunina T.
Wireless data transmission systems based on visible light emitting diods: challenges and opportunities …….68

Kireev A., Fedorenko R., Fokin G.
Accuracy evaluation of positioning by Cramer Rao bound……..……....77

Kovalsky A.
Research of adaptive multiplexing and dispatching of multiservice traffic in the channeling equipment of land satellite communication systems.
Part 2. Models of adaptive multiplexing of the traffic …….84

Ushanev K.
The calculation of the traffic transformation operator for deliberate increase of the structural complexity of information stream……..……....93

Lavrukhin V., Lezhepekov A., Vladyko A.
Experimental testbed for access point selection in IoT WiFi networks……102

AUTHORS INDEX ……..……113

ПРИМЕНЕНИЕ АСИНХРОННОГО МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ СКРЫТЫХ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ОДНОМ ВИДЕОПОТОКЕ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Е.С. Абазина[1*], **А.А. Ерунов**[1]

[1]Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация
*Адрес для переписки: e.s.abazina@yandex.ru

Информация о статье
УДК 621.396
Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Абазина Е.С., Ерунов А.А. Применение ассинхронного мультиплексирования скрытых каналов передачи данных в одном видеопотоке систем спутниковой связи // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 2. С. 5–15.

Аннотация: *Развитие методов сокрытия данных и расширение приложений цифровой стеганографии требует поиска компромисса между скрытностью и пропускной способностью скрытых каналов передачи данных. В данной статье обоснована актуальность исследований в направлении перераспределения пропускной способности группового скрытого канала передачи данных в видеопотоке системы спутниковой связи, предствлен подход, позволяющий увеличить число скрытых каналов передачи данных в одном видеопотоке за счет асинхронного мультиплексирования.*

Ключевые слова: *цифровая стеганография, скрытые каналы, стегоканалы, скрытая пропускная способность, асинхронное мультиплексирование, переменная пропускная способность скрытого канала.*

APPLICATION OF ASYNCHRONOUS MULTIPLEXING FOR HIDDEN CHANNELS IN ONE VIDEO STREAM OF SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

E. Abazina[1], **A. Erunov**[1]

[1]Military Space Academy of A.F. Mozhaysky, St. Petersburg, 197198, Russian Federation

Article info
Article in Russian

For citation: Abazina E., Erunov A. Application of Asynchronous Multiplexing for Hidden Channels in One Video Stream of Satellite Communication Systems // Proceedings of Educational Institutes of Communication. 2017. Vol. 3. Iss. 2. PP. 5–15.

Abstract: *The development of data's concealment and extension of the applied scope of digital steganography demand to search the compromise between concealment and capacity of the hidden channel. In this article the relevance of redistribution in one video stream of satellite communication systems of the hidden channels capacity is justified. An approach to increasing numbers*

of the hidden channels in one video stream is submitted here. It can be achieved by the using of asynchronous multiplexing for hidden channels.

Keywords: *Digital steganography, the hidden channels, stegochannels, capacity of the hidden channel, asynchronous multiplexing, variable capacity of the hidden channel.*

В современных условиях эффективность применения сил и средств в значительной степени определяется эффективностью функционирования системы управления этими силами и средствами. Под силами и средствами авторы понимают любые абстрактные человеческие ресурсы и материальные средства, на которые возложено выполнение задач по предназначению. Независимо от решаемых задач, система управления включает в себя органы управления – лица, принимающие решения и контролирующие их исполнение, управляемые объекты – силы и средства, на которые возложено выполнение поставленной задачи, и инфокоммуникационную систему, обеспечивающую взаимодействие органов управления и управляемых объектов. При организации управления на распределенной территории, в труднодоступных районах, в регионах с отсутствующей телекоммуникационной инфраструктурой взаимодействие возможно лишь при использовании спутниковых систем связи. При этом одним из основных недостатков систем спутниковой связи является разведдоступность и низкая помехоустойчивость. Передача информации ограниченного распространения по спутниковым каналам требует применения дополнительных технологических решений, обеспечивающих защиту передаваемой информации. С этой целью целесообразно совместное применение криптографических и стеганографических методов.

Основной задачей цифровой стеганографии, в отличие от криптографии, является сокрытие предаваемых данных за счет избыточности различных видов информации, представляемой в цифровом виде и не привлекающей внимания несанкционированных наблюдателей. Информацию, в которой осуществляется скрытая передача, принято называть контейнером [1, 2]. Основным требованием, предъявляемым к стеганографическому обмену, является скрытность в смысле сохранения в тайне факта передачи информации. Скрытность, как правило, определяется искажениями, вносимыми в контейнер при встраивании скрываемой информации: чем меньшей модификации подвержен контейнер, тем более скрытно осуществлено встраивание дополнительных данных.

По целям использования методов цифровой стеганографии общепризнанными являются три направления [1–3]:

– встраивание скрытых каналов передачи информации – целью встраивания является сокрытие факта передачи информации;

– встраивание цифровых водяных знаков (ЦВЗ) – цель встраивания состоит в подтверждении подлинности предаваемых данных и в предотвращении несанкционированного доступа к ним;

– встраивание идентификационных номеров (цифровые отпечатки пальцев, ЦОП) – с целью скрытой аннотации и аутентификации передаваемой информации.

Под скрытым (стеганографическим) каналом понимают совокупность программных (или аппаратно-программных) средств, реализующих методы встраивания и извлечения информации в контейнер, и среды распространения контейнера, позволяющих сохранить в тайне факт передачи встроенной информации.

В отличие от ЦВЗ и ЦОП, скрытые каналы характеризуются максимальным количеством информации, которое возможно встроить в один контейнер при сохранении скрытности встраивания, называемым в стеганографии пропускной способностью скрытого канала или скрытой пропускной способностью. Скрытая пропускная способность тем больше, чем больше число элементов контейнера возможно исказить или заменить при встраивании скрываемой информации. Скрытность и пропускная способность скрытого канала состоят в противоречии друг с другом: увеличение одного из них приводит к снижению другого [1–3].

Дополнительные ограничения на пропускную способность скрытого канала возникают из-за необходимости обеспечения достоверности приёма скрываемых данных не хуже заданной. Зависимость скрытой пропускной способности $C_{\text{стег}}$ от скрытности U и достоверности приёма скрываемых данных $P_{\text{ош}}$ представлена на рис. 1.

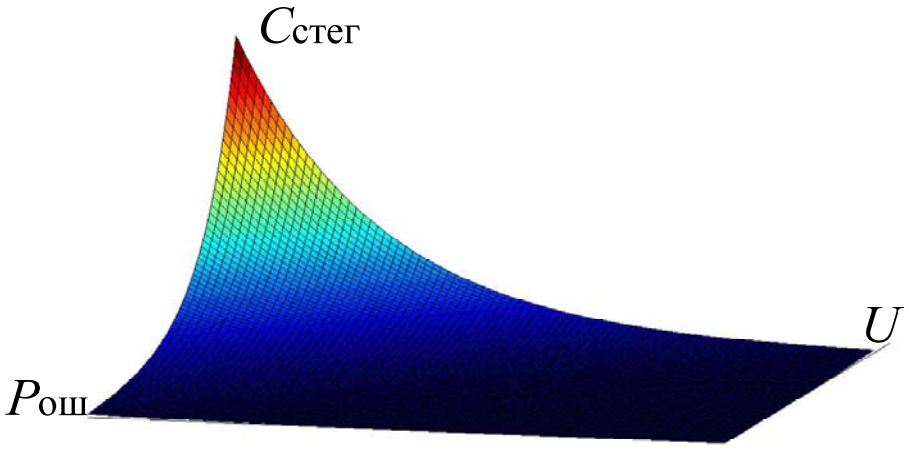


Рисунок 1. Определение пропускной способности скрытого канала

С целью организации защищенных каналов обмена информацией ограниченного распространения по спутниковым радиолиниям предлагается рассмотреть возможность построения стегосистемы, обеспечивающей скрытый информационный обмен между несколькими парами абонентов в одном контейнере. Значительная избыточность видеоданных в сравнении с остальными видами трафика определяет их приоритетное использование в качестве контейнера для скрытой передачи информации.

Потребность в числе каналов спутниковой связи для обеспечения функционирования системы управления силами и средствам, требования к пропускной способности элементарных каналов связи и степени их защищенности

определяются иерархическим уровнем органа управления, которому они предоставляются. Требования же по достоверности приема информации и времени ее передачи зависят от вида передаваемой информации. В условиях чрезвычайных ситуаций целесообразно предусмотреть первоочередную организацию низкоскоростных информационных каналов, ориентированных на передачу речи и коротких текстовых сообщений или телеграмм. Таким образом, основными видами трафика скрытых каналов, рассматриваемых в работе, следует считать:

– трафик, критичный к задержке по времени (телефонные переговоры), с ограничением на время доставки пакета не хуже, чем $t_{\text{дост}} \leq 400$ мс;

– трафик, критичный к достоверности приема (текстовые сообщения и телеграммы), с ограничением на вероятность ошибочного приема не хуже, чем $P_{\text{ош}} \leq 10^{-3}$.

Анализ ранее разработанных технологических решений организации скрытых каналов в видеоданных, подробно представленный в работах [1–3], позволил сформулировать следующие выводы. Наибольшей скрытностью обладают методы встраивания информации в частотную область видеоданных до проведения операций сжатия. Однако это приводит к искажению скрываемой информации в процессе сжатия, что обуславливает необходимость ее помехоустойчивого кодирования, а, следовательно, накладывает дополнительные ограничения на скрытую пропускную способность. Многоабонентный скрытый информационный обмен в структуре одного видеоконтейнера может быть реализован за счет кодового уплотнения скрываемых сообщений [4–6]. Существующая технология позволяет сформировать порядка 30-ти элементарных скрытых каналов с пропускной способностью в 1,2 кбит/с каждый при средней скорости передачи видеопотока 8 Мбит/с [4–6]. Пропускная способность скрытого канала в видеопотоке зависит от его динамики и, следовательно, не постоянна.

Таким образом, применение одной только технологии кодового уплотнения скрываемых данных недостаточно для организации скрытого информационного обмена достаточно крупной (порядка 100 абонентов) системы управления. Одним из способов повышения пропускной способности скрытого канала является применение асинхронного мультиплексирования скрываемых данных: телефонных и телеграфных переговоров. Возможность применения данной технологии обоснована пульсирующим характером речи, состоящей из последовательности периодов активности абонента и пауз между ними. Статистика активности речевых абонентов свидетельствует о том, что в среднем лишь 40–45 % времени переговоров приходится на долю активной речи. Наличие пауз может быть использовано для передачи иной информации одновременно с ведущимся телефонным разговором по средствам статистического мультиплексирования.

В отличие от мультиплексирования с временным разделением, предполагающего выделение фиксированного временного интервала из общей полосы пропускания для каждого из каналов, при статистическом мультиплексирова-

нии каждому информационному потоку предоставляется временной интервал в соответствии с требуемой скоростью передачи информации.

В соответствии с ранее разработанным методом организации кодово-уплотненного скрытого канала [4–6], встраивание скрываемых данных осуществляется путем замены пары бит оцифрованного спектра видеоконтейнера, полученного в базисе функций, согласованных с двумерной шумоподобной сигнальной конструкцией (ДШСК), элементами ДШСК, модулированной информацией, требующей сокрытия. При применении статистического мультиплексирования в стегосистеме, разделяемым ресурсом между активными абонентами выступают элементы видеоконтейнера, подлежащие модификации при встраивании, а также строки матрицы ДШСК.

Особенность мультиплексирования состоит в необходимости согласования выходной скорости пакетированных данных абонентов скрытого информационного обмена с переменной скоростью их встраивания в контейнер. Принцип работы такого асинхронного мультиплексора представлен на рис. 2.

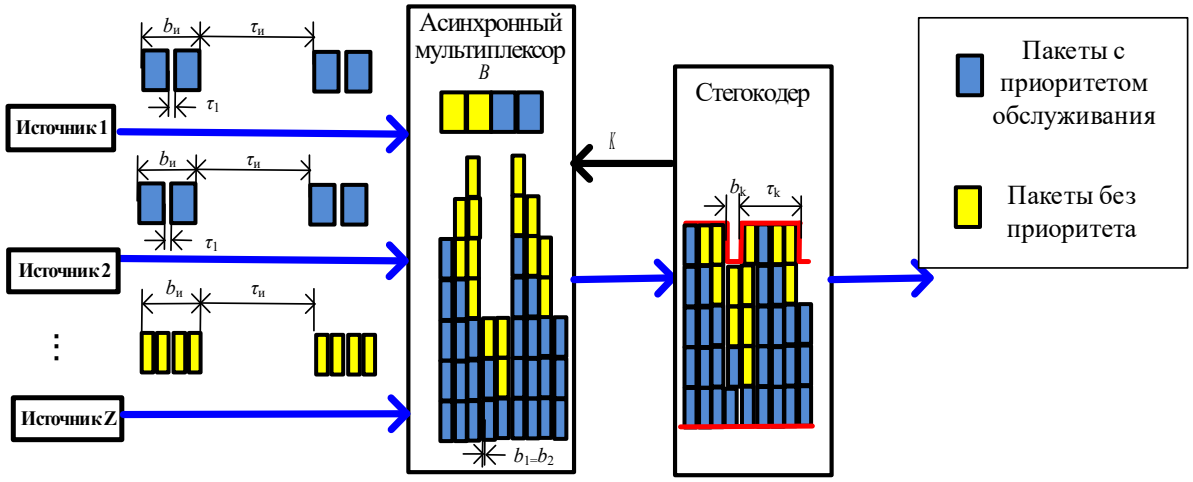


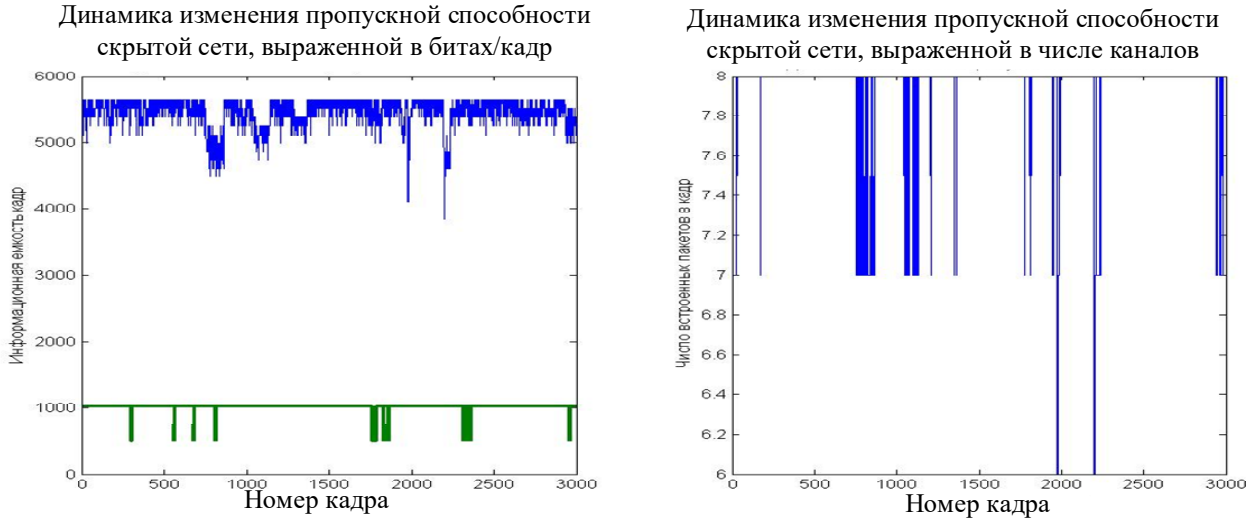
Рисунок 2. Принцип работы асинхронного мультиплексора с переменной скоростью передачи

Пакетированные данные абонентов скрытого информационного обмена поступают на вход стегокодера в соответствии с приоритетом обслуживания со скоростью передачи, согласованной с текущей скоростью встраивания. Приоритет в обслуживании потока пакетированных данных, подлежащих сокрытию, может быть назначенв соответствии со срочностью или важностью передаваемой информации. В случае переполнения входного буфера асинхронного мультиплексора происходит потеря пакетов, а с увеличением его емкости – увеличение времени задержки пакетов. Параметры вероятности потери пакетов и времени их задержки являются ключевыми при оценивании качества обслуживания трафика абонентов скрытого информационного обмена.

Для оценивания пропускной способности скрытого канала с кодовым уплотнением в работе разделены понятия емкости скрытого канала и скрытой пропускной способности. Под емкостью скрытого канала K авторы понимают

потенциальные возможности видеоконтейнера, определяемые, как максимум типовых скрытых каналов, организуемых в этом контейнере, из числа возможных. Под скрытой пропускной способностью $C_{стег}$ в статье подразумевается максимально достижимая скорость скрытой передачи данных в одном видеоконтейнере и измеряемая в бит/с.

Результаты имитационного моделирования оценивания переменной пропускной способности группового скрытого канала представлены на рис. 3: оценена скрытая пропускная способность $C_{стег}$ (рис. 3а) и емкость скрытого канала K (рис. 3б). Результаты получены для значений вероятностей ошибочного приема $P_{ош}$ не хуже 10^{-3} (соответствует синей кривой графиков) и $P_{ош}$ не хуже 10^{-5} (соответствует зеленой кривой графиков). Ось абсцисс соответствует номерам кадров в видеопотоке и характеризует динамику видеоконтейнера, ось ординат – скрытой пропускной способности $C_{стег}$ или емкости скрытого канала K (рис. 3а и рис. 3б соответственно).



а) б)

Рисунок 3. Результаты оценивания пропускной способности скрытого канала

На рис. 4 представлены накопленные статистические данные об изменении числа элементарных каналов и снижении скрытой пропускной способности (зеленая кривая), аппроксимированные кривой, изменяющейся по экспоненциальному закону распределения случайной величины (синяя кривая).

Результаты проверки соответствия выбранного закона распределения случайной величины снижения пропускной способности реальному процессу по критерию Пирсона, представлены на рис. 5.

Полученные значения критерия Пирсона $x^2_{эксп}$ соответствуют синей кривой на рис. 5. При этом зеленая линия соответствует критическому значению критерия Пирсона $x^2_{крит}$.при заданном числе степеней свободы $r = k - s = 7$ ($k = 8$ – число разрядов, $s = 1$ – число наложенных связей) для выборки. Вероятность, равная 0,7, характеризует расхождение теоретического и статистического распределения и означает, что данное расхождение, обусловленное случайными

причинами, будет не меньше, чем фактически наблюдаемое в данной серии опытов значение χ^2.

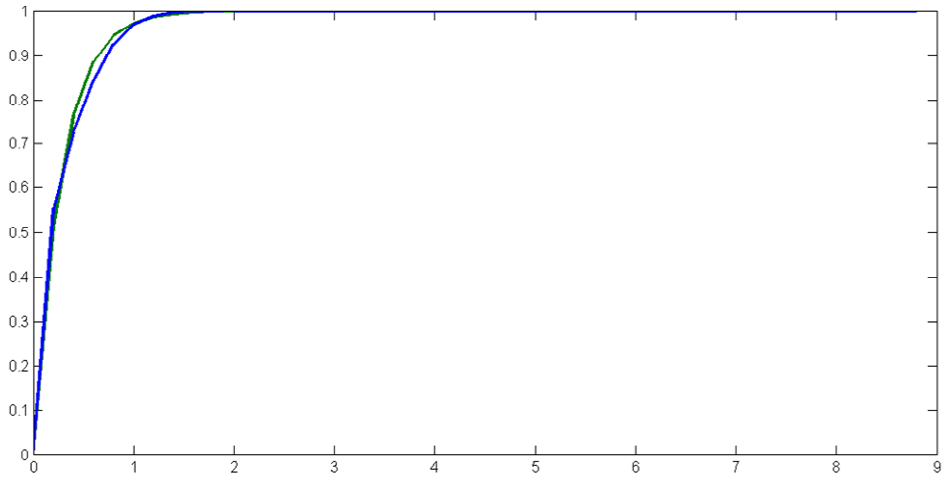


Рисунок 4. Аппроксимация закона распределения случайной величины снижения пропускной способности скрытого канала

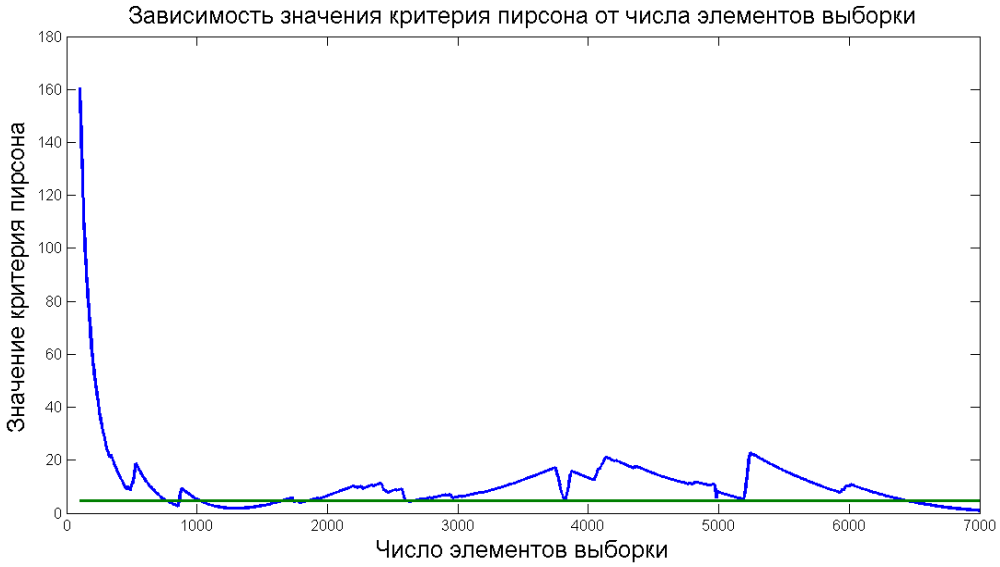


Рисунок 5. Проверка выбранного закона распределения случайной величины снижения пропускной способности по критерию Пирсона

Анализ представленных графиков позволяет заключить, что применение выбранного закона аппроксимации случайной величины снижения пропускной способности допустимо в модели асинхронного мультиплексирования скрываемых данных в видеоконтейнере.

Применение асинхронного мультиплексирования низкоскоростных информационных потоков при формировании группового скрытого канала в видеоданных позволяет достичь увеличения скрытой пропускной способности. Зависимость коэффициента уплотнения канала от активности источников трафика, подлежащего сокрытию, при изменении канальной емкости мультиплексора представлены на рис. 6.

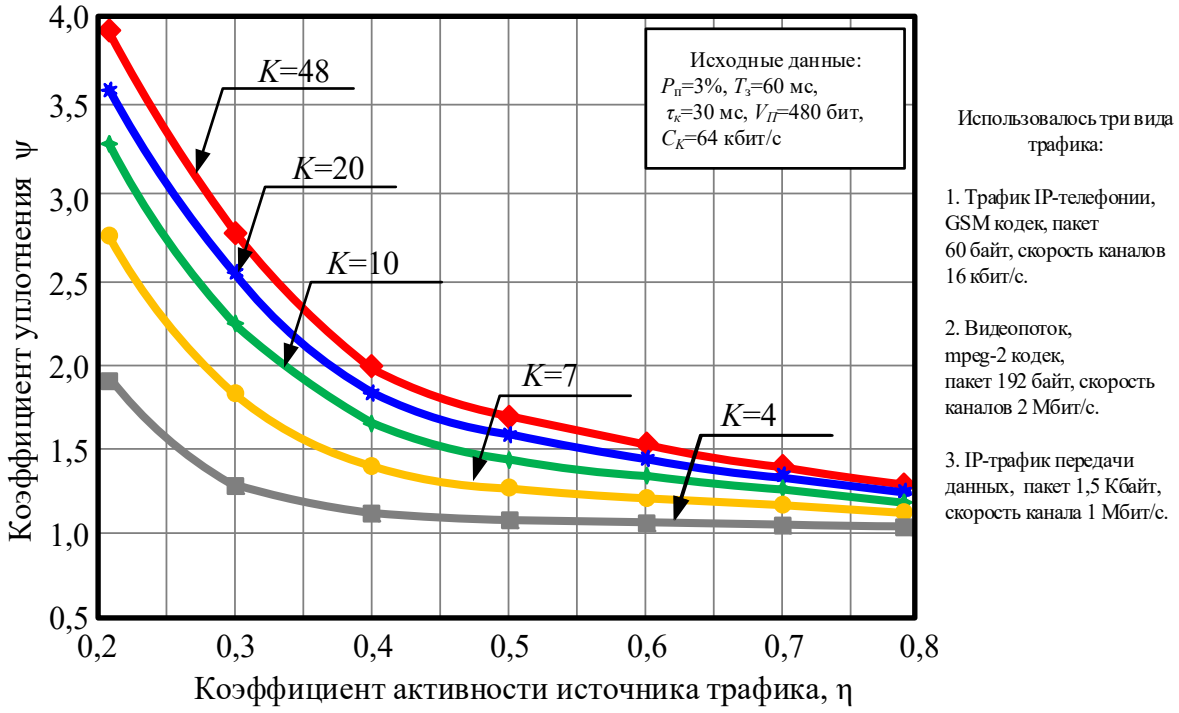
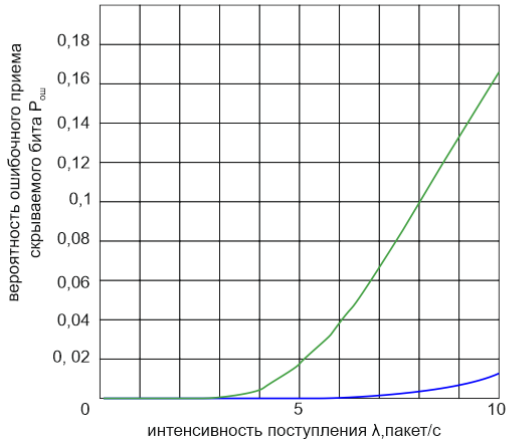


Рисунок 6. Зависимость коэффициента уплотнения от активности источников трафика при изменении канальной емкости мультиплексора

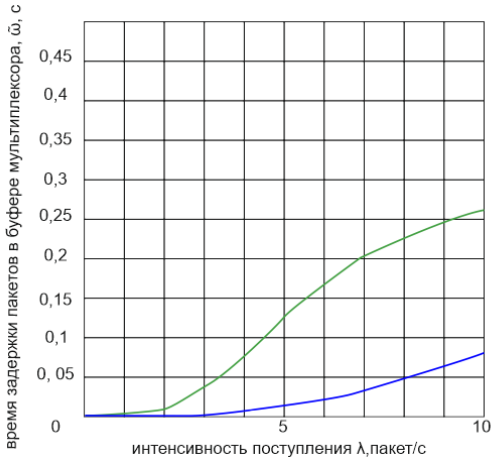
Данная технология реализована при работе мультиплексора с постоянной канальной емкостью и позволяет повысить скрытую пропускную способность на величину, обратную коэффициенту активности мультиплексированных источников.

Результаты оценивания емкости скрытого канала K, пропускной способности скрытого канала $C_{стег}$ при ограничениях на качество обслуживания мультисервисного трафика абонентов скрытого информационного обмена (вероятность потери пакетов $p_{пп}$, время задержки пакетов $t_{зад}$) при асинхронном мультиплексировании с переменной скоростью встраивания скрываемых данных приведены на рис. 7.

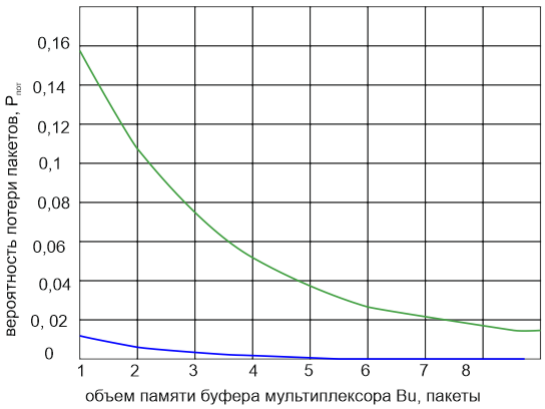
Представленные зависимости получены при следующих условиях: интенсивность активизации речевых абонентов $\alpha = 1{,}2$; интенсивность умолкания источников трафика $\beta = 1{,}8$; число источников трафика $Z = 9$; число статистически уплотняемых скрытых каналов $K = 4$; объем памяти буфера мультиплексора $Bu = 8$ пакетов; интенсивность поступления пакетов 1 приоритета $\lambda_1 = 10$ пакетов/с; интенсивность поступления пакетов 2 приоритета $\lambda_2 = 20$ пакетов/с; интенсивность обслуживания пакетов 1 и 2 приоритетов = 10 пакетов/с; среднее время снижения пропускной способности скрытого канала $t_{сниж} = 5$ с; среднее время восстановления пропускной способности скрытого канала $t_{восст} = 0{,}25$ с. Пакеты трафика первого приоритета отмечены на графиках синим, второго приоритета – зеленым.



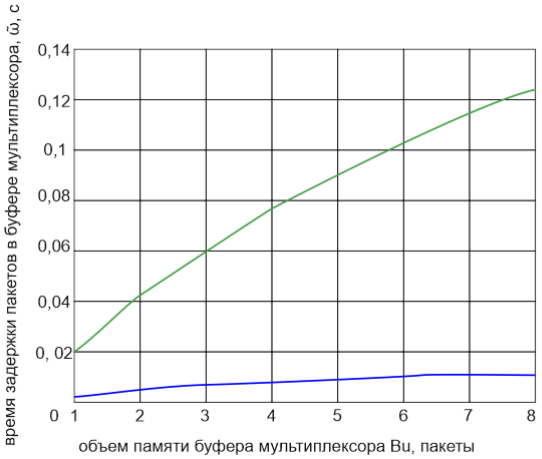
Зависимость вероятности потери пакетов от интенсивности поступления пакетов



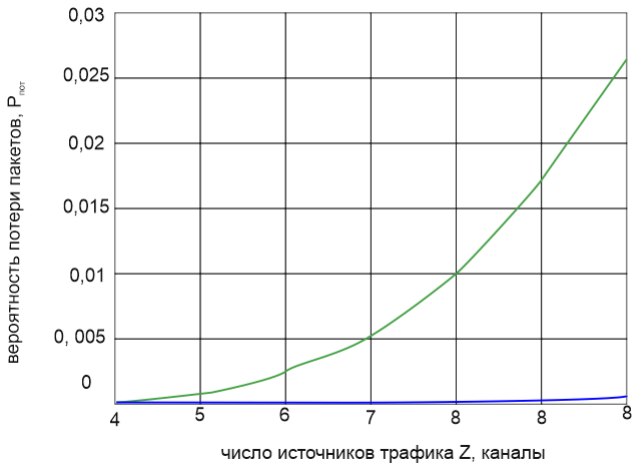
Зависимость времени задержки пакетов от интенсивности поступления пакетов



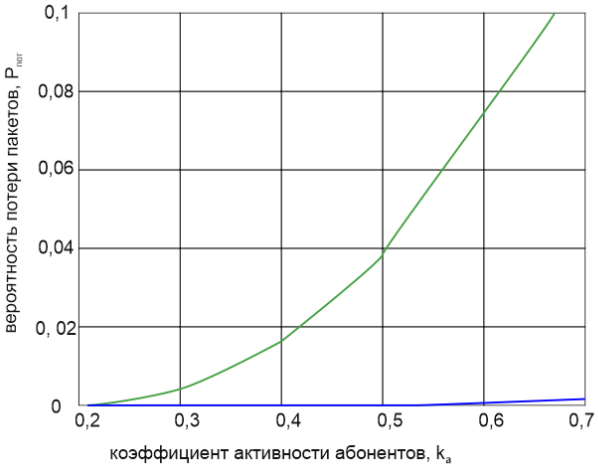
Зависимость вероятности потери пакетов от емкости буфера



Зависимость вероятности потери пакетов от числа источников трафика



Зависимость времени задержки пакетов от емкости буфера



Зависимость вероятности потери пакетов от активности абонентов

Рисунок 7. Результаты оценивания параметров мультисервисного трафика абонентов скрытого информационного обмена при асинхронном мультиплексировании

На рис. 8 представлена зависимость выигрыша, получаемого в результате асинхронного мультиплексирования, от канальной емкости группового скрытого канала при вероятности потери пакетов не более 1 % (синие кривые) и при вероятности потери пакетов не более 3 % (зеленые кривые). При времени задержки пакетов в буфере мультиплексора $\tilde{\omega} = 120$ мс полученные зависимости отмечены на графиках сплошными кривыми, при времени задержки пакетов в буфере мультиплексора $\tilde{\omega} = 60$ мс – пунктирными.

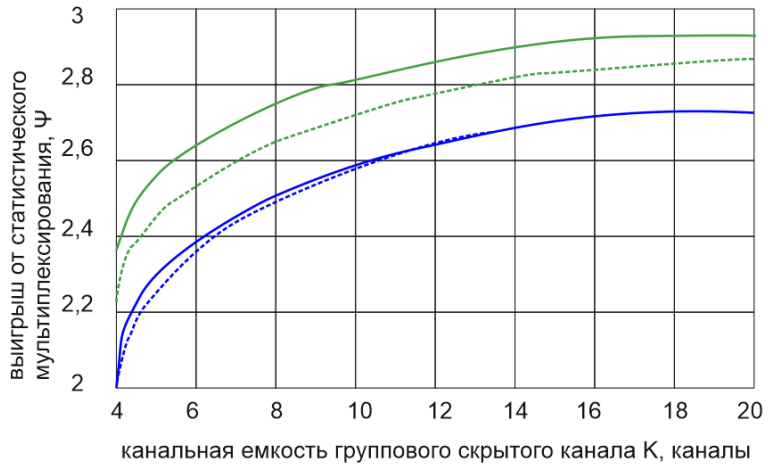


Рисунок 8. Зависимость выигрыша, получаемого в результате асинхронного мультиплексирования, от канальной емкости группового скрытого канала

При оценивании скрытности разработанной технологии организации скрытых каналов в видеопотоке был осуществлен контроль параметров контейнера до и после встраивания скрываемых данных:

– субъективное оценивание визуального качества видеоконтейнера (визуальная атака) [7];

– объективное оценивание визуального качества видеоконтейнера по показателю пикового отношения сигнал-шум (ПОСШ), для которого в [8] определено значение не ниже 30 дБ, что соответствует удовлетворительному качеству видеоданных;

– оценивание изменения гистограммы видеоконтейнера до и после встраивания (статистическая атака).

Результаты оценивания скрытности разработанной технологии организации группового скрытого канала передачи данных с применением асинхронного мультиплексирования в видеоконтейнере представлены в [9]. Выполнение требований к ПОСШ видеоданных после встраивания скрываемой информации в совокупности с изменениями визуального качества и гистограммы видеоизображения, неотличимыми от искажений, вносимых шумами канала, позволяет делать вывод о построении ρ-надежной стегосистеме с вероятностью ошибочного обнаружения несуществующего скрытого сообщения, стремящейся

к нулю, при вероятности не обнаружения скрытого сообщения, стремящегося к единице [1, 2].

Таким образом, применение в процессе формирования группового скрытого канала в видеоконтейнере технологии асинхронного мультиплексирования встраиваемых данных, предаваемого в интересах управления силами и средствами, позволяет:

– обеспечить требования, предъявляемые к качеству обслуживания мультисервисного трафика абонентов скрытого информационного обмена;

– повысить пропускную способность скрытого канала и емкость скрытого канала в видеоконтейнере при ограничениях на скрытность встраивания и качество обслуживания. Достигаемый выигрыш при этом составляет до 2,9 раз в сравнении с существующей технологией формирования скрытого канала с кодовым уплотнением в структуре видеопотока.

Список используемых источников

1. Грибунин В.Г., Оков И.Н., Туринцев И.В. Цифровая стеганография. М.: Солон-Пресс. 2009. 272 с.

2. Конахович Г.Ф., Пузыренко А.Ю. Компьютерная стеганография. Теория и практика. Киев: МК-Пресс. 2006. 283 с.

3. Абазина Е.С., Ерунов А.А. Цифровая стеганография: состояние и перспективы // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 182–201. URL: http://journals.intelgr.com/sccs/20162/html.

4. Абазина Е.С., Ерунов А.А. Результаты моделирования метода скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 2. С. 1–25. URL: http://journals.intelgr.com/sccs/20152/html.

5. Абазина Е.С. Метод кодового уплотнения скрытого канала при передаче видеоданных // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 3. С. 14–42. URL. http://journals.intelgr.com/sccs/20153/html.

6. Абазина Е.С., Коровин В.М., Федосеев В.Е., Цветков К.Ю. Имитационная модель скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в структуре сжимаемых видеоданных // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615358. 15.02.2015.

7. ГОСТ 26320-84. Оборудование телевизионное студийное и внестудийное. Методы субъективной оценки качества цветных телевизионных изображений. М.: Изд-во стандартов. 1985. 8 с.

8. ГОСТ Р 52722-2007. Каналы передачи цифровых телевизионных сигналов. Основные параметры и методы измерений. М.: Стандартинформ. 2007. 18 с.

9. Абазина Е.С., Ерунов А.А., Федосеев В.Е., Цветков К.Ю. Выбор параметров стегосистемы при передаче скрытой информации в видеоданных // Сборник докладов XII научно-технической конференции по криптографии, посвященной 95-летию образования Специальной службы. Орел: Академия ФСО. 2016. С. 112–116.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ ПРОТОКОЛА OPENFLOW В ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЯХ

И.А. Альшаев[1*], **А.В. Красов**[1], **И.А.Ушаков**[1]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация
*Адрес для переписки: alshaev51@gmail.com

Информация о статье
УДК 004.056.52
Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Альшаев И.А., Красов А.В., Ушаков И.А. Исследование принципов работы протокола OpenFlow в программно-конфигурируемых сетях // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 2. С. 16–27.

Аннотация: *Несмотря на возможность использования программно-конфигурируемых сетей, протоколы, которые обеспечивают корректное и безопасное управление этими сетями, постоянно подвергаются доработке. Принципы работы этих протоколов демонстрируют порядок обработки трафика в сетевых устройствах, уровень управления которых централизован на выделенном контроллере, а также, процесс передачи трафика от одного устройства к другому. В данной статье представлено исследование принципов работы протокола управления программно-конфигурируемых сетей – OpenFlow. Детально рассмотрены механизмы передачи сетевого трафика в OpenFlow-коммутаторы и процесс обработки полученной информации в самом коммутаторе.*

Ключевые слова: *программно-конфигурируемые сети, OpenFlow-коммутатор, OpenFlow-порт, пайплайн, таблица потоков, классификатор, исполнительное действие.*

RESEARCH OF THE WORKING PRINCIPLES OF THE OPENFLOW PROTOCOL IN THE SOFTWARE-DEFINED NETWORKS

I. Alshaev[1], **A. Krasov**[1], **I. Ushakov**[1]

[1]The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunication, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info
Article in Russian

For citation: Alshaev I., Krasov A., Ushakov I. Research of the Working Principles of the Openflow Protocol in the Software-Defined Networks // Proceedings of Educational Institutes of Communication. 2017. Vol. 3. Iss. 2. PP. 16–27.

Abstract: *Despite on the fact that the SDN is actually in using, the protocols are always have experiencing some modernizations and completions. The work principles of this protocols are clearly*

show how the SDN working and the order of traffic handling in the network devices. This paper describes the researches of working SDN management protocol – OpenFlow. The article has a detail investigation of the network traffic transferring mechanisms in the OpenFlow – switches and processing of the received information in the OpenFlow – switch by itself.

Keywords: *software-defined networking, OpenFlow-switch, OpenFlow-port, pipeline, flow table, classifier, an action.*

Введение

На сегодняшний день самым распространённым решением для реализации управления сетевых устройств в программно-конфигурируемых сетей является протокол OpenFlow. По определению, OpenFlow – это протокол взаимодействия между сетевыми устройствами, такими как коммутаторы и маршрутизаторы, и централизованным контроллером, который представляет собой сетевую операционную систему [1], установленную на выделенном физическом сервере, в программно-конфигурируемой сети. Такое управление может заменить или дополнить работающую на сетевом устройстве функцию, осуществляющую построение маршрутов, создание таблицы коммутации и т. д. OpenFlow-контроллер используется для управления таблицами потоков коммутаторов, на основании которых принимается решение о передаче принятого пакета на конкретный порт коммутатора. Таким образом, в сети формируются прямые сетевые соединения с минимальными задержками передачи данных и необходимыми параметрами. На рис. 1 представлена схема взаимодействия между контроллером и сетевыми устройствами с помощью различных протоколов управления уровнем передачи данных, к которому относятся эти устройства.

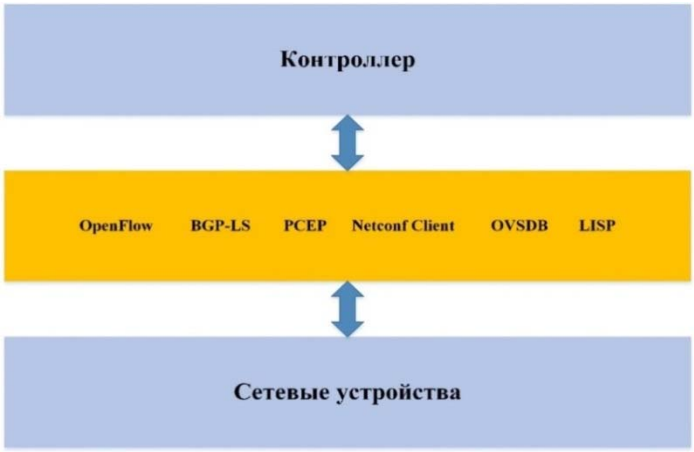


Рисунок 1. Взаимодействие между контроллером и коммутатором

Основные проблемы протокола

На сегодняшний день реализация протокола OpenFlow имеет некоторые открытые вопросы. Централизация управления сетью может стать настоящей проблемой, которая приводит к некоторым сомнениям в развертывании программно-конфигурируемой сети в принципе.

Основными угрозами при внедрении данного протокола являются:

1) В случае отсутствия связи между контроллером и устройствами сети коммутаторы переходят в автономное состояние, и уровень передачи данных становится просто-напросто неуправляемым или вовсе перестает работать.

2) Ошибка в программировании контроллера может привести к серьезным проблемам на всей сети, которую он обслуживает.

3) Контроллер становится основной точкой уязвимости и главной целью для атак со стороны злоумышленников.

4) Пока такого рода управление, вынесенное отдельным уровнем (control plane), делается как проприетарное программное обеспечение, то имеют место такие понятия как «ответственность», «техническая поддержка» и т. п. А если в качестве решения выступает открытое программное обеспечение, то конечный пользователь не сможет обратиться за поддержкой к какому-либо вендору.

Контроллеры и коммутаторы

При такой концепции всей системы особенно важным становится выбор контроллера OpenFlow. Именно его быстродействие станет решающим фактором при возникновении любых экстренных ситуаций. Именно его алгоритмы будут определять эффективность работы всей сети и его сбой с большой степенью вероятности повлияет на работу всей сети.

Ingress Port	Ingress MAC	Dest MAC	Ether Type	VLAN ID	VLAN Priority	IP SRC	IP DEST	IP Protocol	IP TOS	TCP/UDP SRC	TCP/UDP DEST
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Рисунок 2. Базовые поля в OpenFlow-пакете

Основная идея предполагает, что если мы отделяем уровень управления от уровня передачи трафика в коммутаторах, то они, как минимум, должны стать проще. Но тем не менее, новый протокол, а точнее огромное количество учитываемых по умолчанию полей в таблицах маршрутизации, выдвигает повышенные требования к объемам памяти на коммутаторах. На рис. 2 показаны поля стандартного OpenFlow-пакета.

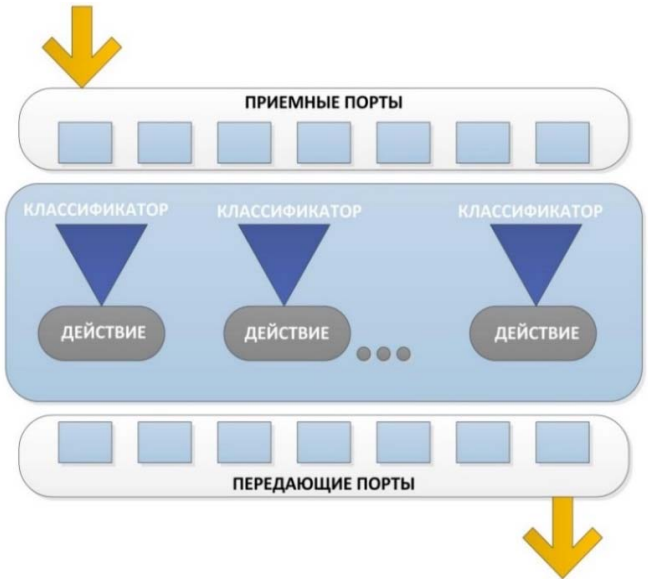


Рисунок 3. Схема прохождения OpenFlow-пакета в коммутаторе

Уровень передачи данных коммутатора состоит из следующих компонентов, который программируются OpenFlow-контроллером [1]: OpenFlow-порты (Ports), потоки информации (Flows), таблицы потоков (Flow-Tables), классификаторы (Matches), исполнительные действия (Actions). Приходящие пакеты на OpenFlow-порт распределяются по потокам в таблицах потоков с помощью классификаторов. Каждый поток состоит из набора действий (Actions), приме-

няющихся к каждому пакету, который должен соответствовать определённому правилу. На рис. 3 представлена схема прохождения пакета в OpenFlow-коммутаторе.

OpenFlow-порты

OpenFlow-порты выполняют те же функции, что и порты стандартного коммутатора. С точки зрения входящих и исходящих потоков трафика, нет никакой разницы с обычным L2-коммутатором традиционной IP-сети [2]. Входящий порт одного потока может быть исходящим для другого. Процесс коммутации пакетов в OpenFlowвыглядит следующим образом. Пакеты, обрабатываемые протоколом OpenFlow, принимаются на входящий порт, обрабатываются в пайплайне коммутатора и направляются далее в исходящий порт. По определению, пайплайном считается программный конвейер, в котором происходит последовательный процесс обработки данных. Например, значение входящего порта является одним из свойств пакета, проходящего через пайплайн коммутатора, и показывает на каком OpenFlow-порту этот пакет был принят в обработку [3]. Пайплайн в протоколе OpenFlow является самой важной частью, так как именно в нем принимается решение о том, отправлять пакеты на исходящий порт или нет, при этом устанавливая параметры действий (actions). А параметры этих действий в свою очередь будут определять, как именно пакет будет возвращён обратно в сеть.

Исследуемый протокол определяет набор стандартных портов: физические, логические и локальные зарезервированные, если поддерживаются OpenFlow-коммутатором. Физическими портами (physical) являются непосредственно порты самого коммутатора. Логические (logical), это порты напрямую непривязанные к физическим интерфейсам оборудования, как и в традиционных сетях, например, VLAN, Tunnel и Null интерфейсы [4, 5]. OpenFlow-коммутатор может создавать определённое число OpenFlow-портов, доступных для использования в локальных процессах коммутатора, такие порты называются зарезервированными (reserved). Зарезервированные порты используются для внутренней обработки трафика и для гибридных типов внедрения, например, OpenFlow-порты в связке с портами традиционной сети. Зарезервированные порты могут быть обязательными или опциональными. Обязательные порты включают порты типа ALL, CONTROLLER, TABLE, IN_PORT, ANY, UNSET. В то время как опциональные порты – LOCAL, NORMAL и FLOOD.

Коммутаторы, которые разработаны только для работы с OpenFlow не поддерживают порты типа NORMALи FLOOD, в то время как гибридные коммутаторы поддерживают. Передача трафика в порты типа FLOOD зависит от того, как сконфигурирован и для чего предназначается коммутатор. Здесь можно упомянуть об использовании группы ALL, которая позволяет контроллеру более гибко реализовывать потоковую рассылку. А если, например, понадобится создать туннель между двумя конечными точками, это будет невозможно сделать с помощью протокола OpenFlow. Подобные задачи можно

выполнить с помощью других протоколов, например, OF-CONFIG. Порты могут быть добавлены или удалены из конфигурации коммутатора с помощью OF-CONFIG [5], но не с помощью OpenFlow.

OpenFlow таблицы

При получении пакета из него извлекаются метаданные (например, ingress port) и другие поля пакета. Затем эти поля сравниваются с записями в таблице потоков. Каждая запись в таблице имеет соответствующее поле «protocol», по которому идет сравнение. Результат с наивысшим приоритетом считается лучшим, и обработка пакета с таким приоритетом начинается первой. Каждая запись в таблице потоков должна иметь различный приоритет, а запись с наивысшим приоритетом определяет то, как дальше будет обработан пакет. На рис. 4 наглядно представлена стандартная таблица потоков, через которую проходит пакет, а на рис. 5 показан процесс обработки пакета в пайплайне, который состоит из нескольких таких таблиц.

Рисунок 4. Стандартная таблица потоков

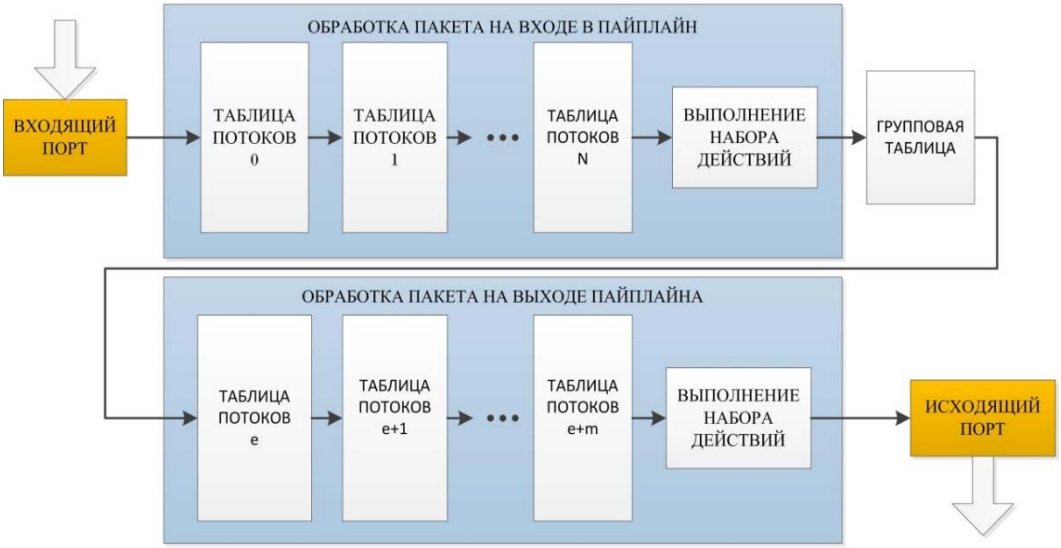


Рисунок 5. Процесс обработки пакетов в пайплайне OpenFlow-коммутатора

Как только выбрано правило (Match), к пакету применяется определенное действие (Action). Возможными действиями могут быть: «отправить в порт X», «отбросить» или «отправить на контроллер». Пример такого процесса показан на рис. 6. По умолчанию протокол OpenFlow со времён версии 1.0 отправляет на контроллер все пакеты, не соответствующие ни одному правилу. В более поздних версиях протокола этот механизм был изменен, т. к. может подвергнуть DoS-атакам на контроллер со стороны злоумышленников [6].

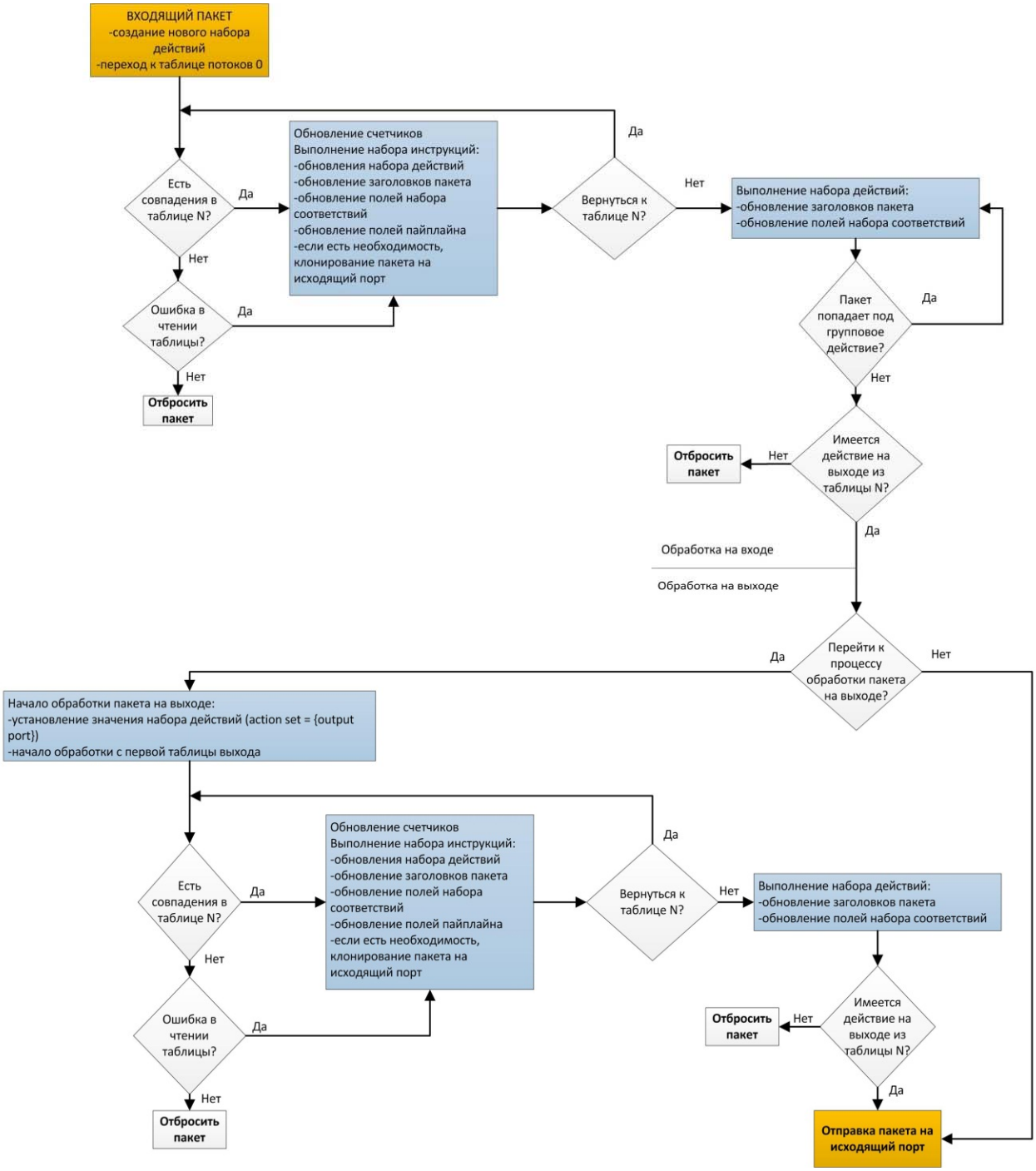


Рисунок 6. Детальная блок-схема прохождения пакетов в OpenFlow-коммутаторе

Первоначальная спецификация протокола OpenFlow 1.0 предполагала лишь возможности «перенаправить на другой порт» или «отправить на контроллер», но позже пришли к выводу, что в определенных случаях требуется модифицировать поля в пакете, например, уменьшить TTL или добавить тег VLAN. Версия 1.0 была признана неполной, т. к. необходима возможность выполнения более одного действия с конкретным пакетом.

Ограничение на количество таблиц в последующих версиях протокола было изменено. Но в то же время разрушило идею о том, что OpenFlow может использоваться на недорогих коммутаторах. Наличие нескольких таблиц накладывает дополнительные требования к ресурсам коммутаторов.

Исследование и примеры создания OpenFlow-записей в таблицах

Рассмотрим методики создания топологий сетей, которые будут содержать в себе коммутатор, с поддержкой протокола OpenFlow, OpenFlow-контроллер и несколько хостов для реализации простейшей локальной сети, а также исследуем воздействие OpenFlow-записей на трафик в коммутаторе. Виртуальный стенд развернут в эмуляторе сетей mininet, который позволяет работать с виртуальной сетью таким образом, чтобы желаемая топология могла содержать различные параметры хостов и коммутаторов. Для запуска эмулятора mininet использовалась операционная система Ubuntu 16.10. Для управления OpenFlow-коммутатором использовались команды – ovs-ofctl, которые позволяют создать политики обработки трафика и управлять его передачей в сети.

На рис. 7 показан скриншот запущенного эмулятора mininet с параметром –mac: sudo mn --topo=single,3 --controller=none –mac, что позволяет создать топологию с 1 коммутатором и 3 хостами.

```
pigga@ubuntu:~$ sudo mn --topo=single,3 --controller=none --mac
*** Creating network
*** Adding controller
*** Adding hosts:
h1 h2 h3
*** Adding switches:
s1
*** Adding links:
(h1, s1) (h2, s1) (h3, s1)
*** Configuring hosts
h1 h2 h3
*** Starting controller

*** Starting 1 switches
s1 ...
*** Starting CLI:
mininet> dump
<Host h1: h1-eth0:10.0.0.1 pid=5091>
<Host h2: h2-eth0:10.0.0.2 pid=5093>
<Host h3: h3-eth0:10.0.0.3 pid=5095>
<OVSSwitch s1: lo:127.0.0.1,s1-eth1:None,s1-eth2:None,s1-eth3:None pid=5100>
mininet> net
h1 h1-eth0:s1-eth1
h2 h2-eth0:s1-eth2
h3 h3-eth0:s1-eth3
s1 lo:  s1-eth1:h1-eth0 s1-eth2:h2-eth0 s1-eth3:h3-eth0
```

Рисунок 7. Создание простейшей топологии сети с OpenFlow-коммутатором

Параметр --controller=none исключает OpenFlow-контроллер из топологии в данном примере. Отсюда следует, что если мы изменим значения параметра --topo на 2 и 4, то топология будет состоять из двух OpenFlow-коммутаторов и каждый из коммутаторов будет иметь по 4 хоста. Команда dump позволяет вывести информацию о всех узлах сети и хостах с параметрами интерфейсов. Команда net демонстрирует как соединены хосты и узлы.

Созданная сеть будет выглядеть следующим образом (рис. 8). Параметры виртуальных сетевых адаптеров получаем с помощью широкоизвестной команды ifconfig. В интерпретаторе mininet это будет выглядеть следующим образом: h1 (h2 & h3) ifconfig. Open vSwitch имеет свойство обозначать свои порты для того, чтобы их использование в дальнейшем было упрощено. Каждый хост будет закреплен под определенным номером OpenFlow-порта. Для удобства, номер хоста соответствует номеру порта на OpenFlow-коммутаторе.

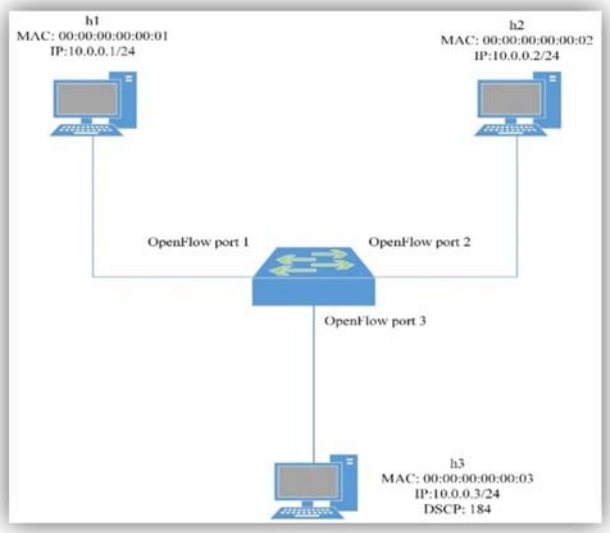


Рисунок 8. Топология сети
и параметры конфигурации

Рассмотрим пример (рис. 9), где sh ovs-ofctl show s1 позволяет запускать команду из терминала операционной системы.

```
mininet> sh ovs-ofctl show s1
OFPT_FEATURES_REPLY (xid=0x2): dpid:0000000000000001
n_tables:254, n_buffers:256
capabilities: FLOW_STATS TABLE_STATS PORT_STATS QUEUE_STATS ARP_MATCH_IP
actions: output enqueue set_vlan_vid set_vlan_pcp strip_vlan mod_dl_src mod_dl_dst mod_nw_s
rc mod_nw_dst mod_nw_tos mod_tp_src mod_tp_dst
 1(s1-eth1): addr:6e:a6:70:f0:32:31
     config:     0
     state:      0
     current:    10GB-FD COPPER
     speed: 10000 Mbps now, 0 Mbps max
 2(s1-eth2): addr:e2:3d:89:b0:99:92
     config:     0
     state:      0
     current:    10GB-FD COPPER
     speed: 10000 Mbps now, 0 Mbps max
 3(s1-eth3): addr:22:85:b1:3c:2f:3c
     config:     0
     state:      0
     current:    10GB-FD COPPER
     speed: 10000 Mbps now, 0 Mbps max
 LOCAL(s1): addr:7e:fd:5b:4e:b7:4d
     config:     PORT_DOWN
     state:      LINK_DOWN
     speed: 0 Mbps now, 0 Mbps max
OFPT_GET_CONFIG_REPLY (xid=0x4): frags=normal miss_send_len=0
mininet>
```

Рисунок 9. Параметры OpenFlow-коммутатора. Привязка OpenFlow-портов
к стандартным портам коммутатора

```
mininet> pingall
*** Ping: testing ping reachability
h1 -> X ^C
Interrupt
stopping h1
mininet> sh ovs-ofctl add-flow s1 action=normal
mininet> pingall
*** Ping: testing ping reachability
h1 -> h2 h3
h2 -> h1 h3
h3 -> h1 h2
*** Results: 0% dropped (6/6 received)
mininet>
```

Рисунок 10. Добавление записи в OpenFlow-таблицу

Далее для проверки связи между хостами нужно добавить OpenFlow-запись (рис. 10).

Здесь можно увидеть, что, если не задать ни одного правила на OpenFlow-коммутаторе, тосвязи в локальной сети не будет. Для того, чтобы создать стандартную OpenFlow-запись, нужно воспользоваться командой: sh ovs-ofctl add-flow s1 action= normal.

Для того чтобы получить данные об OpenFlow-записи, используем следующую команду: sh ovs-ofctl dump-flows s1. И получим (см. рис. 11):

```
mininet> sh ovs-ofctl dump-flows s1
NXST_FLOW reply (xid=0x4):
 cookie=0x0, duration=355.983s, table=0, n_packets=24, n_bytes=1680, idle_age=347, actions=NOR
MAL
mininet>
```

Рисунок 11. OpenFlow-таблица

Чтобы удалить все записи для потоков, необходимо воспользоваться командой sh ovs-ofctl del-flows s1.

Создадим правило в OpenFlow-таблице, которое будет указывать коммутатору, на какой из портов отправлять трафик, который пришел с указанного порта. Такая запись называется Layer 1 matching (см. рис. 12).

```
mininet> sh ovs-ofctl add-flow s1 priority=500,in_port=1,actions=output:2
mininet> sh ovs-ofctl add-flow s1 priority=500,in_port=2,actions=output:1
mininet> h1 ping -c3 h2
PING 10.0.0.2 (10.0.0.2) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 10.0.0.2: icmp_seq=1 ttl=64 time=2.15 ms
64 bytes from 10.0.0.2: icmp_seq=2 ttl=64 time=0.063 ms
64 bytes from 10.0.0.2: icmp_seq=3 ttl=64 time=0.033 ms

--- 10.0.0.2 ping statistics ---
3 packets transmitted, 3 received, 0% packet loss, time 2221ms
rtt min/avg/max/mdev = 0.033/0.750/2.154/0.992 ms
mininet> h3 ping -c3 h2
PING 10.0.0.2 (10.0.0.2) 56(84) bytes of data.

--- 10.0.0.2 ping statistics ---
3 packets transmitted, 0 received, 100% packet loss, time 2035ms

mininet> sh ovs-ofctl dump-flows s1
NXST_FLOW reply (xid=0x4):
 cookie=0x0, duration=76.800s, table=0, n_packets=5, n_bytes=378, idle_age=58, priority=500,in
_port=1 actions=output:2
 cookie=0x0, duration=66.386s, table=0, n_packets=5, n_bytes=378, idle_age=58, priority=500,in
_port=2 actions=output:1
mininet>
```

Рисунок 12. OpenFlow-таблица № 1. Layer 1 matching

Теперь OpenFlow-коммутатор может применить определённые ему правила при передаче трафика с порта 1 на порт 2 и наоборот. Как видно на рис. 12, связи с хостом h3 нет как раз из-за отсутствия правил для порта, к которому он подключен (порт 3). После повторного применения команды sh ovs-ofctl dump-flows s1 видим, как изменилась таблица OpenFlow-записей.

Управлять правилами в таблицах OpenFlow-записей позволяет поле приоритета (priority). Посмотрим, как влияет добавление правила с большим значением priority на передачу трафика, а затем удалим его, используя параметр --strict: (см. рис. 13).

```
mininet> sh ovs-ofctl add-flow s1 priority=32768,actions=drop
mininet> h1 ping -c3 h2
PING 10.0.0.2 (10.0.0.2) 56(84) bytes of data.

--- 10.0.0.2 ping statistics ---
3 packets transmitted, 0 received, 100% packet loss, time 2030ms

mininet> sh ovs-ofctl dump-flows s1
NXST_FLOW reply (xid=0x4):
 cookie=0x0, duration=20.085s, table=0, n_packets=6, n_bytes=420, idle_age=7, actions=drop
 cookie=0x0, duration=1100.334s, table=0, n_packets=5, n_bytes=378, idle_age=1082, priority=500,in_port=1 actions=output
:2
 cookie=0x0, duration=1089.920s, table=0, n_packets=5, n_bytes=378, idle_age=1082, priority=500,in_port=2 actions=output
:1
mininet> sh ovs-ofctl del-flows --strict
ovs-ofctl: 'del-flows' command requires at least 1 arguments
mininet> sh ovs-ofctl del-flows s1 --strict
mininet> sh ovs-ofctl dump-flows s1
NXST_FLOW reply (xid=0x4):
 cookie=0x0, duration=1151.669s, table=0, n_packets=5, n_bytes=378, idle_age=1133, priority=500,in_port=1 actions=output
:2
 cookie=0x0, duration=1141.255s, table=0, n_packets=5, n_bytes=378, idle_age=1133, priority=500,in_port=2 actions=output
:1
mininet>
```

Рисунок 13. Приоритет записей в OpenFlow-таблицах

Следующее правило будет сравнивать MAC-адрес источника трафика и MAC-адрес назначения, и отправлять трафик, согласно значению параметра output. Такая запись называется Layer 2 matching (см. рис. 14).

```
mininet> sh ovs-ofctl add-flow s1 dl_src=00:00:00:00:00:01,dl_dst=00:00:00:00:00:02,actions=ou
tput:2
mininet> sh ovs-ofctl add-flow s1 dl_src=00:00:00:00:00:02,dl_dst=00:00:00:00:00:01,actions=ou
tput:1
mininet> sh ovs-ofctl add-flow s1 dl_type=0x806,nw_proto=1,actions=flood
mininet> pingall
*** Ping: testing ping reachability
h1 -> h2 X
h2 -> h1 X
h3 -> X X
*** Results: 66% dropped (2/6 received)
mininet>
```

Рисунок 14. OpenFlow-таблица № 2. Layer 2 matching

Для корректной работы L2 необходимо прописать правило, которое будет контролировать ARP-запросы. Первые 2 строчки таблицы описывают передачу трафика согласно физическим адресам, но для того, чтобы OpenFlow-

коммутатор получил сведения о том, за каким IP закреплён нужный MAC-адрес, нужно описать правило, которое разрешает широковещательный трафик. В данном примере действие flood даёт возможность отправлять ARP-REQUEST на все порты, кроме того, с которого запрос был сгенерирован.

Третья таблица OpenFlow-записей описывает политику передачи трафика на основе IP адресации и ToS – Layer 3 matching. Запись: sh ovs-ofctl add-flow s1 priority=500,ip,nw_src=10.0.0.3,actions=mod_nw_tos:184,normal. В данной записи описывается ToS, который позволяет маркировать трафик специальной меткой DSCP (Differenciated Services Code Point), что в свою очередь определяет его приоритет. Если обратить внимание на саму OpenFlow-запись, то параметр priority отличается от DSCP тем, что задает порядок сравнения пакетов передаваемого трафика с записями в OpenFlow-таблице. Если повысить значение priority в записи для ToS, то пакет сначала пройдет сравнение по этой записи, а потом по всем остальным. На рисунке 15 показан пример создания OpenFlow-таблицы Layer 3 matching. Такая структура таблиц очень похожа на работу списков доступа в процессе маршрутизации трафика в традиционных сетях – ACL.

```
mininet> sh ovs-ctl add-flow s1 priority=500,ip,nw_src=10.0.0.0/24,nw_dst=10.0.0.0/24,actions=normal
/bin/sh: 1: ovs-ctl: not found
mininet> sh ovs-ofctl add-flow s1 priority=500,ip,nw_src=10.0.0.0/24,nw_dst=10.0.0.0/24,actions=norm
al
mininet> sh ovs-ofctl add-flow s1 priority=500,ip,nw_src=10.0.0.3,actions=mod_nw_tos:184,normal
mininet> sh ovs-ofctl add-flow s1 arp,nw_dst=10.0.0.1,actions=output:1
mininet> sh ovs-ofctl add-flow s1 arp,nw_dst=10.0.0.2,actions=output:2
mininet> sh ovs-ofctl add-flow s1 arp,nw_dst=10.0.0.3,actions=output:3
mininet> pingall
*** Ping: testing ping reachability
h1 -> h2 h3
h2 -> h1 h3
h3 -> h1 h2
*** Results: 0% dropped (6/6 received)
mininet> sh ovs-ofctl dump-flows s1
NXST_FLOW reply (xid=0x4):
 cookie=0x0, duration=48.844s, table=0, n_packets=4, n_bytes=168, idle_age=13, arp,arp_tpa=10.0.0.1
actions=output:1
 cookie=0x0, duration=41.844s, table=0, n_packets=4, n_bytes=168, idle_age=13, arp,arp_tpa=10.0.0.2
actions=output:2
 cookie=0x0, duration=23.328s, table=0, n_packets=4, n_bytes=168, idle_age=13, arp,arp_tpa=10.0.0.3
actions=output:3
 cookie=0x0, duration=123.928s, table=0, n_packets=12, n_bytes=1176, idle_age=18, priority=500,ip,nw
_src=10.0.0.0/24,nw_dst=10.0.0.0/24 actions=NORMAL
 cookie=0x0, duration=87.500s, table=0, n_packets=0, n_bytes=0, idle_age=87, priority=500,ip,nw_src=
10.0.0.3 actions=mod_nw_tos:184,NORMAL
mininet>
```

Рисунок 15. OpenFlow-таблица № 3. Layer 3 matching

Заключение

Таким образом, проведенное исследование показало, что использование OpenFlow позволяет упростить множество задач, а реализация таблицы обработки потоков данных обеспечивает многоуровневую безопасность. В приведенном исследовании показано, как с помощью OpenFlow-контроллера управлять коммутатором с помощью внутреннего языка командной строки Mininet. Для более приближенной демонстрации работы SDN данный макет необходимо реализовать на оборудовании, которое будет поддерживать работу OpenFlow. На реальном макете можно будет доказать значимость проблем протокола

OpenFlow, которые проявляются в незащищённости передаваемых сообщений с информацией о политике передачи трафика. На сегодняшний день, наиболее известным и бюджетным вариантом является использование оборудования MikroTik. Реализация данного макета находится на стадии тестирования.

В дальнейшем планируется провести более детальное исследование работы программно-конфигурируемых сетей на базе протокола OpenFlow и выполнить работу по внедрению механизмов защиты от перехвата трафика, используя TLS-шифрование.

Список используемых источников

1. Open Networking Foundation. OpenFlow Switch Specification Version 1.5.1 (Protocol version 0x06) // Open Networking Foundation. 2015. URL: https://www.opennetworking.org /images/stories/downloads/sdn-resources/onf-specifications/openflow/openflow-switch-v1.5.1.pdf.

2. Красов А.В., Левин М.В., Цветков А.Ю. Управление сетями передачи данных с изменяющейся нагрузкой // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. 2015. № 1. С. 141–146.

3. Дубровин Н.Д., Ушаков И.А., Чечулин А.А. Применение технологии больших данных в системах управления информацией и событиями безопасности // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сборник научных статей V международной научно-технической и научно-методической конференции. СПбГУТ. 2016. С. 348–353.

4. Алейников А.А., Билятдинов К.З., Красов А.В., Левин М.В. Контроль, измерение и интеллектуальное управление трафиком: монография. СПб.: Центр «Астерион», 2016. 92 с.

5. Open Networking Foundation. OF–CONFIG 1.2 OpenFlow Management and Configuration Protocol // Open Networking Foundation. 2014. URL: https://www.opennetworking.org /images/stories/downloads/sdn-resources/onf-specifications/openflow-config/of-config-1.2.pdf.

6. Алейников А.А., Билятдинов К.З., Красов А.В., Кривчун Е.А., Крысанов А.В. Технические аспекты управления с использованием сети интернет. СПб.: Центр «Астерион», 2016. 305 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА СТЕГОАНАЛИЗА ЦИФРОВЫХ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ, ОСНОВАННОГО НА ФЕНОМЕНЕ ЛИНЕЙНОЙ КОЛЛИЗИИ

К.А. Ахрамеева[1*], **Л.Г. Попов**[1]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация
*Адрес для переписки: oklaba@mail.ru

Информация о статье
УДК 004.021
Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Ахрамеева К.А., Попов Л.Г. Исследование метода стегоанализа цифровых видеопоследовательностей, основанного на феномене линейной коллизии // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 2. С. 28–36.

Аннотация: *В статье представлено подробное рассмотрение метода стегоанализа цифровых видеопоследовательностей, основанного на феномене линейной коллизии. Описывается условие статистической невидимости, служащее основой для разработки устойчивого к атаке линейной коллизии цифрового стеговложения. Продемонстрированы результаты экспериментальной проверки (в виде таблиц) эффективности работы, написанной на языке C++ программы, реализующей атаку (2-го типа) по удалению стеговложения. В исследовании используются различные форматы и типы видеопоследовательностей, отличающиеся количеством кадров в секунду, скоростью смены сцен, степенью взаимной корреляции между кадрами, битрейтом и т. д.*

Ключевые слова: *стегоанализ, цифровая видеопоследовательность, цифровое стеговложение, феномен линейной коллизии, статистическая невидимость, временные корреляции, коллизии 1-го и 2-го типов, разложение на кадры, линейное сложение, контейнер, битрейт, уровни избыточности и шума, сжатие, фильтр.*

RESEARCH OF DIGITAL VIDEO STEGANALYSIS METHOD FOUNDED ON THE PHENOMENON OF LINEAR COLLUSION

K. Ahrameeva[1], **L. Popov**[1]

[1]The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunication, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info
Article in Russian

For citation: Ahrameeva K., Popov L. Research of Digital Video Steganalysis Method Founded on the Phenomenon of Linear Collusion // Proceedings of Educational Institutions of Communication. 2017. Vol 3. Iss. 2. PP. 28–36.

Abstract: *A detailed consideration of the method of digital video steganalysis founded on the phenomenon of linear collusion is represented in this paper. A statistical invisibility condition, which*

is a foundation of developing collusion-resistant embedding of the secret binary message in a digital video, is described. Tables demonstrate the results of experimental verification of the efficiency of the program written by C++. This program implements Type II collusion to delete a covert data from a digital video. Different formats and types of video, which differs from each other by number of frames per second, the rate of motion, correlation coefficients between frames, bitrate and so on, are used in this research.

Keywords: *steganalysis, digital video sequence, digital covert data, the phenomenon of linear collusion, statistical invisibility, temporal correlations, Type I and Type II collusions, decomposition into frames, linear addition, container, bitrate, redundancy and noise levels, compression, filter.*

Известно, что в исходном (необработанном) виде видеопотоки – это последовательности кадров изображения, поэтому сложность и гибкость пространства для вложения дополнительной информации в видео значительно больше, чем для изображений из-за присутствия пространства времени. Этот дополнительный объём позволяет нагрузке быть более избыточной и надёжно вложенной, что возможно за счёт использования более сложных временных маскирующих характеристик человеческого восприятия. Кроме того, атакующий имеет свободу шире использовать корреляции в объёме сигнала, чтобы разработать более эффективную оценку цифрового стеговложения или атаку удаления. Один важный класс таких атак известен как линейная коллизия множества кадров [1, 2]. В общем случае коллизия может быть линейной или нелинейной, используя в своих интересах сходства и различия среди кадров, чтобы уменьшить энергию стеговложения по отношению к тому, что является покрывающей информацией.

Два типа линейной коллизии

Коллизия появляется, когда коллекция видеокадров комбинируется с конечной целью получить свободную от вложения копию оригинала. Фреймы могут формировать продолжительную во времени подпоследовательность или происходить из сильно различающихся частей видео. Ключевая идея – это использование временной избыточности исходного видео либо стеговложения, чтобы оценить избыточный компонент. В случае линейной коллизии над множеством кадров отдельные видеокадры с вложением масштабируются и суммируются, чтобы сформировать результирующий фрейм, который представляет оценку оригинального кадра или стеговложения. Если масштабирование для всех кадров одинаково, тогда общая атака состоит из усреднения набора видеокадров с вложением. Интуитивно, эта операция имеет эффект усиления компонента стеговложения или исходного видео, который повторяется от кадра к кадру и ослабления того, который отличается.

Линейная коллизия первого типа возникает, когда огромное количество визуально непохожих видеокадров помечены линейной комбинацией цифровых стеганографических вложений с фиксированным шаблоном. Это обычно встречается во многих существующих вложениях для видео [3–5].

Коллизия второго типа возникает, когда огромное количество визуально похожих кадров помечены линейной комбинацией цифровых стеговложений с независимыми шаблонами. Примером такой атаки может служить усреднение кадров. Этот случай соответствует, например, вложениям, которые используют разные двумерные псевдошумовые последовательности, чтобы пометить каждый фрейм [6]. Рассмотрим определение линейной коллизии [7].

Определение 1. Даны две случайные величины A и B с определёнными математическим ожиданием и дисперсией; считается, что A – это с ϵ – оптимальной среднеквадратической ошибкой (MSE – Mean Square Error) оценка B, если и только если:

$$E\left[\left(\hat{A}-B\right)^2\right] < \epsilon, \tag{1}$$

где E – оператор математического ожидания; $\hat{A} = \sqrt{\mathrm{var}(B)/\mathrm{var}(A)}(A - EA) + EB$ и $\mathrm{var}(\cdot)$ – дисперсия аргумента (случайной величины).

В определении 1 случайная переменная A нормализуется, чтобы отразить те же самые математическое ожидание и дисперсию как у B. Также требуется:

$$0 < \mathrm{var}(A), \mathrm{var}(B), EA, |EB| < \infty. \tag{2}$$

Следующее определение из [7] определяет класс рассматриваемых атак.

Определение 2. Допустим, дан ряд видеокадров с вложением $X_k = U_k + \alpha_k W_k,\ k = 1, \ldots, n$, где U_k – исходный k-ый фрейм, α_k – глубина вложения для k-го фрейма, W_k – k-ый компонент стеговложения. Тогда линейная коллизия – это процесс формирования линейной комбинации фреймов:

$$\bar{X} = \sum_{k=1}^{n} \beta_k X_k = \sum_{k=1}^{n} \beta_k U_k + \sum_{k=1}^{n} \beta_k \alpha_k W_k, \tag{3}$$

где β_k – некоторый коэффициент.

При этом $\bar{X}$ представляет собой оценку с ϵ-оптимальной среднеквадратической ошибкой:

1) компонента стеговложения $\bar{W} = \sum_{k=1}^{n} \beta_k \alpha_k W_k$;

2) исходного компонента $\bar{U} = \sum_{k=1}^{n} \beta_k U_k$.

В случае 1) возникает атака коллизии 1-го типа; в случае 2) – атака коллизии 2-го типа.

Определение 2 выражает в краткой форме атаку усреднения кадров, принимая $\beta_k = 1/n$.

Суждение 1. Предполагая, что масштабированные элементы стеганографического вложения $\alpha_k W_k$ не зависят от оригинальных кадров U_k, необходимое условие для каждой из двух форм линейной коллизии, описанных выше, даётся в следующем виде [7]:

$$\rho(\bar{X}, \bar{U}) < \sqrt{\tilde{\epsilon}(2-\tilde{\epsilon})}\ (\text{Тип 1}); \tag{4}$$

$$\rho(\bar{X}, \bar{U}) > 1 - \tilde{\epsilon} \text{ (Тип 2)}, \quad (5)$$

где $\bar{X} = \sum_{k=1}^{n} \beta_k X_k$, $\bar{U} = \sum_{k=1}^{n} \beta_k U_k$, $\tilde{\epsilon} = \epsilon / \big(2\mathrm{var}(B)\big)$, то есть:

$\rho(\bar{X}, \bar{U}) > \sqrt{\tilde{\epsilon}(2 - \tilde{\epsilon})}$ – линейная коллизия 1-го типа невозможна;

$\rho(\bar{X}, \bar{U}) < 1 - \tilde{\epsilon}$ – линейная коллизия 2-го типа невозможна.

Как в случае коллизии 1-го типа, суждение 1 даёт только необходимое условие для коллизии 2-го типа. Условие недостаточно, поскольку надлежащая разработка стеговложения может (как показано далее) предоставить защиту против этих атак.

В нашем случае при создании программного фильтра оценка последовательности кадров осуществляется при помощи частного случая линейной коллизии, который называется простая линейная коллизия, так как коллизионные веса (collusion weights) применяются для всех фреймов одинаковые. Имеется скользящее окно, чтобы обозначить временное соседство, используемое для усреднения кадров. Предполагается, что это окно содержит визуально похожие фреймы. Берётся окно размером $2L + 1$ фреймов сосредоточенное на фрейме k, чтобы усреднить видеопоследовательность. Оценка k-го фрейма определяется следующим выражением:

$$\widehat{U}_k = \mathfrak{C}_P(Y_k) = \begin{cases} \dfrac{1}{2L+1} \displaystyle\sum_{i=1}^{2L+1} Y_i, & 1 \le k \le L; \\ \dfrac{1}{2L+1} \displaystyle\sum_{i=k-L}^{k+L} Y_i, & L < k \le N - L; \\ \dfrac{1}{2L+1} \displaystyle\sum_{i=N-2L}^{N} Y_i, & N - L < k \le N, \end{cases} \quad (6)$$

где $\mathfrak{C}_P$ – оператор коллизии с параметром P, являющимся длиной окна коллизии; Y_i – кадры, в которых предположительно могут быть вложения; $\widehat{U}_k$ – оценка исходного кадра U_k; N – общее количество кадров в видеопоследовательности; L – некоторое число.

Стоит отметить, что общие формы оператора коллизии $\mathfrak{C}$ представляют из себя попиксельное получение максимума, минимума, математического ожидания или среднего значения над рядом кадров видеоизображения [7–9].

Эффективность оценки $\widehat{U}_k$ как аппроксимация U_k зависит от величины L в связи со скоростью движения в видеопоследовательности. Поэтому, если коллизия применяется к данной видеопоследовательности Y_k, которая может содержать, а может и не содержать стеговложение, то полагается, что в обоих случаях для медленно меняющегося контента и правильно выбранного значения L, результат будет аппроксимацией (приближением) U_k. Таким образом, если секретное сообщение погружено в видео, то вычитание $\widehat{U}_k$ из Y_k даёт $Y_k - \widehat{U}_k \approx Y_k - U_k = \alpha W_k$ – оценку масштабированного Гауссовского стеговложения с нулевым математическим ожиданием. Если в Y_k не присутствует дополни-

тельная информация, то результат будет независим от любой характеристики такой, например, как гауссовость, которая предполагается по отношению к стеговложению. Это различие используется классификатором образцов, подробное рассмотрение которого выходит за рамки данной работы.

Из всего выше сказанного видно, как статистическая избыточность в покрывающем видео может помочь стегоаналитику в обнаружении скрытых данных. Увеличенная межкадровая корреляция улучшает производительность коллизии.

Статистическая невидимость

Дана последовательность оригинальных видеокадров U_k , $k = 1, \dots, n$ и последовательность видеокадров с вложением $X_k = U_k + \alpha_k W_k$, предполагается, что компонент стеговложения W_k, погружённый в видео статистически невидим, если и только если коэффициент корреляции между любыми двумя оригинальными кадрами a и b равен коэффициенту корреляции между двумя соответствующими кадрами с вложением, то есть $\rho(U_a, U_b) = \rho(X_a, X_b) \forall a, b \in \{1, \dots, n\}$.

Это свойство называется статистической невидимостью, поскольку атакующий, анализирующий видеопоследовательность на покадровой основе, не замечает какой-либо статистической разницы между оригинальной последовательностью и видео с вложением.

В [7] предлагается теорема о взаимосвязи между статистической невидимостью и многокадровой коллизией. Однако перед знакомством с ней необходимо сделать следующие предположения:

1) Видеокадры имеют общее конечное матожидание и дисперсию (среднюю энергию), то есть $E(U_k) = \mu_U$ и $\mathrm{var}(U_k) = \sigma_U^2$.

2) Элементы стеговложения W_k имеют нулевое матожидание, то есть $E(W_k) = 0$ и имеют общую ненулевую конечную дисперсию $\sigma_W^2 > 0$. Следовательно, $E(X_k) = E(U_k)$.

3) Глубины вложения α_k имеют конечный второй момент $E(\alpha^2)$.

4) Элементы стеговложения W_k, глубины вложения α_k и исходные кадры U_k независимы друг от друга.

Теорема 1. По предположениям (1)–(4) следующие утверждения эквивалентны:

$$\rho(X_a, X_b) = \rho(U_a, U_b) \forall a, b \in \{1,2, \dots, n\}; \quad (7)$$

$$\rho(U_a, U_b) = (E\alpha_a\alpha_b / E\alpha^2)\rho(W_a, W_b) \forall a, b \in \{1,2, \dots, n\}; \quad (8)$$

$$\rho(\bar{X}, \bar{U}) = \rho(X_a, U_a) \forall a \in \{1,2, \dots, n\}, \quad (9)$$

где ρ – коэффициент корреляции.

Свойство (7) описывает условие статистической невидимости; свойство (8) определяет зависимый от оригинального видео критерий создания сте-

говложения; свойство (9) гарантирует, что стеговложение, удовлетворяющее данным критериям, обладает статистической устойчивостью к атакам линейной коллизии 1-го и 2-го типов.

Таким образом, при разработке устойчивого к атаке линейной коллизии цифрового стеганографического вложения необходимо учитывать рассмотренные выше условия.

Фильтр *Collusion*

Для практического исследования эффективности линейной коллизии по удалению цифрового стеговложения (атака 2-го типа) погружённого в видеопоследовательность, был создан программный фильтр под названием Collusion (см. рис. 1).

Рисунок 1. Общая схема реализуемого алгоритма фильтрации видеопоследовательностей

В качестве объектов обработки используются видеофайлы с расширением AVI (Audio Video Interleave). Для погружения используется текстовый файл с расширением .txt. С помощью свободно распространяемой утилиты MSU StegoVideo [10] создаётся стегосистема со «слепым» декодером, так как на приёмной стороне при извлечении скрытой информации покрывающее сообщение неизвестно. Алгоритм вложения также не известен («черный ящик»).

В результате экспериментов по вложению текста с последующим сжатием кодеком H.264 выяснилось, что информация теряется полностью вне зависимости от используемого битрейта и уровня избыточности. Поэтому было решено использовать кодек Xvid с различными профилями, а также кодек Lagarith Lossless, осуществляющий сжатие без потерь.

При моделированиях использовалась длина окна коллизии $Z = 2L + 1 = 5$, которая является оптимальной, поскольку полагается, что глубина вложения секретного сообщения небольшая. В результате осуществляемой обработки видеопоследовательностей извлечение смысловой информации с помощью программы MSU становится затруднительным или полностью невозможным, что демонстрирует рис. 2.

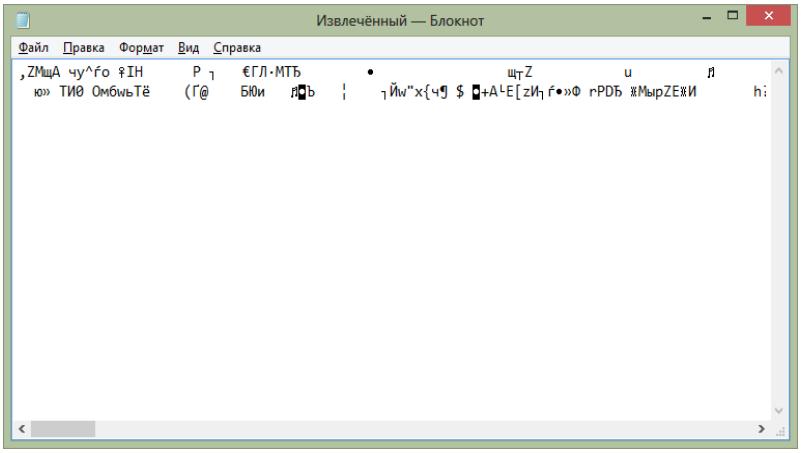


Рисунок 2. Результат извлечения

Ниже в таблицах 1–5 приведены результаты моделирования.

Таблица 1. Сравнение кодеков

№ п/п (название видеоролика)	**Название видеокодека**					
	Xvid 1.3.4				Lagarith Lossless	
	XvidHome		DivX 720HD			
	Ошибки до атаки, %	Ошибки после атаки, %	Ошибки до атаки, %	Ошибки после атаки, %	Ошибки до атаки, %	Ошибки после атаки, %
1. (busta–kamennye cvety.avi)	17,64	100	11,76	100	0	100
2. (chas pik.avi)	5,88	100	11,76	100	0	100
3. (simoni muha.avi)	94,08	пустой файл	100	пустой файл	0	100
4. (kolyaska.avi)	52,92	100	82,32	100	0	100
5. (ozvuchka.avi)	17,64	100	23,52	100	0	100

Таблица 2. Битрейт (низкая скорость смены сцен)

Битрейт, kbit/s	**Название видеокодека**					
	Xvid 1.3.4					
	XvidHome		XvidHD 720		DivX 720HD	
	Ошибки до атаки, %	Ошибки после атаки, %	Ошибки до атаки, %	Ошибки после атаки, %	Ошибки до атаки, %	Ошибки после атаки, %
250	23,52	100	23,52	100	23,52	100
500	23,52	100	23,52	100	23,52	100
1000	23,52	100	23,52	100	23,52	100
1500	23,52	100	23,52	100	23,52	100
2000	23,52	100	23,52	100	23,52	100
2500	23.52	100	23,52	100	23,52	100
3000	23,52	100	23,52	100	23,52	100

Таблица 3. Битрейт (высокая скорость смены сцен, пониженный коэффициент корреляции *R* между кадрами)

Битрейт, kbit/s	**Название видеокодека**	
	Xvid 1.3.4	
	XvidHome	
	Ошибки до атаки, %	Ошибки после атаки, %
250	0	100
500	17,64	100
1000	11,76	100
1500	0	100
2000	0	100
2500	0	100
3000	0	100

Таблица 4. Количество кадров в секунду (fps – frames per second)

Frames per second (fps)	**Название видеокодека**	
	Xvid 1.3.4	
	XvidHome	
	Ошибки до атаки, %	Ошибки после атаки, %
24	23,52	100
25	23,52	100
30	0	100
60	0	100
120	0	100
200	0	100

Таблица 5. Возможный объём вложения в зависимости от битрейта

Битрейт, kbit/s	**Название видеокодека**	
	Xvid 1.3.4	
	XvidHome	
	Количествово символов без пробелов, зн.	Количествово символов с пробелами, зн.
250	782	1694
500	807	1694
1000	974	1695
1500	974	1696
2000	1070	1696
2500	1229	1697
3000	1303	1702
5000	1359	1705
10000	1359	1705

На рис. 3 представлено сравнение качества изображения до (слева) и после (справа) атаки. Наблюдаются незначительные искажения исходного изображения, приемлемые с точки зрения стороннего наблюдателя.

Рисунок 3. Сравнение качества изображения: слева – до атаки, справа – после атаки

Выводы

1) Рассмотренный метод простой линейной коллизии подходит для практической реализации в приложениях реального времени и показывает хорошие результаты по удалению (для типовых видеофайлов).

2) Чем больше избыточности в видео, тем больший объём информации можно вложить при меньших потерях.

3) Предпочтительнее использовать lossless кодеки.

4) С увеличением битрейта при извлечении наблюдается уменьшение количества нераспознанных символов (при быстрой скорости смены сцен).

5) Ниже 5000 kbit/s увеличивается количество ошибок.

6) Выше 5000 kbit/s ошибок нет, но отсутствует увеличение количества вложенных бит.

7) Для большего объёма вложения разумнее увеличивать количество кадров при сохранении приемлемого значения битрейта.

Список используемых источников

1. Budhia U., Kundur D., Zourntos T. Digital Video Steganalysis Exploiting Statistical Visibility in the Temporal Domain // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. Dec. 2006. Vol. 1. Iss. 4. PP. 502–516.

2. Небаева К.А., Попов Л.Г. Исследование методов стегоанализа цифровых видеопоследовательностей // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. V Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. научных статей. СПб.: СПбГУТ, 2016. С. 489–493.

3. Hartung F., Eisert P., Girod B. Digital Watermarking of MPEG-4 Facial Animation Parameters // Comput. Graph. Jul.–Aug. 1998. Vol. 22. Iss. 4. PP. 425–435.

4. Kalker T., Depovere G., Haitsma J., Maes M. A Video Watermarking System for Broadcast Monitoring // Proc. SPIE. Jan. 1999. Vol. 3657. PP. 103–112.

5. Cox I.J., Kilian J., Leighton F.T., Shamoon T. Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia // IEEE Trans. Image Process. Dec. 1997. Vol. 6. PP. 1673–1687.

6. Mobasseri B.G. Exploring CDMA for Watermarking of Digital Video // Proc. SPIE. Jan. 1999. Vol. 3657. PP. 96–102.

7. Su K., Kundur D., Hatzinakos D. Statistical Invisibility for Collusion-Resistant Digital Video Watermarking // IEEE Trans. Multimedia. Feb. 2005. Vol. 7. Iss. 1. PP. 43–51.

8. Trappe W., Wu M., Wang Z., Liu K. Anti-collusion Fingerprinting for Multimedia // IEEE Trans. Signal Process. Apr. 2003. Vol. 51. Iss. 4. PP. 1069–1087.

9. Wang Z., Wu M., Zhao H., Trappe W., Liu K. Collusion Resistance of Multimedia Fingerprinting Using Orthogonal Modulation // IEEE Trans. Image Process. Jun. 2005. Vol. 14. Iss. 6. PP. 804–821.

10. Всё о сжатии данных, изображений и видео / Проект, идеи: Ватолин Д., реализация: Петров О. MSU StegoVideo – уникальная утилита для встраивания информации в видео (фильтр для VirtualDub/отдельная программа) // URL: http://www.compression.ru/video/stego_video/filter_settings.html.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ КВАЗИ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ВНЕШНИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ОТКЛИКА МАЛОМОДОВОГО ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

А.В. Бурдин[1*], О.Г. Морозов[2], А.А. Василец[2*], А.М. Кафарова[1], А.Ю. Минаева[1], Н.Л. Севрук[1]

[1]Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, 443010, Российская Федерация
*Адрес для переписки: bourdine@yandex.ru
[2]Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, 420111, Российская Федерация
*Адрес для переписки: a.vasilets@mail.ru

Информация о статье
УДК 621.373.826
Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Бурдин А.В., Морозов О.Г., Василец А.А., Кафарова А.М., Минаева А.Ю., Севрук Н.Л. Экспериментальная апробация квази-интерферометрической схемы регистрации внешних механических воздействий на основе анализа отклика маломодового оптического сигнала // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 2. С. 37–50.

Аннотация: *В работе представлены результаты экспериментальной апробации квази-интерферометрической схемы регистрации внешних механических воздействий на распределенный сенсор, представляющий собой строительные длины кварцевых градиентных многомодовых оптических волокон 50/125 с центральным габаритным дефектом профиля показателя преломления, возбуждаемых когерентным источником оптического излучения. Приведены результаты измерения импульсных откликов соответствующих модификаций схемы, дополненной, в зависимости от конфигурации, прецизионными макроструктурными дефектами и/или волоконной решеткой Брэгга, для различной степени приложенной внешней механической нагрузки.*

Ключевые слова: *маломодовый режим, маломодовые эффекты, многомодовые оптические волокна, градиентный профиль показателя преломления, дифференциальная модовая задержка, распределенный сенсор, волоконная решетка Брэгга, макроструктурный дефект.*

EXPERIMENTAL APPROBATION OF QUASI-INTERFEROMETRIC SCHEME FOR OUTER MECHANICAL STRESS DETECTION BASED ON FEW-MODE OPTICAL SIGNAL RESPONSE ANALYSIS

A. Bourdine [1], O. Morozov[2], A. Vasilets[2], A. Kafarova[1], A. Minaeva[1], N. Sevruk[1]

[1]Povolzhskiy State University of Telecommunication & Informatics, Samara, 443010, Russian Federation
[2]Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI, Kazan, 420111, Russian Federation

Article info
Article in Russian

For citation: Bourdine A., Morozov O., Vasilets A., Kafarova A., Minaeva A., Sevruk N. Experimental Approbation of Quasi-Interferometric Scheme for Outer Mechanical Stress Detection Based on Few-Mode Optical Signal Response Analysis // Proceedings of Educational Institutes of Communication. 2017. Vol. 3. Iss. 1. PP. 37–50.

Abstract: *This work is concerned with experimental approbation of quasi-interferometric scheme for detection of outer mechanical stress via distributed fiber optic sensor. The sensor is excited by laser source silica graded-index multimode optical fiber with great defect of refractive index profile in the center core region. We present some results of pulse response measurements performed under various stress order and various scheme configurations differing by adding fiber Bragg gratings and macrostructure defects like tapers or up-tapers.*

Keywords: *few-mode regime, few-mode effects, multimode optical fibers, graded index refractive index profile, differential mode delay, distributed fiber optic sensor, fiber Bragg grating, macrostructure defect, taper, up-taper.*

В настоящее время для ряда практических приложений возникает задача регистрации локальных и распределенных механических воздействий на поверхность контролируемого объекта – например, давления, нагрузки, деформации и пр. Известен целый ряд коммерческих волоконно-оптических датчиков [1–5], успешно решающих данную проблему с применением таких методов, как оптическая рефлектометрия, интерферометрия, поляриметрия и др.

В ранее опубликованных работах [6–8] были продемонстрированы потенциальные возможности разработанного альтернативного способа регистрации внешних воздействий. Последний, в отличие от классических подходов, реализуемых как в коммерческих системах волоконно-оптических датчиков сенсорных сетей, так и подавляющем большинстве проприетарных решений [1–5], базируется на маломодовых эффектах, возникающих в процессе передачи оптического сигнала, генерируемого когерентным источником излучения, по многомодовым оптическим волокнам (ММ ОВ).

В целом, возбуждение достаточно кротких отрезков ОВ – от нескольких сантиметров и даже менее до метровых и более длин – с увеличенным, по сравнению с традиционными одномодовыми (SM) ОВ, диаметром сердцевины, с помощью лазера, в том числе через SM согласующий световод, достаточно широко используется, например, при реализации разнообразных интерферометрических схем [1, 9–11]. Целый ряд публикаций посвящен приложению волоконных решеток Брэгга (ВРБ), записанных на отрезках ММ ОВ, и проявляющихся в них эффектах для различных схем волоконно-оптических датчиков – вибраций, температуры, деформаций и пр., например, [12–14] и др. Здесь необходимо отметить, что подавляющее большинство схем, представленных в указанных работах, ориентированы исключительно на анализ спектрального отклика той или иной волоконно-оптической структуры с включением отрезка ММ ОВ, при возбуждении когерентным источником (лазером непрерывного

или, напротив, модулированного излучения), что соответствует непосредственно маломодовому режиму передачи, когда оптический сигнал переносится ограниченным модовым составом [15]. В отдельную группу целесообразно выделить публикации, ориентированные на регистрацию и обработку зондирующего сигнала и/или его отклика при прохождении протяженных длин ММ ОВ методами оптической рефлектометрии во временной области (фактически, на сегодняшний день для этих приложений ММ ОВ вытеснены SM ОВ [3, 16]) и анализа спекл-структур [3, 17–19].

В отличие от известных решений, ранее разработанный альтернативный подход регистрации внешних воздействий [6–8] базируется на анализе изменения отклика маломодового оптического сигнала малой длительности при прохождении распределенного сенсора – кварцевого градиентного многомодового ОВ кат. ОМ2 с сильным проявлением дифференциальной модовой задержки (ДМЗ), возбуждаемого когерентным источником оптического излучения. Вход и выход схемы подключаются непосредственно к выходу передающего и входу приемного оптических модулей анализатора ДМЗ R2D2 [20–22]. В процессе мониторинга выполняется сравнение «опорной» и «текущей» формы импульса, детектируемой на выходе тестируемого ММ ОВ. Благодаря приложенному внешнему локальному или распределенному механическому воздействию на ММ ОВ сенсора появляются новые микро- и макроизгибы, что неизбежно меняет процессы взаимодействия и смешения модовых компонентов сигнала. В свою очередь, это существенно влияет на изменение искаженной за счет ДМЗ формы импульсного отклика, в том числе, на изменение соотношения нормированных амплитуд главного максимума и периферийных пиков.

Полученные результаты экспериментальных и теоретических исследований создали предпосылки для модификации исходной простой конфигурации схемы регистрации внешних механических воздействий к ее модификации – так называемой квази-интерферометрической схеме измерения импульсного отклика маломодового оптического сигнала. Данную схему, внешний вид базовой конфигурации которой представлен на рис. 1, было предложено реализовать на основе каскадного соединения многомодовых Y-разветвителей 50:50 «6» и «10» с предварительно выровненными плечами «8′» и «8″». Вход и выход квази-интерферометрической схемы подключаются непосредственно к выходу передающего «1» (SM ЛД, $\lambda = 1310$ нм, пигтелирован стандартным SM ОВ рек. ITU-T G.652 FC/UPC «2») и входу приемного «15» (ММ пигтейл кат. ОМ2+ FC/UPC «14») оптических модулей анализатора ДМЗ R2D2 через проходные волоконно-оптические розетки FC/UPC «3» и «13». Входной порт разветвителя «6» и выходной порт разветвителя «10» оконцованы ММ пигтейлами кат. ОМ2+ (ММ ОВ 50/125) FC/UPC, подваренными с помощью сварочного аппарата Ericsson FSU-975 по штатной программе сварки ММ ОВ № 04 «ММ–ММ» [23] строго центрировано без каких-либо радиальных рассогласований – сварки «5» и «11».

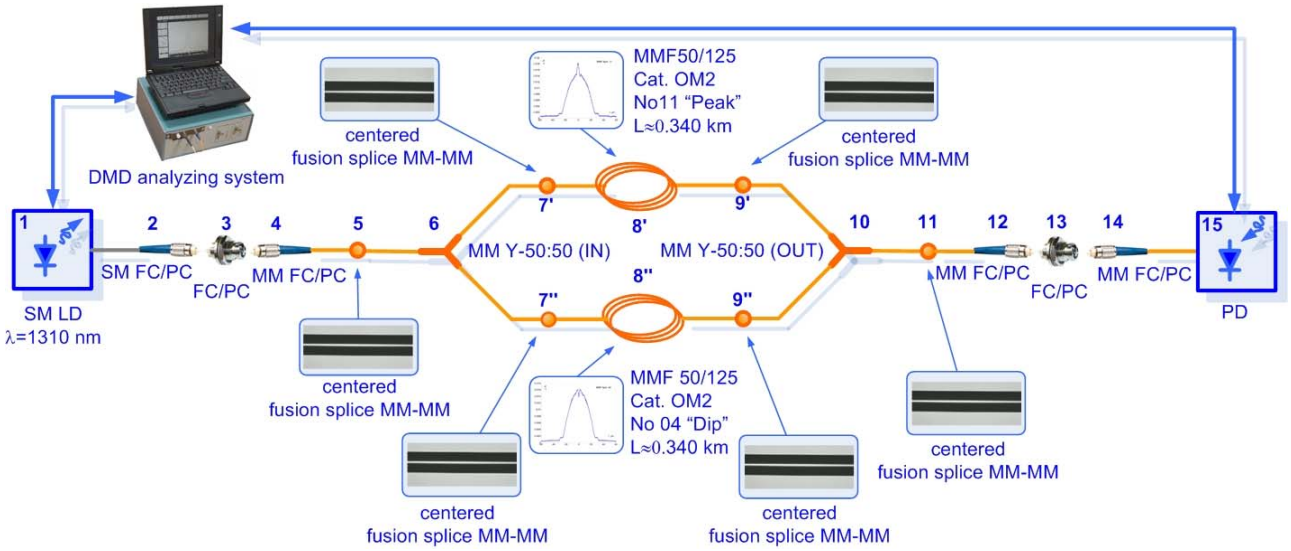
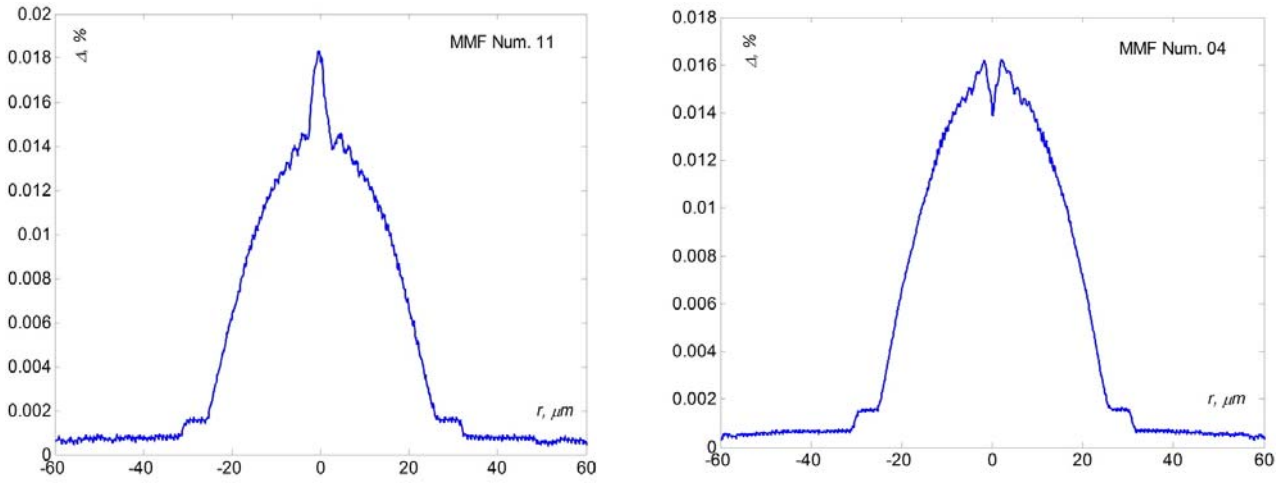


Рисунок 1. Базовая конфигурация квази-интерферометрической схемы измерения импульсного отклика маломодового оптического сигнала

На этом этапе было предложено рассматривать плечо «8′» интерферометра как «опорное», а «8″» – как «сенсорное». В качестве первого использовалась бухта ММ ОВ 50/125 кат. ОМ2 отечественного производства длиной порядка 340 м с характерным технологическим дефектом градиентного профиля преломления в виде габаритного пика в центре сердцевины (образец ММ ОВ № 04 [24, 25]) (рис. 2а), сильным проявлением ДМЗ и стабильным характером и степенью проявления данного эффекта [6–8], вне зависимости от приложенных локальных или распределенных механических нагрузок.



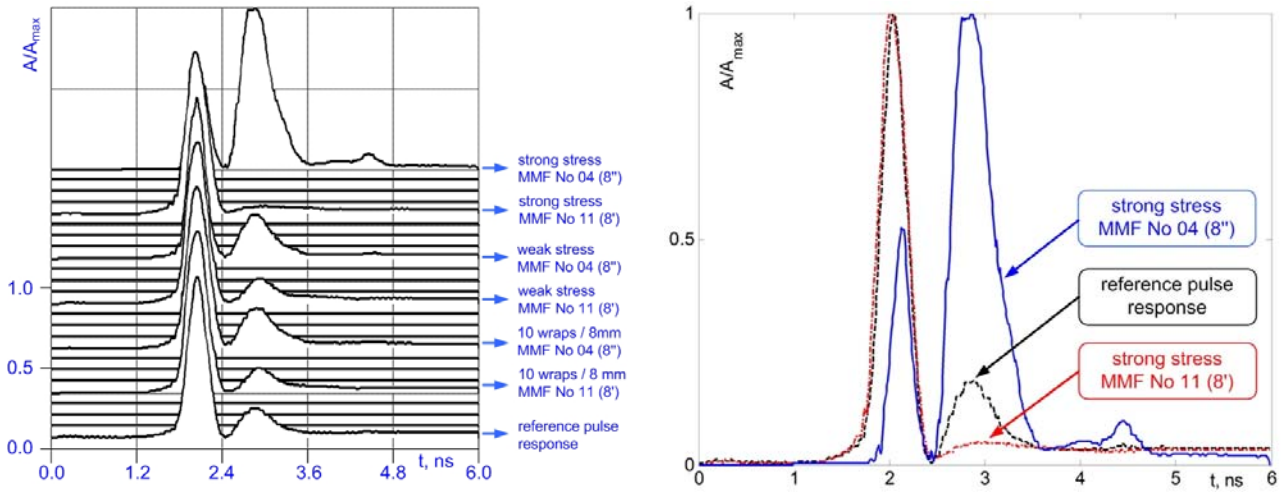
а) б)

Рисунок 2. Профили показателя преломления многомодовых ОВ, используемых в базовой конфигурации квази-интерферометрической схеме (см. рис. 1):
а) ОВ №11 – «опорное» плечо «8′»; б) ОВ №04 – «сенсорное» плечо «8″»

Напротив, «сенсорное» плечо «8″» схемы представляло собой бухту ММ ОВ 50/125 кат. ОМ2 идентичной протяженности, но уже центральным дефек-

том профиля в виде габаритного провала (образец ММ ОВ № 11 [24, 25]) (рис. 2б), также с сильным проявлением, и повышенной, согласно результатам ранее проведенных экспериментальных исследований [6–8], чувствительностью к внешним воздействиям, с точки зрения нестабильности искаженной формы импульсного отклика при передаче оптического сигнала в маломодовом режиме. В общем случае, предварительно описанные длины ММ ОВ выравнивались с помощью оптического рефлектометра обратного рассеяния во временной области (OTDR), далее – с применением анализатора ДМЗ R2D2, таким образом, чтобы результирующий импульсные отклик, снимаемый на выходе схемы, располагался в пределах масштабной шкалы 0…10 нс.

Предполагалось, что наличие двух независимых «опорного» и «сенсорного» плеч позволит не только осуществить регистрацию механического воздействия, но и оценить степень его проявления. Для проверки данной гипотезы была проведена серия тестов, включающая в себя измерения импульсного отклика маломодового сигнала, генерируемого одномодовым ЛД передающего модуля анализатора ДМЗ на длине волны 1310 нм (квазигауссова форма, исходная длительность 340 пс) до и после приложенного с разными усилиями воздействий («слабое» 200 Н и «сильное» 500 Н, а также намотка 10 витков ОВ на оправку диаметром 8 мм) как на «сенсорное», так и «опорное» плечи схемы. На рис. 3а представлена диаграмма динамики формы импульсных откликов в зависимости от характера механического воздействия, на рис. 3б – результаты сопоставления форм импульсных откликов без и в условиях «сильного» воздействия на плечи измерительной схемы.



а) б)

Рисунок 3. Результаты измерения: а) диаграмма динамики формы импульсных откликов в зависимости от степени и характера приложенного механического воздействия; б) сопоставление форм импульсных откликов без и в условиях «сильного» воздействия на плечи измерительной схемы

В отличие от [6–8], сравнительный анализ опорной формы импульсного отклика и формы импульсного отклика при внешнем механическом воздействии на ОВ включал в себя оценку смещения периферийных пиков относи-

тельно главного опорного для одного и того же отклика максимума уже не только по нормированной амплитуде, но и по задержке. Анализ полученных результатов подтвердил сделанное выше предположение. Так, переход к предложенной квази-интерферометрической конфигурации измерительной схемы регистрации внешних воздействий на основе маломодовых эффектов добавил в пространство параметров еще одно новое измерение: в отличие от базовой схемы на одном ММ ОВ, помимо отклонения нормированной амплитуды периферийного пика относительно главного максимума, наблюдается также его смещение и во времени, в зависимости от степени приложенного воздействия.

На втором этапе были проведены следующие 2 модификации базовой конфигурации квази-интерферометрической схемы, результаты которых представлены на рис. 4. Так, для повышения чувствительности схемы к внешним механическим воздействиям, оказывающих в большей степени влияние на моды средних и высших порядков, радиальное распределение поля которых, в отличие от низших направляемых мод, сосредоточенного в периферийной части сердцевины и/или ближе к границе раздела сердцевина/оболочка, ввод сигнала с выхода ЛД передающего модуля R2D2 «1» стал выполняться через согласующий пигтейл FC/UPC «4» со стандартным SM ОВ рек. ITU-T G.652, подваренным к входному порту ММ Y-разветвителя «6» с сильным прецизионным радиальным смещением 7,5 мкм с помощью сварочного аппарата Ericsson FSU-975 по программе № 8 «Аттенюатор» [23], позволяющей непосредственно устанавливать искомое значение параметра «offset adjustment» («коррекция смещения»). Кроме того, сенсорное плечо «8″» было дополнено волоконной решеткой Брэгга (ВРБ) «17″», записанной на коротком, порядка 40 см отрезке ММ ОВ кат. OM2+/OM3 с длиной волны Брэгга $\lambda = 1550$ нм [26–28]. При этом в данном случае ВРБ рассматривалось уже не в виде волоконно-оптического рефрактора заданной оптической несущей, а в качестве прецизионного локального микродефекта с периодической микроструктурой, обеспечивающего управление модовым составом маломодового оптического сигнала.

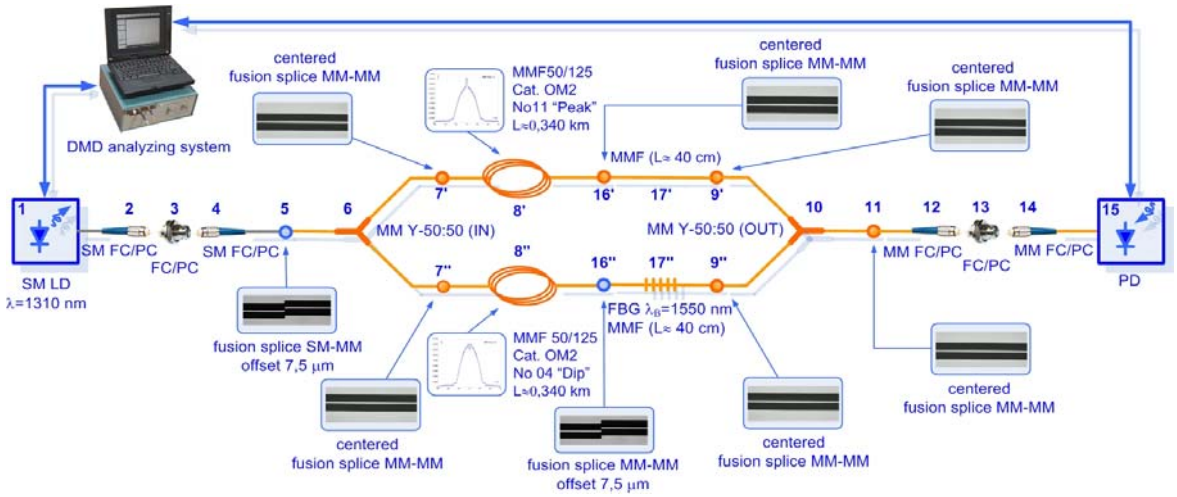
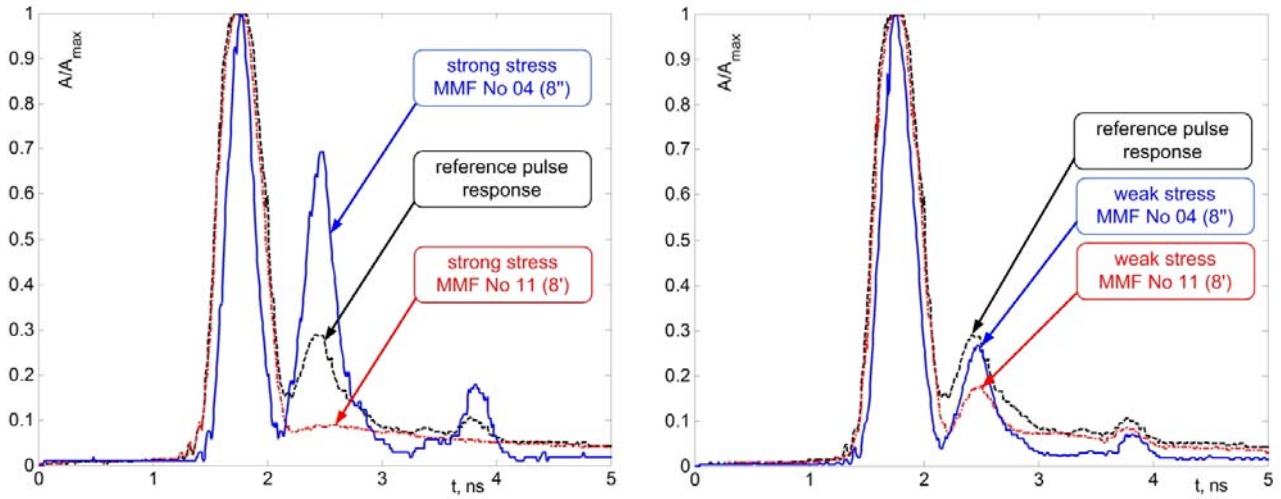


Рисунок 4. Квази-интреферометрическая схема измерения импульсного отклика маломодового оптического сигнала со смещенным вводом и ВРБ в «сенсорном» плече

Вход ВРБ, записанной на ОВ «17″», подваривался к выходу «сенсорного» плеча «8″» с указанным сильным прецизионым радиальным смещением 7,5 мкм (сварка «16″»), выход – напротив, по стандартной программе сварки ММ ОВ № 4 «ММ–ММ» строго центрированно без каких-либо рассогласований («9″»). Для балансировки плеч квази-интерферометра между выходом второго «опорного» плеча «8′» и соответствующим портом Y-разветвителя был центрированно также по стандартной программе № 4 «ММ–ММ» вварен отрезок ММ ОВ кат. ОМ2+/ОМ3 «17′» аналогичной длины 40 см (сварки «16′» и «9′»). На рис. 5 представлены формы импульсных откликов для поочередного «сильного» и «слабого» воздействий на «сенсорное» и «опорное» плечи схемы. Результаты оценки смещения периферийных пиков относительно главного опорного максимума по задержке и нормированной амплитуде для базовой конфигурации схемы и схемы с включением ВРБ в сенсорное плечо сведены в таблице.



(а) (б)

Рисунок 5. Сопоставление форм импульсных откликов в условиях воздействия на «сенсорное» и «опорное» плечи схемы: а) «сильное» 500 Н; б) «слабое» 200 Н

Таблица. Результаты оценки смещения периферийных пиков

Механическое воздействие	Базовая конфигурация		ВРБ + смещенный ввод	
	ΔA_{norm}	Δt_{delay}, пс	ΔA_{norm}	Δt_{delay}, пс
«сенсор.» (04): «сильное» 500 Н	0,34	124,00	0,40	75,70
«сенсор.» (04): «слабое» 200 Н	0,09	2,72	0,02	72,45
«сенсор.» (04): витки на оправке	0,06	7,40	0,04	89,05
«опорн.» (11): «сильное» 500 Н	0,13	128,00	0,20	179,70
«опорн.» (11): «слабое» 200 Н	0,03	18,00	0,11	120,50
«опорн.» (11): витки на оправке	0,03	17,50	0,11	120,34

Анализ полученных данных показал следующее. Оба рассмотренных варианта реализации схемы обеспечили регистрацию «сильного» внешнего механического воздействия. Благодаря наложению импульсных откликов с выходов «плеч» схемы, данный эффект регистрировался не только для «сенсорного» ММ ОВ, но и для «опорного» ММ ОВ с центральным дефектом профиля показателя преломления в виде провала, которое в простом базовом одноволоконном исполнении с подключением к R2D2, согласно проведенным в [6–8] серии экспериментальных тестов, отличалось, напротив, повышенной устойчивостью к внешним воздействиям, с точки зрения изменения искаженной за счет ДМЗ формы импульсного отклика относительно исходной. Здесь следует отдельно отметить существенное смещение периферийного пика относительно главного максимума по времени на от 75 до 180 пс относительного начального значения. Более того, включение ВРБ в «сенсорное» плечо обеспечило также детектирование уже «слабого» воздействия, причем также и в «сенсорном», и в «опорном» плечах схемы: здесь смещение периферийного пика относительно главного максимума по времени составило 72 пс для ММ ОВ № 04 и 120 для ММ ОВ № 11, соответственно.

Вышесказанное позволило сделать предварительное предположение о потенциальных возможностях использования предложенных конфигураций квазиинтерферометрической схемы, в том числе, дополненной смещенным вводом сигнала с выхода лазера и включением ВРБ, записанной на ММ ОВ, для регистрации внешних локальных и распределенных механических воздействий в альтернативных распределенных сенсорных системах на базе маломодовых эффектов. Поэтому на следующем этапе модификации схемы было предложено уже в обоих плечах квази-интерферометра использовать ММ ОВ кат. ОМ2 с центральным провалом профиля, которые, как было показано в упоминавшихся работах [6–8], отличаются сильным проявлением ДМЗ при одновременной повышенной чувствительности к механическим нагрузкам, с точки зрения изменения формы импульсного отклика. Здесь, в отличие от предыдущей версии, каждое плечо интерферометра состояло из двух компонентов – катушки ММ ОВ кат. ОМ2 протяженностью порядка 500 м с сильным проявлением ДМЗ (А-04-01 «8-1′» и А-04-02 «8-1′′») и бухты этого же ММ ОВ длиной около 100 м, выполняющей функции распределенного сенсора (А-04-03 «8-2′» и «8-2′′») (см. рис. 6). Профили показателя преломления перечисленных промышленных образцов строительных длин ММ ОВ представлены на рис. 7.

Так же, как и в предыдущем случае, вход разветвителя «6» оконцован одномодовым SM пигтейлом FC/UPC «4» с помощью сварочного аппарата Ericsson FSU-975 по программе № 8 «Аттенюатор» с сильным осевым смещением 7,5 мкм (сварка «5»), в то время как выход разветвителя «10» подварен к ММ пигтейлу «12» строго соосно (сварка «11»). Как было показано выше, предложенный квази-интерферометр обеспечивает регистрацию сильных внешних механических воздействий. Поэтому для этой модификации схемы была проведена серия тестов, ориентированных, напротив, на экспериментальные иссле-

дования возможности регистрации слабых механических воздействий 2...20 Н на основе анализа изменения формы импульсного отклика.

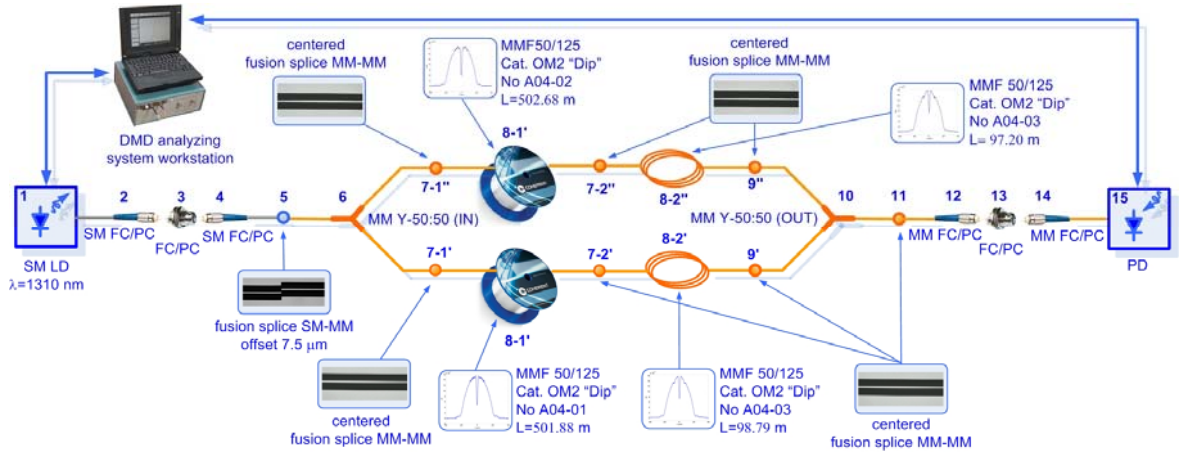
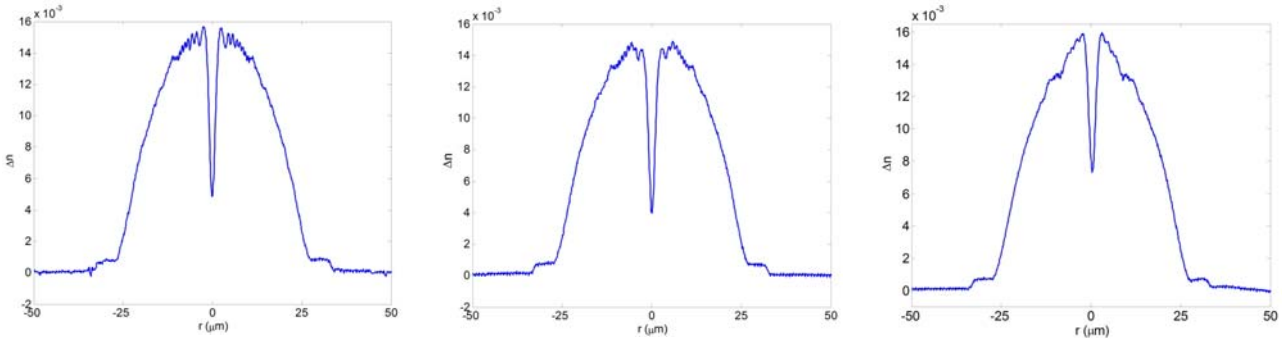
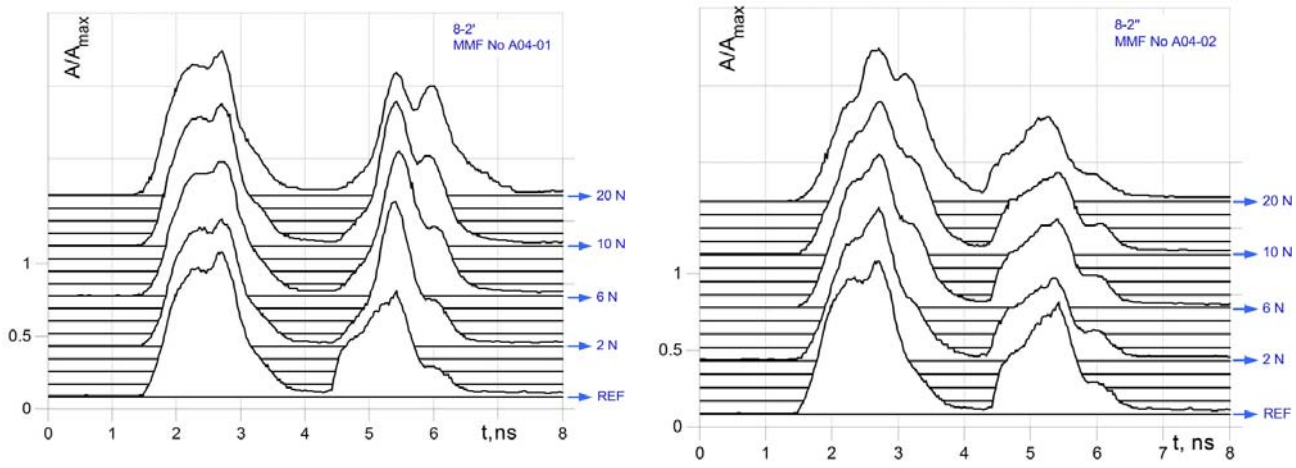


Рисунок 6. Модификация квази-интерферометрической схемы с двухкомпонентными плечами



а) б) в)

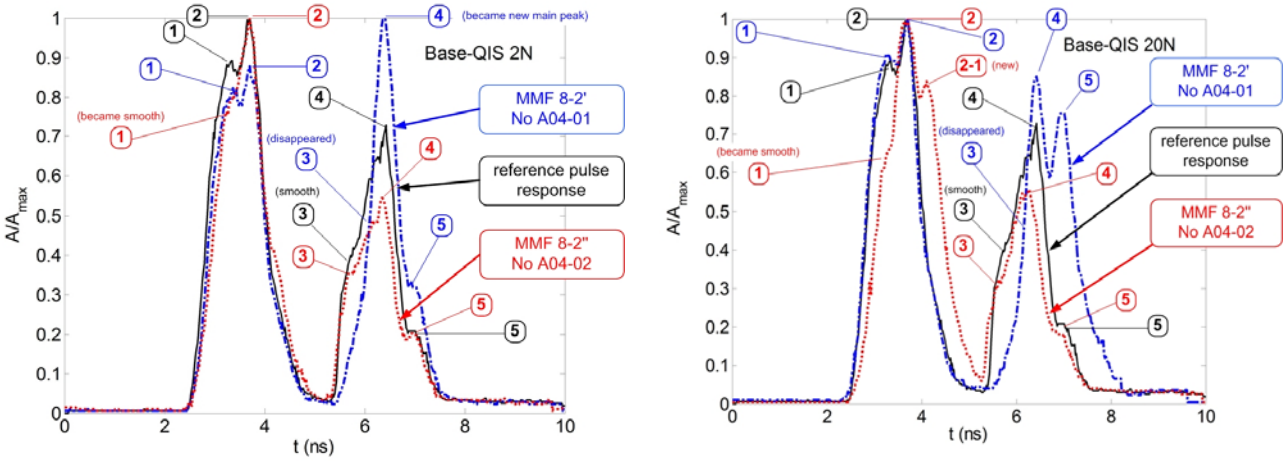
Рисунок 7. Профили показателя преломления ММ ОВ двухкомпонентных плеч квази-интерферометрической схемы (см. рис. 6):
а) А-04-01 «8-1′»; б) А-04-02 «8-1″»; в) А-04-03 «8-2′»/«8-2″»



(а) (б)

Рисунок 8. Диаграмма динамики формы импульсных откликов в зависимости от степени и характера приложенного механического воздействия: а) сенсор «8-2′»; б) сенсор «8-2″»

Результаты сопоставления измерения последних при воздействии 2, 6, 10 и 20 Н на сенсоры «8-2′» и «8-2″» каждого из плеч схемы в виде диаграмм динамики представлены на рис. 8а и 8б, а их наложение для приложенных усилий 2 Н и 20 Н – на рис. 9а и 9б, соответственно.

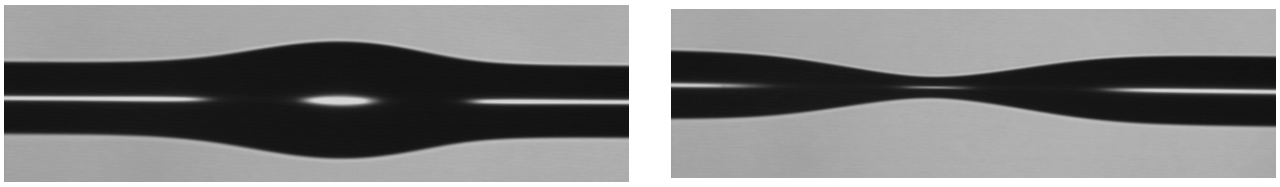


(а) (б)

Рисунок 9. Сопоставление форм импульсных откликов в условиях воздействия: а) 2Н и б) 20 Н на сенсоры плеч схемы

Анализ полученных результатов показывает, что базовая конфигурация представленной модификации схемы обеспечивает возможность регистрации приложенного воздействия при одновременной идентификации плеча квази-интерферометра, на которое это воздействие было оказано. Здесь искаженный, благодаря сильному проявлению ДМЗ, импульсный отклик содержит фиксированный главный (опорный) максимум № 2 (рис. 9) и периферийный пик № 4 (рис. 9), положение которого меняется по задержке и нормированной амплитуде относительно опорного. Так, при воздействии 20 Н на сенсор «8-2′» наблюдается увеличение амплитуды локального максимума № 5, таким образом, что отклонение данного параметра относительно главного максимума № 2 изменилось с 0,79 до 0,25, в то время как значение задержки составило 3,27 нс вместо 3,24, соответствующей опорному отклику. В свою очередь, при воздействии 20 Н на плечо «8-2″» разность нормированных амплитуд максимумов № 2 и № 4 увеличилась с 0,27 до 0,44, в то время как задержка уменьшилась на 150 пс – от 5,42 нс до 5,27 нс.

На следующем этапе, схема дополнялась включением на выходе сенсора «8-2″» отдельных ВРБ, записанных на отрезках ММ ОВ кат. ОМ2+/ОМ3 с длиной волны Брэгга как 1550 нм, так и 1310 нм, а также аналогичных ВРБ, но уже записанных непосредственно поверх предварительно сформированных в ММ ОВ макроструктурных дефектов типа «перетяжка» и «бочка» (рис. 10а и 10б) [29, 30]. Рассмотренные семь конфигураций предложенной модификации квази-интерферометрической схемы, с точки зрения исследования потенциальных возможностей регистрации слабых внешних механических воздействий, представлены на рис. 11.



а) б)

Рисунок 10. Прецизионные макроструктурные дефекты, сформированные в ММ ОВ: а) «бочка»; б) «перетяжка»

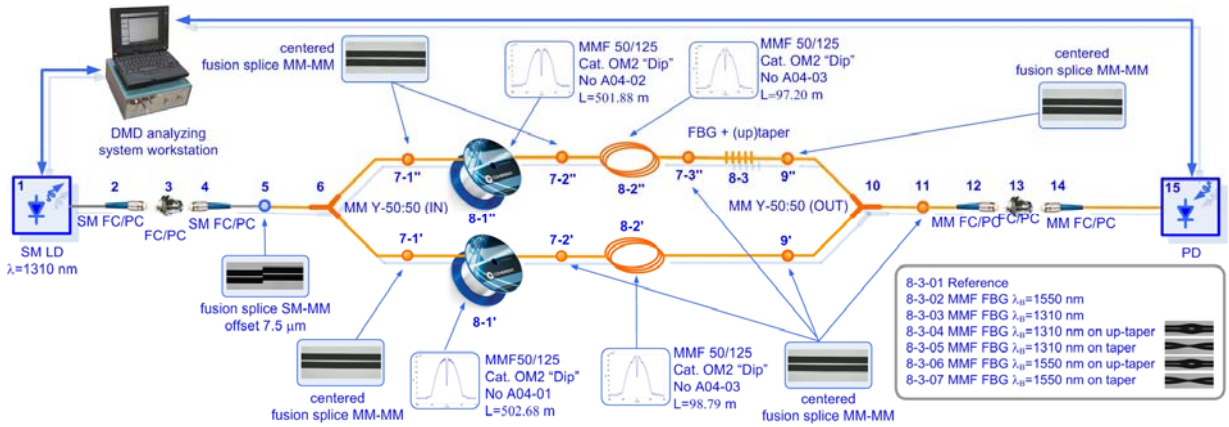


Рисунок 11. Модификация квази-интерферометрической схемы с двухкомпонентными плечами, дополненная ВРБ и макроструктурными дефектами

Результаты измерений в виде построенных на одном полигоне диаграмм динамики импульсного отклика маломодового оптического сигнала, регистрируемого на выходе схемы, в зависимости от приложенного механического воздействия 2…20 Н для перечисленных конфигураций схемы с включением на выходе сенсора «8-2″» макроструктурного дефекта и/или ВРБ, приведены на рис. 12а…12е. Общие результаты изменения положения компонентов импульсных откликов по нормированной амплитуде и задержке, в зависимости от конфигурации схемы и приложенного механического воздействия, представлены в виде сводных диаграмм на рис. 13а и 13б.

Сопоставление полученных данных показало следующее. Наименьший сдвиг по задержке для всей группы рассмотренных схем и проведенной серии тестов составил при воздействии 2 Н $\Delta t_з$ = 18,40 пс и соответствует схеме 8-3-04 (ВРБ λ = 1310 нм + «бочка»). Максимальное значение этого же параметра при воздействии 20 Н достигало значения $\Delta t_з$ = 536,50 пс для схемы 8-3-06 (ВРБ λ = 1550 нм + «бочка»). Более того, для ряда схем были зарегистрированы стабильные отклонения по задержке между итерациями последовательно увеличиваемого приложенного воздействия, которые достигали до 15…20 пс. С точки зрения нормированной амплитуды, наибольшую чувствительность к слабым воздействиям продемонстрировали 8-3-01 (базовая) и схемы 8-3-02 (ВРБ λ = 1550 нм), 8-3-04 (ВРБ λ = 1310 нм + «бочка») и 8-3-05 (ВРБ λ = 1310 нм + «перетяжка»): здесь значения отклонения указанного параметра достигали от 0,1 до 0,25, в то время как для остальных конфигураций схем – менее 0,05.

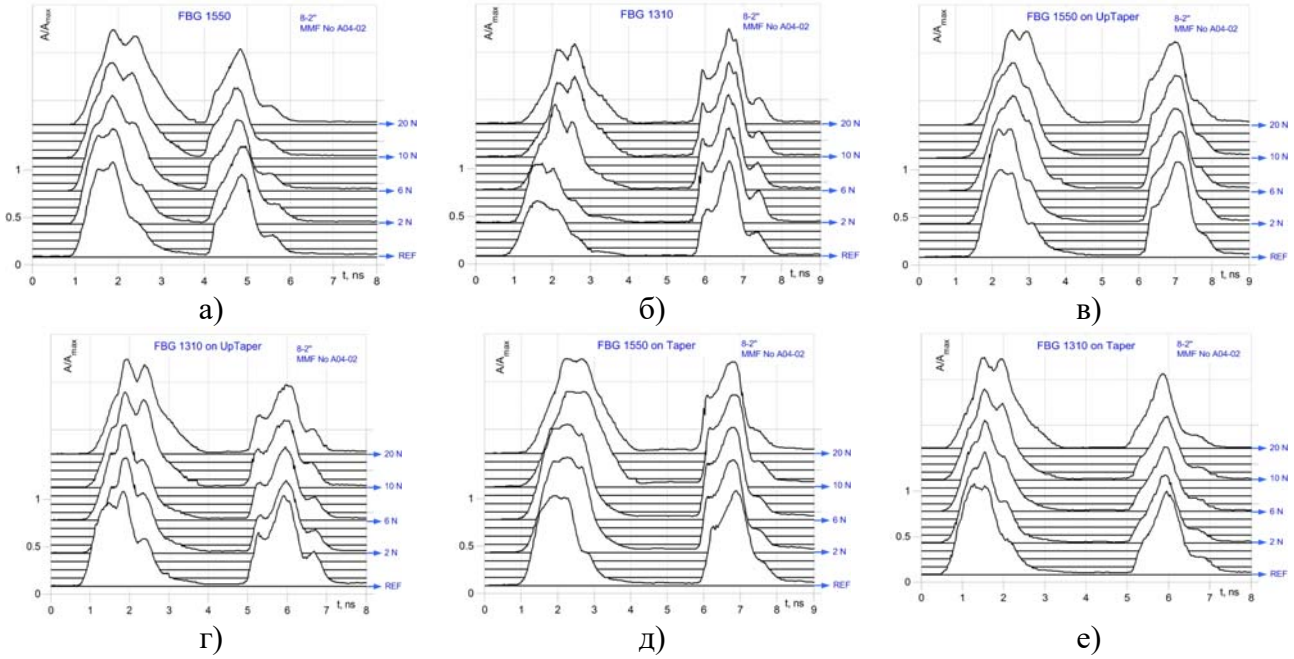


Рисунок 12. Сводные диаграммы динамики изменения формы импульсных откликов в зависимости от степени и характера приложенного механического воздействия на сенсор «8-2″» схемы, дополненный: а) ВРБ λ = 1550; б) ВРБ λ = 1310; в) ВРБ λ = 1550, записанной поверх «бочки»; г) ВРБ λ = 1310, записанной поверх «бочки»; д) ВРБ λ = 1550, записанной поверх «перетяжки»; е) ВРБ λ = 1310, записанной поверх «поретяжки»

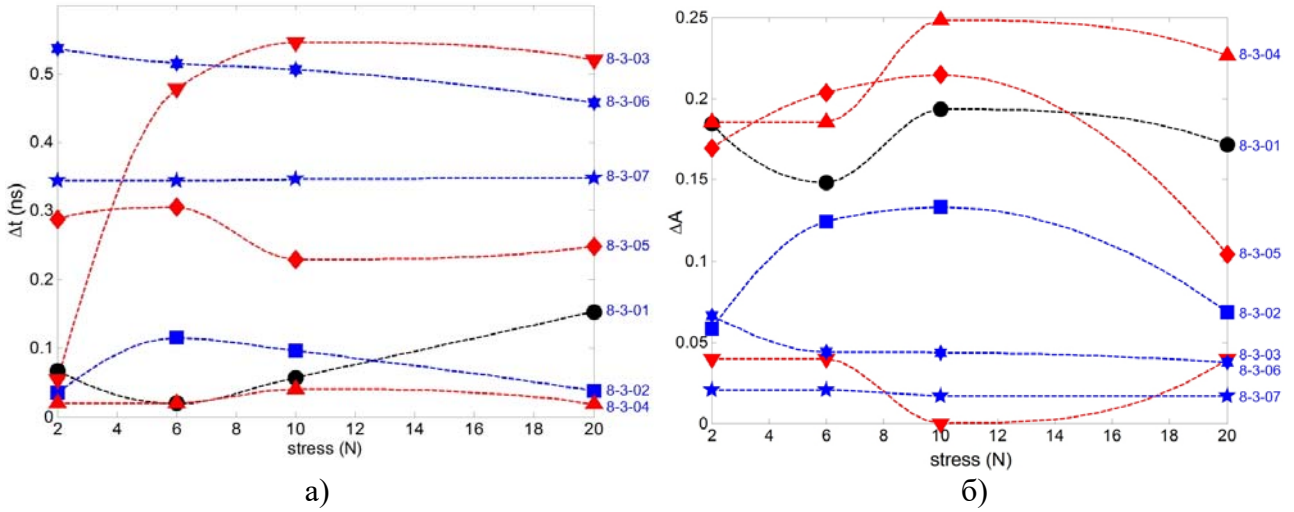


Рис. 13. Сводные диаграммы динамики изменения отклонения положения периферийного пика относительно главного максимума, в зависимости от приложенного механического воздействия: а) по задержке; б) по нормированной амплитуде

Анализ полученных результатов демонстрирует потенциальные возможности использования предложенной квази-интерферометрической схемы не только для регистрации в целом, но и для оценивания степени внешних локальных и распределенных механических воздействий при одновременном обеспечении возможности идентификации плеча схемы, к которому было приложено усилие, а включение дополнительных волоконно-оптических струк-

тур – ВРБ и прецизионных макродефектов – управлять чувствительностью предложенной альтернативной измерительной схемы, функционирующей на базе маломодовых эффектов.

Работа подготовлена при финансовой поддержке гранта Президента РФ в рамках научного проекта МД-9418.2016.8, а также грантов РФФИ в рамках научных проектов № 16-37-50087 мол_нр и № 16-37-50089 мол_нр.

Список используемых источников

1. Grattan L.S., Meggitt B.T. Optical Fiber Sensor Technology. Fundamentals. New York, NY, USA: Springer Science. 2000. 325 p.

2. Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. М.: Физматлит. 2001. 272 с.

3. Куликов А., Игнатьев А. Обзор волоконно-оптических систем охраны периметра // Алгоритмы Безопасности. 2010. № 4. С. 56–61.

4. Krohn D., MacDougall T., Mendez Al. Fiber Optic Sensors. Bellingham: SPIE Press. 2014. 332 p.

5. Rajan G. Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications (Devices, Circuits, and Systems). Boca Raton, FL, USA: CRC Press / Taylor & Francis. 2015. 575 p.

6. Бурдин А.В., Федоров А.А., Тынкован В.О., Баранов К.В., Чивильгин А.Л. Распределенный сенсор на многомодовых оптических волокнах, работающих в маломодовом режиме // Фотон-Экспресс. 2013. № 6 (110). С. 256–257.

7. Бурдин А.В., Дмитриев Е.В., Прапорщиков Д.Е., Севрук Н.Л. Применение кварцевых многомодовых волоконных световодов с габаритным центральным дефектом профиля показателя преломления в распределенных сенсорах волоконно-оптических датчиков на базе маломодовых эффектов // Прикладная Фотоника. 2016. Т. 3. № 3. С. 252–279.

8. Бурдин А.В., Василец А.А., Бурдин В.А., Морозов О.Г. Распределенный сенсор на многомодовых оптических волокнах, дополненных волоконной решеткой Брэгга, функционирующих в маломодовом режиме передачи сигнала // Фотон-Экспресс. 2016. № 6 (134). С. 12–13.

9. Liu Yu, Wei Li. Low-cost High-Sensitivity Strain and Temperature Sensing Using Graded-Index Multimode Fibers // Applied Optics. 2007. Vol. 46 (13). PP. 2516–2519.

10. Xue H., Meng H., Wang W., Xiong R., Yao Q., Huang B. Single-Mode-Multimode Fiber Structure Based Sensor for Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature // IEEE Sensors Journal. 2013. Vol. 13(11). PP. 4220–4223.

11. Li A., Wang Yi., Hu Q., Shieh W. Few-Mode Fiber Based Optical Sensors // Optics Express. 2015. Vol. 23 (2). PP. 1139–1150.

12. Li D., Gong Yu., Wu Yu. Tilted Fiber Bragg Grating in Graded-Index Multimode Fiber and its Sensing Characteristics // Photonic Sensors. 2013. Vol. 3 (2). PP. 112–117.

13. Fang Sh., Li B., Song D., Zhang J., Sun W., Yuan L. A Smart Graded-Index Multimode Fiber Based Sensor Unit for Multi-Parameter Sensing Applications // Optics and Photonics Journal. 2013. Iss. 3. PP. 265–267.

14. Schmid M.J., Muller M.S. Measuring Bragg Gratings in Multimode Optical Fibers // Optics Express. 2015. Vol. 23. Iss. 6. PP. 8087–8094.

15. Bottacchi S. Multi-Gigabit Transmission Over Multimode Optical Fibre. Theory and Design Methods for 10GbE Systems. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd. 2006. 654 p.

16. Liokumovich L.B., Ushakov N.A., Kotov O.I., Bisyarin M.A., Hartog A.H. Fundamentals of Optical Fiber Sensing Schemes Based on Coherent Optical Time Domain Reflectometry:

Signal Model under Static Fiber Conditions // IEEE Journal of Lightwave Technology. 2015. Vol. 33 (17). PP. 3660–3671.

17. Горбачев О. Интерференционные исследования спекл-структур в оптическом кабеле // Фотоника. 2012. № 6 (36). С. 20–24.

18. Lujo I., Klokoc P., Komljenovic T., Bosiljevac M., Sipus Z. Fiber-Optic Vibration Sensor Based on Multimode Fiber // Radioengineering. 2008. Vol. 17(2). PP. 93–97.

19. Rodriguez-Cobo L., Lomer M., Galindez C., Lopez-Higuera J.M. Speckle Characterization in Multimode Fibers for Sensing Applications // Proceedings of SPIE. 2012. Vol. 8413. PP. 84131R-1–84131R-6.

20. Бурдин А.В. Дифференциальная модовая задержка кварцевых многомодовых оптических волокон разных поколений // Фотон-Экспресс. 2008. № 5–6 (69–70). С. 20–22.

21. Бурдин А.В. О диагностике дифференциальной модовой задержки многомодовых оптических волокон // Инфокоммуникационные технологии. 2008. № 4. С. 33–38.

22. Bourdine A.V., Prokopyev V.I., Dmitriev E.V., Yablochkin K.A. Results of Conventional Field-Test Equipment Application for Identification of Multimode Optical Fibers With High DMD // Proceedings of SPIE. 2009. Vol. 7374. PP. 73740J-01–73740J-07.

23. Ericsson FSU-975. Руководство пользователя: пер. с англ. Ericsson. 2001. 76 с.

24. Бурдин А.В., Яблочкин К.А. Исследование дефектов профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон кабелей связи // Инфокоммуникационные технологии. 2010. № 2. С. 22–27.

25. Bourdine A.V., Praporshchikov D.E., Yablochkin K.A. Investigation of Defects of Refractive Index Profile of Silica Graded-Index Multimode Fibers // Proceedings of SPIE. 2011. Vol. 7992. PP. 799206-1–799206-8.

26. Бурдин А.В., Василец А.А., Бурдин В.А., Морозов О.Г., Кузнецов А.А., Нуреев И.И., Фасхутдинов Л.И., Кафарова А.М., Минаева А.Ю., Севрук Н.Л. Результаты экспериментальных исследований маломодовых режимов волоконных Брэгговских решёток на многомодовых световодах // Инфокоммуникационные технологии. 2016. № 1. С. 19–33.

27. Бурдин А.В., Василец А.А., Бурдин В.А., Морозов О.Г., Кузнецов А.А., Нуреев И.И., Фасхутдинов Л.И., Кафарова А.М., Минаева А.Ю., Севрук Н.Л. Результаты записи волоконных Брэгговских решеток на кварцевых градиентных многомодовых оптических волокнах разных поколений // Инфокоммуникационные технологии. 2016. № 2. С. 129–137.

28. Bourdine A.V., Vasilets A.A., Burdin V.A., Morozov O.G., Nureev I.I., Kuznetzov A.A., Faskhutdinov L.M., Kafarova A.M., Minaeva A.Yu., Sevruk N.L. Fiber Bragg Grating Writing Technique for Multimode Optical Fibers Providing Stimulation of Few-Mode Effects in Measurement Systems // Proceedings of SPIE. 2016. Vol. 9807. PP. 98070J-1–98070J-7.

29. Бурдин А.В., Василец А.А., Севрук Н.Л. Результаты экспериментальной апробации технологии нанесения прецизионных макроструктурных дефектов на кварцевые оптические волокна // Первый научный форум «Телекоммуникации: теория и технологии» «3Т-2016», XIV Международная научная конференция «Оптические технологии в телекоммуникациях» (ОТТ-2016): материалы конференции. Самара. 2016. С. 112–113.

30. Evtushenko A.S., Faskhutdinov L.M., Kafarova A.M., Kazakov V.S., Kuznetzov A.A., Minaeva A.Yu., Sevruk N.L., Nureev I.I., Vasilets A.A., Andreev V.A., Morozov O.G., Burdin V.A., Bourdine A.V. Technique for Writing of Fiber Bragg Gratings Over or Near Preliminary Formed Macro-Structure Defects in Silica Optical Fibers // Proceedings of SPIE. 2017. Vol. 10342. PP. 103420X-1–103420X-11.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ В ИЗОГНУТЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

М.С. Былина[1*], **М.Н. Халилов**[1]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация
*Адрес для переписки: BylinaMaria@mail.ru

Информация о статье
УДК 621.372.8
Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Былина М.С., Халилов М.Н. Теоретическое и экспериментальное исследование потерь в изогнутых оптических волокнах // Труды учебных заведений связи. 2017. Том 3. № 2. С. 51–59.

Аннотация: *В статье рассмотрена методика расчета коэффициента затухания изогнутого участка слабонаправляющего оптического волокна круглого поперечного сечения со ступенчатым профилем показателя преломления, основанная на расчете распределений напряженностей электрических и магнитных полей направляемых мод. Представлены результаты расчетов зависимостей коэффициентов затухания различных волокон от радиуса изгиба. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.*

Ключевые слова: *оптическое волокно, мода, одномодовое волокно, изгибные потери, коэффициент затухания.*

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF LOSS IN OPTICAL FIBERS

M. Bylina[1], **M. Halilov**[1]

[1]The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunication, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info
Article in Russian

For citation: Bylina M., Halilov M. Theoretical and Experimental Research of Loss in Optical Fibers // Proceedings of Educational Institutes of Communication. 2017. Vol. 3. Iss. 2. PP. 51–59.

Abstract: *The loss formula for optical fibers with constant radius of curvature of their axes is derived by expressing the field outside of the fiber in terms of a superposition of cylindrical outgoing waves. In this paper we show that the bending losses of fiber modes can be calculated with the help of curvature-loss formula for slab wave guides and the validity of the result by showing that it is in agreement with the known dependence attenuation from parameters of the slab waveguide and of the LP_{01}-mode of the round step-index fiber.*

Keywords: *bending loss, attenuation coefficient, mode, optical fiber, single-mode fiber.*

Изложенная в литературе теория распространения излучения по оптическим волокнам (ОВ) обычно относится к прямым ОВ. Реальные ОВ имеют изгибы, которые могут носить как систематический, так и случайный характер. Систематические изгибы возникают, например, при скрутке модулей с ОВ в оптическом кабеле (ОК). Случайные изгибы возникают при изготовлении ОК, при их прокладке и монтаже. В зависимости от отношения радиуса изгиба R к радиусу сердцевины r_c различают макро- ($R >> r_c$) и микро-изгибы ($R \sim r_c$).

Любые изгибы ОВ приводят к увеличению затухания, обусловленного излучением части мощности направляемых мод в оболочку ОВ. Затухание резко возрастает с уменьшением радиуса изгиба. Изгибы ОВ могут выполнять и позитивные функции. Они могут использоваться для ввода и вывода излучения через боковую поверхность ОВ без его разрыва, например, при организации служебной связи, для конструирования аттенюаторов и т. п.

Рассмотрим методику расчета коэффициента затухания, обусловленного макроизгибом постоянного радиуса ОВ круглого поперечного сечения со ступенчатым профилем показателя преломления (ППП), основанную на расчете распределений напряженностей электрических полей направляемых мод.

В [1] физический механизм потерь на излучение направляемой моды в оболочку ОВ при макроизгибе объясняется следующим образом. При постоянном радиусе изгиба R фазовые фронты полей направляемых мод вращаются вокруг центра кривизны изгиба C с постоянной угловой скоростью (рис. 1).

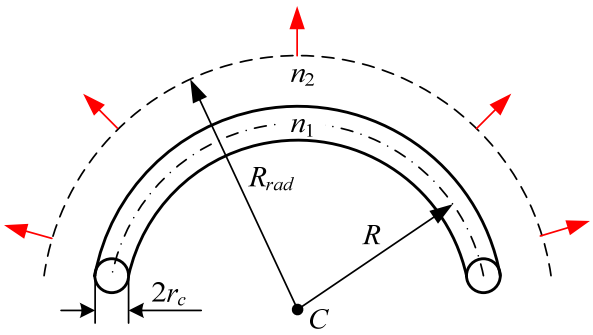


Рисунок 1. Физический механизм потерь на излучение в изогнутом участке ОВ

Поэтому фазовая скорость, параллельная оси ОВ возрастает при увеличении расстояния от центра кривизны C. Поскольку оболочка ОВ имеет постоянный показатель преломления (ПП), фазовая скорость может превышать скорость света в данной среде. Поэтому должен существовать некоторый радиус R_{rad} в плоскости изгиба, при превышении которого поле уже не может направляться ОВ и должно становиться излучающим.

Определим коэффициент затухания α (Нп/м), обусловленный только макроизгибом [1]:

$$\alpha = \frac{1}{L}\frac{P_{rad}}{P_{in}}, \quad (1)$$

где P_{in} – мощность на входе изогнутого участка; P_{rad} – мощность, излученная в оболочку; L – длина изогнутого участка.

В [2, 3] получено выражение для расчета коэффициента затухания α_{lm} направляемой линейно-поляризованной моды LP_{lm} на изогнутом участке ОВ со ступенчатым ППП:

$$\alpha_{lm}(R) = \frac{\sqrt{\pi}U_{lm}^2 e^{-\frac{2}{3}\frac{W_{lm}^3}{r_c^3\beta_{lm}^2}R}}{e_l V^2\sqrt{r_c W^3 R}K_{l-1}(W)K_{l+1}(W)}, \quad (2)$$

где $V = kr_c(n_1^2 - n_2^2)^{0,5}$ – нормированная частота ОВ; $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число; λ – длина волны; n_1 и n_2 – ПП сердцевины и оболочки ОВ; β_{lm} – постоянная распространения направляемой моды LP_{lm} в ОВ; l и m – азимутальный и радиальный порядки моды; e_l – коэффициент; равный 2, если $l = 0$, и равный 1 при $l \neq 0$, $U_{lm} = r_c(n_1^2 k - \beta_{lm}^2)^{0,5}$; $W_{lm} = r_c(\beta_{lm}^2 - n_2^2 k)^{0,5}$ – безразмерные скалярные параметры моды LP_{lm} в сердцевине и в оболочке, являющиеся решениями характеристического уравнения, которое для рассматриваемого ОВ имеет вид:

$$U\frac{J_{l+1}(U)}{J_l(U)} = W\frac{K_{l+1}(W)}{K_l(W)}, \quad (3)$$

где $J_l(x)$ – функция Бесселя первого рода l-го порядка; $K_l(x)$ – модифицированная функция Бесселя второго рода l-го порядка. Отметим, что для любых l и m справедливо:

$$V^2 = U_{lm}^2 + W_{lm}^2. \quad (4)$$

Выражение (2) получено при следующих упрощающих предположениях:

1) радиус оболочки ОВ полагался бесконечно большим;

2) волокно считалось слабонаправляющим, то есть высота ППП $\Delta << n_1$.

Отметим, что для высоты ППП справедливо выражение [1, 4]:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}. \quad (5)$$

Для проведения теоретического исследования в работе было проведено моделирование ОВ с оболочкой из чистого кварцевого стекла и сердцевиной из кварцевого стекла, легированного оксидом германия с концентрацией 3,5 молярных процента. Такое волокно по своим характеристикам близко к известному одномодовому (ОМ) стандартному ОВ марки SMF-28 [4].

На рис. 2 представлены зависимости ПП сердцевины и оболочки моделируемого ОВ от длины волны, рассчитанные по известному уравнению Селлмейера [5]:

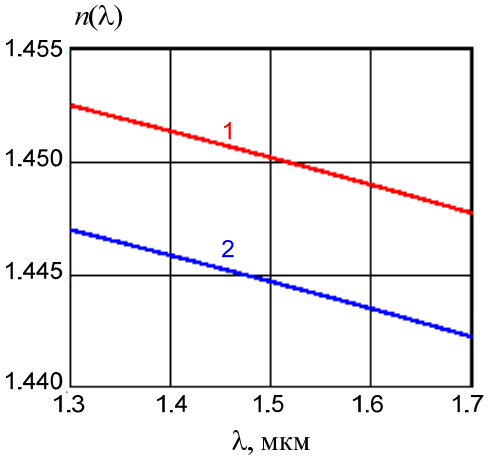


Рисунок 2. Параметры моделируемого ОВ:
1 – ПП сердцевины, 2 – ПП оболочки

$$n^2 - 1 = \sum_{i=1}^{3}\frac{A_i\lambda^2}{(\lambda^2 - \lambda_i^2)}, \quad (6)$$

где A_i и λ_i – эмпирические коэффициенты, значения которых для стекол сердцевины и оболочки приведены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты Селлмейера для стекол сердцевины и оболочки

Состав стекла (в молярных процентах)	A_1	A_2	A_3	λ_1, мкм	λ_2, мкм	λ_3, мкм
100 % SiO_2	0,6961663	0,4079426	0,8974794	0,0684043	0,1162414	9,896161
3,5 % GeO_2, 96,5 % SiO_2	0,7042038	0,4160032	0,9074049	0,0514415	0,1291600	9,896156

Единственной направляемой модой ОМ ОВ является мода LP_{01}. В этом случае $\alpha = \alpha_{01}$ и из (2) можно получить:

$$\alpha = \alpha_{01} = \frac{\sqrt{\pi} U_{01}^2 e^{-\frac{2}{3}\frac{W_{01}^3}{r_c^3 \beta_{01}^2} R}}{4V^2 \sqrt{r_c R W_{01}^3} K_1^2(W_{10})}, \quad (7)$$

где U_{01}, W_{01} – безразмерные скалярные параметры моды LP_{01} в сердцевине и оболочке ОВ; β_{01} – постоянная распространения моды LP_{01}.

В табл. 2 представлены результаты расчета β_{01}, доли η мощности моды LP_{01} в сердцевине ОВ и эффективного показателя преломления моды LP_{01} по выражениям [1]:

$$\beta_{01} = \sqrt{k^2 n_1^2 - \frac{U_{01}^2}{r_c^2}}, \quad (8)$$

$$\eta = \frac{U_{01}^2}{V^2}\left(\frac{W_{01}^2}{U_{01}^2} - \frac{K_0^2(W_{01})}{K_1^2(W_{01})}\right), \quad (9)$$

$$n_{eff} = \frac{\beta_{01}}{k}, \quad (10)$$

где $K_0(x)$, $K_1(x)$ – модифицированные функции Бесселя второго рода 0-го и 1-го порядка. Радиус сердцевины r_c принимался равным 4,1 мкм.

Таблица 2. Параметры моделируемого ОВ

λ, нм	n_1	n_2	NA	β_{01}, 1/мкм	n_{eff}	η, %
1310	1,45231	1,44680	0,012631	6,95387	1,44983	84,0
1480	1,45034	1,44485	0,012607	6,14506	1,44746	78,8
1550	1,44951	1,44402	0,012597	5,86351	1,44647	76,5
1625	1,44859	1,44311	0,012586	5,58869	1,44539	73,9

В табл. 3 и на рис. 3 и 4 представлены результаты расчета по выражению (7) зависимости коэффициента затухания α изогнутого участка рассматриваемого ОВ от длины волны и радиуса изгиба.

Таблица 3. Зависимость α от радиуса изгиба и длины волны

Длина волны λ, нм	**1310**			**1480**			**1550**			**1625**		
Радиус изгиба *R*, мм	8	10	12	8	10	12	8	10	12	8	10	12
Коэффициент затухания α, дБ/м	3,00	0,22	0,02	42,40	6,48	1,01	99,71	19,32	3,82	220,1	53,25	13,15

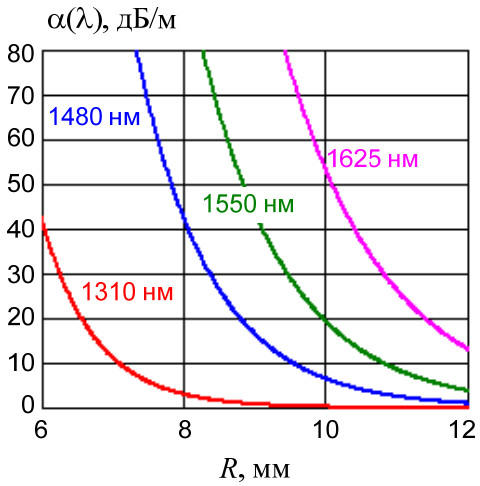


Рисунок 3. Зависимость α от радиуса изгиба при разных длинах волн

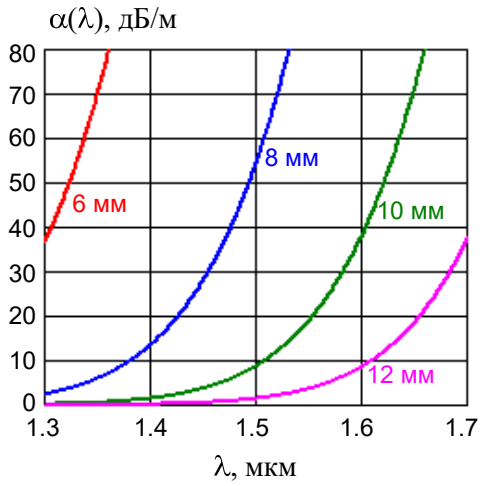


Рисунок 4. Зависимость α от длины волны при разных радиусах изгиба

Из табл. 3 и рис. 3 видно, что с уменьшением радиуса изгиба коэффициент затухания изогнутого участка быстро возрастает. Эти расчеты позволяют оценить допустимый радиус изгиба ОМ ОВ R_a, если заданы число витков N и допустимое возрастание затухания Δa. Величина R_a может быть получена путем численного решения относительно R следующего уравнения:

$$\Delta a = N \cdot (2\pi R) \cdot \alpha_{01}(R), \qquad (11)$$

где $\alpha_{01}(R)$ определяется выражением (7).

На рис. 5 представлено семейство графиков зависимостей допустимого радиуса изгиба от длины волны при разных Δa (расчет произведен при N = 100, r_c = 4,1 мкм).

Из табл. 3 и рис. 3 и 4 видно, что с ростом длины волны α также возрастает. Этот факт лежит в основе рекомендации [6] проводить рефлектометрические измерения волоконно-оптических линий связи для поиска изгибов на двух различных длинах волн.

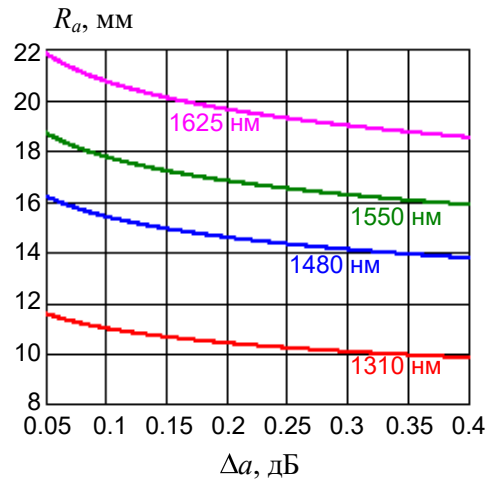


Рисунок 5. Зависимость R_a от допустимого возрастания затухания при разных длинах волн

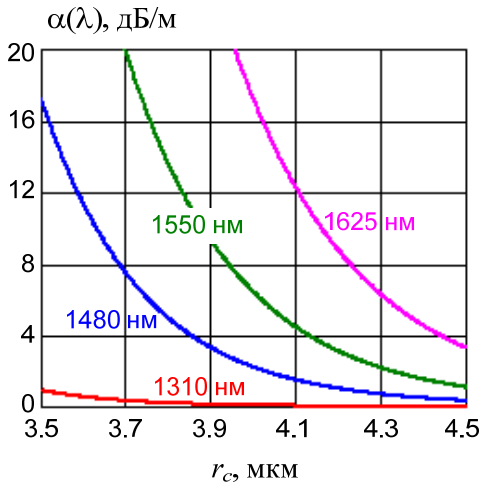


Рисунок 6. Зависимость α от радиуса сердцевины при разных длинах волн

Результаты измерений позволяют идентифицировать изгиб ОВ и определить его параметры. Обычно используются измерения на рабочей длине волны и на длине волны существенно больше рабочей.

В работе также было проведено исследование зависимости α_{01} от радиуса r_c сердцевины ОВ и высоты ППП Δ.

В табл. 4 и на рис. 6 представлены результаты расчета α по выражению (7) для $R = 10$ мм и различных r_c и λ. Видно, что при увеличении r_c коэффициент затухания α уменьшается.

Таблица 4. Зависимость α от радиуса сердцевины ОВ и длины волны

Длина волны λ, нм	**1310**			**1480**			**1550**			**1625**		
Радиус сердцевины r_c, мкм	4	4,25	4,5	4	4,25	4,5	4	4,25	4,5	4	4,25	4,5
Коэффициент затухания α, дБ/м	0,08	0,03	0,01	2,21	0,84	0,34	6,42	2,59	1,09	17,2	7,42	3,29

В табл. 5 и на рис. 7 представлены результаты расчета α при $r_c = 4{,}1$ мкм, $\lambda = 1310$ нм, $n_2 = 1{,}4468$ и различных Δ и R по выражению (7). Расчеты показали, что чем больше высота ППП, тем изгибные потери меньше.

Таблица 5. Зависимость α от высоты ППП и радиуса изгиба

Высота профиля ПП Δ, %	**0,3**			**0,35**			**0,4**		
Радиус изгиба R, мм	6	8	10	6	8	10	6	8	10
Коэффициент затухания α, дБ/м	199,7	41,21	8,78	31,46	3,40	0,38	3,60	0,18	0,01

Для проверки правильности расчетов в работе было проведено экспериментальное исследование, в ходе которого с помощью калиброванных оправок, диаметры которых приведены в табл. 6, создавались изгибы ОМ ОВ и с помощью оптического рефлектометра (ОР) DVP-321 измерялись вносимые ими потери. Схема исследования приведена на рис. 8. Для обеспечения равномерного натяжения волокна и горизонтального положения витка на поверхности оправки в установке использовались небольшие грузики.

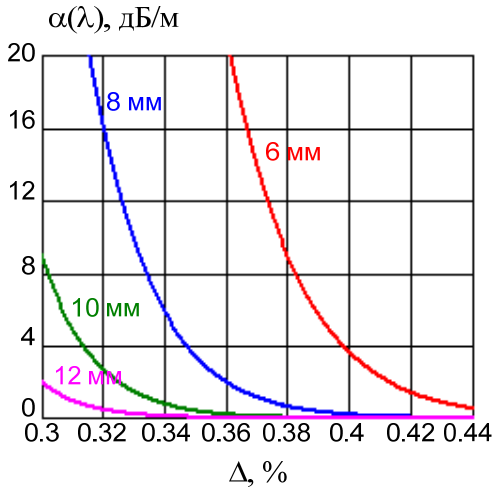


Рисунок 7. Зависимость α от высоты ППП при разных радиусах изгиба

Таблица 6. Диаметры калиброванных оправок

Номер оправки	Диаметр, мм	Номер оправки	Диаметр, мм
1	11,5	5	17,7
2	12,0	6	20,3
3	13,0	7	22,8
4	15,2	8	25,5

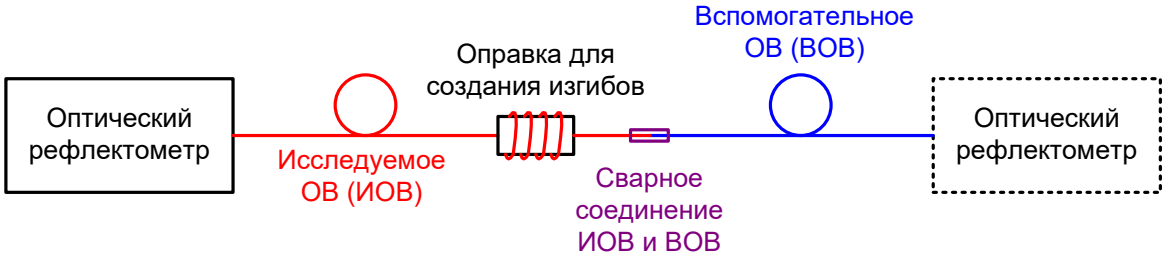


Рисунок 8. Схема экспериментальной установки

В качестве исследуемого ОВ использовалось ОМ ОВ марки SMF-28 производства Corning, параметры которого представлены в табл. 7.

В работе была использована следующая методика исследования:

1. ОР поочередно подключался к экспериментальной установке со стороны исследуемого и вспомогательного ОВ и регистрировались рефлектограммы ОВ в отсутствие изгибов.

2. По зарегистрированным рефлектограммам измерялись потери a_1, вносимые сварным соединением исследуемого и вспомогательного ОВ.

3. Исследуемое волокно подвергалось макроизгибу путем наматывания на оправку N полных витков (360°).

4. ОР поочередно подключался к экспериментальной установке со стороны исследуемого и вспомогательного ОВ и регистрировались рефлектограммы ОВ с макроизгибом. На рис. 9 (см. ниже) представлена одна из зарегистрированных рефлектограмм ОВ с макроизгибом.

5. По зарегистрированным рефлектограммам измерялись суммарные потери a_2, вносимые сварным соединением исследуемого и вспомогательного ОВ и созданным макроизгибом.

6. Рассчитывались потери, вносимые созданным макроизгибом, по выражению:

$$a_{meas} = a_2 - a_1 . \quad (12)$$

7. Определялся коэффициент затухания изогнутого участка исследуемого ОВ по выражению:

$$\alpha_{meas} = \frac{a_{meas}}{2\pi R_b N}, \quad (13)$$

где R_b – радиус оправки.

Таблица 7. Параметры ОМ ОВ SMF-28

Параметр	Значение на длинах волн	
	1310 нм	1550 нм
Максимальный коэффициент затухания, дБ/км	0,34	0,2
Диаметр модового поля, мкм	9,2 ± 0,4	10,4 ± 0,8
Длина волны отсечки, нм	≤ 1260	
Минимальная/минимальная длина волны нулевой дисперсии, нм	1301,5 / 1321,5	
Наклон дисперсионной характеристики на длине волны нулевой дисперсии, пс / (нм^2·км)	0,092	
Диаметр сердцевины типовой, мкм	8,2	
Диаметр оболочки, мкм	125 ± 0,7	
Профиль показателя преломления	ступенчатый	

Измерения в п. 2 и 5 осуществлялись следующим образом:

1. По каждой из двух зарегистрированных рефлектограмм проводилось измерение вносимых потерь методом трех курсоров [7]. Фиксировались результаты измерения a_{11} и a_{12} в п. 2 и a_{21} и a_{22} в п. 5.

2. Рассчитывались потери a_1 и a_2 по следующим выражениям [6, 7]:

$$a_1 = \frac{a_{11} + a_{12}}{2}, \qquad a_2 = \frac{a_{21} + a_{22}}{2}. \quad (14)$$

На рис. 10 (см. ниже) сопоставлены результаты измерений и теоретических расчетов. Видно, что они хорошо согласуются друг с другом.

В результате проведенных исследований установлено, что коэффициент затухания изогнутого участка ОВ:

1) возрастает с увеличением длины волны оптического сигнала;

2) возрастает с уменьшением радиуса изгиба;

3) возрастает с уменьшением радиуса сердцевины оптического волокна;

4) возрастает с уменьшением высоты профиля показателя преломления.

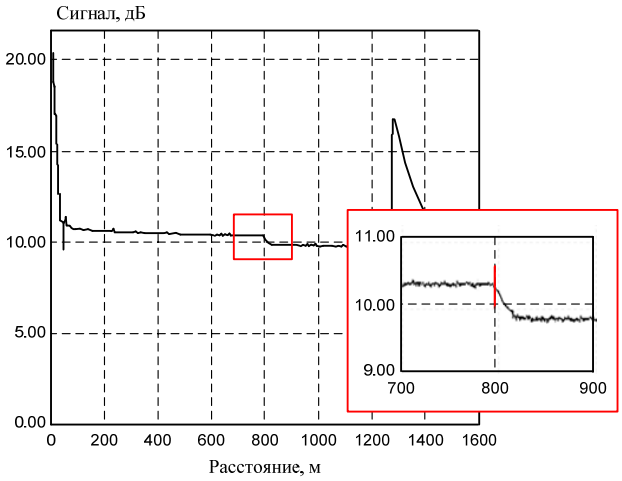


Рисунок 9. Рефлектограмма ОВ с макроизгибом радиуса R = 10,15 мм, зарегистрированная на длине волны 1550 нм при длительности зондирующего импульса 200 нс

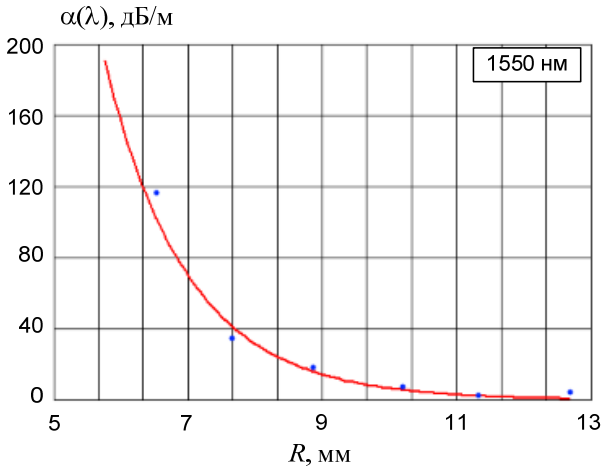


Рисунок 10. Зависимость α от радиуса изгиба: теоретически рассчитанная (красная кривая) и экспериментально измеренная (синие точки)

Список используемых источников

1. Снайдер А. Теория оптических волноводов; пер. с англ. / Под ред. Е.М. Дианова, В.В. Шевченко. М.: Радио и связь. 1987. 656 с.

2. Marcuse D. Curvature Loss Formula for Optical Fibers // J. Opt. Soc. Am. Vol. 66. Iss. 3 (March 1976). PP. 216–220.

3. Wang Q., Farrell G., Freir T. Theoretical and Experimental Investigations of Macro-Bend Losses for Standard Single Mode Fibers // Optics Express. Vol. 13. Iss. 12 (13 June 2005). PP. 4476–4484.

4. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. М.: Вэлком. 2003. 288 с.

5. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов: пер. с англ. / Под ред. И.Н. Сисакяна. М.: Мир. 1984. 512 с.

6. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС. 1999. 671 с.

7. Былина М.С., Глаголев С.Ф., Кочановский Л.Н., Пискунов В.В. Измерение параметров волоконно-оптических линейных трактов: учеб. пособие, СПбГУТ. СПб., 2002. 82 с.

РЕЖИМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЧ-КОЛЕБАНИЯМИ В ТРАНЗИСТОРНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ КЛЮЧЕВЫХ УСТРОЙСТВАХ

А.А. Ганбаев[1*], **В.А. Филин**[1]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация
*Адрес для переписки: asif.ganbayev@gmail.com

Информация о статье
УДК 621.375.026
Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Ганбаев А.А., Филин В.А. Режимы возбуждения и методы управления ВЧ-колебаниями в транзисторных резонансных ключевых устройствах // Труды учебных заведений связи. 2017. Том 3. № 2. С. 60–67.

Аннотация: *Рассмотрены методы возбуждения высокочастотного управляемого резонансного инвертора тока, а также описаны методы его модуляции. Приведены временные диаграммы на нагрузке инвертора в режиме автоколебаний. Исследована работа инвертора при использовании PSPICE модели нитрид-галлиевых транзисторов с учетом реальных характеристик и исследованы методы модуляции при котором линейность модуляционной характеристики сохраняется. Получен высокий (более 90 %) КПД инвертора.*

Ключевые слова: *управляемый резонансный инвертор тока, широтно-импульсная модуляция, внешнее возбуждение, автоколебания, коэффициент полезного действия.*

DRIVE MODES AND METHODS OF CONTROLLING HF OSCILLATIONS IN TRANSISTOR RESONANT SWITCHING MODE DEVICES

A. Ganbayev[1], **V. Filin**[1]

[1]The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunication, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info
Article in Russian

For citation: Ganbayev A., Filin V. Drive Modes and Methods of Controlling HF Oscillations in Transistor Resonant Switching Mode Devices // Proceedings of Educational Institutions of Communication. 2017. Vol 3. Iss. 2. PP. 60–67.

Abstract: *Methods of driving a controlled current fed resonant inverter are considered, and methods for modulation are also given. Time diagrams are presented for the load of inverter in the self-oscillation regime. The work of inverter was investigated using the PSPICE model of nitride-gallium transistors with considering the real characteristics and modulation methods are investigated in which the linearity of the modulation characteristic is preserved. A high efficiency of the inverter (more than 90 %) is obtained.*

Keywords: *controlled current fed resonant inverter, pulse-width modulation, external excitation, self-oscillation, drain efficiency, power added efficiency.*

Вводные замечания и постановка задачи

Энергетически эффективные режимы генерирования, усиления и преобразования мощности электрических колебаний в последнее десятилетие завоевывают все более высокие частоты (ВЧ). Известны разработки ключевых усилителей мощности (например, функционирующих в режиме Е с КПД более 85 %) для рабочих частот, превышающих 3 ГГц [1]. Эти достижения обусловлены в первую очередь появлением новых видов полевых и биполярных транзисторов, обладающих существенно более высокими энергетическими и скоростными характеристиками. В значительной мере эти свойства проявляются в нитрид-галлиевых полевых транзисторах (GaN) на гетеропереходах [2]. Проводятся широкие исследования по разработке методов и схем усиления радиочастотных модулированных колебаний на основе высокоэффективных GaN-транзисторных ключевых усилителей. Разрабатываются также промышленные ВЧ генераторы для нагрева металла и плазмы, DC-DC преобразователи с предельно высокой частотой переключения, ориентированные на применение GaN-транзисторов. Основным ключевым режимом на ВЧ и СВЧ остается мягкий режим переключения класса Е [2].

На сегодняшний день практически не решена проблема линейного управления мощностью ключевых генераторов и преобразователей класса Е при помощи простых и надежных схемных решений, не снижающих общий КПД и не ухудшающих массогабаритные показатели устройства. Высокочастотный ключевой режим колебаний может также быть получен в резонансном инверторе тока (РИТ), классическая мостовая схема которого приведена на рис. 1.

Практические схемные решения для РИТ с надежной защитой от перенапряжений на транзисторах и эффективным управлением мощностью колебаний фактически отсутствуют. Поэтому актуальным является исследование методов возбуждения ключевых режимов и управления ими в новой схеме управляемого резонансного инвертора тока (в управляемом дроссельном ключевом генераторе).

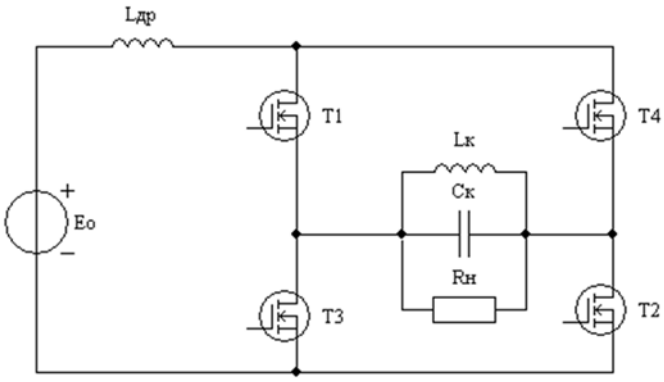


Рисунок 1. Классическая схема РИТ

Модуляция при внешнем возбуждении управляемого РИТ

Как показано в [3] исследуемая схема управляемого инвертора тока имеет линейную модуляционную характеристику. Известно, что схема классического РИТ является дуальной резонансному инвертору напряжения и обладает суще-

ственно более высокой рабочей частотой по сравнению с резонансным инвертором напряжения, поскольку паразитные выходные емкости транзисторов моста суммируются с емкостью параллельного резонансного контура и не происходит потерь энергии, т. к. переключения происходят при нулевых напряжениях на транзисторах.

Но практического применения классический РИТ не нашел из-за возможных перенапряжений на дросселе и транзисторах при нештатном изменении нагрузки, что приводит к аварийному режиму. В исследуемой схеме управляемого РИТ с помощью диодов устранена возможность перенапряжений на транзисторах моста и на дросселе. В схему также введен дополнительный ключевой усилитель класса D, на выходе которого формируются импульсы, модулированные по длительности и линейно управляющие мощностью ВЧ колебаний. На рис. 2 показана обобщенная схема управляемого РИТ, построенная в программе ADS при использовании реальных моделей нитрид-галлиевых (GaN) транзисторов [4, 5].

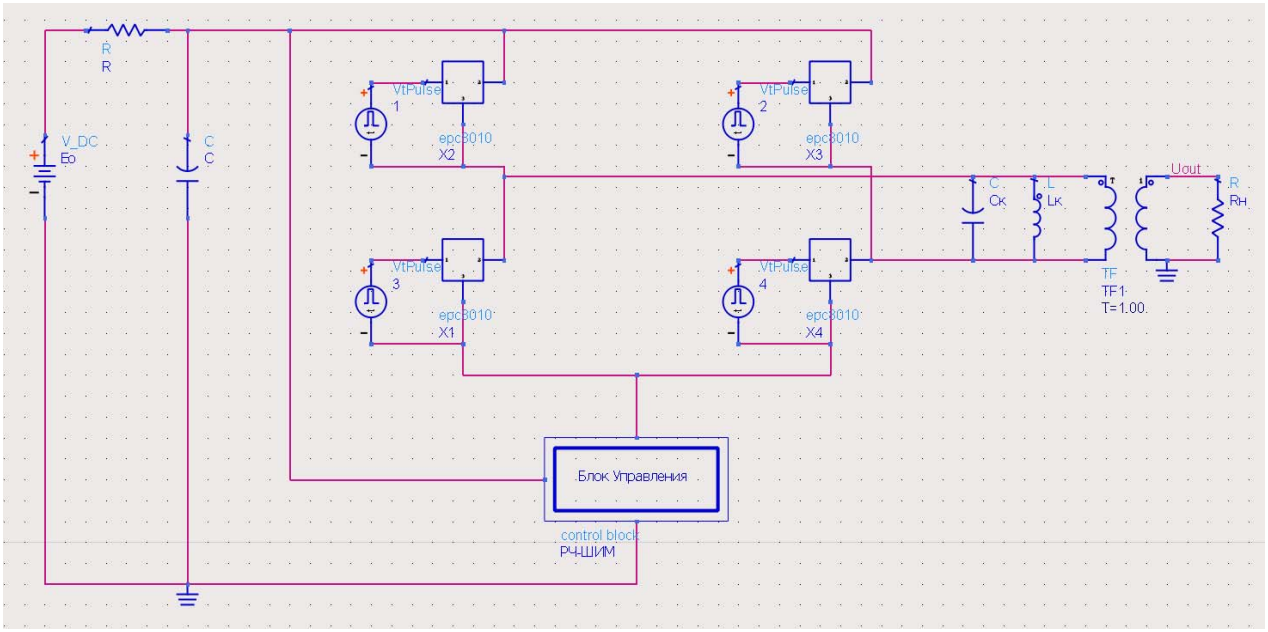


Рисунок 2. Обобщенная модель управляемого РИТ

При увеличении частоты переключения транзисторов моста в управляемом РИТ (рис. 2) до сотен мегагерц потребуется широкополосная ШИМ, реализовать которую классическим методом невозможно. Поэтому приходится использовать другие виды модуляции: дельта-сигма (ΔΣ) модуляцию, многоканальную ШИМ, радиочастотную ШИМ и т. д.

Радиочастотную ШИМ (РЧ-ШИМ) впервые предложил американский ученый Рааб в 1973 году [6–8]. На данный момент ее все чаще используют для модуляции ВЧ ключевых усилителей мощности и генераторов. По сравнению с дельта-сигма модуляцией в РЧ-ШИМ отсутствуют ВЧ шумы квантования. Способ получения модулированных импульсов при РЧ-ШИМ приведен на рис. 3.

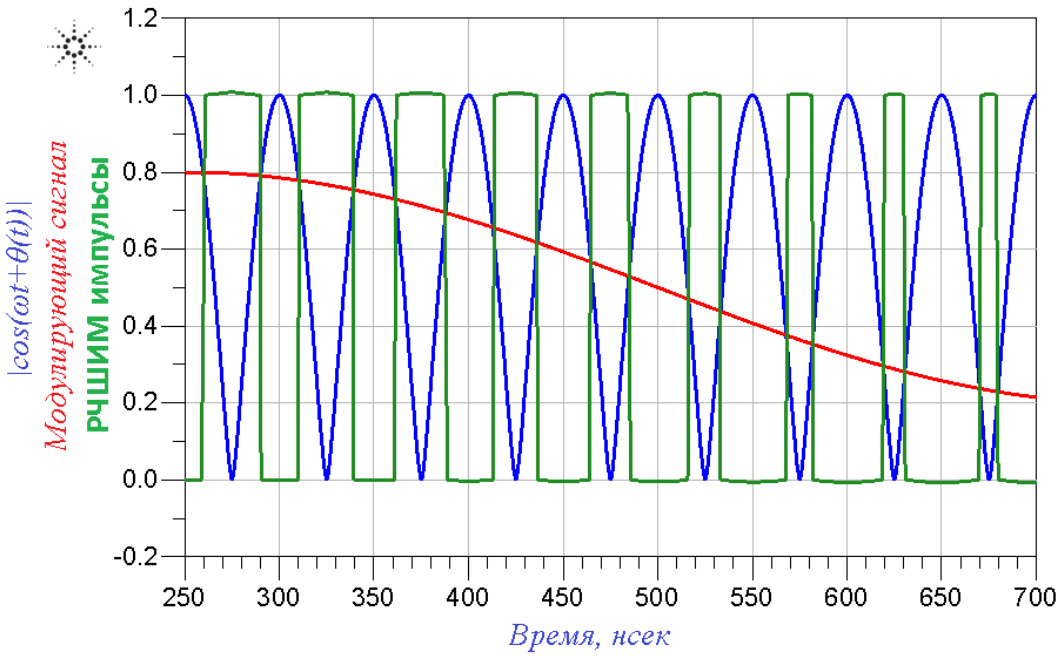


Рисунок 3. Временная диаграмма импульсов при РЧШИМ

Также для управляемого РИТ можно применить многоканальную ШИМ. Принцип многоканальной ШИМ заключается в увеличении эквивалентной тактовой частоты ШИМ на количество каналов, подключенных параллельно с задержкой каждого канала на k/N, где N – число каналов, k – номер канала. На рис. 4 показана временная диаграмма импульсов в каждом канале для 8-канального ШИМ.

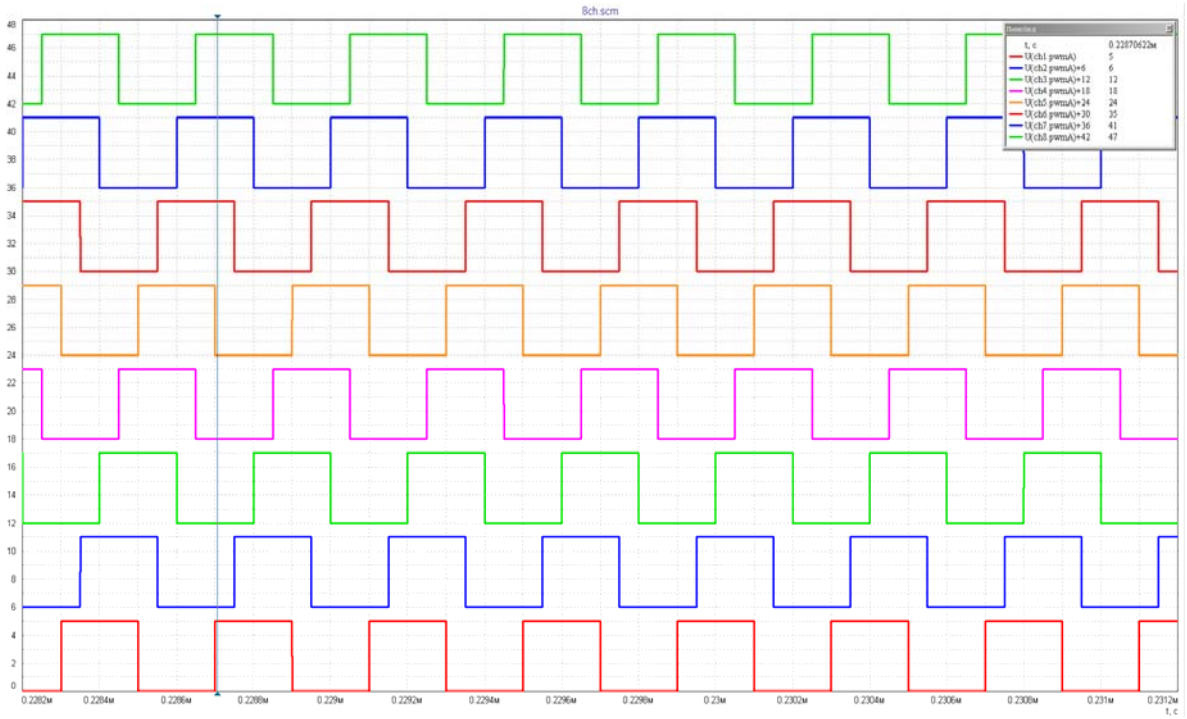


Рисунок 4. Временная диаграмма импульсов при многоканальной (8-канальной) ШИМ

На рис. 5 представлен модулированный сигнал на нагрузке и его спектр при использовании 4-канальной ШИМ. Резонансный контур настроен на частоту 20 МГц, тактовая частота каждого канала ШИМ составляет 10 МГц, частота модулирующего сигнала – 5 МГц.

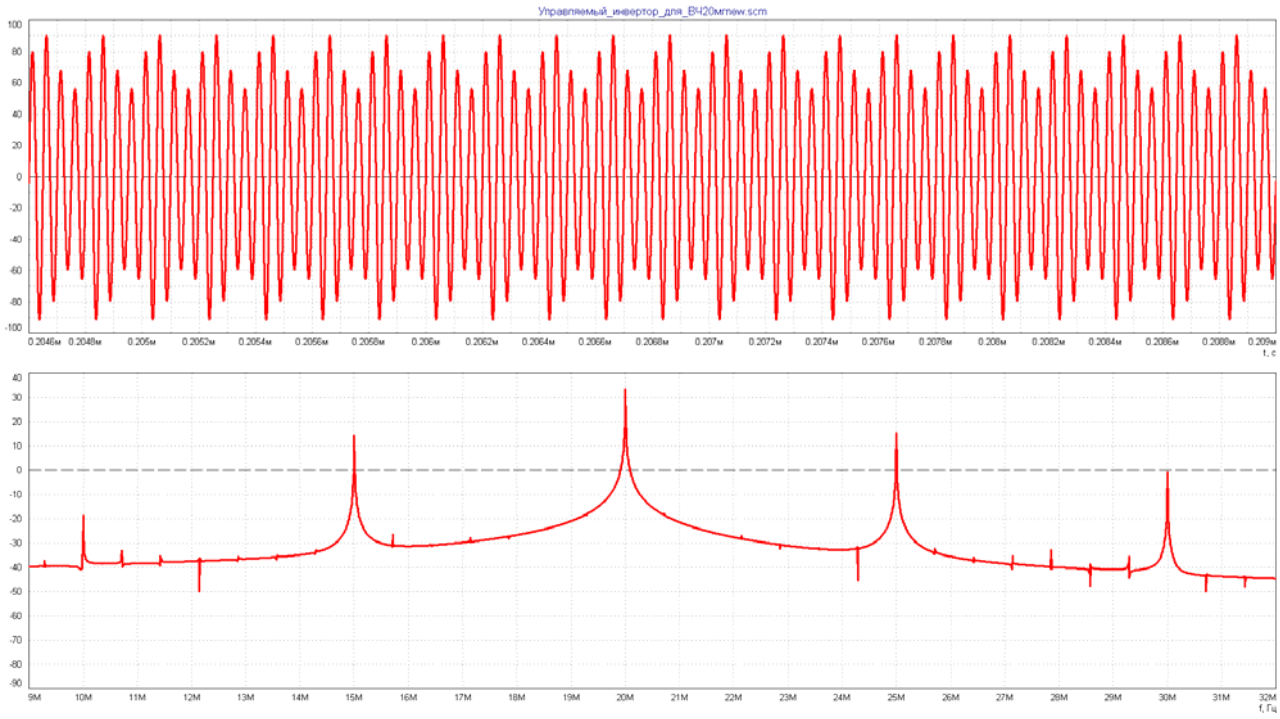


Рисунок 5. Временная диаграмма и спектр АМ сигнала на нагрузке

Режим внешнего возбуждения транзисторов моста РИТ наиболее целесообразно использовать в радиосвязи, где нагрузка характеризуется постоянством и стабильностью [9, 10].

Режим автоколебаний в управляемом РИТ

Современные промышленные генераторы требуют больших мощностей и высоких частот колебаний в нагрузке. Технологические процессы (нагрев металлов, плазмы и др.) при этом характеризуются существенным изменением нагрузки. Однако при нестабильной нагрузке обеспечить энергетически эффективный режим переключения транзисторов в нуле напряжения, используя фиксированное внешнее возбуждение, невозможно. В этих случаях целесообразно использовать режим автоколебаний в управляемом РИТ, при котором изменение нагрузки приводит к автоматической подстройке частоты автоколебаний, обеспечивающей режим переключения в нуле напряжения.

На рис. 6 приведена упрощенная математическая модель управляемого резонансного инвертора тока в режиме автоколебаний для работы на частоте 10 МГц.

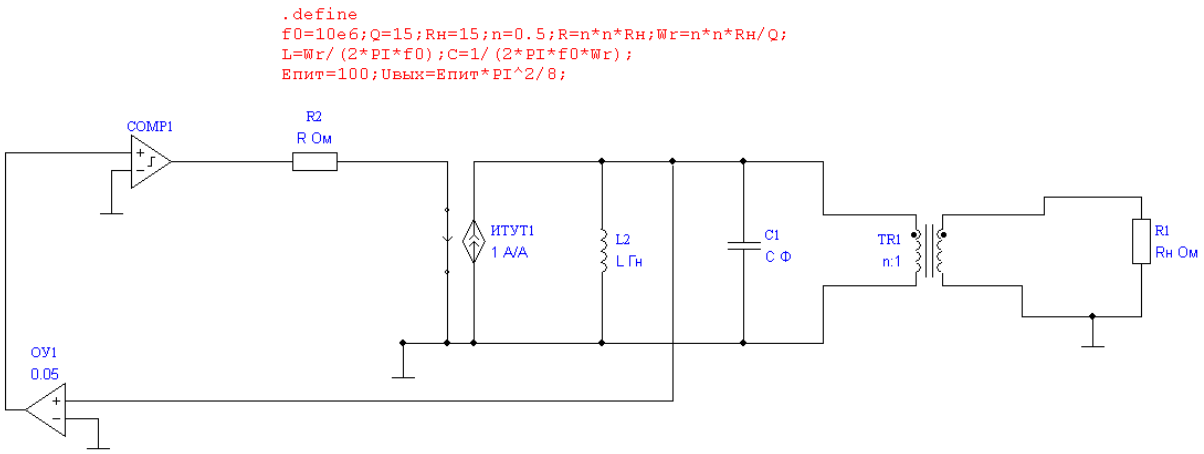


Рисунок 6. Упрощенная модель РИТ в режиме автоколебаний

В этой модели на выходе компаратора COMP1 формируется прямоугольный ток в диагонали моста (см. рис. 1 и 2). Постоянный управляющий ток соответствует установившемуся значению тока дросселя, задаваемого источником питания и нагрузкой. Возбуждение автоколебаний происходит при выполнении условия баланса фаз и амплитуд.

На рис. 7 приведены временные диаграммы тока в диагонали моста и напряжения на нагрузке в установившемся автоколебательном режиме при добротности контура $Q = 0{,}7$, а также спектр напряжения. Аналогичные кривые и их спектры для добротностей нагруженного контура $Q = 1{,}0$ и $Q = 5{,}0$ приведены, соответственно, на рис. 8 и 9.

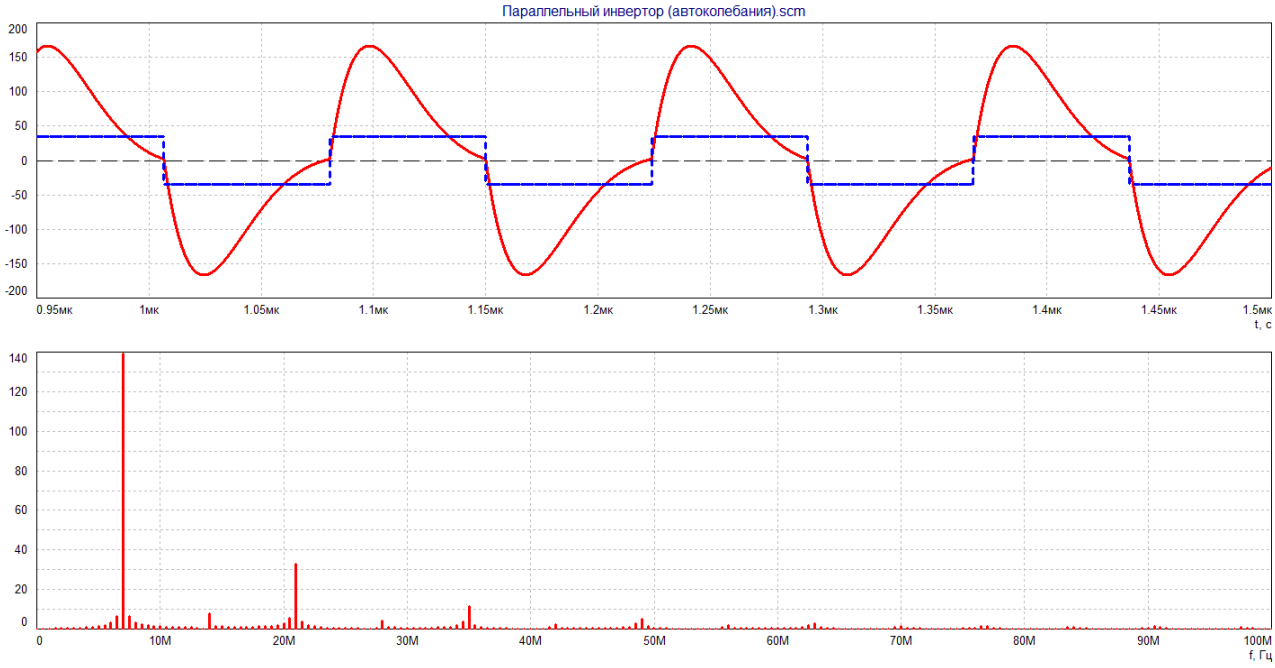


Рисунок 7. Временные диаграммы тока в диагонали моста и напряжения на нагрузке и спектр при добротности $Q = 0{,}7$

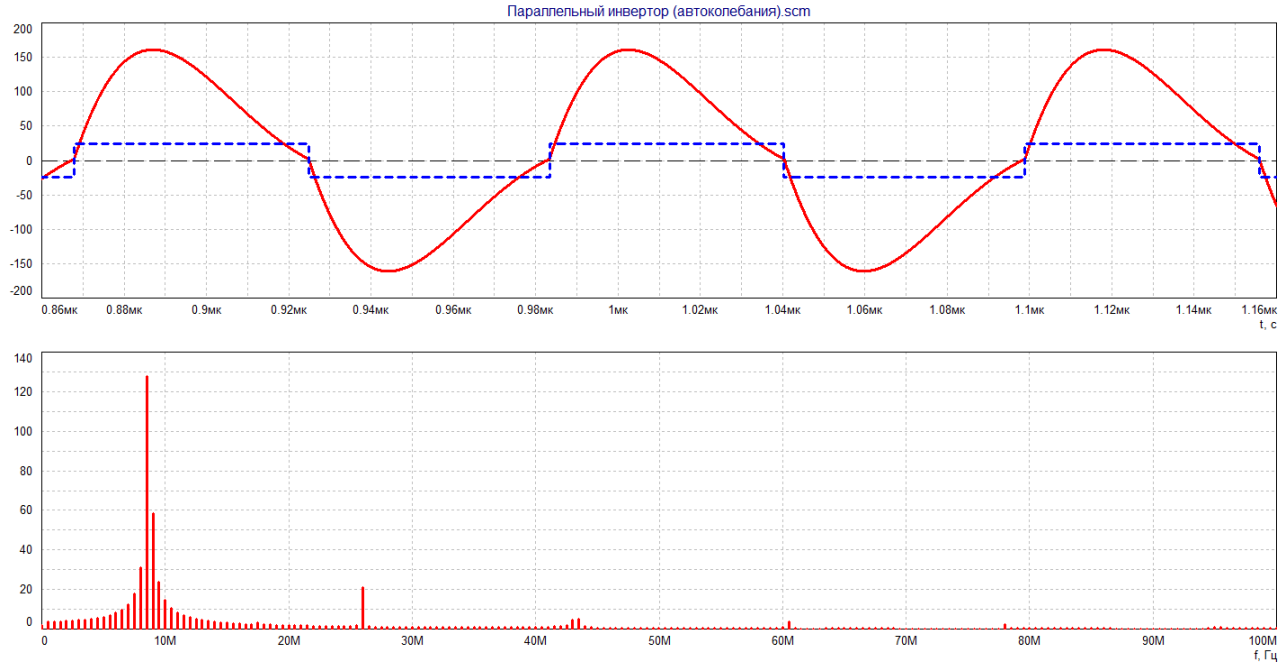


Рисунок 8. Временные диаграммы тока и напряжения на нагрузке (и спектр) при добротности $Q = 1{,}0$

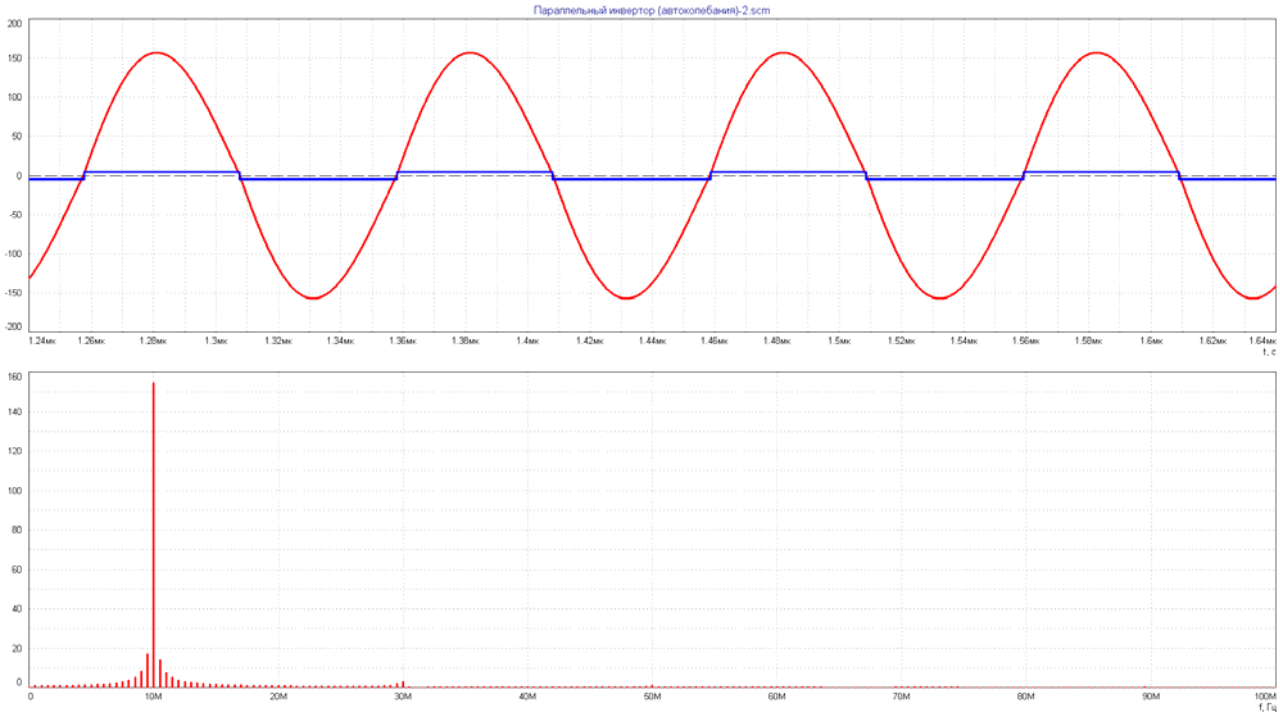


Рисунок 9. Временные диаграммы тока и напряжения на нагрузке (и спектр) при добротности $Q = 5{,}0$

Таким образом, по приведенным диаграммам на рис. 7–9 можно увидеть, что при минимальной добротности $Q = 0{,}7$, а также при добротностях $Q = 1$, $Q = 5$ режим переключения транзисторов моста всегда происходит при нулевом значении напряжения на транзисторе. При малых добротностях частота автоколебаний смещается в область более низких значений от заданной резонансной ча-

стоты контура, подстраиваясь под заданную нагрузку. Напряжение в нагрузке при этом становится несинусоидальным, но при этом сохраняется важное свойство автогенератора в ключевом режиме: переключения происходят в нуле напряжения на транзисторах моста.

Был также рассчитан коэффициент полезного действия (КПД) для управляемого РИТ в программе Advanced Design Systems (ADS), используя SPICE-модели с реальными характеристиками нитрид-галлиевых транзисторов. Для рабочей частоты 10 МГц и добротности нагруженного контура Q = 5 КПД составил 98 % при мощности в нагрузке равной 420 Ватт.

Заключение

Предложенная схема управляемого РИТ может работать как в режиме внешнего возбуждения, так и в режиме автоколебаний. Схема является высокочастотной, а также позволяет получать высокий КПД, при высоких мощностях. Модуляционная характеристика является линейной и позволяет использовать в качестве управления разные виды модуляции.

Список используемых источников

1. Крыжановский В.Г. Транзисторные усилители с высоким КПД. Донецк: АПЕКС. 2004. 448 с.

2. Grebennikov A., Sokal N., Franco M. Switchmode RF Power Amplifiers. Elsevier Inc. 2012. 448 p.

3. Филин В.А., Ганбаев А.А. Моделирование и анализ характеристик управляемого резонансного инвертора тока на нитрид-галлиевых транзисторах // «Неделя науки 2016». Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций: материалы научно-практической конференции с международным участием. СПб: Изд-во СПбПУ. 2016. С. 15–17.

4. Артым А.Д. Усилители класса D и ключевые генераторы в радиосвязи и радиовещании. Москва: Радио и связь. 1980. 209 с.

5. Артым А.Д. Повышение эффективности радиопередающих устройств. М.: Радио и связь. 1987. 176 с.

6. Bo Shi, Siew Weng Leong. Pulse-Width Modulation for Switching Mode Power Amplifiers. Singapure: Institute for Infocomm Research. 2015.

7. Raab F. Radio Frequency Pulse-Width Modulation // IEEE Trans. Comm. Aug. 1973. Vol. COM-21. Iss. 8. PP. 958–966.

8. Raab F. Class-D Power Amplifier with RF Pulse-Width Modulation // Dig. IEEE Micro w. Theory Tech. Sym. June 2010. PP. 924–927.

9. Филин В.А., Ганбаев А.А. Анализ методов модуляции ВЧ-колебаний в ключевых генераторах // Труды учебных заведений связи. 2016. Т. 2. № 2. С. 39–44.

10. Филин В.А., Ганбаев А.А. Применение дельта-сигма модуляции в ключевых усилителях мощности // Труды учебных заведений связи. 2016. Т. 2. № 3. С. 78–83.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА БАЗЕ СВЕТОДИОДОВ ВИДИМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

И.В. Гришин[1*], В.А. Хричков[1], Т.Р. Ялунина[1]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация
*Адрес для переписки i.v.grischin@gmail.com

Информация о статье
УДК 621.3.052.9
Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Гришин И.В., Хричков В.А., Ялунина Т.Р. Перспективы развития беспроводных систем передачи данных на базе светодиодов видимого излучения // Труды учебных заведений связи. 2017. Том 3. № 2. С. 68–76.

Аннотация: *В настоящее время технология передачи данных с использованием видимого света рассматривается как одно из возможных решений надвигающейся проблемы кризиса спектра радиочастот. Данная технология позволяет совмещать высокие показатели энергоэффективности с защищенностью и высокими скоростями передачи данных. В статье исследуется возможность внедрения беспроводных систем передачи данных на базе светодиодов видимого излучения, а также приводится расчет их пропускной способности.*

Ключевые слова: *системы передачи при помощи видимого света, технология VLC, Li-Fi.*

WIRELESS DATA TRANSMISSION SYSTEMS BASED ON VISIBLE LIGHT EMITTING DIODS: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

I. Grishin[1], V. Hrichkov[1], T. Yalunina[1]

[1]The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunication, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info
Article in Russian

For citation: Grishin I., Hrichkov V., Yalunina T. Wireless Data Transmission Systems Based on Visible Light Emittig Diods: Challenges and Opportunities // Proceedings of Educational Institutes of Communication. 2017. Vol. 3. Iss. 2. PP. 68–76.

Abstract: *Currently, the technology of data transmission using visible light is considered as one of the possible solutions to the impending problem of radio frequencies spectrum crisis. Visible light communications allow combine high energy efficiency with security and high data transmission speeds. The article explores the possibility of introducing data transmission technology with the help of visible light, and also calculates the throughput of such networks.*

Keywords: *transmission systems using visible light, VLC technology, Li-Fi.*

С ростом популярности смартфонов потребность в беспроводном трафике данных растет в геометрической прогрессии. В связи с этим надвигается кризис спектра радиочастот (РЧ), т. к. требования к скорости передачи данных продолжают расти и, несмотря на развитие технологий в области увеличения эффективности использования спектра, ожидается, что спрос трафика будет много больше допустимой пропускной способности.

Поскольку спектр РЧ ограничен и, к тому же, весьма дорог, в настоящее время активно изучаются новые методы беспроводной передачи данных. Одним из таких направлений являются оптические беспроводные сети, которые предлагают значительные преимущества в сравнении с радиосетями. Оптический диапазон спектра электромагнитных волн обширен и включает в себя: инфракрасное излучение, видимый свет и ультрафиолетовое излучение. Частным случаем реализации оптических беспроводных сетей являются системы передачи видимым светом (СПВС). Технология передачи данных посредством светодиодов видимого излучения нова и представляет собой вполне реальный метод решения проблемы кризиса спектра РЧ или, по крайней мере, его смягчение. К тому же, существует готовая инфраструктура для развертывания таких сетей, ведь светодиоды уже интегрированы почти в каждый дом. А проблема транзитных соединений может быть решена с помощью существующей технологии PLC (от англ. Power Line Communication).

Необходимо также отметить, что сигнал в СПВС может занимать безлицензионные длины волн – от 380 нм до 750 нм. Общий ресурс возможных частот видимого спектра – 390 ТГц, что в 6,5 тысяч раз больше, чем весь спектр частот радиосвязи (около 60 ГГц). Высокие скорости передачи могут реализовываться за счет использования недорогих внешних интерфейсов с коммерчески доступными светодиодами. Кроме того, до тех пор, пока выполняются правила техники безопасности для глаз, СПВС не несут вреда здоровью.

Еще одним достоинством таких сетей является их защищенность. В связи с тем, что свет не распространяется через непрозрачные объекты и стены, СПВС могут быть заключены внутри помещений. Это устраняет опасения по поводу перехвата информации. Та же способность оптического сигнала может быть использование для исключения помех между соседними сотами. К тому же, так как оптическое излучение не мешает другим электромагнитным волнам, к СПВС не чувствительно электрооборудование, что обеспечивает безопасную передачу данных в районах, где электромагнитное излучение запрещено или нежелательно. К таким местам относятся авиация, больницы, здравоохранение, нефтяные и атомные электростанции и др.

В прошлом, значительную выгоду в беспроводной мобильной связи можно было получить сокращением межсотового расстояния. За последние 25 лет с помощью уменьшения размера сот спектральная эффективность сети была увеличена на два порядка. В последнее время распространены гетерогенные сети, то есть сети, состоящие из разного размера сот: микро, пика, фемто и др. Фемтосоты работают на коротком расстоянии, используя низкий уровень мощ-

ности излучения, в связи с чем имеют малую стоимость. Развертывание фемтосот благоприятствует повторному использованию частот и, следовательно, увеличивает пропускную способность на единицу площади в пределах системы. Тем не менее, несогласованное развертывание малых сот также вызывает дополнительное взаимодействие и внутрисотовые помехи, что накладывает ограничение на размещение этих базовых станций, так как иначе повторное использование частот может компенсировать выгоду от использования фемтосот.

Однако технология использования фемтосот может быть легко применена в СПВС для того, чтобы устранить помехи, созданные путем тесного повторного использования спектра РЧ в гетерогенных сетях. Оптические фемтосоты (ОФС) не мешают работе соседних ячеек. ОФС не только улучшают покрытие внутри помещений, но они, т. к. не генерируют помехи для соседних сот, способны повысить пропускную способность беспроводной связи РЧ сетей.

ОФС позволяют чрезвычайно плотно использовать повторные частоты благодаря свойствам световых волн. Охват каждой отдельной ячейки ограничен, а стены позволяют системе предотвращать помехи между соседними сотами. Это удовлетворят необходимость развертывания нескольких точек доступа в закрытом пространстве, обеспечивая повсеместное покрытие в дополнение к почти равномерному освещению.

Технологию СПВС можно использовать как поверх основного освещения, так и в дополнение к нему, например, только в рабочей зоне. При втором способе реализации технологии не требуется расчета межсимвольной интерференции, возникающей вследствие наложения сигналов от соседних источников излучения. Однако при развертывании СПВС по всей площади необходим точный расчет расположения источников, с целью исключения негативного воздействия взаимных влияний.

Предполагается, что СПВС будут нацелены на предоставление тех же услуг, что и существующие на сегодняшний день беспроводные сети доступа Wi-Fi. Однако рассматриваемая технология не сможет полностью их вытеснить, потому как имеет множество недостатков, к которым главным образом относятся невозможность функционирования сетей при выключенном свете, непроходимость световых потоков через непрозрачные объекты (что, с другой стороны, является и преимуществом СПВС) и многое другое, и не сумеет удовлетворить все достоинства систем передачи посредством РЧ. Поэтому свое место СПВС могут найти в качестве дополнения к существующим сетям и могут быть развернуты в рамках гетерогенной сети, включающей как системы передачи видимым светом, так и радиоволнами.

Например, нисходящий поток может быть организован при помощи видимого света, а восходящий – с использованием радиочастот. Это позволит реализовать беспроводные точки доступа в полнодуплексном режиме. Такие сети найдут применение, по большей части, в общественных местах, где большую роль играет достаточная пропускная способность систем передачи (в читальных залах, в залах ожидания аэропортов и вокзалов, в кафе и торговых центрах).

Благодаря ограниченности охвата световых волн появляется возможность создавать большое количество ОФС на одной площади, что ведет к дополнительному увеличению пропускной способности одной соты.

Выход в интернет может быть реализован посредством технологии PLC. К адаптеру PLC будет подключен приходящий в помещение по витой паре сигнал, через сеть сигнал придет на источники света, в каждом из которых будет стоять демодулятор, а также схема модулирования сигнала и разнесения на несущие (при использовании ламп с несколькими светодиодами, излучающими на разных длинах волн). На устройства сигнал с источников излучения будет поступать с помощью небольшого приемника, который будет подключен через USB-порт. Главным элементом приемника является фотодиод (преобразующий оптическое излучение в электрический сигнал), используемый совместно с оптическими фильтрами для разных несущих частот. На телефон сигнал может поступать непосредственно, без использования дополнительных приемников, так как он и так имеет встроенный фотодиод, а обработка сигнала может быть полностью осуществлена в телефоне с помощью соответствующего приложения. Однако так как в телефонах не встроены оптические фильтры, необходимо, чтобы передача осуществлялась либо на одной несущей, либо на многих несущих передавался один и тот же сигнал. В таком случае, при подключении к сети, во временной интервал, отведенный под передачу для сотового устройства, источник будет передавать только одну последовательность бит.

Передача на нескольких несущих может осуществляться при помощи использования RGB-источников излучения. Физически это три светодиода (красный, зеленый, синий) под общей линзой. Принцип их работы основывается на том, что при одновременном излучении на трех длинах волн, соответствующих указанным выше цветам, человеческий глаз воспринимает излучение как белое. Данный тип источников дает возможность передавать информацию параллельно на каждой несущей и таким образом увеличить пропускную способность системы, которая будет складываться из полос пропускания синего, зеленого и красного светодиодов.

Однако передача информации на трех несущих порождает проблему восприятия освещения человеческим глазом, ведь последовательности бит, передаваемых светодиодами, не одинаковы, поэтому в каждый момент времени оттенок суммарного излучения будет иным (табл. 1) и это может приносить человеку дискомфорт и, в худшем случае, негативно влиять на здоровье глаз.

Таблица 1. Зависимость суммарного излучения от последовательности бит в каждый момент времени

Последовательность бит (RGB)	0 0 0	0 0 1	0 1 0	0 1 1	1 0 0	1 0 1	1 1 0	1 1 1
Результирующее излучение								

Для того чтобы определиться, будет ли человеческий глаз замечать изменение оттенка освещения или нет, в программе MathCad была смоделирована

система передачи на трех длинах волн с двумя возможными состояниями для каждой. Для разных скоростей передачи были сняты показания с частотой инерционности глаза, которая достигает 80 Гц [1].

Согласно результатам моделирования, с увеличением частоты мерцания усреднение результирующего излучения становится все точнее и, начиная с 50 кГц, является практически константой (табл. 2).

Таблица 2. Восприятие изменения цветопередачи при различной частоте пульсаций

Частота пульсаций	Моменты времени, фиксируемые глазом								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
100 Гц									
500 Гц									
1 кГц									
50 кГц									
1 МГц									

В связи с этим можно сказать, что человек благодаря инерционным свойствам глаза даже при относительно низких скоростях не будет замечать изменения цветопередачи.

Для организации восходящего потока оптимальным вариантом является использование радиочастот, так как передавать сигнал от абонента на иной длине волны видимого спектра затруднительно (необходима большая оптическая мощность, что сложно реализуемо и не практично), а использовать ИК-спектр – небезопасно. Поэтому PLC-адаптер можно дополнить приемником РЧ. И таким образом организовать гетерогенную сеть СПВС-РЧ.

Исходя из характеристик беспроводных сетей доступа Wi-Fi, представленных в табл. 3, можно поставить задачи перед исследуемой технологией СПВС. Имеет смысл разработка беспроводной системы передачи с параметрами, как минимум, не хуже существующих.

Следует сказать, что наиболее используемым на сегодняшний день является стандарт 802.11g со скоростью передачи 54 Мбит/с. Предельных скоростей достигает стандарт 802.11ac: 3,3 Гбит/с (с использованием технологии MIMO 4×4) или 6,7 Гбит/с (с использованием технологии MIMO 8×8). Однако необходимо учитывать, что пропускная способность ограничивается провайдером, предоставляющим доступ в интернет, поэтому такие высокие скорости имеют место, по большей части, в корпоративных, но не в домашних сетях.

Таким образом, на данный момент максимально возможная скорость в беспроводных сетях доступа Wi-Fi в одном канале достигает 866 Мбит/с. Поэтому можно сформировать условие, что исследуемая система передачи на базе светодиодов видимого излучения должна обеспечивать скорости передачи не менее 1 Гбит/с.

Таблица 3. Технические данные стандартов беспроводных сетей доступа Wi-Fi

Стандарт	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n	802.11ac
Полоса частот, МГц	20			20/40	20/40/80/160
Модуляционные схемы	BPSK, DQPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM+OFDM, CDMA/CA			BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM +OFDM, CDMA/CA	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
Пиковая скорость, Мбит/с	54	11	54	150 (до 4 каналов)	866 (до 8 каналов)
Несущие частоты, ГГц	3,7/5,0	2,4	2,4	2,4–2,5/5,0	5,0
Режим Передачи данных	полудуплекс (временное разделение восходящего и нисходящего потоков)				
Радиус действия, м	< 100				

В общем виде СПВС можно представить следующим образом (рис. 1).

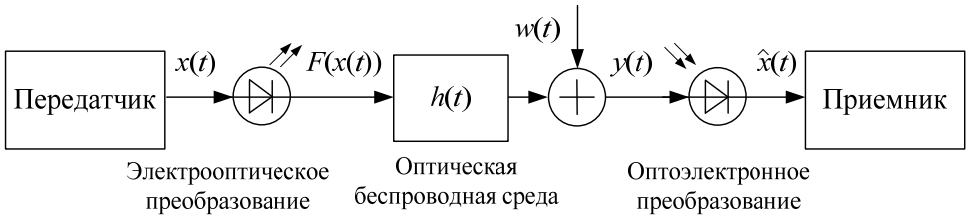


Рисунок 1. Обобщенная модель системы передачи данных с помощью видимого света

Представленная система передачи состоит из: передатчика, который формирует электрический сигнал; электрооптического преобразователя, в роли которого выступает светодиод; оптической беспроводной среды; оптоэлектронного преобразователя, функцию которого выполняет фотодиод; приемника, который принимает и производит цифровую обработку электрического сигнала с выхода фотодиода.

Оптический сигнал на входе оптоэлектронного преобразователя, $y(t)$, определяется формулой [2]:

$$y(t) = h(t) * F\big(x(t)\big) + w(t),$$

где * – оператор линейной свертки; $x(t)$ – передаваемый электрический сигнал; $F(x(t))$ – функция нелинейного преобразования входного электрического сигнала; $h(t)$ – импульсная характеристика оптической беспроводной среды; $w(t)$ – оптические шумы, вызванные посторонним излучением; $y(t)$ – оценка переданного оптического сигнала; $\hat{x}(t)$ – оценка переданного электрического сигнала.

Для определения потенциальной пропускной способности СПВС необходимо воспользоваться теоремой Шеннона-Хартли, согласно которой:

$$C = B_к \cdot \log_2(1 + ОСШ), \quad (1)$$

где C – допустимая пропускная способность канала, бит/с; $B_к$ – полоса пропускания канала, Гц; ОСШ – отношение мощности сигнала к мощности шума.

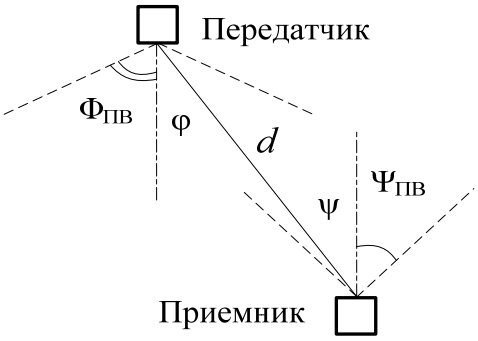


Рисунок 2. Геометрия сценария СПВС прямой видимости

На рисунке 2 изображено геометрическое представление передачи оптического сигнала. Мощность сигнала, попадающего на фотоприемное устройство, складывается из двух составляющих: прямого светового потока и отраженных.

В данной статье рассматривается только передача сигнала в зоне прямой видимости. В этом случае принимаемая мощность будет определяться следующей формулой [2]:

$$P_{пр} = H_0 \cdot P_{пер}, \quad (2)$$

где $P_{пер}$ – мощность передатчика, Вт, а H_0 – величина, характеризующая нормированное количество светового потока, приходящегося на приемник, которая выражается формулой [3]:

$$H_0 = \frac{(m+1) \cdot \cos^m(\varphi) \cdot A}{2 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot \cos\psi \cdot \mathrm{rect}\psi,$$

где A – площадь фоточувствительной зоны, м^2; d – расстояние между передатчиком и приемником, м; φ – угол между нормалью передатчика и лучом, попадающим на приемник, рад; ψ – угол между нормалью приемника и световым потоком, попадающим на приемник, рад; $\Phi_{ПВ}$ – поле видимости передатчика, рад; $\Psi_{ПВ}$ – поле видимости приемника, рад; $\mathrm{rect}\psi = 1$, если $\Psi \le \Psi_{ПВ}$, $\mathrm{rect}\psi = 0$, если $\Psi > \Psi_{ПВ}$; m – коэффициент концентрации плотности световой энергии, который определяется следующим образом [2]:

$$m = \frac{\lg(\cos(60°))}{\lg(\cos(\Phi_{ПВ}))}.$$

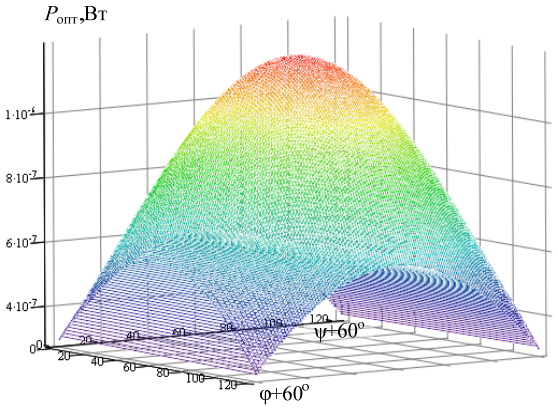


Рисунок 3. Зависимость принимаемой мощности от углов излучения и приема

Зависимость мощности принимаемого сигнала от местоположения передатчика и приемника согласно (2) представлена на рис. 3 ($P_{пер}$ = 3 Вт, A = 1 мм^2, $\Phi_{ПВ}$ = 45°, $\Psi_{ПВ}$ = 45°, m = 2, d = 2,1 м). Из графика становится видно, что в случае, когда нормали СИД и фотоприемного устройства совпадают, принимаемая мощность является максимальной. Однако при отклонении

нормалей уже на несколько градусов снижение мощности является весьма значительным.

Другое графическое представление формулы (2) – тепловая диаграмма (рис. 4) – наглядно демонстрирует, что принимаемая мощность менее чувствительна к флуктуациям угла приема, нежели угла излучения.

Для организации оптических точек доступа большое значение имеет концентрация светового потока на малой площади, так как чем меньше будет угол распространения оптического излучения, тем большая мощность будет приходить на приемное устройство и тем меньше искажений, вызванных распространением по беспроводной среде и переотражениями, будет в сигнале.

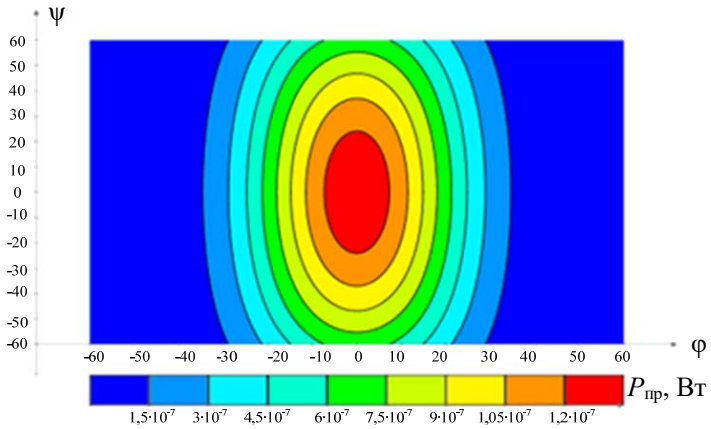


Рисунок 4. Тепловая диаграмма распределения интенсивности принимаемого излучения

К тому же, как уже было сказано, существенной проблемой является наложение световых потоков, так как при неправильном расположении источников излучения может привести к большим задержкам и, как следствие, к межсимвольной интерференции. Для того чтобы этого избежать, необходимо использовать как можно более узконаправленные источники излучения. Однако при использовании источников со слишком маленьким углом излучения может появиться ощущение «пятнистого» освещения. Поэтому выбор поля видимости передатчика является компромиссом между минимизацией задержек и организацией равномерного освещения.

На рис. 5 представлена зависимость принимаемой мощности от поля видимости светодиода (2). Однако необходимо отметить, что чем уже будет направленность оптического излучения, тем чувствительнее будет система передачи к различным изменениям относительного положения приемника.

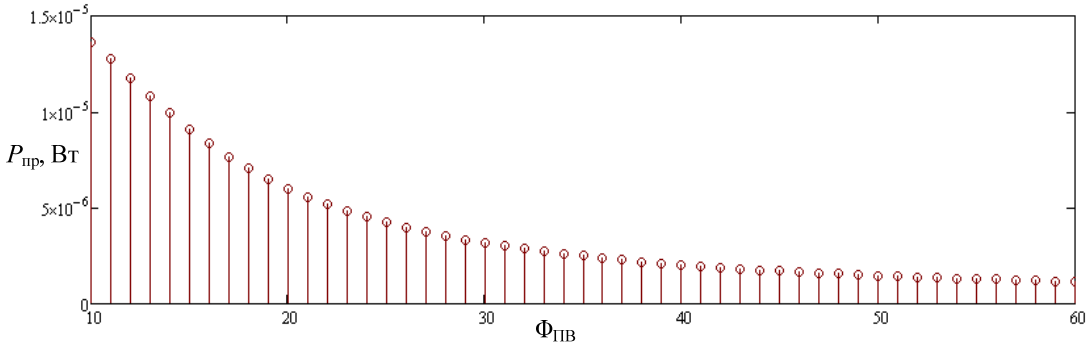


Рисунок 5. График зависимости принимаемой мощности от поля видимости светодиода, при $P_{пер}$ = 3 Вт, A = 1 мм^2, $Ф_{ПВ}$ = 10°– 60°, $Ψ_{ПВ}$ = 45°, d = 1 м, φ = ψ = 10°

RGB-светодиоды обладают большим потенциалом в качестве передатчиков, потому что позволяют передавать информацию сразу на трех несущих и увеличивает полосу пропускания канала в три раза. Полоса пропускания одного канала (несущей) составляет около $B_к = B_r = B_g = B_b \approx 43$ МГц.

В рассматриваемой технологии ОСШ определяется следующей формулой [3, 4]:

$$\text{ОСШ} = \frac{(S \cdot P_{пр} \cdot M_и)^2}{{i_т}^2 + 2 \cdot q \cdot S \cdot (P_{пр} + P_{ВИ}) \cdot B_к}, \quad (3)$$

где S – чувствительность приемника; А/Вт, $M_и$ – индекс модуляции (который принят равным 0,2); $i_т$ – темновой ток приемника; А, $B_к$ – полоса частот сигнала; $q = 1{,}6 \times 10^{-19}$ Кл – элементарный электрический заряд. Параметр $P_{ВИ}$ – мощность второстепенного излучения.

Если принять, что поле видимости светодиода $Ф_{ПВ} = 45°$, расстояние между источником и приемником $d = 2$ м, площадь фоточувствительной зоны приемника А = 1 мм^2, темновой ток фотодиода $i_т = 40$ пА (что соответствует стандартным значениям), чувствительность фотоприемника $S = 0{,}8$ А/Вт, мощность передатчика $P_{пер} = 15$ Вт, полоса частот одного канала $B_к = 40$ МГц, мощность второстепенного излучения, попадающего на приемник, $P_{ВИ} = 10 \cdot P_{пр}$, а приемник расположен строго под передатчиком, т. е. $\varphi = 0$, то при подстановке в формулу (1) формулы (3) пропускная способность одного оптического беспроводного канала, C, составит порядка 350 Мбит/с, а при передаче на трех несущих – 1,05 Гбит/с.

Таким образом, есть все основания полагать, что технология передачи данных посредством видимого света способна внести существенный вклад в решение проблемы дефицита спектра радиочастот и может быть использована для организации защищенных локальных сетей в пределах одного помещения.

Список используемых источников

1. Луизов А.В. Инерция зрения. М.: ОБОРОНГИЗ, 1961. С. 170–171.
2. Dmitrov S., Haas H. Principles of LED Light Communications: Towards Networked Li-Fi. United Kingdom, Cambridge: Cambridge University Press. 2015.
3. Arnon S. Visible Light Communication. Israel, Negev: Cambridge University Press, 2015.
4. Hranilovic S. Wireless Optical Communication Sustems. Canada, Hamilton: Springer Science + Business Media. 2005.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ ГРАНИЦЫ КРАМЕРА-РАО

А.В. Киреев[1*], **И.В. Федоренко**[2], **Г.А. Фокин**[1]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация
[2]Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация
*Адрес для переписки: kireyev@list.ru

Информация о статье
УДК 621.396
Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Киреев А.В., Федоренко И.В., Фокин Г.А. Оценка точности позиционирования объекта с помощью границы Крамера-Рао // Труды учебных заведений связи. 2017. Том 3. № 2. С. 77–83.

Аннотация: *Выполнена оценка точности позиционирования источника радиоизлучения в зависимости от числа опорных пунктов. Координаты источника определены разностно-дальномерным методом. Основной задачей настоящей работы является оценка влияния числа опорных пунктов и их расположения путем сравнения с границей Крамера-Рао. Для решения системы уравнений реализованы методы нелинейных наименьших квадратов на основе математических алгоритмов Гаусса-Ньютона и Левенберга-Марквардта.*

Ключевые слова: *позиционирование, разностно-дальномерный метод, источник радиоизлучения, имитационное моделирование, метод наименьших квадратов.*

ACCURACY EVALUATION OF POSITIONING BY CRAMER RAO BOUND

A. Kireev[1], **R. Fedorenko**[2], **G. Fokin**[1]

[1]The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation
[2]Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251, Russian Federation

Article info
Article in Russian

For citation: Kireev A., Fedorenko R., Fokin G. Accuracy Evaluation of Positioning by Cramer-Rao Bound // Proceedings of Educational Institutes of Communication. 2017. Vol. 3. Iss. 2. PP. 77–83.

Abstract: *Article is devoted to accuracy estimation of positioning objects by mathematic Cramer Rao bound and depending on amount of base stations. Defining of coordinates is solved by range-difference location method. Gauss-Newton and Levenberg-Marquardt mathematic least square methods were evaluated for solving equation system.*

Keywords: *positioning, range difference location, radio-frequency source, simulation modelling, least square method.*

Ситуации, при которых необходимо быстро и точно определить местонахождение человека, встречаются постоянно. Самым распространенным решением этой задачи является использование системы глобального позиционирования Global Positioning service (GPS) или ГЛОНАСС. Однако, главный недостаток этой технологии заключается, в том, что точность определения местоположения снижается при плохих погодных условиях. Поэтому целесообразно рассмотреть возможности использования метода измерения разности времени приема сигналов.

Технология измерения разности времени приема сигнала используется в мобильных сетях четвертого поколения LTE для определения местоположения как базовых, так и абонентских станций. Так как покрытие территории с использованием этого стандарта связи ежегодно растет, данное исследование актуально.

Цель проводимого авторами исследования заключается в оценке точности позиционирования в зависимости от числа опорных точек и последующем сравнении с границей Крамера-Рао.

Принцип работы разностно-дальномерного метода

Примем, что абонентское устройство излучает сигнал в неизвестный момент времени t_0, при этом для простоты синхронизированы между собой. Расстояние между опорным пунктом и ИРИ равно $d_1 \dots d_N$, где N – число опорных пунктов. Для определения местоположения ИРИ необходимо выбрать один из пунктов основным и рассчитать линии постоянной разности ($d_1 - d_2, d_1 - d_3, \dots d_1 - d_N$) всех возможных пар пунктов. Оценка линий постоянной разности осуществляется путем измерения разности времен прихода сигналов $\tau_{ij} = (\tau_i - t_0) - (\tau_j - t_0) = \tau_i - \tau_j$, где τ_i – время прихода сигнала на опорный пункт i, τ_j – время прихода сигнала на опорный пункт j, $i, j = 1, \dots, N$. Расчет относительно одного основного пункта обусловлен тем, что из $N(N-1)/2$ возможных измерений τ_{ij} статистически независимыми оказываются лишь $(N-1)$ разностей времен прихода. Точка пересечения гипербол, установленных линиями постоянной разности определяет местоположение абонентского устройства.

При моделировании введем аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ) для анализа влияния плохого приема на точность позиционирования, таким образом линии постоянной разности r_{ij}:

$$r_{ij} = d_{i,1} + n_{ij}. \quad (1)$$

Представим выражение (1) в матричном виде. Для этого обозначим координаты опорных пунктов как вектор координат $X_i = [x_i, y_i]^T$, где $i = 1, \dots, N$; $X = [x, y]$ – вектор координат ИРИ. Тогда d_i определяется выражением:

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

Тогда (1) можно представить следующим образом:

$$r = d_1(x) + n,$$

где: $d_1(x) = \begin{bmatrix} \sqrt{(x-x_2)^2-(y-y_2)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2-(y-y_1)^2} \\ \sqrt{(x-x_3)^2-(y-y_3)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2-(y-y_1)^2} \\ \vdots \\ \sqrt{(x-x_N)^2-(y-y_N)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2-(y-y_1)^2} \end{bmatrix}$, $n = [n_2, n_3, \dots, n_L]$.

Таким образом, для нахождения координат ИРИ необходимо решить систему нелинейных уравнений. Рассмотрим несколько алгоритмов решения системы нелинейных уравнений.

Алгоритмы решения системы уравнений РДМ

Алгоритм Гаусса-Ньютона – это итерационный численный метод, работающий по принципу минимизации целевой функции:

$$\varepsilon(x) = \big(r - d_1(x)\big)^T \big(r - d_1(x)\big),$$

то есть для получения оценки $\hat{\mathbf{x}}$ координат ИРИ используется метод наименьших квадратов:

$$\hat{x} = \arg\min \varepsilon(x).$$

Получение оценки $\hat{x}$ достигается итеративно за k итераций согласно выражению:

$$x^{k+1} = x^k + (J^T(x^k)J(x^k))^{-1} J^T(x^k),$$

где x^{k+1} – текущее, а x^k – предыдущее рассчитанное значение; $J(x^k)$ – Якобиан вектора $d_1(x^k)$, рассчитанный для x^k:

$$(x^k) = \begin{bmatrix} \frac{x-x_2}{d_2} - \frac{x-x_1}{d_1} & \frac{y-y_2}{d_2} - \frac{y-y_1}{d_1} \\ \frac{x-x_3}{d_3} - \frac{x-x_1}{d_1} & \frac{y-y_3}{d_3} - \frac{y-y_1}{d_1} \\ \vdots & \\ \frac{x-x_N}{d_N} - \frac{x-x_1}{d_1} & \frac{y-y_N}{d_N} - \frac{y-y_1}{d_1} \end{bmatrix}.$$

Алгоритм Гаусса-Ньютона позволяет получить быстрый результат без затрат вычислительной мощности за счет быстрой сходимости, однако это достигается за счет грубой начальной оценки x_0^k, которая для расчетов по нелинейным алгоритмам Гаусса-Ньютона и Левенберга-Марквардта определяется как среднее арифметическое координат опорных пунктов, участвующих в сеансе позиционирования, и определяется выражением:

$$x_0^k = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i.$$

Алгоритм Левенберга-Марквардта опирается на метод наискорейшего спуска и метод Гаусса-Ньютона, то есть может рассматриваться как комбинация последнего с параметром λ, где λ – корректирующий множитель (множитель Марквардта):

$$x^{k+1} = x^k + (J^T(x^k)J(x^k) + \lambda^k I_2)^{-1} J^T(x^k)\Big(r - d_1(x^k)\Big),$$

где $I_n -$ единичная матрица размера n.

Линейный алгоритм работает за счет линеаризации уравнения (1) следующим образом:

$$AQ + q = b,$$

где:

$$\mathrm{A} = 2\begin{bmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & -r_2 \\ x_1 - x_2 & y_1 - y_3 & -r_3 \\ & & \\ x_1 - x_N & y_1 - y_N & -r_N \end{bmatrix},$$

$$Q = [x - x_1 \; y - y_1 \; R_1]^T,$$

$$q = [m_2 \; m_3 \; m_M]^T,$$

$$b = \begin{bmatrix} r_2^2 - (x - x_2)^2 - (y - y_2)^2 \\ r_3^2 - (x - x_3)^2 - (y - y_3)^2 \\ \\ r_N^2 - (x - x_N)^2 - (y - y_N)^2 \end{bmatrix},$$

$$m_i = n_i^2 + 2n_i\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2},$$

$$R_1 = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2}.$$

Оценка координат x ИРИ определяется выражением:

$$x = [[Q]_1 + x_1[Q]_2 + y_1]^T.$$

Для сравнения результатов полученных от разных алгоритмов введем понятие границы (неравенства) Крамера-Рао. Граница Крамера-Рао устанавливает нижнюю границу дисперсии для оценки координат ИРИ:

$$CRLB(x) = \mathrm{trace}(J^T C^{-1} J)^{-1},$$

где J – Якобиан вектора $d_1(x)$, рассчитанный для x; C – ковариационная матрица погрешностей:

$$C = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 + \sigma_2^2 & \sigma_1^2 & \sigma_1^2 \\ \sigma_1^2 & \sigma_1^2 + \sigma_2^2 & \sigma_1^2 \\ \sigma_1^2 & \sigma_1^2 & \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \end{bmatrix},$$

где σ_I – дисперсия погрешности измерений наблюдаемой линии постоянной разности r_i..

Ход моделирования

Оценка точности позиционирования ИРИ была выполнена на основе имитационной модели. Для решения системы уравнения РДМ были реализованы алгоритмы Гаусса-Ньютона, Левенберга-Марквардта и линейный.

Для анализа результатов введем понятие среднеквадратической ошибки прогноза (СКО) координат ИРИ, которое определяется формулой:

$$RMSE = \sqrt{E\left\{\sqrt{(x-\hat{x})^2 + (y-\hat{y})^2}\right\}}.$$

При моделировании опорные пункты располагаются равномерно вокруг ИРИ в радиусе от 4 до 5 километров. При увеличении числа опорных пунктов, имитационная модель автоматически равномерно располагает их по предложенной площади (рис. 1).

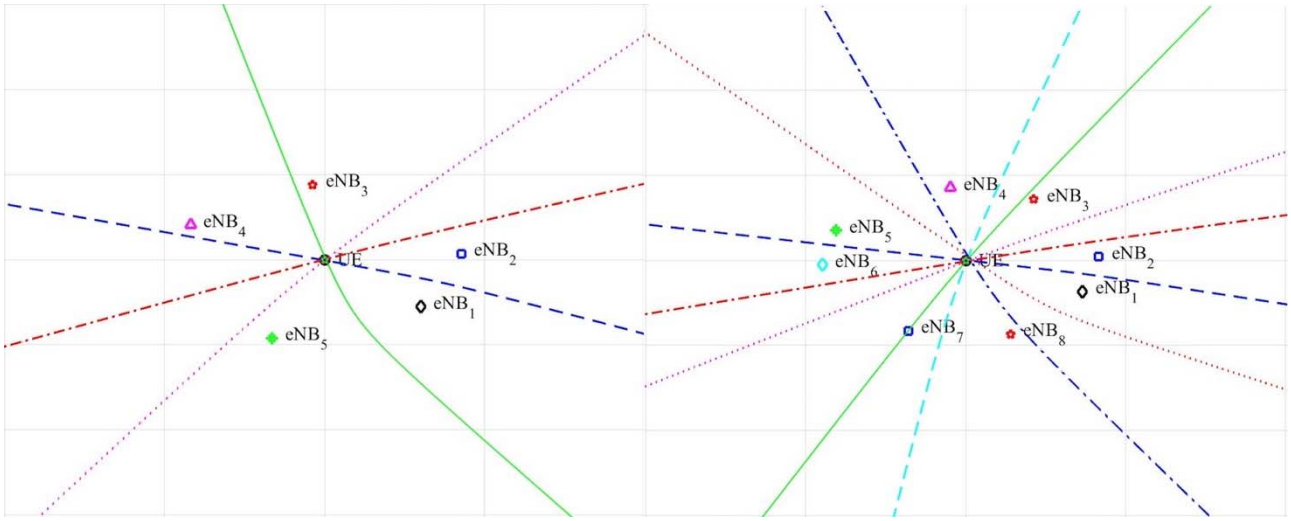


Рисунок 1. Расположение опорных пунктов при изменении их количества

Для соответствующей оценки моделировалось количество опорных пунктов от 3 до 8, влияние шума изменялось от 50 до 100 дБ. В процессе моделирования было установлено, что при заданных условиях алгоритмы Гаусса-Ньютона и Левенберга-Марквардта дают идентичные значения, поэтому целесообразно применять только один из них (см. табл.).

Таблица. Значения СКО для метода Гаусса-Ньютона и линейного алгоритма

Количество опорных пунктов	Метод Гаусса-Ньютона	Линейный алгоритм	Метод Гаусса-Ньютона	Линейный алгоритм
	ОСШ 50 дБ		ОСШ 80 дБ	
3	43,348	526,420	1,368	509,143
4	38,519	36,365	1,214	1,086
5	7,704	24,473	0,244	0,794
6	12,007	6,297	0,380	0,200
7	13,284	11,121	0,378	0,358
8	11,976	4,313	0,083	0,172

Анализ таблицы показывает, что линейный алгоритм неработоспособен при малом количестве опорных пунктов. При низком соотношении сигнал/шум линейный алгоритм дает лучшие результаты, чем методы наименьших квадратов, при хорошем приеме алгоритмы дают идентичные результаты. Увеличение соотношения сигнал/шум дает существенное увеличение точности позиционирования.

Анализ графика на рис. 2 показывает, что линейный алгоритм менее точен, чем метод Гаусса-Ньютона. Увеличение количества опорных пунктов улучшает точность позиционирования ИРИ. Оценка точности позиционирования границей Крамера-Рао показала, что полученные оценки адекватны и соответствуют теории.

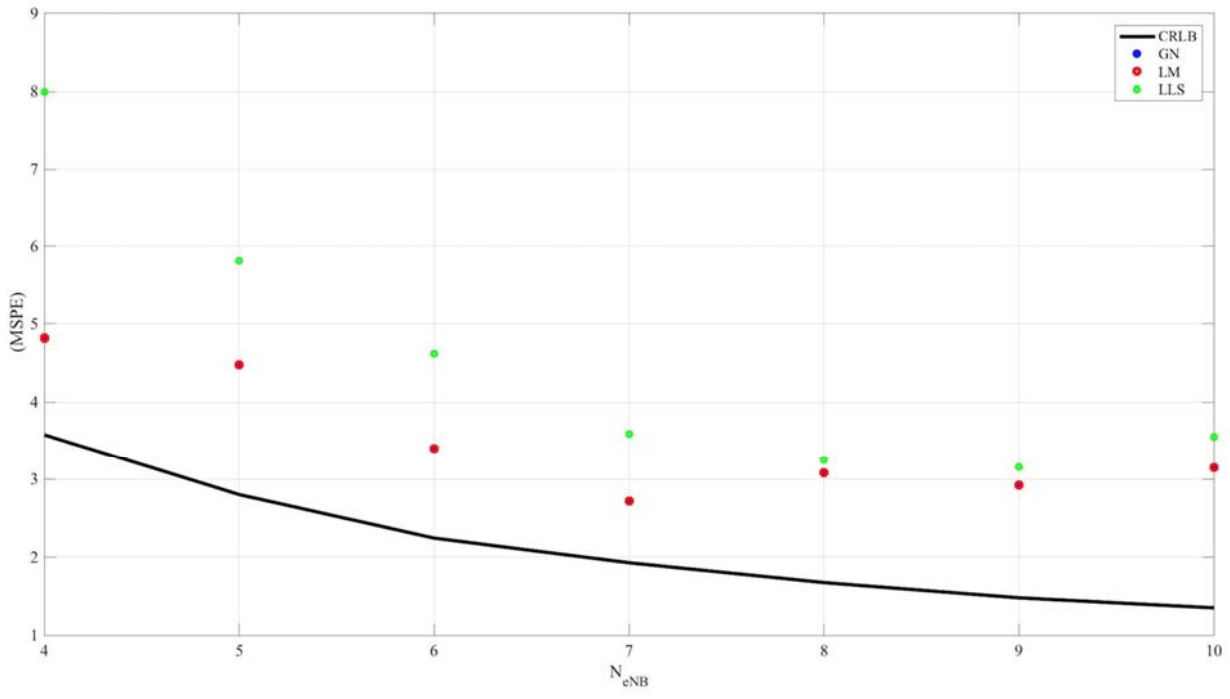


Рисунок 2. Зависимость СКО от числа опорных пунктов при ОСШ 60 дБ

По итогам исследования выполнена оценка точности позиционирования ИРИ разностно-дальномерным методом при увеличении числа опорных пунктов. Для решения системы нелинейных уравнений были реализованы алгоритмы Гаусса-Ньютона, Левенберга-Марквардта и линейный алгоритм. По результатам моделирования использование линейного алгоритма целесообразно при низких соотношениях сигнал/шум.

Увеличение числа опорных пунктов улучшает точность позиционирования, но качество приема сигнала влияет на точность более существенно.

В дальнейшем, планируется экспериментальное исследование метода измерения разности времени приема сигнала с помощью программно-конфигурируемого радио для позиционирования как внутри помещений, так и на больших расстояниях.

Список используемых источников

1. Киреев А.В., Фокин Г.А. Позиционирование источников радиоизлучения в сетях LTE с использованием круговой антенной решетки // Наука и инновации в технических университетах: Материалы Девятого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2015. С. 25–26.

2. Sivers M., Fokin G. LTE Positioning Accuracy Performance Evaluation // Conference on Smart Spaces. Springer International Publishing. 2015. PP. 393–406.

3. Reza Zekavat R. Michael Buehrer // Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances. Wiley-IEEE Press. 2011. P. 1281.

4. Levenberg K.: A Method for the Solution of Certain Problems in Least-Squares // Quarterly Applied Math. 1944. Vol. 2. PP. 164–168.

5. Marquardt D. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters // SIAM Journal Applied Math. 1963. Vol. 11. PP. 431–441.

6. LTE System Toolbox™. URL: http://www.mathworks.com/products/lte-system/.

7. Miao H., Yu K., Juntti M.J. Positioning for NLOS Propagation: Algorithm Derivations and Cramer–Rao Bounds // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2007. Vol. 56. Iss. 5. PP. 2568–2580.

8. Borisov E., Fokin G., Mashkov G. Experimental Validation of Multipoint Joint Processing of Range Measurements via Software-Defined Radio Testbed // Advanced Communication Technology (ICACT), 18th International Conference on. IEEE. 2016. PP. 268–273.

9. Fokin G., Gelgor A., Pavlenko I. LTE Base Stations Localization // International Conference on Next Generation Wired / Wireless Networking. Springer International Publishing. 2014. PP. 191–204.

10. Sivers M., Fokin G., Dmitriev P., Kireev A. Indoor Positioning in WiFi and NanoLOC Networks // International Conference on Next Generation Wired / Wireless Networking. Springer International Publishing. 2016. PP. 465–476.

ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОГО МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ И ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ МУЛЬТИСЕРВИСНОГО ТРАФИКА В КАНАЛООБРАЗУЮЩЕЙ АППАРАТУРЕ ЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ. ЧАСТЬ 2. МОДЕЛИ АДАПТИВНОГО МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ ТРАФИКА

А.А. Ковальский[1*]

[1]Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация
*Адрес для переписки: sake636@mail.ru

Информация о статье
УДК 621.396
Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Ковальский А.А. Исследование адаптивного мультиплексирования и диспетчеризации мультисервисного трафика в каналообразующей аппаратуре земных станций спутниковой связи. Часть 2. Модели адаптивного мультиплексирования трафика // Труды учебных заведений связи. 2017. Том 3. № 2. С. 84–92.

Аннотация: *Статья посвящена вопросам организации адаптивного мультиплексирования и диспетчеризации трафика мультисервисных сетей в каналообразующей аппаратуре земных станций спутниковой связи с учетом изменяющейся помеховой обстановки. Разработаны модели адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисных сетей с учетом приоритетов в обслуживании и нестационарности входящих информационных потоков на основе марковских модулируемых пуассоновских процессов. Для получения вероятностно-временных характеристик мультисервисного трафика при его мультиплексировании использована методика расчета основе предложенных моделей, которая реализована в виде программы в среде MatLab.*

Ключевые слова: *адаптивное мультиплексирование, диспетчеризация мультисервисного трафика, земная станция спутниковой связи.*

RESEARCH OF ADAPTIVE MULTIPLEXING AND SCHEDULING OF THE MULTISERVICE TRAFFIC IN THE CHANNELING EQUIPMENT OF TERRESTRIAL STATIONS OF SATELLITE COMMUNICATION. PART 2. MODELS OF ADAPTIVE MULTIPLEXING OF THE TRAFFIC

A. Kovalsky[1]

[1]Military space academy of A.F. Mozhaysky, St. Petersburg, 197198, Russian Federation

Article info
Article in Russian

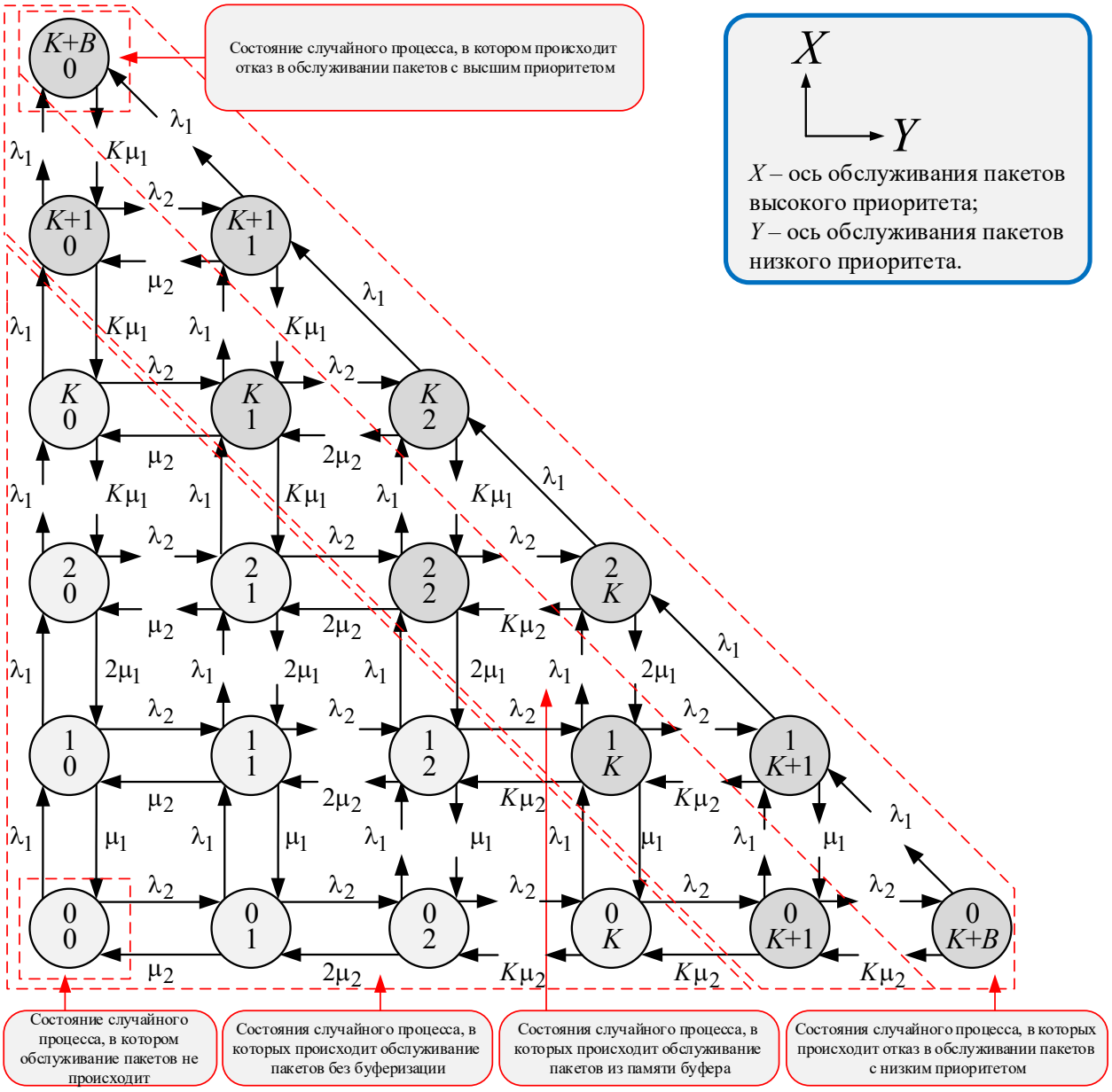
For citation: Kovalsky A. Research of Adaptive Multiplexing and Scheduling of the Multiservice Traffic in the Channeling Equipment of Terrestrial Stations of Satellite Communication. Part 2. Models of Adaptive Multiplexing of the Traffic // Proceedings of Educational Institutes of Communication. 2017. Vol. 3. Iss. 2. PP. 84–92.

Abstract: *Article is devoted to questions of the organization of adaptive multiplexing and scheduling of a traffic of multiservice networks in the channeling equipment of terrestrial stations of satellite communication taking into account the changing interfering situation. Models of adaptive multiplexing of a multiservice traffic taking into account priorities in service and not stationarity of the incoming information flows on the basis of Markovly the modulated Poisson processes are developed. For receiving probabilistic time response characteristics of a multiservice traffic at its multiplexing the calculation procedure to a basis of the offered models which is realized in the form of the program in the environment of MatLab is used.*

Keywords: *adaptive multiplexing, scheduling of a multiservice traffic, terrestrial station of satellite communication.*

Для решения задачи организации адаптивного мультиплексирования и диспетчеризации мультисервисного трафика в каналообразующей аппаратуре земных станций спутниковой связи (ЗССС), а также исследования параметров трафика при его мультиплексировании разработана модель адаптивного мультиплексирования мультисервисного трафика, которая отличается от известных учетом приоритетов в обслуживании. Данная модель представляет случайный марковский процесс, граф состояний которого представлен на рис. 1 и изображает процесс обслуживания двух разнородных потоков пакетов с высшим (ось x) и низшим (ось y) приоритетами. Каждое состояние процесса характеризуется двумя индексами по числу пакетов соответствующего приоритета, находящихся на обслуживании в мультиплексоре, а переходы между состояниями – поступлением нового пакета, либо завершением его обслуживания. Для обслуживания пакетов мультиплексор распределяет канальный ресурс, максимальная емкость которого K каналов, в случае его недостатка поступающие пакеты помещаются в буфер емкостью B. При переполнении буфера пакеты высшего приоритета вытесняют из буфера пакеты с низшим приоритетом.

Данный подход позволяет конструировать графы случайного марковского процесса различной сложности путем введения дополнительных размерностей в пространстве состояний, что соответствует учету дополнительного количества приоритетов в обслуживании. На рис. 2 представлен граф с учетом трех приоритетов в обслуживании – высшего, среднего и низшего, принцип работы модели остается тот же. Существенным ограничением данного класса моделей является наличие допущения о том, что потоки пакетов на входе мультиплексора являются стационарными пуассоновскими потоками.



K – канальная емкость мультиплексора, выделяемая для передачи группового потока уплотненного трафика;
B – объем памяти буфера обмена мультиплексора выделенной для обслуживания входящего трафика;
λ_1 – интенсивность поступления пакетов трафика с высоким приоритетом в обслуживании;
μ_1 – интенсивность уплотнения пакетов трафика с высоким приоритетом в обслуживании;
λ_2 – интенсивность поступления пакетов трафика с низким приоритетом в обслуживании;
μ_2 – интенсивность уплотнения пакетов трафика с низким приоритетом в обслуживании.
$\tau_в=1/\lambda_1$ – средний интервал времени между последовательными поступлениями пакетов трафика с высоким приоритетом в обслуживании;
$b_в=1/\mu_1$ – средние время уплотнения одного пакета входящего трафика с высоким приоритетом в обслуживании;
$\tau_н=1/\lambda_2$ – средний интервал времени между последовательными поступлениями пакетов трафика с низким приоритетом в обслуживании;
$b_н=1/\mu_2$ – средние время уплотнения одного пакета входящего трафика с низким приоритетом в обслуживании.

Рисунок 1. Модель адаптивного мультиплексирования мультисервисного трафика с учетом приоритетов в обслуживании

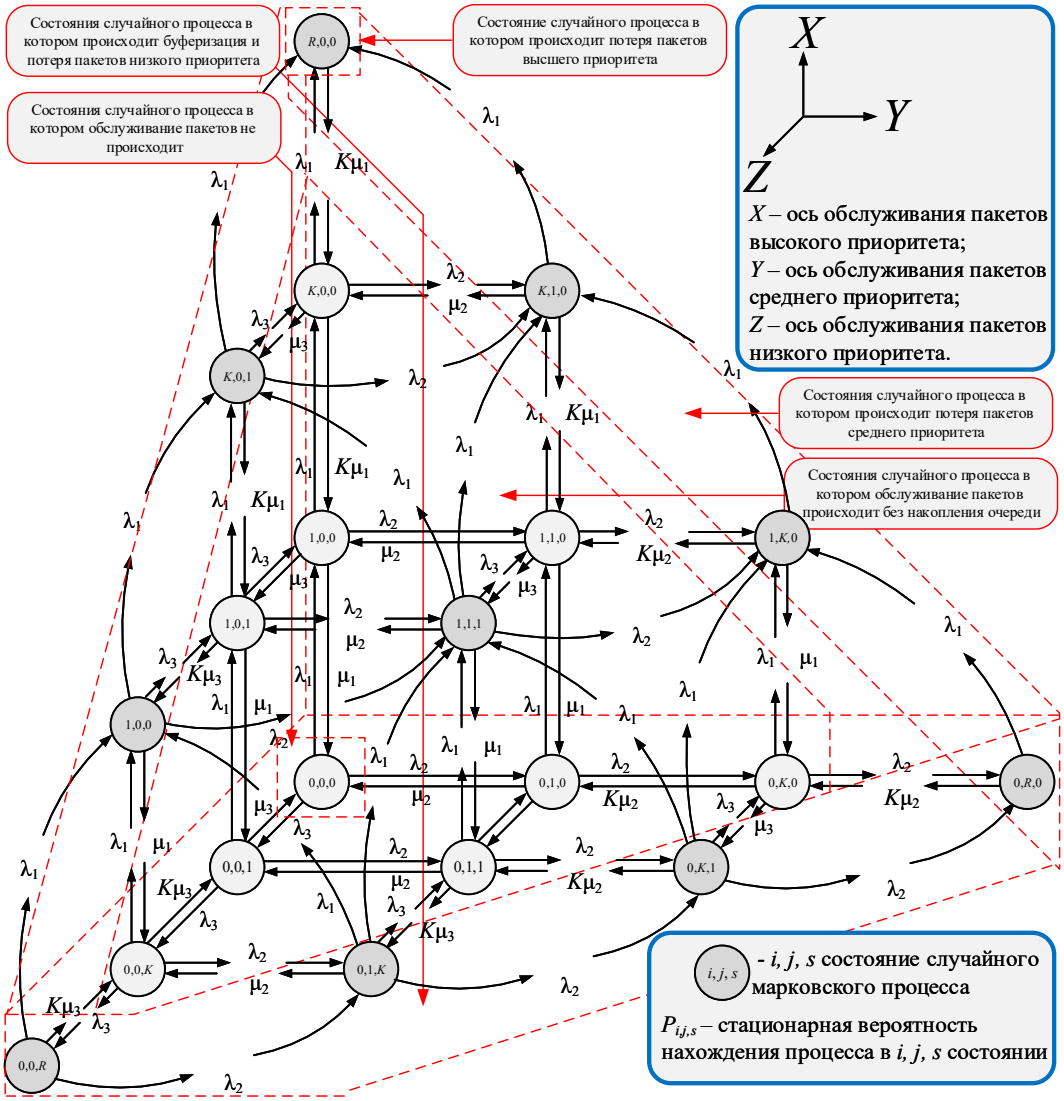


Рисунок 2. Развитие модели адаптивного мультиплексирования мультисервисного трафика с учетом приоритетов в обслуживании

Как показывают исследования реального мультисервисного трафика, его структура существенно отличается от простейшего пуассоновского потока и характеризуется нестационарностью, а также долговременной корреляционной зависимостью – самоподобностью. Одним из конструктивных направлений моделирования таких потоков, в рамках которого имеется возможность получения аналитического решения, является применение марковских моделей пуассоновских процессов (ММПП). Частным случаем таких моделей являются модели прерываемых пуассоновских процессов (ON-OFF модели).

Каждый источник при этом имеет следующую структуру. В период активности (ON-периоды) источник генерирует пуассоновский поток пакетов. После периода активности следует пауза (OFF-период), когда источник не генерирует пакеты. Длительности периодов активности и пауз являются случайными величинами, распределенными по экспоненциальному закону. Комбина-

ция нескольких таких ON-OFF источников образует ММПП, интенсивность которого изменяется во времени, что позволяет учесть нестационарность реальных входных потоков. На рис. 3 изображён граф марковской цепи, моделирующей процесс передачи трафика от группы абонентов, который описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена:

$$\begin{cases} \dot{p}_0(t) = -N\alpha p_0 + \beta p_1(t) \\ \dot{p}_i(t) = (N-i)\alpha p_{i-1}(t) - ((N-i+1)\alpha + (N-i+1)\beta p_i(t) + (N-i)\beta p_{i+1}(t), \\ \dot{p}_N(t) = \alpha p_{N-1}(t) - N\beta p_N(t) \end{cases} \quad (1)$$

где P_i – стационарная вероятность нахождения процесса в i-ом состоянии;

$\alpha = 1/\overline{t_a}, \overline{t_a}$ – среднее время нахождения источника трафика в активном состоянии;

$\beta = 1/\overline{t_п}, \overline{t_п}$ – среднее время нахождения источника трафика в пассивном состоянии.

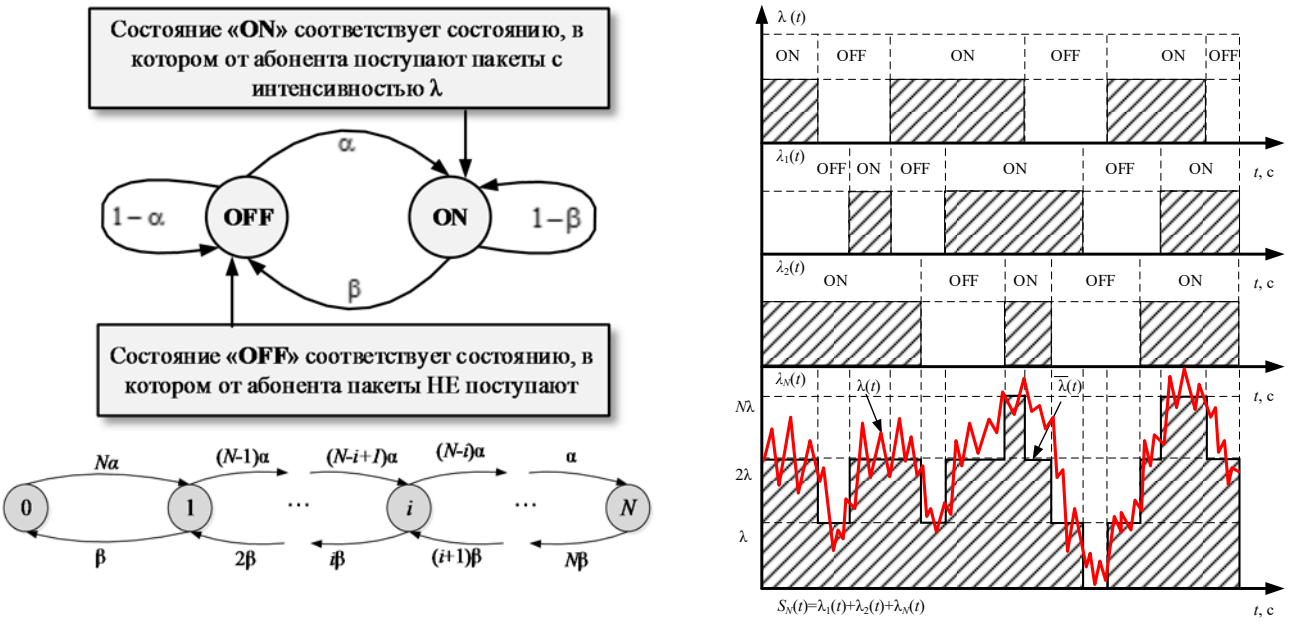
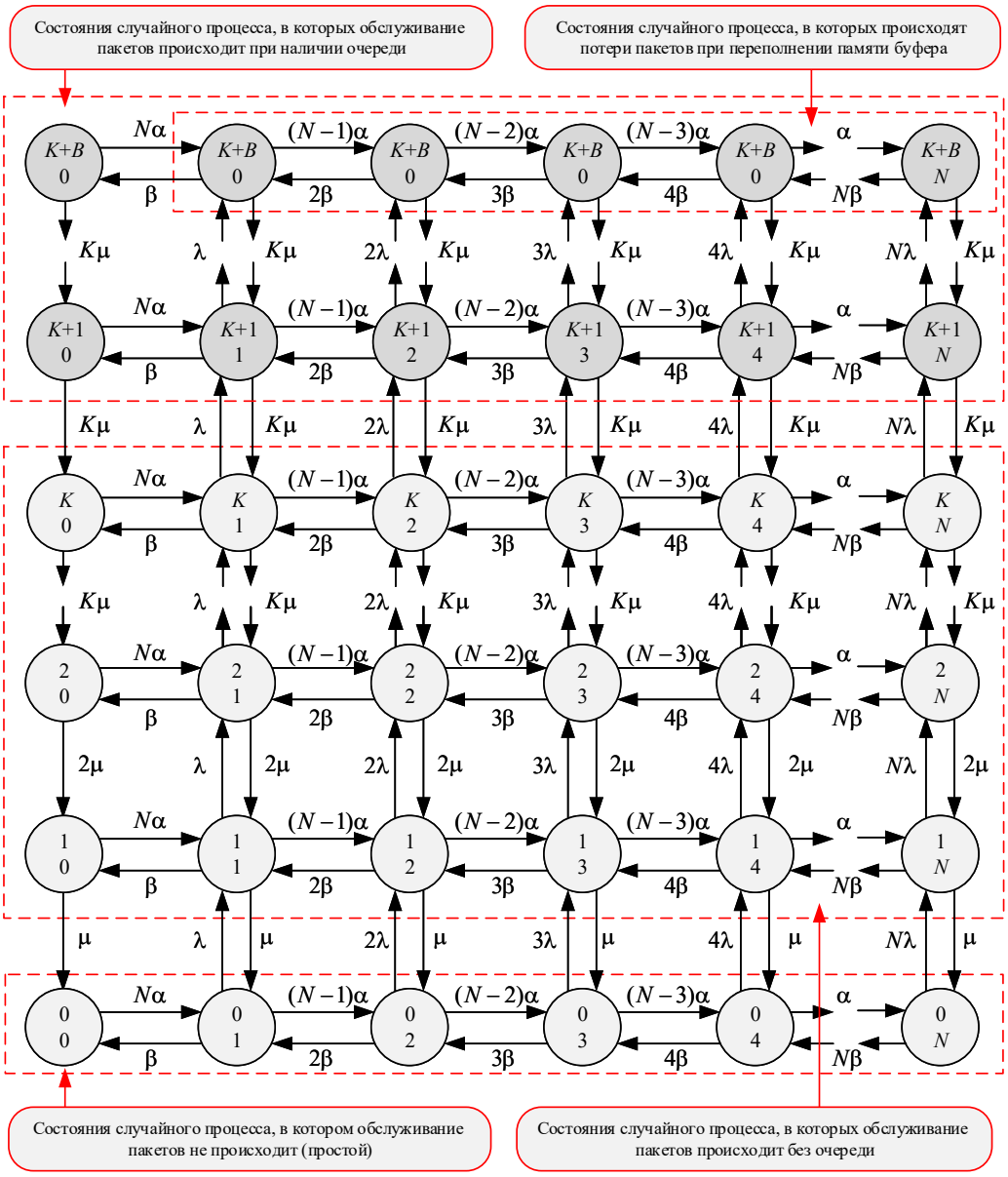


Рисунок 3. Подход к моделированию нестационарного трафика

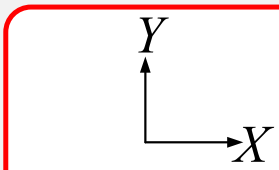
Данный подход позволил разработать модель адаптивного мультиплексирования однородного нестационарного трафика, которая представляет собой граф переходов состояний случайного марковского процесса, который изображен на рис. 4. Модель описывает процесс обслуживания пакетов в мультиплексоре (ось y), которые поступают с изменяющейся интенсивностью от группового источника, состоящего из N абонентов (ось x). Состояние процесса характеризуется двумя индексами: количеством пакетов, находящихся на обслуживании и числом активных источников.

Сочетание моделей приоритетного обслуживания и ММПП позволяет построить обобщенную модель мультиплексирования мультисервисного трафика, приведенную на рис. 5, которая отличается от известных учетом нестационарности входящих информационных потоков и приоритетов в обслуживании.

Приоритеты и разнородность трафика учитываются по осям x и y, изменение интенсивности трафика (нестационарность) – по оси z.



K – канальная емкость мультиплексора, выделяемая для передачи группового потока уплотненного трафика;
B – объем памяти буфера обмена мультиплексора выделенной для обслуживания входящего трафика;
N – количество источников трафика;
λ – интенсивность поступления пакетов в мультиплексор;
μ – интенсивность уплотнения пакетов в мультиплексоре;
α – интенсивность включения источников трафика;
β – интенсивность выключения источников трафика.



X – ось активности абонентов;
Y – ось обслуживания трафика.

Рисунок 4. Модель адаптивного мультиплексирования однородного, нестационарного трафика от группового источника

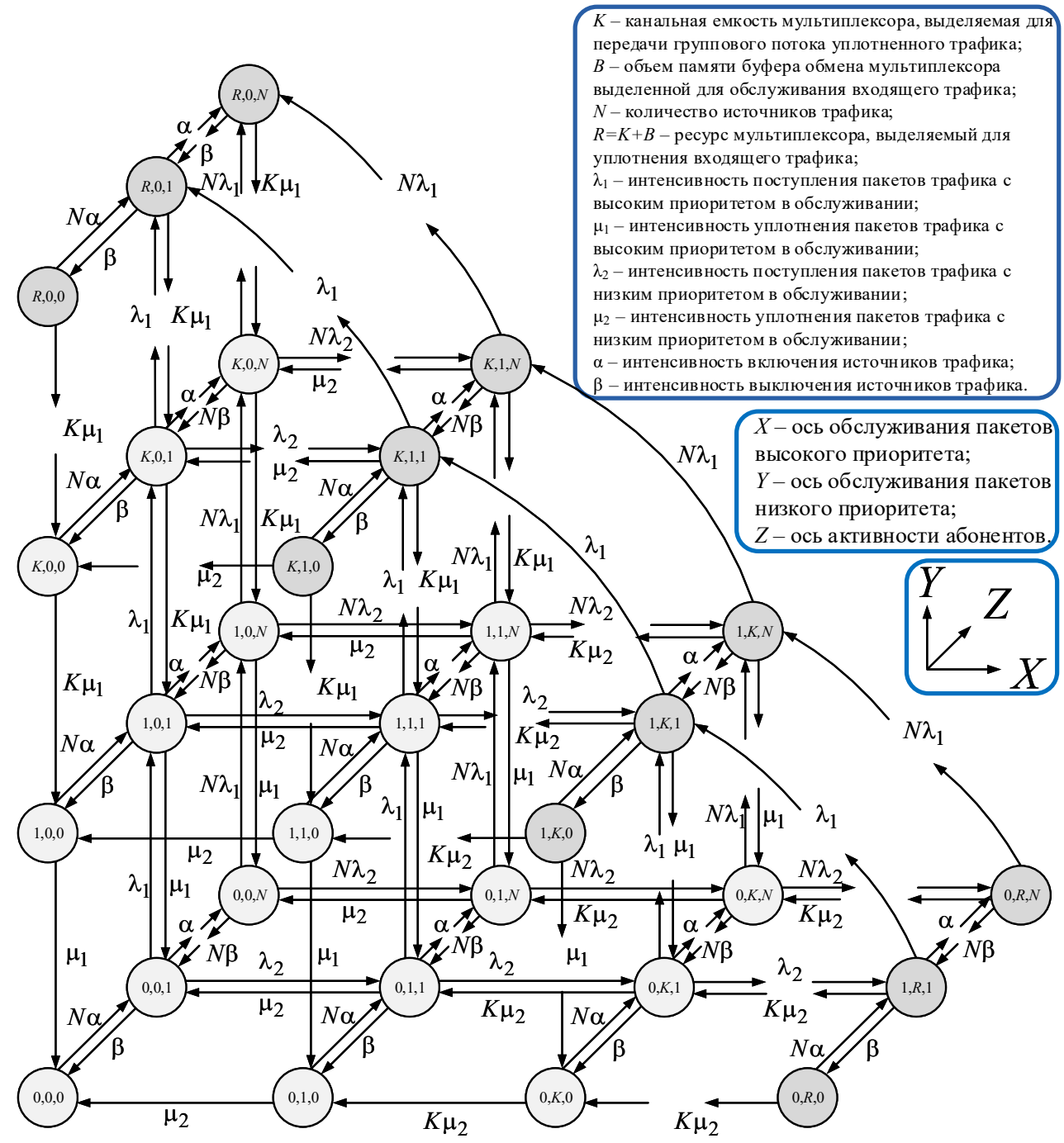


Рисунок 5. Обобщенная модель адаптивного мультиплексирования мультисервисного трафика

Использование разработанных моделей позволяет рассчитать вероятности стационарных состояний случайного марковского процесса, моделирующего

работу адаптивного мультиплексора и оценить вероятностно-временные характеристики (ВВХ) качества обслуживания мультисервисного трафика. Методика расчета указанных характеристик состоит из 4 этапов.

Этап 1. Для расчёта стационарных вероятностей состояний $p_{i,j,k}$ рассматриваемой модели составляется система на основе уравнений баланса переходов:

$$\begin{cases} (\lambda_1+\lambda_2)p_{i,j,k} = \mu_2 p_{i,j,k+1} + \mu_1 p_{i+1,j,k}, i=0, j=0, k=0 \\ (\lambda_1+\lambda_2+j\mu_2)p_{i,j,k} = j\lambda_2 p_{i,j,k-1} + \mu_1 p_{i+1,j,k} + j\mu_2 p_{i+1,j,k}, i=1, 1 \le j \le R, k=0. \\ \dots \\ \sum_{k=0}^{N}\sum_{i=0}^{R}\sum_{j=0}^{R-i} p_{i,j,k} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

Этап 2. Приведение к системе линейных алгебраических уравнений, описывающих граф модели:

$$\begin{cases} (\lambda_1+\lambda_2)p_{000} = \mu_2 p_{010} + \mu_1 p_{100} \\ (\lambda_1+\lambda_2+\mu_2)p_{010} = \lambda_2 p_{000} + \mu_1 p_{110} + 2\mu_2 p_{200}. \\ \dots \\ p_{000} + p_{100} + p_{200} + \dots + p_{R,R,N} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

Этап 3. Решение системы линейных алгебраических уравнений.

Вводится вектор: $P = \left[p_z = p_{i,j},\ z = \overline{1,Z}\right]^{\mathrm{T}} \Rightarrow A \times P = B$, где A – $(Z+1)Z$-мерная матрица интенсивностей переходов; P – Z-мерный вектор ненулевых состояний системы массового обслуживания; B – $(Z+1)$-мерный вектор правых частей.

Решается матричное уравнение: $P = A' \times B$, где A'– матрица, псевдообратная матрице A, определяемая как $A' = [A^{\mathrm{T}}A]^{-1} = A^{\mathrm{T}}$.

Этап 4. Расчет ВВХ трафика при его мультиплексировании.

Рассчитывается вероятность потери (переполнения буфера мультиплексора) пакетов с высоким и низким приоритетом:

$$P_{\text{п1}} = \sum_{k=1}^{N} p_{i,j,k}, i = R, j = 0;\ P_{\text{п1}} = \sum_{k=1}^{N}\sum_{i=0}^{R} p_{i,j,k}, j = R - i. \quad (4)$$

Рассчитывается средняя длина очереди пакетов трафика в памяти буфера адаптивного мультиплексора с высоким и низким приоритетом в обслуживании:

$$q_1 = \sum_{k=0}^{N}\sum_{i=K+1}^{R}(i-K)\sum_{j=0}^{R-i} p_{i,j,k};\ q_2 = \sum_{k=0}^{N}\sum_{l=1}^{B} l \sum_{i=0, j=K+l-i}^{i=K+j, j=1} p_{i,j,k}. \quad (5)$$

Рассчитывается среднее время задержки пакетов с высоким и низким приоритетом в памяти буфера мультиплексора до начала передачи:

$$\omega_1 = \frac{q_1}{[\lambda_1(1 - P_{\text{п}1})]}, \quad \omega_2 = \frac{q_2}{[\lambda_1(1 - P_{\text{п}2})]}. \tag{6}$$

Рассчитывается среднее время задержки с высоким и низким приоритетом при обслуживании в мультиплексоре:

$$\tau_1 = 1/\mu_1;\ \tau_2 = 1/\mu_2. \tag{7}$$

Рассчитывается среднее время задержки в мультиплексоре с высоким и низким приоритетом:

$$\mathrm{T}_{31} = \omega_1 + \tau_1 = \frac{q_1}{[\lambda_1(1 - P_{\text{п}1})]} + \frac{1}{\mu_1}, \quad \mathrm{T}_{32} = \omega_2 + \tau_2 = \frac{q_2}{[\lambda_1(1 - P_{\text{п}2})]} + \frac{1}{\mu_2}. \tag{8}$$

Рассчитывается коэффициент мультиплексирования мультиплексора ЗССС (производится методом численного перебора параметров):

$$\rho = \frac{N}{K} \to \max \left| \begin{matrix} P_{\text{п}1} \le P_{\text{треб}1}, P_{\text{п}2} \le P_{\text{треб}2} \\ T_{\text{з}1} \le T_{\text{треб}1}, T_{\text{з}2} \le T_{\text{треб}2} \end{matrix} \right. . \tag{9}$$

Таким образом, расчет ВВХ трафика при его мультиплексировании позволяет обоснованно управлять назначением приоритетов в обслуживании в зависимости от статистических характеристик входных потоков и пропускной способности каналов.

Продолжение следует.

Список используемых источников

1. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания: учебник. М.: Машиностроение. 1979. 432 с.

2. Зиннуров С.Х., Ковальский А.А., Топорков И.С. Модель и алгоритм управления процессом резервирования ресурса сети спутниковой связи при обслуживании мультисервисного нестационарного трафика // Известия института инженерной физики. Серпухов. 2016. Т. 1. № 39. С. 37–47.

3. Ковальский А.А. Модели адаптивного мультиплексирования и алгоритмы диспетчеризации мультисервисного трафика земных станций спутниковой связи в условиях изменяющейся помеховой обстановки // Труды МАИ. 2016. Вып. 90. С. 20.

4. Adas A. Traffic models in broadband networks // IEEE Communication magazine. 1997. Vol. 35. Iss. 7. PP. 82–89.

5. Muscariello L., Mellia L., Meo M., Ajmone M. Marsan, Cigno R. Lo. Markov models of internet traffic and a new hierarchical MMPP model // Computer communications. 2005. Vol. 28 (16). PP. 1835–1851.

РАСЧЕТ ОПЕРАТОРОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТРАФИКА ДЛЯ ПРЕДНАМЕРЕННОГО ПОВЫШЕНИЯ СТРУКТУРНОЙ СЛОЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОТОКА

К.В. Ушанев[1*]

[1]Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация
*Адрес для переписки: stan_007@mail.ru

Информация о статье
УДК 623.624
Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Ушанев К.В. Расчет операторов преобразования трафика для преднамеренного повышения структурной сложности информационного потока // Труды учебных заведений связи. 2017. Том 3. № 2. С. 93–101.

Аннотация: *Статья посвящена развитию теории информационной безопасности и информационного противоборства. Цель исследования состоит в определении операторов преобразования наиболее актуальных информационно-технических воздействий, основанных на преобразовании структуры трафика в направлении ее усложнения. В основу научно-методического аппарата для обоснования информационно-технического воздействия, использующего усложнение структуры трафика, положен метод функционального преобразования трафика, ранее обоснованный в работах Г.И. Линца и представителей его научной школы. Полученные новые информационно-технические воздействия в дальнейшем могут использоваться для тестирования устойчивости и безопасности телекоммуникационных систем, а также для разработки способов их защиты.*

Ключевые слова: *информационная безопасность, информационное противоборство, сетевые атаки, обнаружение вторжений, способы обнаружения сетевых атак, информационно-техническое воздействие, преобразование трафика, сложный трафик, трафик сложной структуры.*

THE CALCULATION OF THE TRAFFIC TRANSFORMATION OPERATOR FOR DELIBERATE INCREASE OF THE STRUCTURAL COMPLEXITY OF INFORMATION STREAM

K. Ushanev[1]

[1]Military space academy of A.F. Mozhaiskiy, St. Petersburg, 197198, Russian Federation

Article info
Article in Russian

For citation: Ushanev K. The Calculation of the Traffic Transformation Operator for Deliberate Increase of the Structural Complexity of Information Stream // Proceedings of Educational Institutes of Communication. 2017. Vol. 3. Iss. 2. PP. 93–101.

Abstract: *The paper is devoted to theory of information security and theory of information warfare evolve. The aim of the paper is the calculation of the traffic transformation operator. Methods used: the scientific-methodological apparatus for the research of a new cyber-attacks is based on the method of functional transformation of traffic. These new cyber-attacks can be used to test resilience and security of telecommunication systems, and to develop protection methods.*

Keywords: *information security, information warfare, network attack, intrusion detection, methods of detection of network attacks, information technology impact, the traffic transformation, the complexity traffic, the traffic with structural complexity.*

Актуальность

В настоящее время актуальным направлением исследований является разработка моделей и методов оценки функционирования систем связи в условиях воздействия на них различного рода деструктивных факторов [1]. Причем к деструктивным факторам можно отнести ИТВ, ориентированные на усложнение структуры трафика, от которой напрямую зависит [2, 3] своевременность обслуживания трафика в узлах маршрутизации и коммутации пакетов. В работах [2, 3] указывается на снижение своевременности обслуживания трафика со сложной структурой в узлах маршрутизации и коммутации пакетов в сотни раз по сравнению с обслуживанием простейшего трафика.

При этом под трафиком со сложной структурой понимается информационный поток, у которого коэффициент вариации интервалов времени между поступлениями отдельных пакетов больше единицы ($c_\tau > 1$), который определяется по формуле:

$$c_\tau = \sigma(\tau)/m(\tau),$$

где c_τ – коэффициент вариации значений интервалов времени между поступлениями отдельных пакетов трафика (его дисперсионная характеристика, определяющая структурную сложность трафика);

$m(\tau)$ – математическое ожидание значений интервалов времени τ между поступлениями отдельных пакетов трафика;

$\sigma(\tau)$ – среднее квадратическое отклонение значений интервалов времени τ между поступлениями отдельных пакетов трафика.

Под своевременностью обслуживания трафика в узле сети будем понимать время от момента прихода начала пакета в узел, до момента покидания пакетом узла. Это время определяется задержкой при ожидании пакета в буфере узла и временем его обработки в коммутационном устройстве. При этом время обработки в коммутационном устройстве определяется объемом пакета и, как правило, для этого времени принимается допущение об экспоненциальном законе его распределения.

Эти выводы вполне согласуются с исследованиями других авторов, в которых регистрируется факты снижения своевременности обработки сложного трафика. К примерам таких исследований можно привести работы известных

специалистов: Ю.И. Рыжикова [4, 5], П.А. Будко [6], Л.А. Фомина [7, 15, 16], В.Н. Тарасова, Н.Ф. Бахаревой [8, 9], О.И. Шелухина [10], А.Н. Назарова, К.И. Сычева [11], Е.А. Новикова [18–21]. В работе [22] предложен вариант ИТВ, основанный на формировании структуры информационных потоков трафика с высоким уровнем сложности, за счет внедрения дополнительных имитационных потоков.

Таким образом, такое ИТВ может быть использовано для преднамеренного создания условий, направленных на повышение времени обработки информационных потоков в узлах маршрутизации, и как следствие, снижения своевременности обслуживания потоков трафика ниже значений, определяемых требованиями к системе связи. Схема системы, осуществляющей такое ИТВ, представлена на рис. 1.

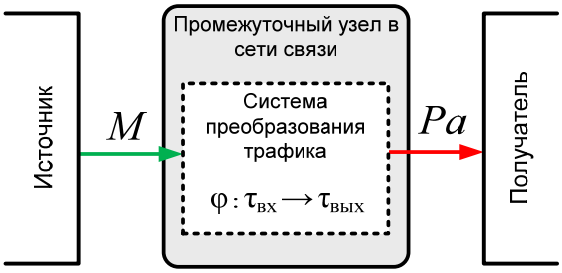


Рисунок 1. Схема системы, осуществляющей ИТВ на основе преобразования структуры трафика

Постановка задачи

Цель работы – получить ряд операторов преобразования трафика для проведения исследований в целях обоснования параметров ИТВ, основанного на перехвате трафика и преобразовании его структуры в направлении ее усложнения. Задача работы – обосновать оператор преобразования трафика.

Для формализации задачи в работе введены следующие обозначения:

τ – интервал времени между поступлением смежных очередных пакетов трафика;

$\tau_{вх}$ – интервал времени между поступлением пакетов входного потока трафика, который будет подвергнут преобразованию;

$\tau_{вых}$ – интервал времени между поступлением пакетов выходного потока трафика, который уже преобразован;

$\Delta\tau = \tau_{вых} - \tau_{вх}$ – задержка пакета при выполнении преобразования;

$\Delta\tau_{min}$ – минимальное значение задержки пакета трафика при выполнении преобразования;

$\Delta\tau_{max}$ – максимальное значение задержки пакета трафика при выполнении преобразования;

$f(\Delta\tau)$ – плотность распределения задержки пакетов трафика при выполнении преобразования;

λ – параметр экспоненциального распределения;

α – параметр формы распределения Парето;

k – коэффициент масштаба распределения Парето;

$\Phi(*)$ – функция Лапласа;

a – коэффициент сдвига равномерного распределения;

$(b - a)$ – коэффициент масштаба равномерного распределения;

m – математическое ожидание;

σ – среднее квадратическое отклонение.

Как показано в обзоре [12] для представления сложного трафика можно использовать различные модели: ON-OFF модели; потоки с распределениями Парето, Вейбулла, Гамма, потоки Кокса, и другие.

В рамках решаемой задачи предлагается использовать поток, в котором время между приходом заявок имеет Парето-распределение. Выбор Парето-распределения в качестве модели сложного трафика обусловлено следующими соображениями.

Во-первых, как показано в работе [2], сложный трафик с коэффициентом вариации c_τ>1 может быть представлен моделью потока с Парето-распределением:

$$F(\tau) = 1 - \left(\frac{k}{\tau}\right)^{\alpha}, \qquad k > 0, \qquad \alpha > 0, \tau > k,$$

где τ – интервал времени между поступлением очередных заявок в потоке с распределением Парето;

k – коэффициент масштаба;

α – параметр формы распределения Парето.

Зависимость между коэффициентом вариации c_τ и параметром α распределения Парето в диапазоне $\alpha \in [1{,}2; 2]$ с погрешностью до 3,27 % может быть аппроксимирована выражением [3]:

$$c_\tau(\alpha) = 1{,}41 \times 10^4 \times e^{-5{,}384 \cdot \alpha} + 1{,}52;$$

откуда:

$$\alpha = \frac{-1}{5{,}384} \ln\left(\frac{c_\tau - 1{,}52}{1{,}41 \times 10^4}\right).$$

Во-вторых, корректность и адекватность моделирования сложного трафика потоком с Парето-распределением моментов поступления заявок подтверждается аналогичным подходом, используемым различными исследователями в работах [6, 13, 14].

В качестве модели входного трафика, который подвергается преобразованию, в работе используются:

– простейший поток (который давно и традиционно используется для моделирования информационных потоков в сетях в теории телетрафика) с функцией вероятности экспоненциального распределения:

$$F\left(\tau_{\text{вх}}^{\text{exp}}\right) = 1 - e^{-\lambda \tau_{\text{вх}}^{\text{exp}}}; \qquad (1)$$

– поток с равномерным распределением, представленный функцией вероятности:

$$F\left(\tau_{\text{вх}}^{\text{равн}}\right) = \frac{\tau_{\text{вх}}^{\text{равн}} - a}{b - a}; \qquad (2)$$

– поток с нормальным распределением, представленный функцией вероятности:

$$F\left(\tau_{\text{вх}}^{\text{норм}}\right) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{\tau_{\text{вх}}^{\text{норм}}} e^{\frac{(\tau_{\text{вх}}^{\text{норм}} - m)^2}{2\sigma^2}} d\tau_{\text{вх}}^{\text{норм}}. \quad (3)$$

Обоснование оператора преобразования трафика

Для обоснования оператора преобразования трафика был использован метод функционального преобразования трафика, впервые предложенный в работе Г.И. Линца, Л.А. Фомина, С.А. Скоробогатовой [15]. В ней метод функционального преобразования трафика предлагался в качестве направления снижения структурной сложности входного трафика. Дальнейшее развитие метод функционального преобразования получил в работах Г.И. Линца и его коллег [14, 16, 17] где на основе этого метода решается задача обеспечения инвариантности мультисервисной сети к структуре входного трафика.

Вместе с тем, анализ исследований Г.И. Линца и его коллег [14–17] показал, что полученные в них результаты носят общетеоретический характер, а разработанный научно-методический аппарат (НМА) функционального преобразования трафика трудно применим на практике. В частности, этим НМА не учитываются требования по качеству обслуживания (QoS – Quality of Service) трафика (задержка преобразования, требуемый объем буфера преобразователя, вероятность отказа в обслуживании), а также сохранение вероятностно-временных параметров преобразования (равенство математических ожиданий входного и выходного потоков трафика, только положительный сдвиг во времени поступивших пакетов, невозможность преобразования всех пакетов и т. д.).

В предыдущей работе автора [23] решена задача разработки НМА преобразования трафика с учетом требований по QoS и вышеуказанных дополнительных параметров, но применительно к задаче снижения структурной сложности трафика. Вместе с тем, в этой работе, так же, как и в работах Г.И. Линца, не рассматривается задача преобразования структуры трафика в направлении его усложнения.

Таким образом, для обоснования оператора преобразования трафика в направлении усложнения его структуры будет использован метод функционального преобразования трафика, рассмотренный в работах Г.И. Линца и его коллег [14–17]. Дальнейшие совершенствование процесса преобразования трафика на основе обоснованного оператора будет вестись с учетом требований по QoS и параметров преобразования, в соответствии с наработками, представленными в работе [23].

В соответствии с поставленной задачей входной поток трафика моделируется потоками, имеющими экспоненциальное, равномерное и нормальное распределение значений интервалов времени между поступлениями очередных заявок. Функции вероятности данных распределений представлены выражениями (1)–(3) соответственно.

Выходной поток трафика моделируется потоком сложной структуры и имеет Парето-распределение времени распределения между поступлениями очередных заявок:

$$G(\tau_{\text{вых}}) = 1 - \left(\frac{k}{\tau_{\text{вых}}}\right)^{\alpha}, \qquad k > 0, \qquad \alpha > 0, \tau_{\text{вых}} > k. \tag{4}$$

Сформируем оператор φ, который задает отображение:

$$\varphi : F(\tau_{\text{вх}}) \to G(\tau_{\text{вых}}). \tag{5}$$

С учетом свойства инвариантности дифференциалов вероятности можно записать:

$$f(\tau_{\text{вх}})d\tau_{\text{вх}} = g(\tau_{\text{вых}})d\tau_{\text{вых}}, \tag{6}$$

откуда в общем виде можно получить оператор преобразования:

$$g(\tau_{\text{вых}}) = f(\tau_{\text{вх}}) \left|\frac{d\tau_{\text{вх}}}{d\tau_{\text{вых}}}\right|. \tag{7}$$

Проинтегрировав выражение (6) получим:

$$\int_0^{\tau} f(\tau_{\text{вых}})d\tau_{\text{вх}} = \int_0^{\tau} g(\tau_{\text{вых}})d\tau_{\text{вых}}. \tag{8}$$

Последнее выражение определяет равенство функций вероятности входного и выходного процессов:

$$F\tau_{\text{вх}} = G(\tau_{\text{вых}}). \tag{9}$$

Преобразуем выражение (9) с учетом того, что функция вероятности Парето-распределения $G(\tau_{\text{вых}})$ определяется выражением (4):

$$F(\tau_{\text{вх}}) = 1 - \left(\frac{k}{\tau_{\text{вых}}}\right)^{\alpha}, \tag{10}$$

откуда получим оператор преобразования произвольного распределения $F(\tau_{\text{вх}})$ в поток с Парето-распределением:

$$\tau_{\text{вых}} = \left(\frac{k^{\alpha}}{1 - F(\tau_{\text{вх}})}\right)^{\frac{1}{\alpha}}. \tag{11}$$

Расчет операторов преобразования трафика

В соответствии с поставленной в данной работе задачей, потоками, имеющими экспоненциальное, равномерное и нормальное распределение и используемыми в качестве модели входного трафика, полученным для расчета операторов преобразования трафика выражением (11), определим оператор φ преобразования в поток с распределением Парето.

1) Оператор φ-преобразования потока с экспоненциальным распределением в поток с распределением Парето получим подстановкой в выражение (11) вместо $F(\tau_{вх})$ функции $F\left(\tau_{вх}^{exp}\right)$, определяемой выражением (1) и получим:

$$\tau_{вых} = \varphi\left(\tau_{вх}^{exp}\right) = \left(\frac{k^{\alpha}}{1-\left(1-e^{-\lambda\tau_{вх}^{exp}}\right)}\right)^{\frac{1}{\alpha}} = k\ e^{\frac{\lambda\tau_{вх}^{exp}}{\alpha}}. \quad (12)$$

2) Оператор φ преобразования потока с равномерным распределением в поток с распределением Парето получим таким же образом подстановкой в выражение (11) вместо $F(\tau_{вх})$ функции $F\left(\tau_{вх}^{равн}\right)$, определяемой выражением (2):

$$\tau_{вых} = \varphi\left(\tau_{вх}^{равн}\right) = \left(\frac{k^{\alpha}}{1-\left(\frac{\tau_{вх}^{равн}-a}{b-a}\right)}\right)^{\frac{1}{\alpha}} = k\ \left(\frac{b-a}{b-\tau_{вх}^{равн}}\right)^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (13)$$

3) Оператор φ преобразования потока с нормальным распределением в поток с распределением Парето получим подстановкой в выражение (11) вместо $F(\tau_{вх})$ функции $F\left(\tau_{вх}^{норм}\right)$ с учетом того, что функция определяется выражением (3):

$$\tau_{вых} = \varphi\left(\tau_{вх}^{норм}\right) = \left(\frac{k^{\alpha}}{1-\Phi(*)}\right)^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (14)$$

где Ф(*) – функция Лапласа (функция распределения, позволяющая определить вероятность попадания случайной величины, распределенной по нормальному закону, при значениях $m = 0$, $\sigma = 1$):

$$\Phi\left(\tau_{вх}^{норм}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{\tau_{вх}^{норм}} e^{-\frac{\left(\tau_{вх}^{норм}\right)^2}{2}}\, d\tau_{вх}^{норм}.$$

При определении вероятности попадания значений интервала времени $\tau_{вх}^{норм}$ в заданный интервал $[a, b]$, путем замены $\frac{\tau_{вх}^{норм}-m}{\sigma} = t_{вх}^{норм}$, $\frac{a-m}{\sigma} = A$, $\frac{b-m}{\sigma} = B$ в выражении (1) функция Лапласа примет вид:

$$\Phi\left(\tau_{\text{вх}}^{\text{норм}}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{A}^{B} e^{-\frac{\left(t_{\text{вх}}^{\text{норм}}\right)^2}{2}} dt_{\text{вх}}^{\text{норм}}.$$

При этом значения функции Лапласа посчитаны и приводятся в специальных таблицах.

В проведенном ранее исследовании автора и его коллег [24] показано, что полученные операторы преобразования трафика (12) – (14) в трафик со сложной структурой в дальнейшем необходимо более подробно исследовать. Так, например, в исследовании [24] было выявлено, что при прямом использовании оператора преобразования возникают отрицательные значения времени задержки пакетов в системе ИТВ, что противоречит физическому смыслу процесса.

Вывод

Дальнейшее исследование полученных операторов преобразования входного трафика (12)–(14) на предмет выявления в нем типовых процессов и определения рекомендаций по рациональному практическому применению данных операторов представляет интерес дальнейших научных изысканий автора для разработки ИТВ, основанных на преобразовании структуры трафика в направлении ее усложнения.

Список используемых источников

1. Макаренко С.И., Михайлов Р.Л. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на неё дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 4. С. 69–79.

2. Ушанев К.В. Имитационные модели системы массового обслуживания типа *Pa*/*M*/1, H_2/*M*/1 и исследование на их основе качества обслуживания трафика со сложной структурой // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 4. С. 217–251.

3. Макаренко С.И., Ушанев К.В. Показатели своевременности обслуживания трафика в системе массового обслуживания *Pa*/*M*/1 на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 1. С. 42–65. URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2016-01/03-Ushanev.pdf.

4. Рыжиков Ю.И. Расчет систем обслуживания с групповым поступлением заявок // Информационно-управляющие системы. 2007. № 2. С. 39–49.

5. Рыжиков Ю.И. Полный расчет системы обслуживания с распределениями Кокса // Информационно-управляющие системы. 2006. № 2. С. 38–46.

6. Будко П.А., Рисман О.В. Многоуровневый синтез информационно-телекоммуникационных систем. Математические модели и методы оптимизации. СПб.: ВАС, 2011. 476 с.

7. Малофей О.П., Родионов В.В., Ряднов Д.С., Фомин Л.А. Моделирование самоподобного трафика при построении сетей NGN // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2009. № 11. С. 176–186.

8. Бахарева Н.Ф., Карташевский И.В., Тарасов В.Н. Анализ и расчет непуассоновских моделей трафика в сетях ЭВМ // Инфокоммуникационные технологии. 2009. Т. 7. № 4. С. 61–66.

9. Бахарева Н.Ф., Горелов Г.А., Тарасов В.Н. Математическая модель трафика с тяжелохвостным распределением на основе системы массового обслуживания $H_2/M/1$ // Инфокоммуникационные технологии. 2014. Т. 12. № 3. С. 36–41.

10. Иванов Ю.А., Пастухов А.С., Шелухин О.И. Исследование влияния самоподобия ON-OFF источников на скорость интернет-трафика // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2008. Т. 4. № 1–2. С. 97–100.

11. Назаров А.Н., Сычев К.И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. Красноярск: Поликом, 2010. 389 с.

12. Макаренко С.И. Анализ математических моделей информационных потоков общего вида и степени их соответствия трафику сетей интегрального обслуживания // Вестник Воронежского государственного университета. 2012. Т. 8. № 8. С. 28–35.

13. Долгушин Д.Ю., Задорожный В.Н., Юдин Е.Б. Аналитико-имитационные методы решения актуальных задач системного анализа больших сетей / Под ред. В.Н. Задорожного. Омск: Издательство ОмГТУ, 2013. 324 с.

14. Линец Г.И. Методы структурно-параметрического синтеза, идентификации и управления транспортными телекоммуникационными сетями для достижения максимальной производительности: автореф. дис. … д-ра техн. наук. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет. 2013. 34 с.

15. Линец Г.И., Скоробогатов С.А., Фомин Л.А. Снижение влияния самоподобности трафика в пакетных сетях // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2008. № 11. С. 38–42.

16. Криволапов Р.В., Линец Г.И., Скоробогатов С.А., Фомин Л.А. Способ снижения влияния самоподобности в сетевых структурах и устройство для его осуществления // Патент на изобретение № 2413284 от 27.02.2011.

17. Говорова С.В., Линец Г.И., Меденец В.В., Фомин Л.А. Построение мультисервисных сетей на основе функциональных преобразований трафика // Инфокоммуникационные технологии. 2014. Т. 12. № 4. С. 40–45.

18. Зиннуров С.Х., Новиков Е.А., Павлов А.Р. Метод оперативного планирования частотно-временного ресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений // Авиакосмическое приборостроение. 2014. № 5. С. 14–23.

19. Новиков Е.А. Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом запаздывания в управлении // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2 (69). С. 79–86.

20. Новиков Е.А. Оценка пропускной способности спутника-ретранслятора при резервировании радиоресурса с упреждением // Труды Научно-исследовательского института радио. 2014. № 3 (15). С. 62–69.

21. Жуков С.Е., Новиков Е.А., Павлов А.Р. Метод динамического распределения радиоресурса ретранслятора в сетях спутниковой связи с учетом неоднородности трафика и запаздывания при управлении // Труды научно-исследовательского института радио. 2014. № 1. С. 74–80.

22. Макаренко С.И. Преднамеренное формирование информационного потока сложной структуры за счет внедрения в систему связи дополнительного имитационного трафика // Вопросы кибербезопасности. 2014. № 3 (4). С. 7–13.

23. Макаренко С.И., Ушанев К.В. Преобразование структуры трафика с учетом требований по качеству его обслуживания // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. № 2. С. 74–84.

24. Макаренко С.И., Коровин В.М., Ушанев К.В. Оператор преобразования трафика для преднамеренного повышения структурной сложности информационных потоков // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 4. С. 77–109. URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2016-04/04-Makarenko.pdf.

EXPERIMENTAL TESTBED FOR ACCESS POINT SELECTION IN IoT WiFi NETWORKS

V. Lavrukhin[1], **A. Lezhepekov**[2], **A. Vladyko**[2]

[1]ER-Telecom Holding, Perm, 614990, Russia
[2]The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russia

Article info
Article in English

For citation: Lavrukhin V., Lezhepekov A., Vladyko A. Experimental Testbed for Access Point Selection in IoT WiFi Networks // Proceedings of Educational Institutes of Communication. 2017. Vol. 3. Iss. 2. PP. 102–112.

Abstract: *This paper analyzes WiFi access point selection mechanisms used by IoT WiFi devices. A testbed for experimental setup is proposed. The testbed includes several WiFi access points, WiFi controller and WiFi network analyzer. More than 900 measurements covering 19 test cases are made. It is shown that an received signal strength indicator is the primary criterion used by the IoT WiFi device for access point selection during connection procedure.*

Keywords: *WiFi, access point, IoT, RSSI, testbed*.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВЫБОРУ WiFi-СЕТИ IoT-УСТРОЙСТВАМИ

В. Лаврухин[1], **А. Лежепёков**[2*], **А. Владыко**[2]

[1]АО «ЭР-Телеком Холдинг», Пермь, 614990, Российская Федерация
[2]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация
*Адрес для переписки: anton.lezhepekov@mail.ru

Информация о статье
УДК 621.396
Язык статьи – английский

Ссылка для цитирования: Lavrukhin V., Lezhepekov A., Vladyko A. Experimental Testbed for Access Point Selection in IoT WiFi Networks // Труды учебных заведений связи. 2017. Том 3. № 2. С. 102–112.

Аннотация: *В статье проводится анализ механизмов, используемых для организации беспроводной WiFi-сети IoT-устройствами. Все измерения произведены средствами испытательного стенда, включающего в себя несколько точек доступа WiFi, WiFi-контроллер и WiFi-анализатор сети. В результате проведения более 900 испытаний в 19 различных условиях установлена зависимость между мощностью принимаемого сигнала RSSI и выбором предпочтительной точки доступа. Предложены параметры Channel Utilization и STA count в качестве дополнительных критериев, влияющих на выбор оптимальной точки доступа.*

Ключевые слова: *WiFi, точка доступа, IoT, RSS, экспериментальный стенд.*

1 Introduction

Interaction of IoT[1] – devices with each other and with outside environment is carried out via organization of wired as well as wireless networks [1]. The basic concept of IoT implies mobility and compactness of end-user devices, thus, the basic means of interaction are wireless access networks. In this article IEEE 802.11 standard is considered as wireless technology for interaction of IoT-devices [2]. The concept of organization of corporate WiFi networks implies centralized management of access points with the help of controller of this network. Access points (AP) are combined into seamless network with one service set identity (SSID). Subscriber station (SS) receives a list of WiFi network SSIDs available for connection. SS operating system programmatically sorts the list of available networks according to criteria specified by application developers. Thus, user does not have any possibility to choose AP independently among corporate networks and to change the sorting algorithm for available WiFi APs. The used side-effect frees the user from decision-making related to the choice of particular AP, instead providing algorithm on program side. Parameters used for relevant AP selection algorithm – access points meeting user's requirements concerning throughput in uplink and downlink and average response time, are not standardized and determined by operating system developers at application level [3].

Objective of present research is determination of wireless WiFi connection parameters by means of experiments affecting the sorting process of the list of available APs by end-user device in the context of Android and iOS operating systems. Absence of recommendations for relevant WiFi network determination of existing group of IEEE 802.11 standards results in uncertainty during formation of the list of APs available for user connection. The problem of existing WiFi APs selection algorithm is in delegation of vendors for criteria selection, which are the base of ranking process, to developers of high-level applications, which are not always experts in the sphere of wireless data transfer – WiFi [4].

By 2020 there are expected 13.5 billion of IoT devices, a part of which competes with each other for the selection of optimal WiFi AP. Inability of relevant AP identification will result in uneven distribution of user devices across APs, and it can lead to service denial with the loss of ability for information exchange within IoT. At the present moment, this problem is solved at the level of WiFi network controller, if network creation includes this controller and there is enabled the load balancing function. In all other cases, the problem of uneven distribution of user IoT-devices at APs has a great impact on network capacity [5].

In this article, the results of 950 experiments confirm the hypothesis of the use of RSSI[2] as the main criterion for relevant network selection, that it takes into account only physical bases of radio signal propagation, but it does not take into ac-

[1] IoT – Internet of Things
[2] RSSI – Received Signal Strength Indication

count behavioral factors of network users (for example, number of connected users and their activity).

2 Background

Nowadays, IEEE 802.11-2012 standard influences algorithm of user stations connection to WiFi access point without explicit criteria specification for relevant network selection, thus, developers of operating systems and high-level applications tacitly use the RSSI [6]. The received signal strength does not take into account noise level of this frequency channel, on which SNR[3] parameter is based [6, 7]. Absence of possibility to change the level of electromagnetic noisiness during optimal access point selection results in multiple interpretation of problem solution concerning relevant WiFi network determination.

3 RSSI experiment

In this article, we will consider WiFi network consisting of controller WiFi Ruckus Wireless ZoneDirector 1100, two APs Ruckus Wireless ZoneFlex 7372, switch D-Link DGS-1100-24P, to which there will be connected user IoT-devices Xiaomi and Apple with operating systems Android and iOS, respectively.

RSSI experiment is necessary for confirmation of hypothesis about exclusive effect of RSSI signal strength. Ranking process of access points is based on arranging the list of available access points as far as RSSI indicator decreases:

$$RSSI = P_0 - 10 \cdot n \cdot \log_{10} \frac{d}{d_0} \ [dBm],$$

where d – distance from device to transmitter, m; d_0 – distance from device to access point, m; n – signal power-loss ratio in environment; P_0 – reference power, dBm.

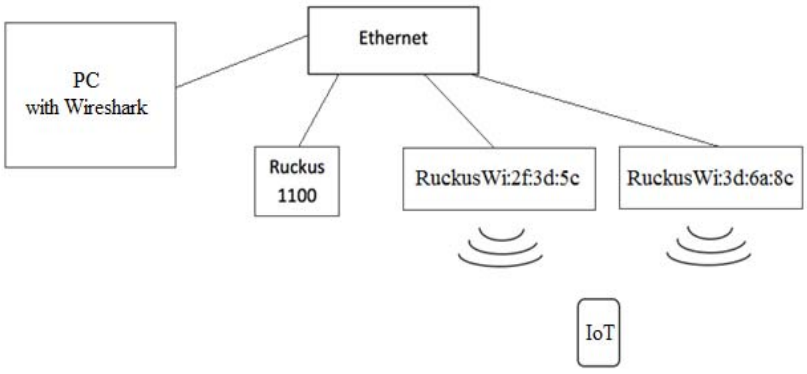


Fig. 1. Scheme of experimental unit

The present experiment was implemented with the use of test unit shown in Fig. 1. Two APs Ruckus Wireless ZoneFlex 7372 are connected into one network under the control of controller Ruckus Wireless ZoneDirector 1100 and broadcasting on the same SSID [4] «TEST». Xiaomi Home and Apple iHome

[3] SNR – Signal to Noise Ratio
[4] SSID – Service Set Identifier

IoT-device was connected to «TEST» network at the same distance from two APs. The experimental procedure involves 20 different states simulated with the use of test unit shown in Fig. 1. In open field conditions in absence of competing devices capable of creating electromagnetic interference (WiFi networks, microwave ovens, medical devices and others), there is generated WiFi network open for public access at frequency band of 5 GHz. Two APs broadcast on the same SSID «TEST», thus, providing the right of choice not to user, but to algorithm embed into UE. During experiment, two APs will have different parameters allowing indirectly determining the factor influenced this or that outcome of connection process. UE is at the same distance from both APs for contest in equal conditions. In case of initial conditions, mobile device is not familiar with network. User connects to the only possible SSID «TEST» without any passwords and with the help of parallel logging Wireshark determines AP MAC-address in favor of which there was made a choice. Tp-Link TL-WDN3200 was used as adapter for frames capturing on user computer with Wireshark installed.

During experiments, there were examined 19 cases with 50 experiments in each. Every case mutually eliminates the influence of access point configuration on relevant WiFi network selection algorithm. In this article, there will be presented 4 of 50 experiments of several most important cases in the form of Matlab graph:

1) Two APs transmit with the same maximum power level of 20 dBm each on 36 and 52 frequency channels (and vice versa). There are no end-user devices connected to APs.

2) There is the same experimental setup as in case 1, but the power level of APs was reduced to minimum level of 1 dBm.

3) Two APs transmit with different power levels of 1 and 10 dBm (and vice versa). There are no end-user devices connected to APs.

4) Two APs transmit with the same power level of 10 dBm each on 36 and 52 frequency channels (and vice versa). The first AP has 10 connected SS devices, the second AP has no any connected SS devices (and vice versa).

5) Two APs transmit with the same power level of 10 dBm each on 36 and 52 frequency channels (and vice versa). The first AP has one connected SS device with iperf traffic generator started to make the maximum channel load, the second AP has no any connected SS devices (and vice versa).

6) Two APs transmit with different power levels of 1 and 10 dBm on 36 and 52 frequency channels (and vice versa). The first AP has one connected SS device with iperf traffic generator started to make the maximum channel load, the second AP has no any connected SS devices (and vice versa).

Results of experiments from Wireshark via LUA language were ported to Matlab for subsequent graph plotting and contest winner determination. The dashed red line indicates the authentication moment. Before each experiment, on user deviced there were deleted all previously saved WiFi networks.

[5] UE – User Equipment

Case 1. In this test case both APs broadcast at the same maximum power level of 20 dBm; there are no other connected users. RuckusWi:3d:6a:8c and RuckusWi:2f:3d:5c use 36 and 52 frequency channels, respectively (and vice versa). Objective of this case is determination of dependence of AP selection on frequency channel number.

Results of Case 1. Processing of 50 results in 50 cases showed (Fig. 2) the absence of dependence of access point selection on frequency channel number during transmitting with maximum power level. Thus, in 50 out of 50 experiments, the fundamental criterion for access point selection was RSSI level. These results are independent from changing APs between frequency channels. UE change did not influence the preferred AP selection.

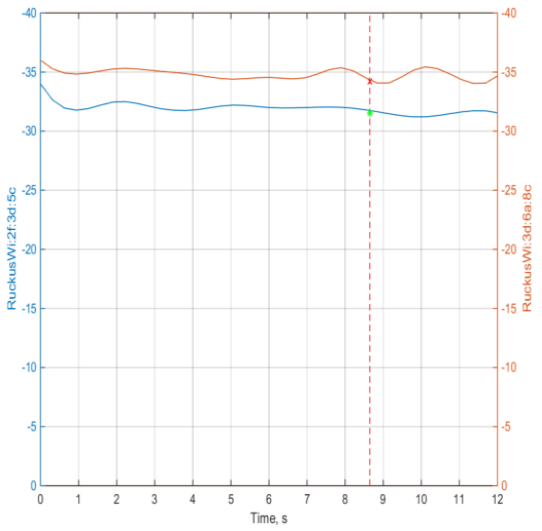


Fig. 2a. Experiment No. 17

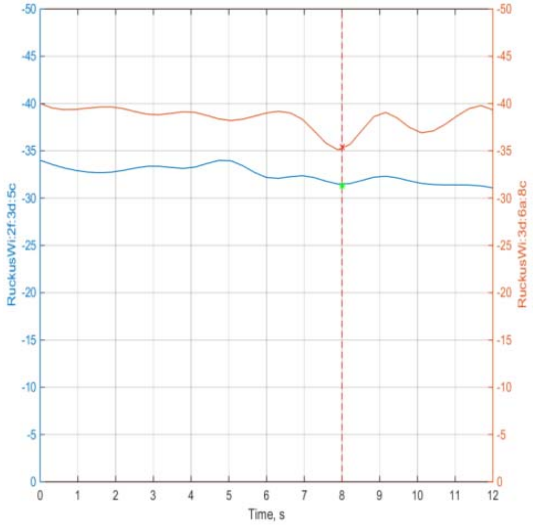


Fig. 2b. Experiment No. 13

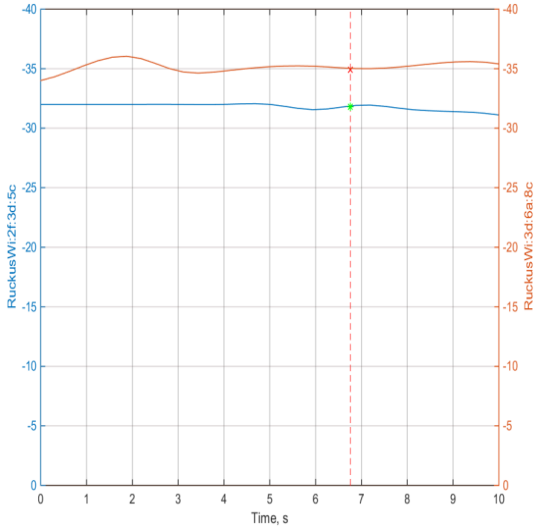


Fig. 2c. Experiment No. 24

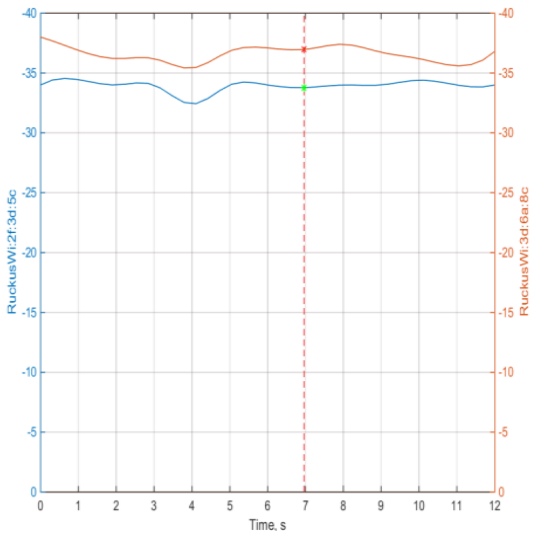


Fig. 2d. Experiment No. 44

Case 2. In this test case both APs broadcast at the same minimum power level of 1 dBm; there are no other connected users. RuckusWi:3d:6a:8c and Ruckus-

Wi:2f:3d:5c use 36 and 52 frequency channels, respectively (and vice versa). Objective of this case is the same as in case 1.

Results of Case 2. Processing of 50 results in 47 cases showed (Fig. 3) the absence of dependence of AP selection on frequency channel number during transmitting with minimum power level. Thus in 47 out of 50 experiments there won the AP with the highest RSSI level; exchange of frequency channels did not influence the contest outcome. UE change did not influence the preferred AP selection.

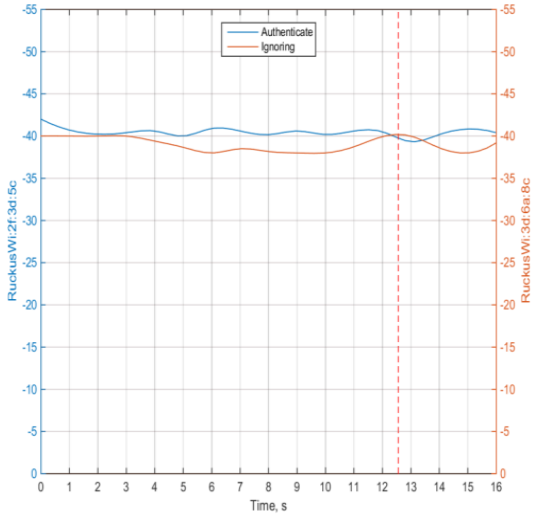


Fig. 3a. Experiment No. 8

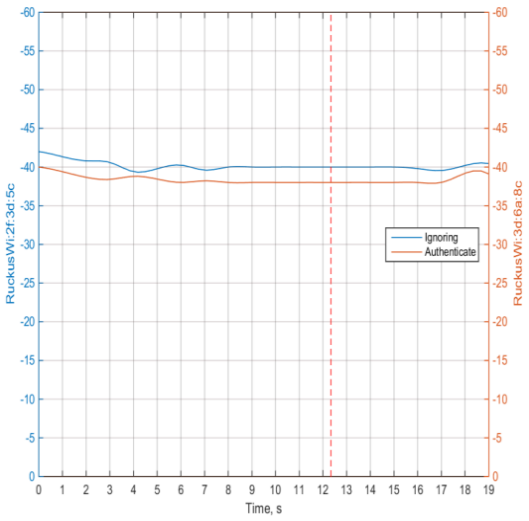


Fig. 3b. Experiment No. 24

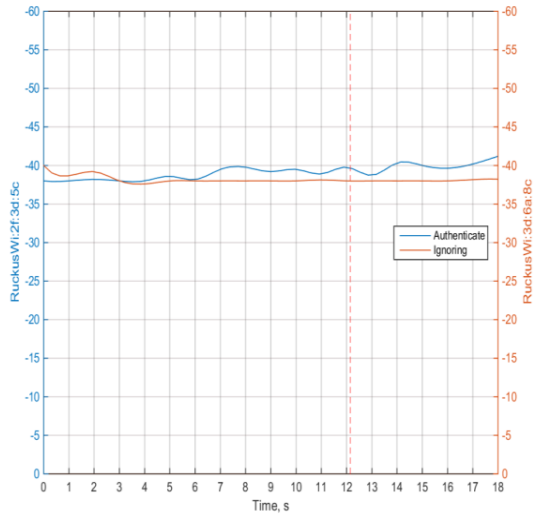


Fig. 3c. Experiment No. 31

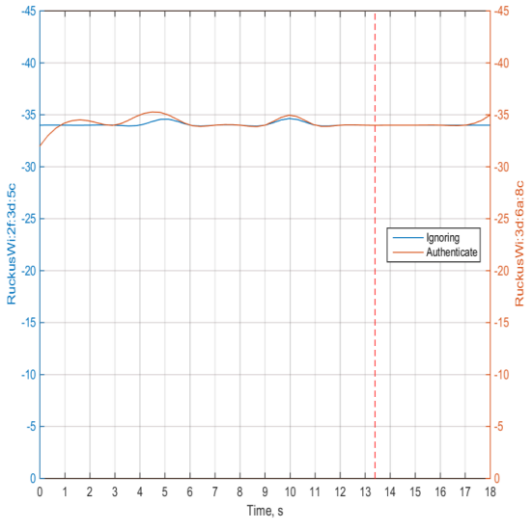


Fig. 3d. Experiment No. 10

Case 3. In this case both APs transmit with different power levels; there are no other connected users. RuckusWi:3d:6a:8c and RuckusWi:2f:3d:5c use 48 and 36 frequency channels and power levels of 1 dBm and 10 dBm respectively (and vice versa).

Results of Case 3. Processing of 50 experiment results of 50 cases showed (Fig. 4) the presence of dependence of access point selection on transmit power level. The result of 50 implemented experiments showed that 50 connections

were on access point with 10-time higher power level. Thus, in 50 out of 50 experiments, there won the access point with the highest RSSI level; the change of transmit power and number of frequency channel did not result in change of preferred AP selection. UE change did not influence the preferred AP selection.

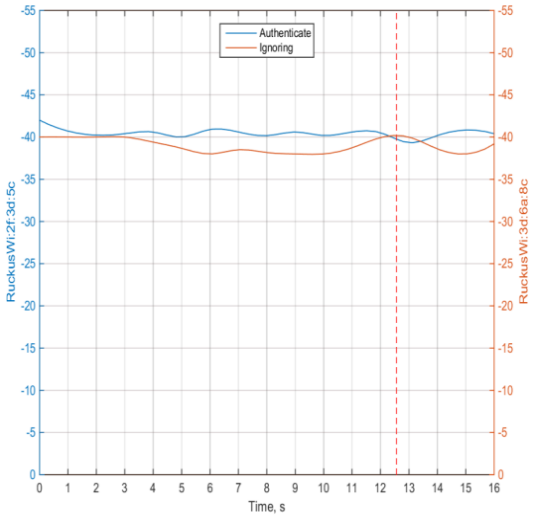


Fig. 4a. Experiment No. 8

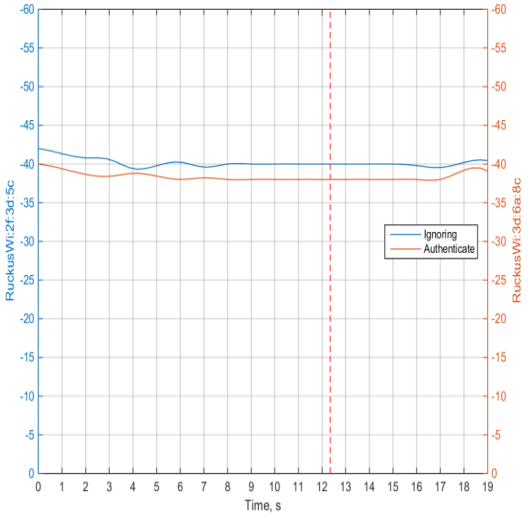


Fig. 4b. Experiment No. 24

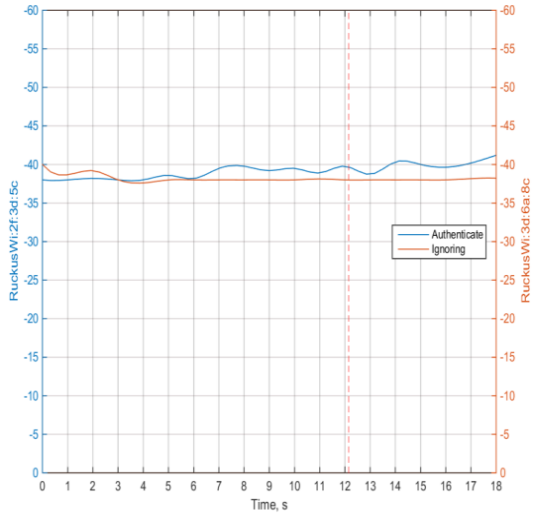


Fig. 4c. Experiment No. 31

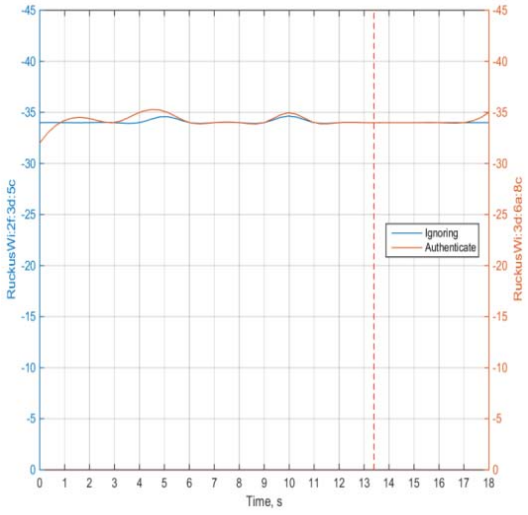


Fig. 4d. Experiment No. 10

Case 4. Objective of this case is determination of dependency of AP selection on number of users connected to the AP. Compared with case 1, there were set the same values of transmit power of 10 dBm for both APs and there were connected 10 other SSs to the first APs (and then to the second AP).

Results of Case 4. Processing of 50 experiment results in 42 cases showed (Fig. 5) the absence of influence of connected (to the AP) SSs on AP selection in Android and iOS. Thus, in 84 % of experiments there won the access point with the highest RSSI level; the number of connected SSs to the AP did not influence the final choice. UE change did not influence the preferred AP selection.

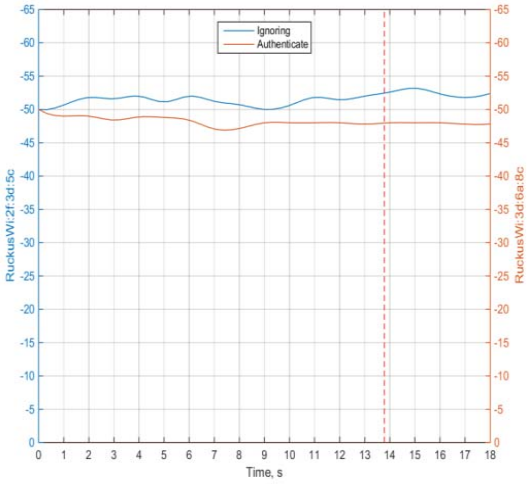


Fig. 5a. Experiment No. 6

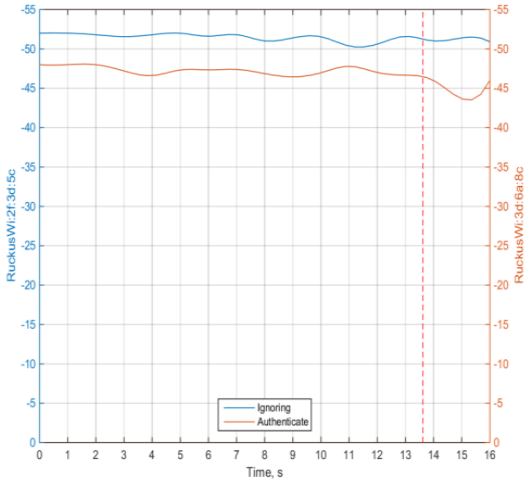


Fig. 5b. Experiment No. 1

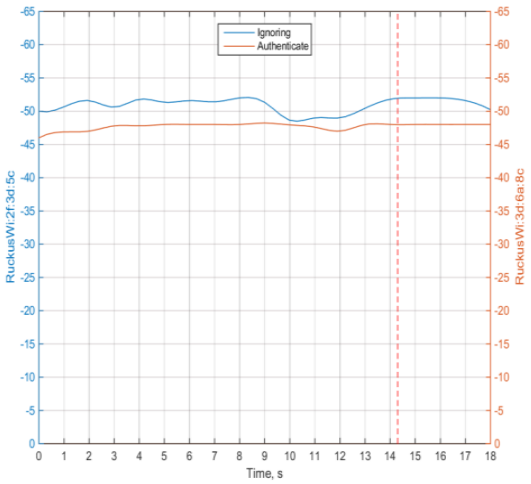


Fig. 5c. Experiment No. 31

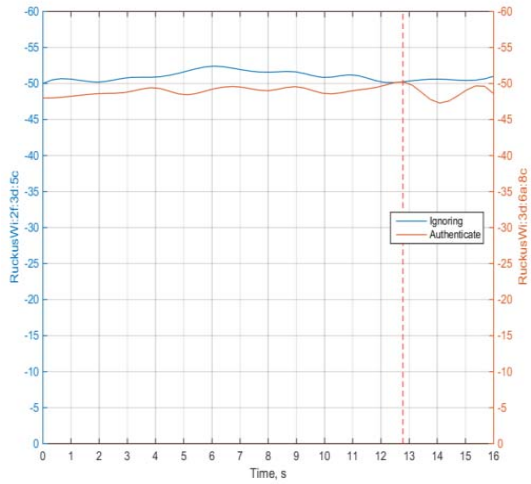


Fig. 5d. Experiment No. 40

Case 5. Objective of this case is determination of dependency of AP selection on traffic load in the frequency channel. Compared with case 4 (same transmit power of 10 dBm on both APs) there was iperf load on the first AP (and then on the second AP). Iperf generated udp stream between SS connected to AP and PC in the wired part of the testbed. This stream occupied more than 90 % of airtime of the frequency channel used by the AP.

Results of Case 5. Processing of 50 experiment results in 38 cases showed (Fig. 6) the absence of influence of frequency channel load on AP selection in Android and iOS devices. The difference of power levels from access points on receiving side at the same initial configuration is explained by physical conditions of environment. Thus, in 76 % of experiments, there won the AP with the highest RSSI level; traffic generation by iperf for AP channel did not influence the final choice.

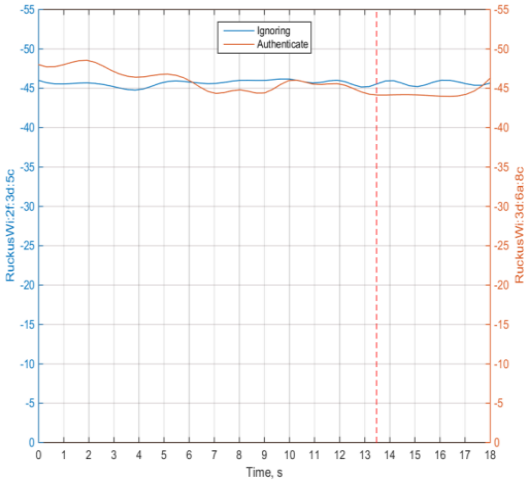


Fig. 6a. Experiment No. 2

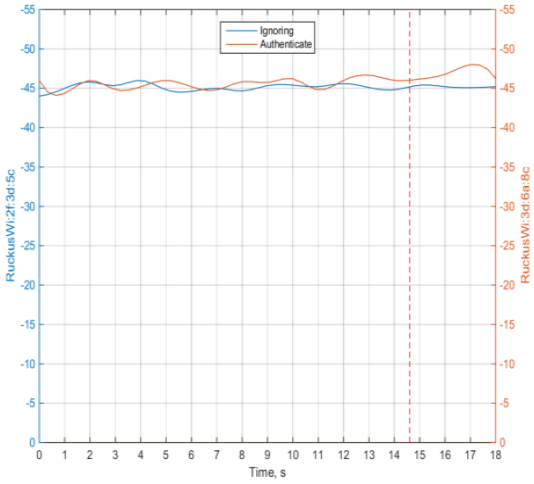


Fig. 6b. Experiment No. 3

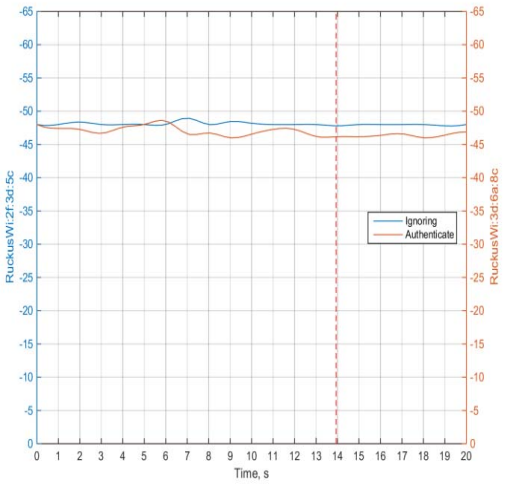


Fig. 6c. Experiment No. 4

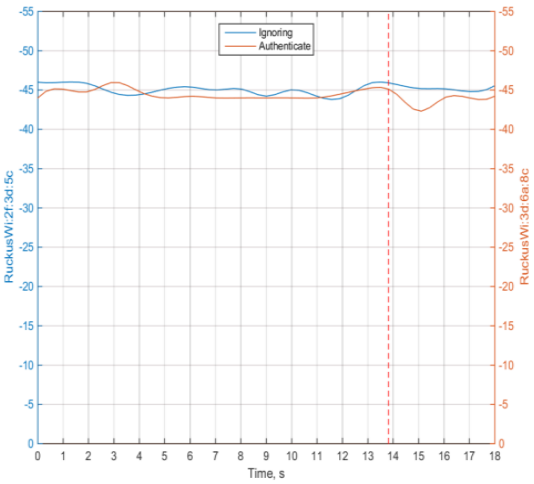


Fig. 6d. Experiment No. 5

Case 6. Objective of this case is determination of dependency of AP selection on traffic load in the frequency channel. Compared with case 5 there are set different power levels on APs: RuckusWi:2f:3d:5c – 1 dB, RuckusWi:3d:6a:8c – 10 dB. Traffic load was applied to the AP with reduced power level.

Results of Case 6. Processing of 50 experiment results in all 50 cases showed (Fig. 7) the absence of influence of AP channel load on AP selection in Android and iOS devices. The result of 50 implemented experiments showed that 50 connections were on AP with 10-time higher power level (RuckusWi:3d:6a:8c) independent of the channel load. Thus, in 50 out of 50 experiments, there won the AP with the highest RSSI level; traffic generation by for AP did not influence the final choice.

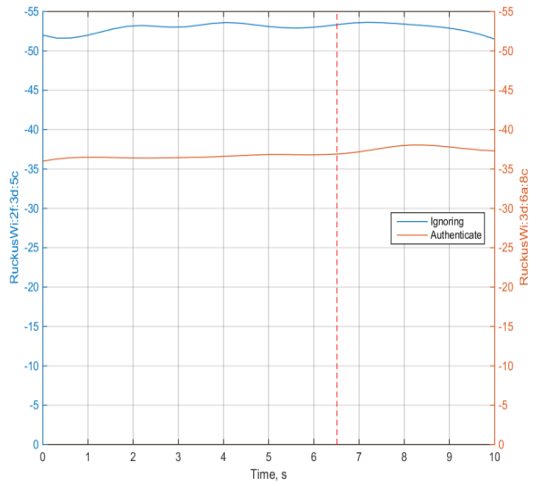


Fig. 7a. Experiment No. 2

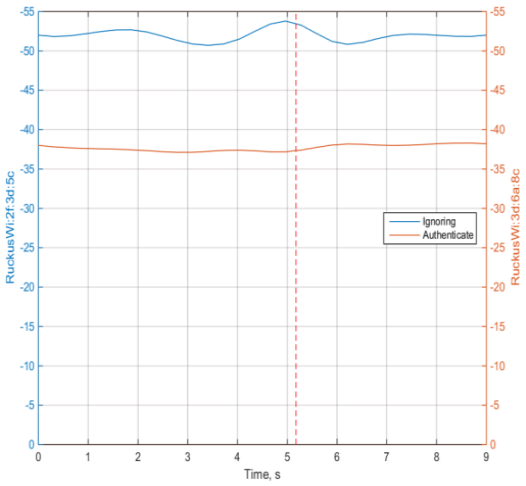


Fig. 7b. Experiment No. 23

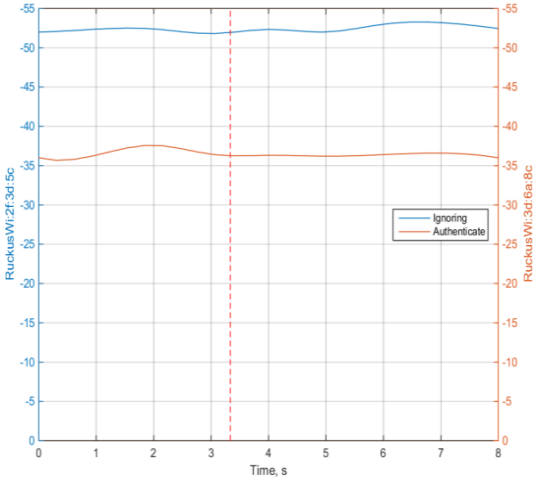


Fig. 7c. Experiment No. 3

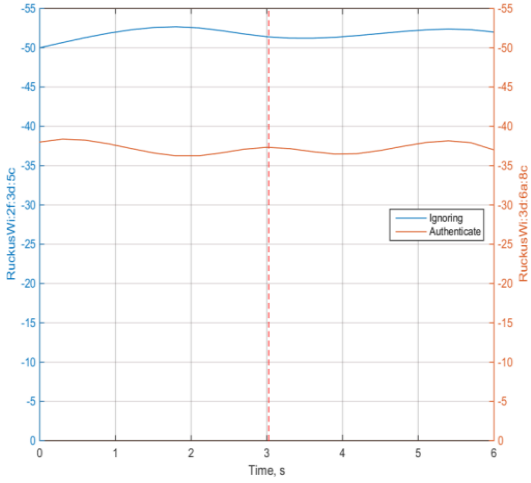


Fig. 7d. Experiment No. 46

4 Results of experiments

Considering all the tests the winner in 885 out of 950 experiments was AP with higher RSSI level in relation to other WiFi AP. This is more than 93 % of choices. Thus, in overwhelming majority the choice of IoT-device is based on RSSI level. In the present experiment, there were examined 19 different cases demonstrating the influence of RSSI parameters, number of frequency channel, SSs count and channel load on access point selection.

The main problem of such algorithm is low correlation dependence of delay and user throughput on RSSI level. The presence of electromagnetic interference sources worsens SNR indicator, but RSSI rests the same, reducing the benefit of use of existing AP ranking algorithm. The presence of another SSs and high channel load are also constraint factors for such algorithm. The use of the number of connected users (STA Count) and frequency channel utilization (Channel Utilization) parameters for AP selection would provide more objective information related to connection

quality. Thus, specified list of wireless WiFi networks in radio coverage zone will undergo further sorting according to its parameters responsible for wireless network quality [8]. It should be noted that the extended mechanism does not solve the problem interference, but it extends mathematical model suggesting to attack the problem of relevant network selection by increasing the number of program criteria without any hardware upgrade [9].

5 Conclusion and future work

In result of investigational study, there have been determined the criteria underlying WiFi access point selection by IoT user devices.

As part of implemented experiments, there has been proven the prevalent use of received signal strength (RSSI) as fundamental criterion for WiFi access point selection. The detailed study of 802.11k specification will allow offering new approaches to formation of relevant list of WiFi access points due to the use of Channel Utilization and STA Count parameters containing the number of connected user stations.

The motivation of this work is jogging a WiFi community including software developers to use more sophisticated algorithm for AP selection by end-user devices, especially in the IoT world. For the future work we will compare different complex algorithms for AP selection proposed by researchers.

References

1. Zanella A., Bui N., Castellani A., Vangelista L., Zorzi M. Internet of Things for Smart Cities // IEEE Internet of Things Journal. 2014. Vol. 1. Iss. 1, PP. 22–32.

2. Vladyko A., Paramonov A., Kirichek R., Koucheryavy A. Using the IEEE 802.11 Family of Standards for Communication Between Robotic Systems // Advances in Intelligent Systems Research. 2016. Vol. 133. PP. 153–157.

3. Andreev S., Gerasimenko M., Galinina O., Koucheryavy Y., Himayat N., Yeh S.P., Talwar S. Intelligent Access Network Selection in Converged Multi-Radio Heterogeneous Networks // IEEE Wireless Communications. 2014. Vol. 21. Iss. 6. PP. 86–96.

4. Khan M.O., Qiu L. Accurate WiFi Packet Delivery Rate Estimation and Applications // IEEE Infocom 2016 – The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications. 2016. PP. 1–9.

5. Kirichek R., Paramonov A., Vladyko A., Borisov E. Implementation of the Communication Network for the Multi-Agent Robotic Systems // International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems. 2016. Vol. 7. Iss. 1. PP. 48–63.

6. Luong P., Nguyen T.M., Le L.B., Đào N.D., Hossain E. Energy-Efficient WiFi Offloading and Network Management in Heterogeneous Wireless Networks // IEEE Access. 2017. Vol. 4. PP. 10210–10227.

7. Lavrukhin V. An Overhead Analysis of Access Network Query Protocol (ANQP) in Hotspot 2.0 Wi-Fi Networks // 13th International Conference on ITS Telecommunications (ITST). 2013. PP. 266–271.

8. Lavrukhin V., Simonina O., Volodin E. An Experimental Study of the Key QoS Parameters in Public Wi-Fi Networks // 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). 2014. PP. 198–203.

9. Lezhepekov A., Letenko I., Vladyko A. Software-Defined Routing in Convergent LTE/WiFi Networks // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2017. PP. 173–175.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абазина Евгения Сергеевна – кандидат технических наук, преподаватель кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, e.s.abazina@yandex.ru

Альшаев Илья Алексеевич – магистрант кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, alshaev51@gmail.com

Ахрамеева Ксения Андреевна – кандидат технических наук, доцент кафедры защищённых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, oklaba@mail.ru

Бурдин Антон Владимирович – доктор технических наук, доцент, помощник ректора по инновациям, профессор кафедры линий связи и измерений в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, bourdine@yandex.ru; bourdine-av@psuti.ru

Былина Мария Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры фотоники и линий связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, BylinaMaria@mail.ru

Василец Александр Александрович – аспирант кафедры радиофотоники и микроволновых технологий Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, a.vasilets@mail.ru

Владыко Андрей Геннадьевич – кандидат технических наук, директор НИИ «Технологии связи» Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, vladyko@sut.ru

Ганбаев Асиф Акиф оглы – аспирант кафедры электроники и схемотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, asif.ganbayev@gmail.com

Гришин Илья Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, i.v.grischin@gmail.com

Ерунов Анатолий Александрович – адъюнкт кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, erun_to@mail.ru

Кафарова Анастасия Михайловна – магистрант кафедры линий связи и измерений в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, nastya59494@mail.ru

Киреев Артем Валерьевич – аспирант кафедры радиосвязи и вещания Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, kireyev@list.ru

Ковальский Александр Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, sake636@mail.ru

Красов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, krasov@inbox.ru

Лаврухин Владимир Алексеевич – менеджер проекта АО «ЭР-Телеком Холдинг», vladimir.lavrukhin@gmail.com

Лежепёков Антон Сергеевич – инженер УНРПНК Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, anton.lezhepekov@mail.ru

Минаева Алина Юрьевна – магистрант кафедры линий связи и измерений в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, minaeva1993@mail.ru

Морозов Олег Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофотоники и микроволновых технологий Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, microoil@mail.ru

Попов Леонид Геннадьевич – магистрант кафедры защищённых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, leonidlitvinovo1994@mail.ru

Севрук Никита Львович – магистрант кафедры линий связи и измерений в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, nikasevruk@mail.ru

Ушаков Игорь Александрович – старший преподаватель кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, ushakovia@gmail.com

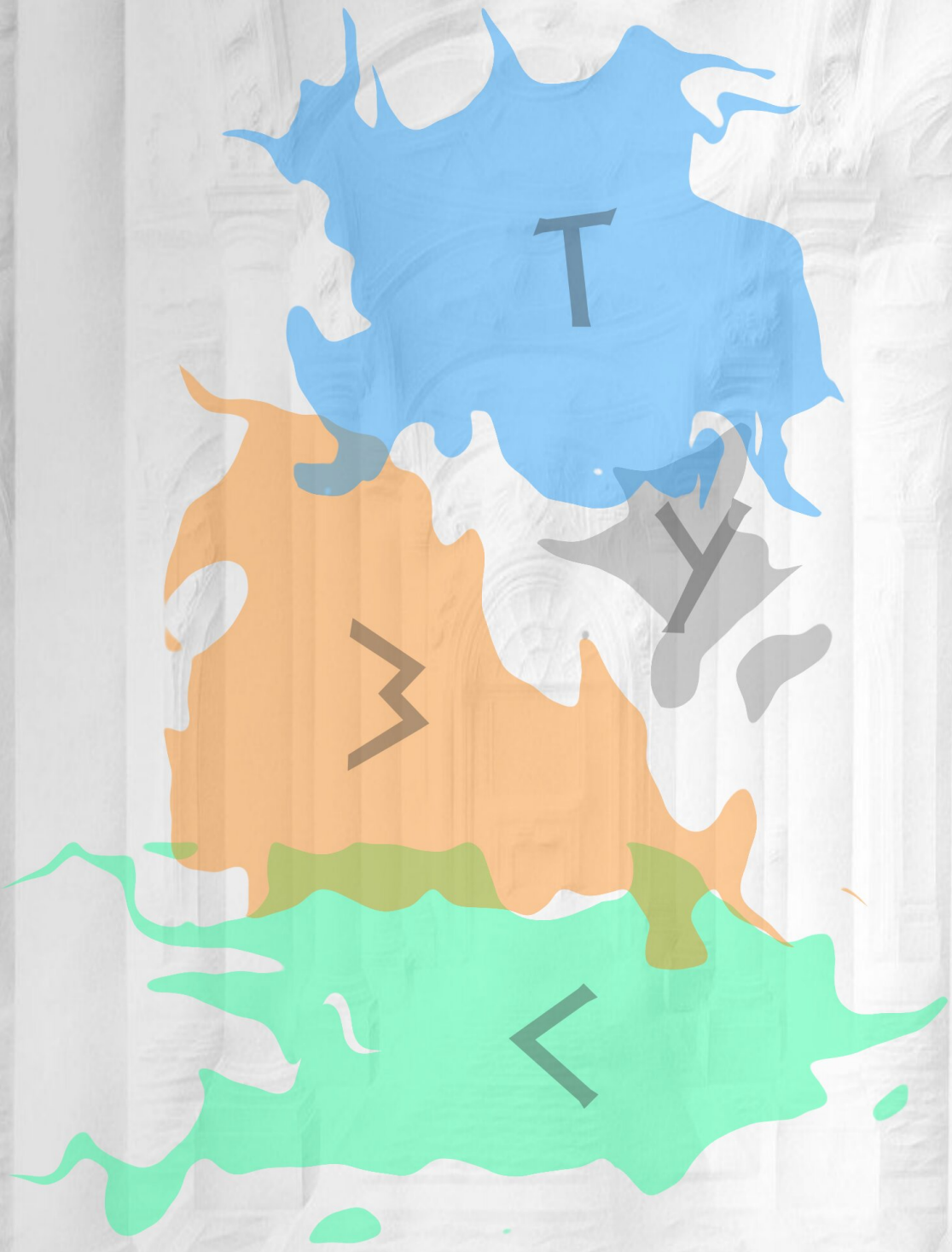
Ушанев Константин Владимирович – кандидат технических наук, инженер лаборатории кафедры систем и средств РЭБ Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, stan_007@mail.ru

Федоренко Иван Вячеславович – аспирант кафедры радиотехнических и телекоммуникационных систем Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, fedorenkoiv@mail.ru

Филин Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и схемотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, filin_vladimir@mail.ru

Фокин Григорий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиосвязи и вещания Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, harley_84@mail.ru

Халилов Михаил Николаевич – студент группы ИКТО-31 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, haliloff.mikhail@yandex.ru

Хричков Валентин Александрович – преподаватель кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, hrichkovv@gmail.com

Ялунина Татьяна Рудольфовна – студентка группы ИКТО-31 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, rudanichek@yandex.ru