



ISSN 2307-1303

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

электронный научный журнал



выпуск 3 за 2014 год

# Информационные технологии и телекоммуникации

## электронный научный журнал: выпуск 3 за 2014 год

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

Адрес учредителя, издателя и редакции:  
С.-Петербург, пр. Большевиков д.22, корп.1,  
193232; e-mail: telecomsut@gmail.com

Электронное представительство журнала  
www.itt.sut.ru

Журнал зарегистрирован в Российском индексе  
научного цитирования (РИНЦ)

Журнал имеет институт рецензирования

Электронное издание. Цена свободная

Settler and publisher Federal State Educational  
Budget-Financed Institution of Higher Vocational  
Education «The Bonch-Bruevich Saint - Petersburg  
State University of Telecommunications»

Address of the Settler and Publisher, Editorial Office:  
193232, Russia, St-Petersburg, Prospekt Bolshevikov  
22 - 1, e-mail: telecomsut@gmail.com

Electronic representative of the Journal  
www.itt.sut.ru

The Journal is included in Russian Index of Scientific  
Quotation (RINTS)

The Journal has review institute

On-line magazin. Free price

**Международная редакционная коллегия**  
Евгений Кучерявый, professor at Tampere U of Tech,  
PhD, Senior member IEEE, Финляндия  
Шахмаран Журсинбекович Сеилов,  
д-р экном. наук, президент Казахской академии  
инфокоммуникации, Казахстан  
Баскин Л.М., д-р ф.-м. наук, профессор, РФ  
Кучерявый А.Е., д-р техн. наук, профессор, РФ  
Буйневич М.В., д-р техн. наук, профессор, РФ  
Макаров В.В., д-р экон. наук, профессор, РФ  
Машков Г.М., д-р техн. наук, профессор, РФ

**Редакция**  
Бачевский С.В., главный редактор,  
д-р техн. наук, профессор  
Доценко С. М., заместитель главного редактора  
д-р техн. наук, профессор  
Владыко А. Г. , заместитель главного редактора,  
канд. техн. наук, member IEEE  
Минаков Л. М., ответственный секретарь,  
IT сопровождение журнала  
Аникевич Е. А., канд. техн. наук, Аникевич Е. М.  
редактирование, корректура, верстка

Неисключительные права на все материалы, опубликованные в данном издании принадлежат СПбГУТ.  
Все материалы, авторские права на которые принадлежат СПбГУТ, могут быть воспроизведены  
при наличии письменного разрешения от СПбГУТ. Ссылка на первоисточник обязательна.

По вопросам приобретения неисключительных прав и использования журнала  
обращайтесь по тел. (812) 326-31-63, добавочный 1388, e-mail telecomsut@gmail.com

За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы публикаций.  
Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов.



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Предисловие выпускающего редактора</b>	<b>4</b>
<b>СИСТЕМЫ, СЕТИ И УСТРОЙСТВА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ</b>	
Боронин П. Н., Кучерявый А. Е. Интернет Вещей как новая концепция развития сетей связи	7
Омётов А. Я., Кучерявый Е. А., Андреев С. Д. О роли беспроводных технологий связи в развитии Интернета Вещей	31
Комар М. С., Кучерявый Е. А., Молчанов Д. А., Петров В. И. Связи для взаимодействия между ядрами центрального процессора	41
Богданов И. А., Кучерявый А. Е. Характеристики беспроводной сенсорной сети для выявления вторжений в виде потоков ложных событий	59
Симонина О. А. Задачи управления качеством услуг в сетях post-NGN	75
Шилин П. А. Персональная цифровая мобильная радиосвязь посредством VANET	84
Дорт-Гольца А. А. Экспериментальная оценка методов краткосрочного прогнозирования для задачи предсказания интенсивности сетевого трафика	97
Солозобов А. С. Масштабируемость и надежность программно-конфигурируемых сетей	111
Ульянов А. В., Гришин И. В. Алгоритм нелинейной адаптивной фильтрации сигналов с OFDM	116
Бородко А. А. Разработка программы для поиска фрагментов речи дикторов	129

## ПРЕДИСЛОВИЕ ВЫПУСКАЮЩЕГО РЕДАКТОРА

Уважаемые читатели!

Вашему вниманию предлагается очередной номер журнала IT&T, посвященный новейшим исследованиям в рамках научной специальности 05.12.13 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Тематика номера определена научными исследованиями, проводимыми на кафедре «Сетей связи и передачи данных» – одной из крупнейших кафедр Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Кафедра большая и, естественно, научно-педагогическая работа на кафедре проводится по многим направлениям. Вместе с тем, на кафедре много молодых кандидатов наук и аспирантов, что способствует проведению научных исследований, в первую очередь, по неизведанным направлениям развития сетей связи и передачи данных. Последнее отражается и на учебном процессе – например, студентам старших курсов предлагается сделать свои Интернет Вещи. Да, уже в течение четырех последних лет на кафедре читается курс по Интернету Вещей, а с 2012 года функционирует и лаборатория Интернета Вещей ([www.iotlab.ru](http://www.iotlab.ru)). Поэтому и сборник начинается со статьи по Интернету Вещей.

В статье П. Н. Боронина и А. Е. Кучерявого «Интернет Вещей как новая концепция развития сетей связи» анализируется история развития сетей связи и предпосылки возникновения концепции Интернета Вещей. Реализация концепции Интернета Вещей требует создания самоорганизующихся сетей, которые, в отличие от существующих инфраструктурных, имеют триллионную клиентскую базу и более подобны живому миру, чем этим сетям. Такое подобие способствует внедрению в сети связи общего пользования биоподобных алгоритмов, т. е. алгоритмов, основанных на поведении колоний в живом мире, базирующихся на принципах роевого интеллекта. Примеры таких алгоритмов проанализированы в статье на основе поведения колоний муравьев и пчел. Дальнейшее развитие концепции Интернета Вещей на область наномира дает возможность человечеству освоить новый частотный диапазон – терагерцовый, возможности передачи информации в котором также рассмотрены в статье и подтверждаются последними исследованиями.

Следующая статья А. Я. Омётова, Е. А. Кучерявого, С. Д. Андреева «О роли беспроводных технологий связи в развитии Интернета Вещей» продолжает тематику Интернета Вещей. В статье особое место уделяется анализу роли беспроводных технологий в развитии концепции Интернета Вещей и постановке новых задач, решение которых, по мнению авторов,

позволит реализовать достоинства Интернета Вещей быстрее и эффективнее.

В статье М. С. Комара, Е. А. Кучерявого, Д. А. Молчанова, В. И. Петрова «Связи для взаимодействия между ядрами центрального процессора» рассматривается возможная архитектура процессора при замене проводных шин обмена данными на систему беспроводной связи, приводится расчет основных характеристик системы при использовании беспроводного канала связи в терагерцовом диапазоне, а также производится оценка применимости различных подходов к организации множественного доступа к каналу связи. Следует отметить, что данная статья является одной из первых, в которых рассматривается практическое приложение терагерцового диапазона в массовых устройствах. Исследования возможности передачи информации в терагерцовом диапазоне проводятся в рамках работ по Интернету нановещей.

Статья И. А. Богданова, А. Е. Кучерявого «Характеристики беспроводной сенсорной сети для выявления вторжений в виде потоков ложных событий» продолжает исследования авторов в области сетевой безопасности сенсорных сетей, где одним из наиболее эффективных видов атак являются атаки на энергетическую систему сенсорной сети. Авторы определяют плотность узлов сенсорной сети и другие ее характеристики, требуемые для обеспечения заданного уровня обнаружения ложных событий, как раз и направленных на уменьшение жизненного цикла сенсорной сети.

Реализация концепция Интернета Вещей приведет к созданию множества сетей связи, в основном, самоорганизующихся, известных в настоящее время как сети post-NGN. Имея в виду темпы создания приложений Интернета Вещей, уже сейчас полезно знать, а какие требования к качеству услуг должны быть предъявлены в сетях post-NGN. Системным вопросам управления качеством услуг в сетях post-NGN посвящена статья О. А. Симониной «Задачи управления качеством услуг в сетях post-NGN». В статье предпринята успешная попытка систематизировать требования к качеству обслуживания и определить приоритеты разработки в этой области для сетей post-NGN.

Следующая статья П. А. Шилина «Персональная цифровая мобильная радиосвязь посредством VANET» раскрывает возможности предложенного автором приложения на основе целевых сетей автомобильного транспорта VANET (Vehicular Ad Hoc Networks) – персональной цифровой мобильной радиосвязи. В статье доказывается, что при использовании модели детерминированного потока вызовов предложенное приложение сможет обеспечить качественную передачу в независимости от количества транспортных средств.

В статье А. А. Дорт-Гольца «Экспериментальная оценка методов краткосрочного прогнозирования для задачи предсказания интенсивности сетевого трафика» анализируются методы краткосрочного прогнозирова-

ния трафика. Экспериментальным путем определены наиболее адекватные поставленным задачам методы, что позволяет методически правильно действовать при решении задач краткосрочного прогнозирования трафика.

Статья А. С. Солозובה «Масштабируемость и надежность программно-конфигурируемых сетей» относится к новому направлению исследований, посвященному так называемым программно-конфигурируемым сетям. Новизна предмета исследования определяет и аналитическое содержание статьи. В данной статье описываются подходы к масштабированию и повышению надёжности работы программно-конфигурируемых сетей, анализируются их преимущества и ограничения.

В статье А. В. Ульянова и И. В. Гришина «Алгоритм нелинейной адаптивной фильтрации сигналов с OFDM» предложен новый нелинейный алгоритм адаптивной фильтрации, позволяющий увеличить скорость сходимости коэффициентов передачи фильтра к оптимальным значениям в 2–3 раза по сравнению с линейным алгоритмом и одновременно уменьшить объем вычислений.

Статья А. А. Бородко «Разработка программы для поиска фрагментов речи дикторов» освещает сложную проблему криминалистического исследования речи, в основе которого лежит выявление комплекса речевых навыков говорящего как сложной социальной, психологической и биологической системы. В статье предлагается структура универсального комплекса для автоматизации проведения фоноскопической экспертизы, и анализируются возможности этого комплекса в целом и его отдельных модулей.

В числе авторов данного номера не только сотрудники кафедры «Сетей связи и передачи данных» СПбГУТ, но и представители других Университетов: Российского университета дружбы народов, Технологического университета г. Тампере (Финляндия) и Ярославского Государственного Университета им. П. Г. Демидова. Редакция журнала очень благодарна коллегам за совместные исследования и надеется на продолжение сотрудничества.

Номер перед Вами, уважаемые читатели. Читайте, наслаждайтесь, делайте свои Интернет Вещи.

Заведующий кафедрой «Сетей связи и передачи данных»,  
доктор технических наук, профессор,  
почетный член НТОРЭС им. А. С. Попова

А.Е. Кучерявый



# СИСТЕМЫ, СЕТИ И УСТРОЙСТВА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.391

**П. Н. Боронин**

*Технологический университет г. Тампере  
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича*

**А. Е. Кучерявый**

*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича*

## ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ КАК НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ

*Интернет Вещей, Вещи, самоорганизующиеся сети, биоподобные алгоритмы, терагерцовый диапазон.*

### 1. История развития сетей связи

С момента изобретения Александром Беллом телефона (дата подачи заявки 14.02.1876) внедрение систем и сетей связи происходит опережающими темпами [1]. В изобретенном А. Беллом телефоне дальность передачи речи предполагалась в 0,5 км, а уже в 1987 году 05 октября в г. Берлине была введена в эксплуатацию воздушная телефонная линия длиной 2 км между почтой и телеграфом. Так было положено начало созданию сетей связи, которые преодолели путь от использования ручных систем коммутации до систем с коммутацией каналов и далее систем с коммутацией пакетов чуть более чем за сто лет.

Рассмотрим далее основные этапы развития сетей и систем связи с тем, чтобы лучше выявить особенности предлагаемой в настоящее время для развития сетей и систем связи концепции Интернета Вещей [2–4], а также понять, насколько концептуальны новые требования при внедрении Интернета Вещей.

Об ускоренном развитии телефонных сетей уже в самом начале их развития свидетельствует, например, тот факт, что в 1881 году, всего через пять лет после открытия телефона, Министерство внутренних дел России подало в правительство первую докладную записку «Об открытии городских телефонных сообщений». 7-го октября 1881 г. было принято решение о строительстве и содержании городских телефонных сетей (ГТС) общего пользования, а уже 14-го ноября 1881 г. был подписан контракт на строи-

тельство городских телефонных станций в Петербурге, Москве, Одессе и Риге [1]. Сети создавались тогда на основе телефонных станций с ручной коммутацией, но уже обладали некоторыми общими особенностями, которые были присущи сетям связи на протяжении последних ста лет.

Прежде всего, эти сети были гомогенными, т. е. предназначенными для передачи одного вида информации – речи. Важнейшей их особенностью, сохранившейся вплоть до наших дней, являлся также инфраструктурный характер сети: все телефонные станции были включены в сеть постоянно на протяжении всего их срока эксплуатации.

Телефонная линия между почтой и телеграфом в Берлине представляла собой простейшую двухполюсную сеть связи. Естественно, с ростом числа пользователей возникла потребность соединять их между собой, для чего было введено понятие телефонных станций и телефонных сетей. Сеть с использованием одной телефонной станции называлась нерайонированной, а при использовании нескольких телефонных станций для каждой из них образовывался свой район и сеть, соответственно, получила название районированной [5].

Следующим шагом в развитии сетей и систем связи стала автоматизация установления соединений, не повлиявшая, однако, на гомогенный и инфраструктурный характер сетей связи. В СССР первая автоматическая телефонная станция емкостью 6 000 номеров была сдана в эксплуатацию в 1929 году в Ростове-на-Дону, а в 1932 году в Ленинграде была запущена районированная сеть из 4-х автоматических телефонных станций, соединенных между собой по принципу «каждая с каждой». Принципиальным шагом в развитии сетей автоматической связи и в СССР, и в США стало создание иерархических сетей, в которых основу сети составляли узлы автоматической коммутации УАК (в США – региональные центры класса 1 - RC1), выполняющие только транзитные функции для связи между собой различных регионов страны. В СССР такой проект был назван ЕАСС – Единая Автоматизированная Система Связи, разработанный в середине 60-х годов прошлого века [6]. Автоматизация позволила существенно улучшить проникновение телефонной связи и качество обслуживания абонентов. Основными системами для обеспечения построения ЕАСС являлись координатные автоматические телефонные станции АТС разработки института ЛОНИИС и завода «Красная Заря» [7].

Существенным шагом вперед в те годы представлялось создание цифровых систем коммутации. Разработка таких систем требовала как наличия больших коллективов профессионально подготовленных специалистов, так и большой трудоемкости. Оценки трудоемкости показывали, что для создания цифровой системы автоматических телефонных станций необходимо 2 000 – 2 500 человеко-лет, что было подтверждено опытом разработки отечественной цифровой системы АТСЦ-90 [8]. Внедрение цифровых АТС позволило привнести на сеть и новые услуги, и лучшее качество обслужи-



вания, и экономически обоснованные методы построения сетей связи, а также внедрить систему общеканальной сигнализации № 7 [9]. Цифровая телефонная сеть связи общего пользования (ТфОП) достигла своего расцвета к середине 90-х годов. Число абонентов всемирной ТфОП к этому времени превысило 600 млн. При всем при этом сеть по-прежнему оставалась и гомогенной, и инфраструктурной.

К середине 90-х годов прошлого века произошли значительные количественные изменения в области сетей связи. Сопоставимыми по числу пользователей с ТфОП стали сети сотовой подвижной связи (ССПС) и Интернет [10]. Это привело к необходимости выбора дальнейшего развития сетей связи общего пользования либо по пути создания единой сети, либо по пути развития отдельных сетей ТфОП, ССПС и Интернет. На 16-м Всемирном конгрессе по коммутации в г. Торонто (Канада) в 1997 году мировое научное и инженерное сообщество выработало новую концепцию развития сетей связи общего пользования, названную конвергенцией [11]. На основе концепции конвергенции Сектором Стандартизации Телекоммуникаций международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т) были разработаны принципы построения сетей связи следующего поколения NGN (Next Generation Networks) [12]. Сети NGN являются сетями связи общего пользования, построенными на принципах коммутации пакетов, что позволяет в единообразной форме передавать любую информацию, будь-то речь, данные, видео и т. д. Такой подход позволил перейти от гомогенных сетей связи общего пользования к гетерогенным. Вместе с тем, даже сети NGN все еще оставались инфраструктурными, в которых технические средства NGN были включены в сеть постоянно на протяжении всего их срока эксплуатации.

Решающую роль в создании концепции конвергенции и дальнейшей разработки и внедрении сетей NGN сыграло развитие сети Интернет. Первоначально Интернет был разработан для оборонного ведомства США по заказу агентства DARPA с целью обеспечения доставки информации до потребителя даже в условиях достаточно сильно разрушенной сети связи. Принцип коммутации пакетов, использованный при создании Интернет, оказался весьма продуктивным, и, как мы видели выше, привел к созданию сетей связи общего пользования с коммутацией пакетов. Определяющий вклад в разработку сети Интернет внесли В. Серф и Р. Кан (сетевые решения и протоколы) [13], а также Л. Клейнрок (теоретические обоснования) [14].

Итак, сети связи в начале 21 века стали гетерогенными и началось масштабное внедрение технологий пакетной коммутации на сетях связи общего пользования (NGN). Однако по-прежнему сети оставались инфраструктурными и в количественном отношении миллиардными, рассчитанными на обслуживание людей как центрального элемента клиентской базы сетей связи общего пользования.

Параллельно с этими процессами начало XXI века ознаменовалось конверсией сенсорных сетей, созданием теории и практической реализацией так называемых всепроникающих сенсорных сетей. Появление возможности взаимодействия устройств между собой без участия человека поставило вопрос о необходимости разработки новой концепции развития сетей связи общего пользования. Как уже отмечалось, замечательно оправдавшая себя концепция сетей связи следующего поколения вместе с тем была рассчитана на обслуживание нескольких десятков миллиардов пользователей. Взаимодействие же устройств между собой заставляет задуматься о построении триллионной сети, т. е. сети, в которой число пользователей будет измеряться единицами и десятками триллионов. Такая концепция получила название Интернета Вещей. Прежде, чем перейти к фундаментальным изменениям в сетях связи при внедрении концепции Интернета Вещей, остановимся более подробно на характеристиках вещей.

## **2. Концепция Интернета Вещей**

Для определения понятия «вещь» используем как основополагающие положения немецкого философа, одного из творцов немецкой классической философии Георга Вильгельма Фридриха Гегеля, так и современную концепцию развития телекоммуникаций. Гегель определял вещь следующим образом [15] «существующее нечто есть вещь» и далее «Вещи-в-себе не должно быть свойственно какое-либо определенное многообразие и потому она обретает такое многообразие лишь будучи вынесена во внешнюю рефлексию, но остается она к нему безразличной».

Сектором стандартизации телекоммуникаций Международного Союза Электросвязи в концепции Интернета Вещей вещи определяются как «объекты физического мира (физические вещи) или информационного мира (виртуальные вещи), которые можно идентифицировать и интегрировать в сети связи» [3].

На сегодняшний день развитие в сфере компьютерных технологий и кибернетики набирает обороты и уже на данный момент предлагает широкий спектр устройств, которые могут работать автономно без участия человека, выполнять различные задачи, такие как мониторинг параметров окружающей среды, управление бытовыми приборами и даже автомобилями, беспилотными самолетами и другими сложными устройствами, управление логистическими цепями на предприятиях и т. п. Каждое устройство, по сути, есть вещь и, соединяясь друг с другом посредством проводных или беспроводных технологий связи, могут сами организовывать целые сети без помощи человека. Новая концепция сетей связи предусматривает объединение всех устройств в одну всемирную сеть Интернет. Такая концепция получила название «Интернет Вещей». Такое название было выбрано не случайно. Дело в том, что в 2009 году количество устройств, подключенных к Интернету, превысило население планеты. При-

чинами создания столь обширной сети будущего стало то, что с, одной стороны, клиентская база в виде человека с его терминалами исчерпала себя, с другой, появление возможности взаимодействия устройств между собой без участия человека. Концепция Интернета Вещей предполагает обслуживание огромного количества устройств, насчитывая триллионы единиц. Важно отметить, что идентификация и интеграция такого громадного числа терминалов в сеть стала возможна после создания нового сетевого протокола взамен старого, который предполагал обслуживание только 4,5 миллиардов сетевых адресов, а исчерпание адресного пространства произошло в 2011 году. К счастью, новый сетевой протокол позволяет объединять в сеть такое количество устройств, что его адресного поля, возможно, хватит до следующего века. Международный исследовательский беспроводной Форум оценивает число вещей в сети в 7 триллион единиц к 2017–2020 годам. В то же время предельное значение числа вещей в сетях связи оценивается как 3 000–5 000 единиц в расчете на одного человека, что позволяет говорить о 50 триллионах вещей в сети.

Приведем подробнее фундаментальные характеристики концепции Интернета Вещей в соответствии с рекомендациями Международного Союза Электросвязи.

*Связность.* Одна из важнейших метрик самоорганизующихся сетей. Было доказано, что связность в большей степени влияет на длительность жизненного цикла беспроводной сенсорной сети, чем мобильность, энергоэффективность и покрытие. МСЭ-Т определяет характеристику связности как возможность любой вещи быть связанной с глобальной инфокоммуникационной структурой. Связность при этом определяется возможностью идентификации вещей.

*Обеспечение вещей услугами.* Сеть связи, каковой бы она ни была, предназначена для обеспечения клиентской базы услугами. В отношении вещей предполагается, что услуги, относящиеся к конкретной вещи как элементу клиентской базы, должны предоставляться без ограничений для физических и виртуальных вещей. Кроме того, предусматривается возможность автономного (в отрыве от иных элементов сети) предоставления услуг. Заметим также, что поскольку на/в теле человека также возможно создание сетей, в рамках концепции Интернета Вещей оговаривается необходимость высококачественного и высокобезопасного предоставления услуг для тела человека.

*Гетерогенность.* Эта фундаментальная характеристика Интернета Вещей дает возможность устройствам быть построенными на различных аппаратных, программных платформах и сетях. При этом эти устройства должны иметь возможность взаимодействовать с иными устройствами через различные сети связи.

*Динамические изменения.* Статус вещей может изменяться динамически, например, от спящих к активным, от связанных в определенный мо-

мент времени с сетью – к несвязанным и т. д. Число вещей, местоположение, скорость и т. п. также могут меняться динамически. Именно эта фундаментальная характеристика Интернета Вещей приводит к необходимости пересмотра принципов построения сети от существующих инфраструктурных к самоорганизующимся. Самоорганизация в широком смысле этого слова подразумевает не только случайное число узлов и взаимосвязей между ними в любой конкретный момент времени, но и самоуправление, самоконфигурацию, самотестирование, самозащиту, самооптимизацию и т. п.

*Огромное число вещей.* Как уже отмечалось, в соответствии с современными воззрениями речь идет о десятках триллионов вещей, что и позволяет говорить о триллионных сетях.

### **3. Переход к самоорганизующимся триллионным сетям**

Переход к триллионным сетям уже на горизонте планирования до 2020 года является следствием как опережающего технологического прогресса в области телекоммуникаций, так и соответствующего ему уровня научной и инженерной мысли. Концепция Интернета Вещей, сформированная Сектором Стандартизации Телекоммуникаций Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т) в 2011 году, спецификации IETF (Internet Engineering Task Force, Инженерный совет Интернета) по 6-й версии протокола IP, стандарты IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Институт инженеров по электротехнике и электронике) 802.11ac и IEEE 802.11ah со скоростями до 1 и 7 Гб/с соответственно позволяют реализовать прогнозы ведущих специалистов по развитию сетей связи. В соответствии с прогнозом известного французского специалиста Ж.-Б. Вальднера предельное число вещей, подключенных к сети, оценивается в 50 триллионов вещей [16].

Триллионные сети в отличие от существующих, рассчитанных на единицы или несколько десятков миллиардов пользователей, должны быть построены как самоорганизующиеся, что позволит принципиально уменьшить число узлов сети, постоянно находящихся в активном состоянии. Большинство узлов самоорганизующихся сетей должно находиться в спящем состоянии, ибо только в этом случае возможно обеспечить разумное потребление энергии в триллионных сетях.

Самоорганизующейся называется сеть, в которой число узлов является случайной величиной во времени и может изменяться от 0 до некоторого максимального значения. Взаимосвязи между узлами в такой сети также случайны во времени и образуются для достижения сетью какой-либо цели или для передачи информации в сеть связи общего пользования или иные сети [17, 18].

Таким образом, при переходе к концепции Интернета Вещей сеть становится неинфраструктурной, оставаясь при этом гетерогенной. Концеп-

ция Интернета Вещей завершает определенный этап развития сетей связи, на котором эти сети были преобразованы из гомогенных инфраструктурных в гетерогенные неинфраструктурные. Поэтому, появление концепции Интернета Вещей можно расценивать даже как более принципиальный шаг в развитии сетей связи общего пользования, чем появление пакетной коммутации.

Самоорганизующаяся сеть, как и все сети связи, состоит из сетей доступа и транзитной сети. Сеть доступа называется Ad Hoc (целевая сеть), а транзитная сеть – mesh (ячеистая). Узлы сети Ad Hoc не имеют функций маршрутизации и могут осуществлять взаимосвязь лишь с ближайшими узлами. В связи с этим достаточно часто узлы Ad Hoc называют дочерними. Последнее в силу самоорганизации сети вовсе не означает, что дочерний узел строго привязан к какому-либо родительскому узлу. В процессе жизненного цикла сети дочерний узел может быть привязан к любому наиболее близко расположенному родительскому узлу, а при определенных условиях и сам может превратиться на время или навсегда в родительский узел, например, в однородных беспроводных сенсорных сетях.

Узлы mesh имеют встроенные функции маршрутизации и могут поддерживать установление соединения не только к ближайшему узлу, но и ко многим другим. Такой сетевой режим называется multi-hop (многошаговое соединение) в отличие от соединений для дочерних узлов Ad Hoc сети, ограниченных одним шагом в установлении соединения (one-hop). Mesh узлы достаточно часто называют родительскими узлами, что подчеркивает транзитную функцию mesh сети. Очевидно, что узлы самоорганизующейся сети могут совмещать родительские и дочерние функции.

Среди приложений сенсорных сетей можно выделить функционирующие уже сегодня:

- беспроводные (всепроникающие) сенсорные сети (USN – Ubiquitous Sensor Networks) [19];
- сети для транспортных средств (VANET – Vehicular Ad Hoc Networks) [20];
- муниципальные сети (HANET – Home Ad Hoc Networks) [21];
- медицинские сети (MBAN – Medicine Body Area Network) [22].

Наиболее значимыми по предполагаемому объему внедрения в настоящее время считаются сети USN, представляющие собой технологическую основу Интернета Вещей.

Беспроводные всепроникающие сенсорные сети USN представляют собой самоорганизующиеся сети, состоящие из множества беспроводных сенсорных узлов, распределённых в пространстве и предназначенных для мониторинга и/или управления характеристиками окружающей среды или объектами, расположенных в ней. Пространство, которое покрывается сенсорной сетью, называют достаточно часто сенсорным полем. Собственно беспроводные сенсорные узлы представляют собой миниатюрные устрой-

ства с ограниченными ресурсами: зарядом батареи, объемом памяти, вычислительными возможностями и т. д. Однако, объединение большого числа этих элементов в сеть обеспечивает возможность получения реальной картины происходящих событий и процессов в рамках этого сенсорного поля. Здесь вполне уместно вспомнить произведение польского писателя С. Лема «Непобедимый», где были обоснованно предсказаны преимущества множества маленьких машин, не требующих большой энергоемкости, перед гигантскими суперкомпьютерами [23].

Вследствие большого числа сенсорных узлов, предназначенных для выполнения одной и той же задачи на плоскости или в  $n$ -мерном пространстве, для построения сенсорной сети используется, как правило, кластеризация. Кластерная организация сенсорной сети призвана продлить жизненный цикл сети и обеспечить как можно большее  $k$ -покрытие в течение этого жизненного цикла, где  $k$  – доля пространства, которое покрыто сенсорной сетью в конкретный момент времени. Жизненный цикл и  $k$ -покрытие сенсорной сети напрямую увязаны с ее энергетическими возможностями, поэтому одной из основных научно-исследовательских задач в настоящее время является повышение энергетической эффективности всепроникающих сенсорных сетей, как, впрочем, и иных сетей тоже.

Кластерная организация считается эффективной и масштабируемой для построения сенсорных сетей, но лишь при условии рационального выбора головного узла в кластерной сети в конкретный момент времени. Действительно, являющийся головным в момент времени  $t_1$  сенсорный узел не обязательно должен быть им же в момент времени  $t_2$ , ибо существующий головной узел уже может затратить достаточно большое количество энергии на передачу сообщений от всех сенсорных узлов кластера к моменту времени  $t_2$ . Поэтому, в момент времени  $t_2$  головным узлом в кластере может быть назначен и иной сенсорный узел, сохранивший к этому времени наибольший энергетический запас.

Одним из самых известных механизмов, обеспечивающих функционирование сенсорных сетей и выбор головных узлов, является алгоритм LEACH (Low Energy Adaptive Cluster Hierarchy, энергетически эффективная адаптивная кластерная иерархия) [24]. Алгоритм LEACH предусматривает вероятностный выбор сенсорного узла на роль головного в начале функционирования сенсорной сети, а впоследствии ротацию на основе энергетических характеристик сенсорных узлов. Подобное решение, естественно, продлевает длительность функционирования сенсорных узлов и сети в целом, но за последние годы разработано достаточно много и других алгоритмов, обладающих улучшенными характеристиками по сравнению с LEACH. Например, лучшие энергетические характеристики обеспечивает алгоритм централизованного выбора головного узла кластера с использованием диаграмм Вороного CHS (Cluster Head Selection, выбор го-



ловного узла) в однородных стационарных всепроникающих сенсорных сетях, разработанный в СПб ГУТ [25].

Следует отметить, что до настоящего времени не удалось найти оптимальные алгоритмы для всего множества всепроникающих сенсорных сетей, что связано как с чрезвычайно большим числом приложений сенсорных сетей, так и с наличием стационарных, мобильных и смешанных стационарных и мобильных сенсорных сетей.

Большое число элементов сенсорных сетей и их многообразие заставляют задуматься о возможности заимствования алгоритмов поведения сенсорных сетей из живого мира. Действительно, триллионные сообщества вещей в сетях связи, использующие для своего построения принципы самоорганизации, в существенно меньшей степени подобны сетям NGN, чем живой природе. Развитие науки в области сетей связи на этапе внедрения концепции Интернета Вещей привело к возможности и необходимости использования биоподобных алгоритмов, что подробно рассматривается в следующем разделе.

#### **4. Биоподобные алгоритмы для реализации приложений Интернета Вещей**

Приложения Интернета Вещей приобретают все большую популярность в различных сферах деятельности человека; примерами могут служить уже рассмотренные выше всепроникающие сенсорные сети, а также автомобильные сети VANET, сети машина-машина M2M (Machine-to-Machine) и т. д.

Принципы роевого интеллекта (Swarm Intelligence, SI) оказались достаточно полезными для решения проблем маршрутизации в самоорганизующихся сетях [26]. В основе эффекта роевого интеллекта лежит тесная взаимосвязь между представителями биологического вида и их социальной деятельностью, например поиск и сбор пищи, строительство жилья, защита собственности и т. п.

Роевой интеллект является разделом области искусственного интеллекта (Artificial Intelligence, AI) и состоит из нескольких групп алгоритмов, в число которых входят, например, муравьиные оптимизационные алгоритмы (Ant Colony Optimization, ACO) [27], пчелиные оптимизационные алгоритмы (Artificial Bee Colony Algorithms) [28], светлячковые алгоритмы (Firefly Algorithms) [29].

В последнее время появились и новые виды закономерностей, основанные на так называемых «полётах Леви» (Lévy flights), а именно: алгоритм атак акул [30], алгоритмы блуждающих альбатросов, шмелей и оленей [31], алгоритм поиска питательных веществ бактериями типа *Escherichia coli* (кишечная палочка) [32]. Они уже используются или будут использоваться для самоорганизующихся сетей приложений Интернета Вещей уже в ближайшее время.

Рассмотрим далее наиболее распространенные сегодня муравьиные и пчелиные алгоритмы.

**Муравьиные алгоритмы.** Одними из самых первых биоподобных адаптивных алгоритмов для самоорганизующихся сетей были алгоритмы оптимизации муравьиных колоний для проводных сетей связи [33]. Исследователи получили вдохновение от коллективного поведения муравьев в природе. Было обнаружено из экспериментов, что муравьи в колониях способны найти кратчайший путь между муравейником и источником питания даже тогда, когда эта задача непосильна для каждого отдельного муравья. Ключом в решении данной задачи является летучее химическое соединение – феромон. Передвигаясь между муравейником и источником питания, муравьи оставляют за собой феромоновый след и передвигаются предпочтительно по тропе с более высокой феромоновой интенсивностью. Более короткие пути могут быть пройдены быстрее, и, поэтому, они помечаются сильнее. С другой стороны, такие пути привлекают все больше муравьев, которые, в свою очередь, усиливают действие феромонов до тех пор, пока большинство муравьев не окажутся на кратчайшем маршруте (рис. 1). На рисунке 1 М – муравей, П – пища.

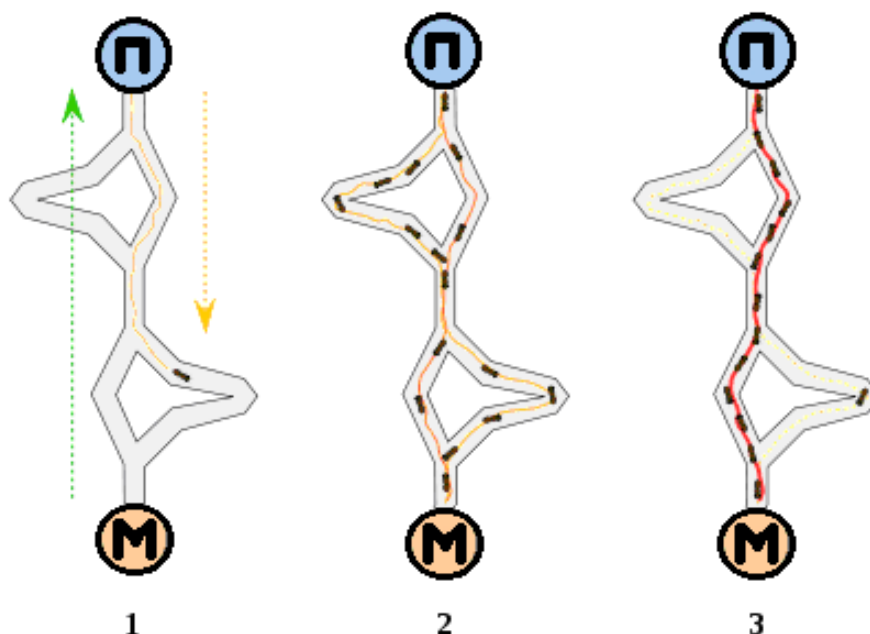


Рис. 1. Поиск кратчайшего маршрута от муравейника до источника пищи

Муравьиные оптимизационные алгоритмы для маршрутизации в телекоммуникационных сетях отличаются от большинства традиционных алгоритмов маршрутизации. Наиболее эффективными оказались гибридные алгоритмы, сочетающие в себе реактивную и проактивную компоненты.

Реактивная составляющая работает только по требованию (on demand), реагируя на события, требующие участия алгоритма, а именно сбор информации о пунктах назначения, вовлеченных в сеанс связи. В природе это можно сравнить с процессом поиска пищи муравьем.

Проактивная компонента работает с некоторой периодичностью. Рассчитана на поддержание и улучшение соединения, и обновление информации о существующих маршрутах во время сеанса связи. Реактивная составляющая отличается от проактивной тем, что она не вступает в работу, пока существующие известные маршруты не выйдут из строя (не станут ошибочными). Это есть аналог улучшения пути между муравейником и источником пищи в природе.

Маршрутная информация хранится в феромоновых таблицах, которые представляют собой дистанционно-векторные двумерные матрицы. В природе роль таких таблиц выполняют феромоны. Пересылка контрольных пакетов и данных происходит стохастически с помощью этих таблиц (рис. 2).

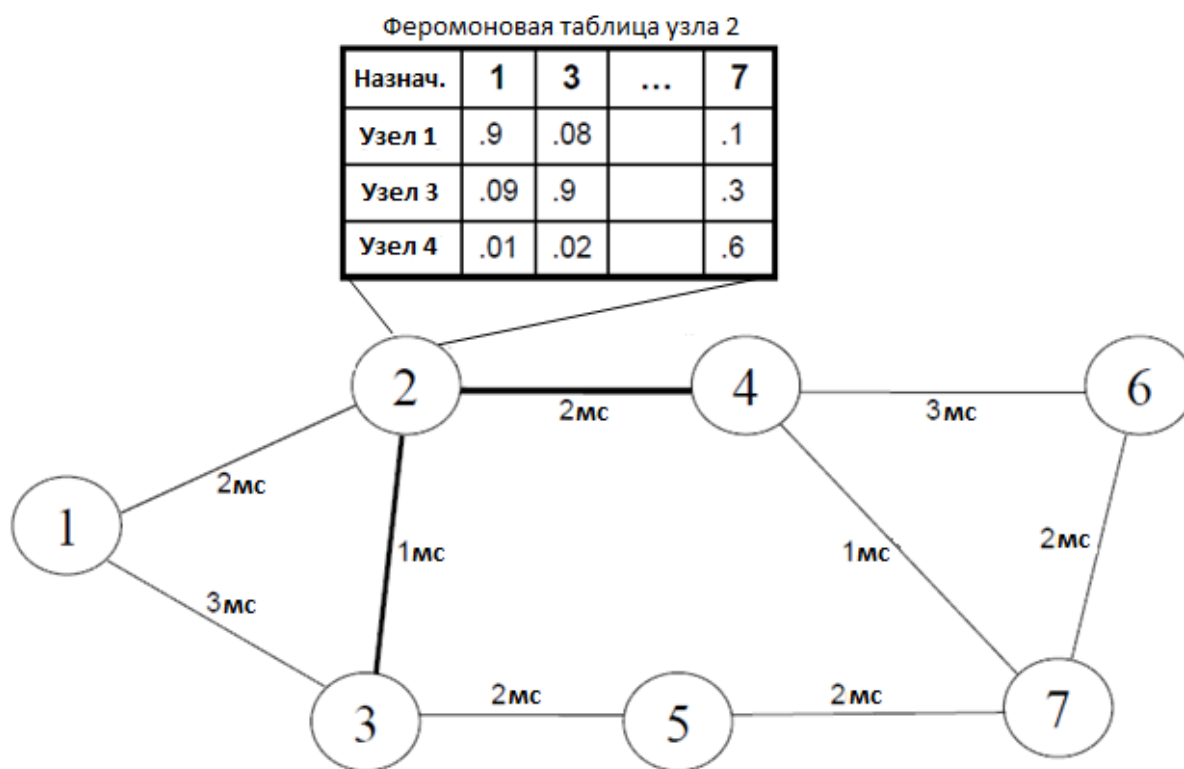


Рис. 2. Феромоновая таблица

Муравьиные алгоритмы собирают маршрутную информацию посредством метода повторяющегося сэмплирования возможных маршрутов между узлом-источником и узлом-приемником, используя контрольные пакеты — муравьи. Также, для сильно динамичных сетей, таких как MANET (англ. “mobile ad hoc networks” — мобильные самоорганизующиеся сети),

для повышения эффективности и надежности используются механизмы создания резервных маршрутов, не имеющих общих сетевых узлов, процедуры «ремонта» маршрута, по которым передавались данные в момент разрыва соединения и т. д. [33].

Принципы работы муравьиных алгоритмов (рис. 3). В начале сеанса связи узел источник получает информацию, которую следует отправить другому узлу в сети. Для этого источник проверяет, есть ли доступная маршрутная информация о запрашиваемом пункте назначения или нет. Если нет, то он запускает процесс реактивного установления соединения, при котором он запускает в сеть муравья для нахождения нужного пути. Такой муравей называется «прямой реактивный муравей» (ПРМ). Принятая копия ПРМ пересылается от узла к узлу. Если узел имеет маршрутную информацию в таблице, то он пересылает его одноадресным способом (unicast), если нет – широковещательно (broadcast). ПРМ хранит полный массив узлов, которые он посетил по пути к пункту назначения.

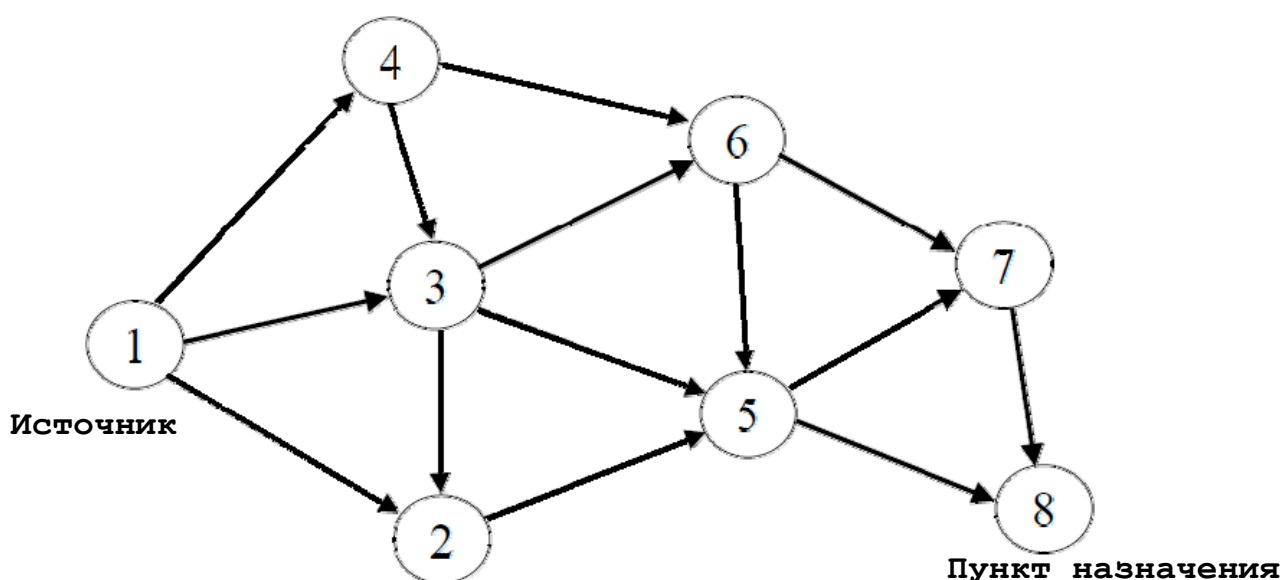


Рис. 3. Процедура реактивного установления соединения.  
Распространение по сети

Когда первая копия ПРМ достигает пункта назначения, ПРМ конвертируется в «обратного реактивного муравья» (ОРМ), в то время как последующие пришедшие копии уничтожаются (метод наилучшего пути). ОРМ следует по тому же пути, что и ПРМ, но в обратном направлении. По пути он собирает информацию о качестве на каждом звене маршрута. На промежуточных узлах и на узле-источнике он обновляет феромоновые таблицы на основе доступной информации о качестве. В процессе реактивного установления соединения может быть установлен только один маршрут

между двумя окончательными узлами. Процедура может повторяться до тех пор, пока не будет установлено надежное соединение (рис. 4).

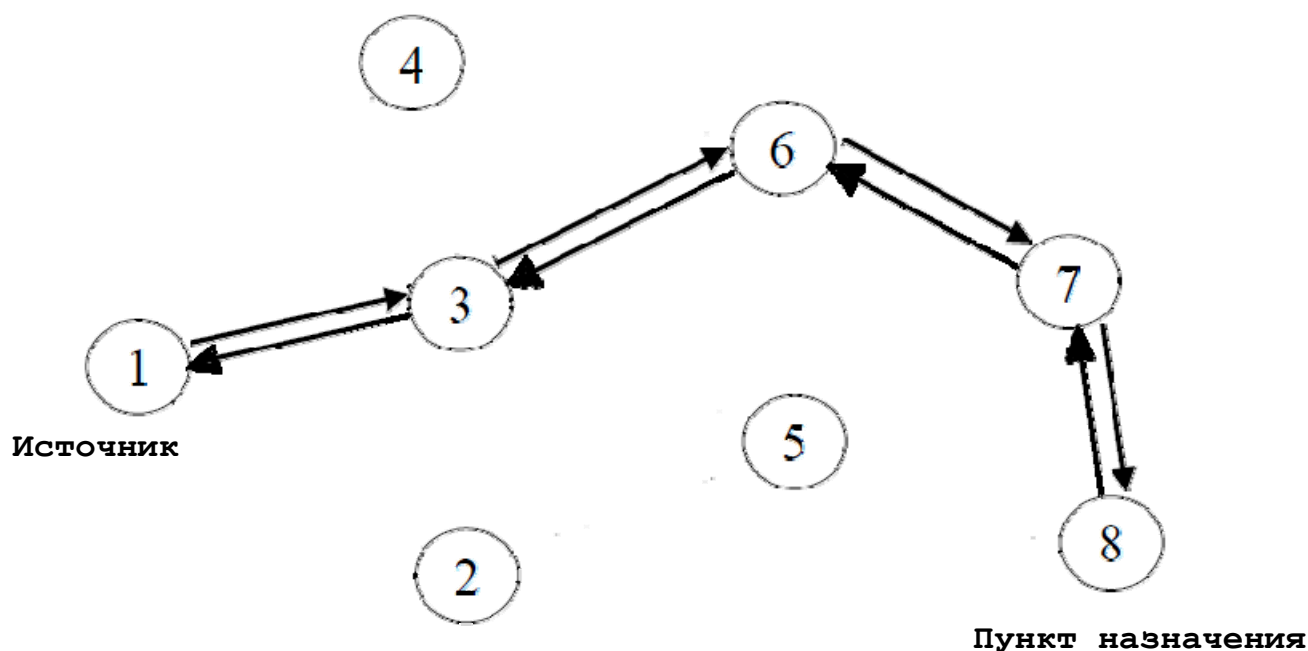


Рис. 4. Процедура реактивного установления соединения.  
Маршрут создан

Как только первое соединение установлено, алгоритм запускает процедуру проактивного поддержания маршрута (рис. 5), в задачи которой входит обновление, расширение и улучшение доступной маршрутной информации. Эта процедура работает на протяжении всего сеанса связи (пока передаются данные). Она состоит из двух подпроцессов: феромоновое распространение (диффузия) и проактивное муравьиное сэмплирование. Цель первого – распространить по сети феромоновую инфу через соседей, которая была размещена муравьями в узлах. Узлы периодически рассылают широковещательное сообщение, содержащее лучшую информацию. Используя информационный бутстреппинг, соседние узлы могут извлечь новый феромон для себя и использовать его в собственных рассылках. Важно заметить, что феромоновое распространение очень похоже на динамическое программирование в DVR (Distance Vector Routing). Такие методы по сбору маршрутной информации считаются эффективными, но могут медленно адаптироваться к динамической ситуации в сети, возможно создавая и распространяя ошибочную информацию (правда, все равно, в дальнейшем сводя ее к корректной). Поэтому подпроцесс феромоновой диффузии может быть рассмотрен как энергетически эффективный, но в то же время потенциально ненадежный способ распределения феромоновой информации. Из-за этой ненадежности феромон, полученный с помощью феромоновой диффузии, хранится отдельно от стандартного, размещенного му-

равьями, и называется виртуальным феромоном (virtual pheromone), а стандартный – регулярным феромоном (regular pheromone).

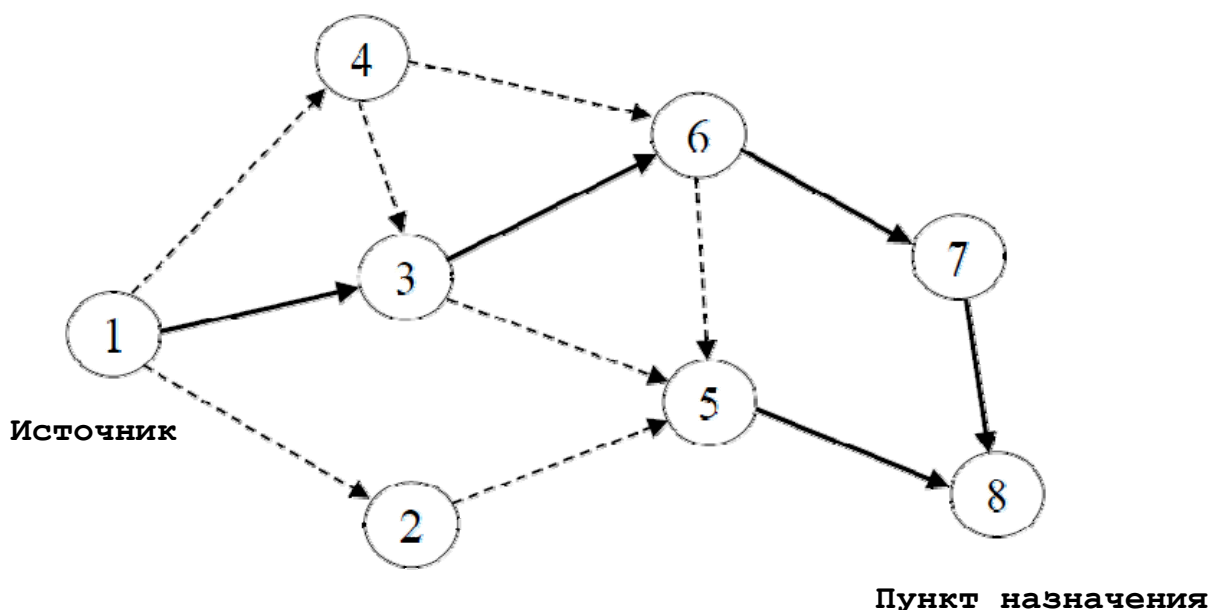


Рис. 5. Процедура проактивного поддержания маршрута

Виртуальный феромон нужен для второго подпроцесса процедуры проактивного поддержания соединения – муравьиного сэмплирования. Во время этого подпроцесса все узлы-источники в сети периодически запускают прямых проактивных муравьев (ППМ) в направлении пункта назначения своей сессии. Эти муравьи строят маршруты случайным образом, выбирая следующий прыжок вероятностно на каждом промежуточном узле. В отличие от ПРМ, ППМ не рассылаются широковещательно. При вычислении вероятности следующего прыжка, муравьи используют как регулярный феромон, так и виртуальный. Поэтому муравьи могут перейти от маршрута, по которому шли предыдущие муравьи к потенциально ненадежному маршруту, появившемуся из-за феромоновой диффузии. Когда ППМ достигает пункта назначения, он преобразуется в обратного проактивного муравья (ОПМ) и возвращается к источнику, оставляя в феромоновой таблице каждого узла регулярный феромон так же, как это делает ОРМ. Таким образом, первый подпроцесс находит новые маршруты, а второй – проверяет их. Сэмплирование обеспечивает надежность, которая отсутствует в бутстреппинге.

В процессе сеанса связи может произойти разрыв соединения, после чего алгоритм попытается восстановить соединение. Крайний узел маршрута распространяет прямых ремонтных муравьев (ПРемМ), которые, как правило, ищут обходной путь вокруг места разрыва соединения, отходя от крайнего узла на максимальное расстояние, равное двум узлам. Если в пределах двух узлов невозможно найти путь для восстановления всего



маршрута, тогда принимается решение о разрыве соединения, сбросе всех пакетов в очереди и в буферах смежных узлов, и затем все узлы, принимавшие участие в сеансе связи, оповещаются сообщением об отказе. После этого снова иницируется процесс реактивного установления соединения.

Муравьиные алгоритмы маршрутизации показали хорошие результаты при работе в сетях MANET [34], где сетевая ситуация может изменяться относительно быстро.

Пчелиные алгоритмы. Другим, не менее важным классом биоподобных алгоритмов, являются пчелиные оптимизационные алгоритмы. Наблюдая за колониями пчел, исследователи обнаружили интересные особенности, которые оказались полезными в беспроводных сенсорных сетях (Wireless Sensor Network, WSN) [35].

В поиске пищи пчелы используют совершенно другой подход, чем муравьи. Один из главных параметров – дальность полета от улья или зона покрытия пчелиной колонией. Обычно такая зона имеет площадь покрытия с радиусом около 5 км.

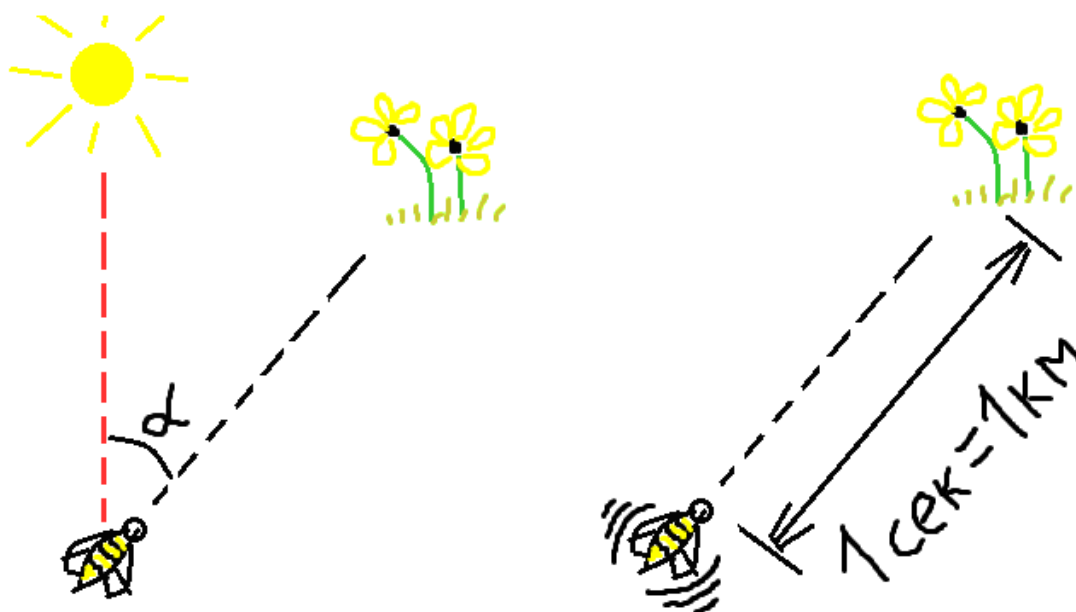


Рис. 6. Интерпретация «языка танцев»

Так называемая пчела-разведчик вылетает из улья, чтобы найти источник энергии. Например, если она нашла поляну цветов, то начинается анализ объема энергетических ресурсов в этой зоне. После этого пчела возвращается в улей и на так называемом «танцполе», используя специальный «язык танцев» рассказывает другим пчелам о том, где находится источник пищи и в каком объеме (рис. 6). Как оказалось, дальность полета зависит от длительности вибрации пчелы во время танца, а именно 1 секунда вибрации приблизительно равна 1 километру от улья до источника пищи. Таким образом, пчелы видят нужные характеристики и оценивают,

насколько рентабельным будет полет туда и обратно. Заинтересованные пчелы отправляются к месту дислокации указанного источника энергии.

В природе пчелы в колонии, взаимодействуя между собой, выполняют следующие функции:

1. Создают высокоорганизованную и эффективную систему.
2. Показывают приспособляемость (адаптивность) к постоянно изменяющимся условиям окружающей среды.
3. Демонстрируют способность быстро восстанавливаться после потери особей (отказоустойчивость).
4. Хорошо размножаются до больших количеств (масштабируемость).

Принципы работы пчелиных алгоритмов. Как и в муравьиных алгоритмах, в пчелиных алгоритмах все начинается с приема информации, которую необходимо передать другому узлу.

Первый этап называется «разведка», подразделяется на прямую разведку и обратную. Прямые разведчики исследуют сеть на наличие головного узла. Внутри себя они несут информацию четырех различных категорий: ID (Identification Number) разведчика, ID узла-источника, минимальная остаточная энергия (изначально равна бесконечности) и число прыжков (равно нулю). Разведчики рассылаются ко всем соседям узла-источника и так далее. Попадая в каждый промежуточный узел, счетчик числа прыжков увеличивается на 1. От этого счетчика зависит, насколько энергетически эффективной будет передача данных. Как только головной узел обнаружен, обратный разведчик (backward scout) возвращается в узел-источник, и создаются множественные каналы между источником и головным узлом.

Алгоритм каждый раз проверяет на всех посещенных узлах характеристики разведчиков и на основе этого делает вывод об эффективности маршрута. Процедура довольно сложная и включает в себя несколько ступеней проверки. Например, когда узел принимает еще одного прямого разведчика, он проверяет, проходил ли уже разведчик с таким ID и т. д.

По окончании процедуры разведки и установления маршрута с помощью «формулы танца» рассчитывается количество пчел-сборщиков, требуемых для данного маршрута. Наступает этап «сбора ресурсов». Сборщики занимаются передачей данных таким же образом, как натуральные пчелы транспортируют пищу.

Процесс передачи данных также является довольно сложным. Данные передаются от источника к головному узлу, причем количество пчел-сборщиков может изменяться в зависимости от ситуации в сети. Для вероятностного расчета используется таблица распределения вероятностей. Основным отличием от работы муравьиных алгоритмов здесь является тот факт, что промежуточные узлы не принимают никаких решений относительно маршрутизации, все решения исходят от узла-источника. В муравьиных же алгоритмах в каждом промежуточном узле хранятся феромоновые

таблицы и производятся расчеты для улучшения работы сети, а также принимаются решения.

Чтобы вернуться обратно в узел-источник, сборщики должны объединиться в один «рой». Объединение происходит по одним и тем же ID маршрута сборщиков. Во время возврата определяется качество маршрутов, энергетически неэффективные удаляются из таблиц маршрутизации.

Существует также больше количество механизмов и деталей работы данного класса алгоритмов. Важно отметить, что пчелиные алгоритмы достаточно успешно применяются для беспроводных сенсорных сетей, где необходима кластеризация вследствие огромного количества узлов в сети.

Итак, биоподобные алгоритмы показывают хорошие результаты, во многих случаях обгоняя по производительности традиционные алгоритмы маршрутизации. Это позволяет усовершенствовать интеллект в беспроводных самоорганизующихся сетях, являющихся основной сетевой моделью при реализации концепции Интернета Вещей. Однако данные сети еще слабо изучены с точки зрения безопасности, поэтому развитие алгоритмов и механизмов в этой области будет продолжаться довольно долгое время. Современные новые подходы такие, как полёты Леви, позволят глубже проникнуть в природу самоорганизующихся сетей и усовершенствовать их.

## **5. Интернет нановещей и подходы к его реализации**

История Интернета Вещей на всепроникающих сенсорных сетях, автомобильных сетях, сетях машина-машина не заканчивается. В последние несколько лет достаточно успешно развивается приложение концепции Интернета вещей к наномиру, так называемый Интернет нановещей [36]. Исследования в области наносетей являются необходимыми для обеспечения передачи информации из наномира в микромир и макромир. Поэтому, создание наносетей, объединяющих нановещи, является одним из принципиальных моментов в развитии сетей связи, поскольку позволит существенно повысить результативность внедрения нанотехнологий.

В создании наносетей выделяют два направления [37, 38]:

- молекулярные наносети,
- электромагнитные наносети.

Остановимся более подробно на проблемах и успехах в развитии электромагнитных наносетей.

Нанотехнологии – это быстро развивающаяся научная область, нацеленная на разработку чрезвычайно малых устройств, способных производить несложные действия. На данный момент, нанотехнологии находят применение в биомедицине, экологии и военных областях. Будучи простыми и производя только примитивные операции, наномашины по отдельности не способны работать со сложными задачами. Чтобы сделать

возможным работу с более сложными приложениями, такими как доставку лекарственных средств в теле человека или совместный мониторинг окружающей среды, требуется возможность обмена информацией и командами между сетевыми объектами и контроллером. Необходимость согласования устройств и информационного обмена, естественно, приводит к концепции наносетей. Одним перспективным способом задействовать сетевые возможности является использование беспроводной связи между наномашинами [39].

В настоящее время исследования в нанотелекоммуникациях сфокусированы на увеличении пропускной способности канала связи при использовании сверхширокополосных сигналов, занимающих весь терагерцовый диапазон частот (терагерц =  $10^{12}$  Гц). Например, в [40] показано, что соединения между наномашинами со скоростями в несколько терабит в секунду (Тбит/с) возможны, но только на расстояния намного меньше 1 метра. Однако стоит отметить, что во многих перспективных приложениях наносетей дальность связи играет более значимую роль, чем скорость передачи данных. Таким образом, важно найти способ увеличить радиус действия отдельного узла связи.

Любая новая научная область всегда ставит перед исследователями ряд непростых задач, что вполне естественно. В данном случае присутствие молекулярной абсорбции из-за вибраций и вращений молекул является уникальной особенностью терагерцового диапазона частот. Молекулярная абсорбция электромагнитного излучения – это эффект, возникающий при передаче сигнала на частотах близких и равных резонансным частотам молекул, которые поглощают часть энергии сигнала и создают шум на этих же частотах за счет внутренней кинетической энергии молекул. Способность поглощать молекулой энергию определяется физическими свойствами (молекулярные связи, пространственная ориентация и т. п.) и измеряется как коэффициент абсорбции. Среди всех составляющих атмосферы Земли, наибольший вклад вносит абсорбция молекулами водяного пара. Еще одной немаловажной проблемой является достаточно сильное затухание сверхвысокочастотного сигнала при распространении его в свободном пространстве во все стороны. Однако, несмотря на довольно сложные характеристики канала связи, существует способ избежать серьезные искажения сигнала, используя так называемые окна прозрачности. В этих окнах коэффициент пропускаемости среды очень высок на малых и средних дистанциях. Это означает, что в окнах прозрачности как молекулярный шум, так и потери в связи с абсорбцией пренебрежительно малы.

Во всем спектре терагерцовых частот существует несколько окон прозрачности. Количество окон уменьшается при увеличении дистанции передачи. Например, для 0,01 метра существует до 15 окон, в то время как для 1 метра – только 6 окон. Для наглядности рисунки 7 и 8 показывают

спектры поглощения электромагнитного излучения средой для этих дистанций.

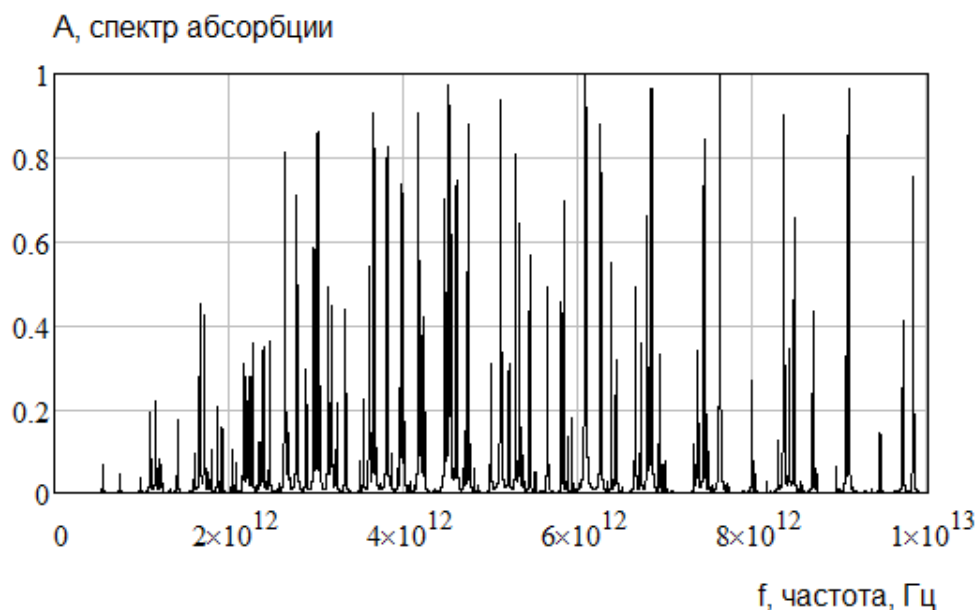


Рис. 7. Спектр абсорбции на дистанции 1 см от источника сигнала

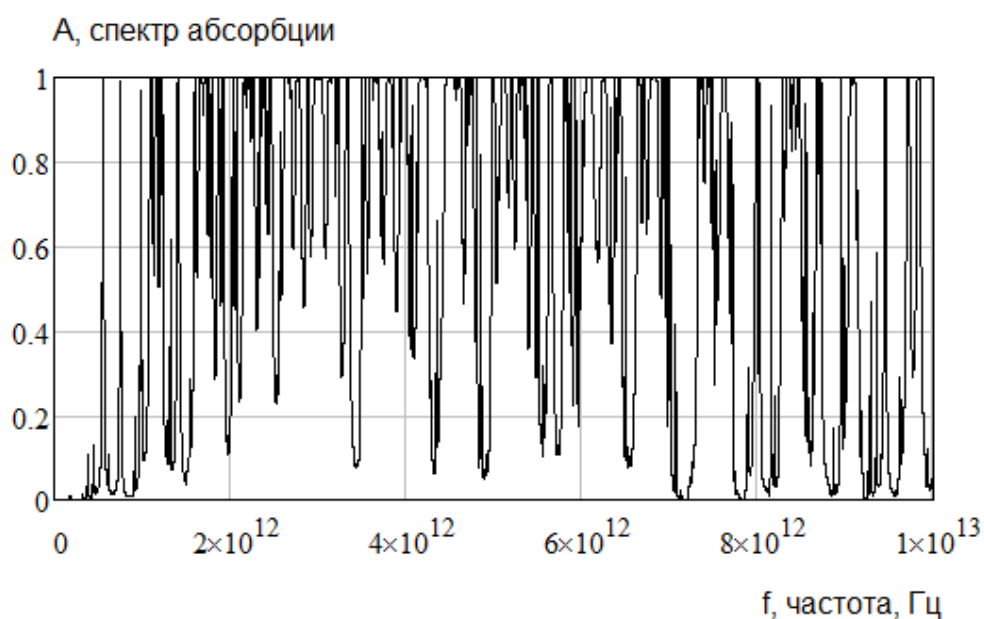


Рис. 8. Спектр абсорбции на дистанции 1 м от источника сигнала

Исследования показали, что наиболее подходящим для передачи сигналов в терагерцовом спектре частот является первое окно прозрачности с полосой частот 0,1–0,54 ТГц [40]. Работа в первом окне позволяет достичь довольно больших дистанций для наносетей до 15 метров с достаточной для транзакционных приложений скоростью передачи данных.

## 6. Выводы

Создание и внедрение концепции Интернета Вещей обеспечит общество новыми, ранее недоступными услугами сетей связи по контролю и управлению за любыми вещами, будь то жилищно-коммунальный комплекс или любые биомассы, включая человека, как в макромире, микромире, так и в наномиире. Реализация концепции Интернета Вещей требует создания самоорганизующихся сетей, которые, в отличие от существующих инфраструктурных, имеют триллионную клиентскую базу и более подобны живому миру, чем этим сетям. Такое подобие способствует внедрению в сети связи общего пользования биоподобных алгоритмов, т.е. алгоритмов, основанных на поведении колоний в живом мире, базирующихся на принципах роевого интеллекта. Дальнейшее развитие концепции Интернета вещей на область наномиира дает возможность человечеству освоить новый частотный диапазон – терагерцовый, возможности передачи информации в котором подтверждаются последними исследованиями и требуют дальнейшего изучения.

В заключение хотелось бы отметить, что мы живем в эпоху, когда все более мыслящими становятся все более обычные вещи. Процессоры используются не только в телекоммуникациях, но уже встраиваются в обычную бытовую технику, делая из холодильников и стиральных машин, штор и светильников интеллектуальные вещи. Примером является концепция умного дома. Это делает среду обитания все более и более интеллектуальной, причем не только уменьшаясь в размерах, но и становясь все менее и менее материальными. Ведь в таких приборах все большую роль играют квантовые эффекты, которые, отсутствуя в макромире, не постигаются обыденным здравым смыслом. Они могут быть лишь абстрагированными, оперируя категориями чистого мышления, о котором все время размышлял Гегель.

## Библиографический список

1. **Иванова, О. Н.** Телефония в датах / О. Н. Иванова. – Москва : МТУСИ, 2006.
2. **Бутенко, В. В.** IoT – новая точка развития ИКТ и средство кардинального повышения адаптивных возможностей человека при взаимодействии с ухудшающейся антропогенной средой / В. В. Бутенко, А. П. Назаренко, В. К. Сарьян // Труды 54-й научной конференции МФТИ. Радиотехника и кибернетика. 10–30 ноября, 2011 г. – М. : МФТИ.
3. **Кучерявый, А. Е.** Интернет Вещей / А. Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2013. – № 1.
4. **Гольдштейн, Б. С.** Сети связи пост-NGN / Б. С. Гольдштейн, А. Е. Кучерявый. – СПб. : БХВ, 2013.



5. **Жданов, И. М.** Построение городских телефонных сетей / И. М. Жданов, Е. И. Кучерявый. – М. : Связь, 1972.
6. **Шамшин, В. А.** Фрагменты жизни / В. А. Шамшин. – М. : ИРИАС, 2008.
7. **Куташов, П. Д.** Городские координатные АТС типа АТСК / П. Д. Куташов, Б. С. Лившиц, И. Е. Мовшович, А. Л. Пошерстник, Г. Б. Ханин. – М. : Связь, 1970.
8. **Голубев, А. Н.** Системы коммутации в конце XX – начале XXI века / А. Н. Голубев, А. Е. Кучерявый, А. С. Миков // Проблемы разработки, внедрения и эксплуатации цифровых систем коммутации. Семинар РНТОРЭС, Пермь, 21–23 апреля, 1997.
9. **Жарков, М. А.** Основные положения системы сигнализации ОКС № 7 для сети связи Российской Федерации / М. А. Жарков, А. Е. Кучерявый. – ЦНТИ «Информсвязь», 1996.
10. **Кучерявый, А. Е.** Концепция развития систем коммутации / А. Е. Кучерявый // Научно-практический семинар «Проблемы разработки, внедрения и эксплуатации цифровых систем коммутации». Пермь, 22–24 апреля, 1998.
11. **Кох, Р.** Эволюция и конвергенция в электросвязи / Р. Кох, Г. Г. Яновский. – М. : Радио и связь, 2001.
12. **Кучерявый, А. Е.** Сети связи следующего поколения / А. Е. Кучерявый, А. Л. Цуприков // Центральный научно-исследовательский институт связи (ЦНИИС), Москва, 2006.
13. **Vinton Cerf** A Protocol for Packet Network Intercommunication / Vinton Cerf, Robert Kahn // IEEE Transactions on Communications, May 1974.
14. **Клейнрок, Л.** Теория массового обслуживания. Пер. с англ. / Пер. И. И. Грушко; ред. В. И. Нейман. – М. : Машиностроение, 1979. – 432 с.
15. **Гегель, Г. В. Ф.** Наука логики / Г. В. Ф. Гегель. – СПб. : Наука, 1997.
16. **Waldner, J.-B.** Nanocomputers and Swarm Intelligence / J.-B. Waldner // ISTE, John Wiley & Sons, 2008.
17. **Кучерявый, А. Е.** Самоорганизующиеся сети / А. Е. Кучерявый, А. В. Прокопьев, Е. А. Кучерявый. – СПб. : Любавич, 2011.
18. **Кучерявый, А. Е.** Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчёта / А. Е. Кучерявый, А. И. Парамонов, Е. А. Кучерявый. – ФГУП ЦНИИС, 2008.
19. **Кучерявый, А. Е.** Модели трафика для сенсорных сетей в России / А. Е. Кучерявый, А. И. Парамонов // Электросвязь. – 2006. – № 6.
20. **Koucheryavy, Y.** Research Challenges in Vehicular Ad hoc Networks / Y. Koucheryavy, J. Jakubiak // IEEE CCNC 2008, January 10–12, 2008. Las Vegas, USA.
21. **Кучерявый, А. Е.** Самоорганизующиеся сети и новые услуги / А. Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2009. – № 1.

22. **Кучерявый, А. Е.** Сети связи с малыми задержками / А. Е. Кучерявый, А. И. Парамонов, Я. М. Аль-Наггар. // Электросвязь. – 2013. – № 12.
23. **Лем, С.** Непобедимый / С. Лем. – Закопане, Польша, 1964.
24. **Heinzelman, W.** Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks / W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan // Proceedings 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Wailea Maui, Hawaii, USA, Jan. 2000.
25. **Koucheryavy, A.** Cluster head selection for homogeneous Wireless Sensor Networks / A. Koucheryavy, A. Salim // Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2009. ICACT 2009. Phoenix Park, Korea.
26. **Bonabeau, Eric;** Dorigo, Marco; Theraulaz, Guy. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems, 1999.
27. **Dorigo, M.,** Stutzle, T. Ant Colony Optimization. Massachusetts Institute of Technology, 2004.
28. **Teodorović, D.,** M, Dell' Orco, "Bee Colony Optimization-A cooperative learning approach to complex transportation problems" in Abstracts – of 10th EWGT Meeting and 16th Mini EURO Conference, Poznan, 2005.
29. **Yang, X. S.** Firefly algorithms for multimodal optimization. Stochastic Algorithms: Foundations and Applications, SAGA 2009. Lecture Notes in Computer Sciences 5792. PP. 169–178, 2009.
30. **Humphries, Nicolas E.;** Queiroz, Nuno, Dyer, Jennifer R. M., Pade, Nicolas G., Musyl, Michael K., Schaefer, Kurt M., Fuller, Daniel W., Brunnschweiler, Juerg M., Doyle, Thomas K., Houghton, Jonathan D. R., Hays, Graeme C., Jones, Catherine S., Noble, Leslie R., Wearmouth, Victoria J., Southall, Emily J., Sims, David W. Environmental context explains Lévy and Brownian movement patterns of marine predators. Nature 465 (7301): 1066–1069, 2010.
31. **Edwards, A. M.;** Phillips, R. A.; Watkins, N. W.; Freeman, M. P.; Murphy, E. J.; Afanasyev, V.; Buldyrev, Sergey V.; da Luz, M. G. E.; Raposo, E. P.; Stanley, H. Eugene; Viswanathan, G. M. Revisiting Lévy flight search patterns of wandering albatrosses, bumblebees and deer 449. PP. 1044–1048, 2007.
32. **Matthäus, F.,** Jagodič, M., and Dobnikar, J. E. coli Superdiffusion and Chemotaxis-Search Strategy, Precision, and Motility. Biophysical Journal Volume 97, 946–957, 2009.
33. **Ducetelle, F.** Adaptive routing in ad hoc wireless multi-hop networks. Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. Lugano, Switzerland, May, 2007.
34. **Молчанов, Д. А.** Самоорганизующиеся сети и проблемы их построения / Д. А. Молчанов // Электросвязь. – 2006. – № 6.

35. **Saleem, M.** A bee-inspired power aware routing protocol for wireless ad hoc sensor networks. Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Computer Engineering. Taxila, Pakistan, 2010.
36. **Akyildiz, I. F.**, Jornet, J. M.. The Internet of Nano-Things. IEEE Wireless Communications. December 2010, V. 17, № 6.
37. **Jornet, J. M.**, Akyildiz, I. F. Graphene-based Nano-Antennas for Electromagnetic Nanocommunications. 4th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). Proceedings, April, 2010.
38. **Cobo-Rus, L. C.**, Akyildiz, I. F. Bacteria-based Communication on Nanonetworks. Nano Communication Networks, v. 1, № 4, December 2010.
39. **Akyildiz, I. F.**, Jornet, J. M., Electromagnetic wireless nanosensor networks, Nano Commun. Netw. (Elsevier) J. 1 (1) (2010), 2–19.
40. **Boronin, P.**, Petrov, V., Moltchanov, D., Koucheryavy, Y., Jornet, J. M., Capacity and throughput analysis of nanoscale machine communication through transparency windows in the terahertz band, Nano Commun. Netw. (Elsevier), Volume 5, Issue 3 (2014), 72–82.

#### **Аннотация**

*Проанализирована новая концепция развития сетей и систем связи - Интернет Вещей. Рассмотрена история развития сетей и систем связи, преобразование сетей в гетерогенные, а затем и в самоорганизующиеся. Приведены определения вещей в соответствии с работами Г. Гегеля в приложении к современным телекоммуникациям. Рассматриваются приложения Интернета Вещей, анализируются алгоритмы выбора головного узла в самоорганизующихся сетях, в том числе биоподобные. Как перспектива развития сетей и систем связи представляются наносети, для которых анализируются достижения в области создания электромагнитных наносетей в терагерцовом диапазоне.*

**P. Boronin**

*Tampere University of Technology*

*Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications*

**A. Koucheryavy**

*Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications*

## **INTERNET OF THINGS AS A NEW CONCEPT OF THE TELECOMMUNICATION NETWORKS DEVELOPMENT**

### **Annotation**

*Internet of Things concept is analyzed. The telecommunication networks history is considered. History overview includes the telecommunication networks transformation from homogeneous to heterogeneous and from infrastructure to self-organizing. The thing definitions are given in according with G.Hegel book and modern telecommunication view. The Internet of Things applications are considered. The cluster head selection algorithms including bio-inspired algorithms are analyzed. The investigation achievements in the terahertz electromagnetic nanonetworks area are considered.*

**Keywords:** Internet of Things, Things, Self-Organizing Networks, Bio-Inspired Algorithms, TeraHertz Band.

**Боронин Павел Николаевич** – инженер кафедры «Сети связи и передача данных» Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»; факультет информатики и электротехники, Технологический университет г. Тампере, Тампере, Финляндия

**Кучерявый Андрей Евгеньевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сети связи и передача данных» Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», [seti\\_sviasi@bk.ru](mailto:seti_sviasi@bk.ru)

**А. Я. Омётов**

*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. М. А. Бонч-Бруевича*

**Е. А. Кучерявый**

*Технологический университет г. Тампере*

**С. Д. Андреев**

*Российский университет дружбы народов*

**О РОЛИ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СВЯЗИ  
В РАЗВИТИИ «ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ»**

*Интернет Вещей, беспроводные устройства связи, системы контроля предприятия,  
беспроводные сенсорные сети, обзор концепции.*

**1. Введение**

В настоящее время развивающаяся технология «Интернета Вещей» выглядит многообещающей для решения различных проблем в области индустрии, начиная с производства и заканчивая отраслью логистики. Например, в случае комплектации почтовых посылок беспроводными сенсорами пользователь или компания будут иметь возможность отслеживать их точное положение в любой момент времени с предельной точностью, а также предсказывать их возможное передвижение с учётом дорожной ситуации мегаполиса. Рассмотренный в широко известной работе 2009 года [1], термин «Интернет Вещей» изначально был связан с технологией радиочастотной идентификации RFID (RadioFrequencyIdentification), а впоследствии к нему также стали причислять актуаторы, сенсоры и прочие мобильные устройства. В то же время, в отечественной литературе обсуждение данного научного профиля началось ещё в 2005 году [2].

Отдельное место стоит уделить интеграции беспроводных сенсорных сетей и RFID меток в мир IoT. Период 1980-х годов можно считать точкой старта развития концепции в целом, так как именно посредством вышеуказанных технологий реальные объекты мира получили возможность взаимодействовать для достижения общих целей с помощью глобальной сети Интернет [3]. В связи с тем, что сети, объединяющие множества различных сущностей, не могут быть однородными, возникло много сопутствующих проблем, некоторые из которых берут своё начало из классических беспроводных сетей множественного доступа. Стоит также отметить, что в настоящее время наблюдается возрастающий интерес к IoT со стороны различных отраслей индустрии [4], таких как агропромышленный комплекс, служ-

Основной целью данной работы является обзор текущего состояния технологии Интернета Вещей, проблем и возможных путей развития.

Данная статья имеет следующую структуру: во втором разделе анализируется развитие беспроводных технологий и их воздействие на эволюцию Интернета Вещей. Далее рассказывается о специфике планирования и развёртывания беспроводных сенсорных сетей. Следующие разделы описывают основные критерии оценки таких сетей, проблемы и пути их дальнейшего развития.

## 2. Развитие технологии

Обращение к истории развития Интернета Вещей, к научной разработанности темы исследования, делает возможным выявление основных эволюционных процессов, проблем, целей и задач дальнейшего развития, а также прогнозирование будущего технологии.

С точки зрения глобальной сети Интернет Вещей можно рассмотреть как объединение множества соединённых между собой устройств для совместного сбора, обработки и передачи информации. Первичной технологией IoT принято считать RFID-метки, которые получили возможность передачи малого объёма информации по беспроводному каналу на устройство считывания. Таким образом, появилась возможность пометить и отслеживать любые снабжённые такой меткой объекты. RFID-ы быстро нашли своё применение в логистике, фармацевтической и производственной отраслях индустрии.

Следующей ключевой технологией в развитии Интернета Вещей стало внедрение Беспроводных Сенсорных Сетей (БСС), использующих группы сенсоров для мониторинга окружающей среды как в зданиях, так и за их пределами [5]. Данные сети активно используются в медицине, на заводах, в системах контроля трафика и т. д., охватывая практически все отрасли современного. Преимущества и столь широкое применение БСС, несомненно, повлияли на изучение данной технологии как в академии, так и в индустрии, что, в свою очередь, породило множество сопутствующих технологий.

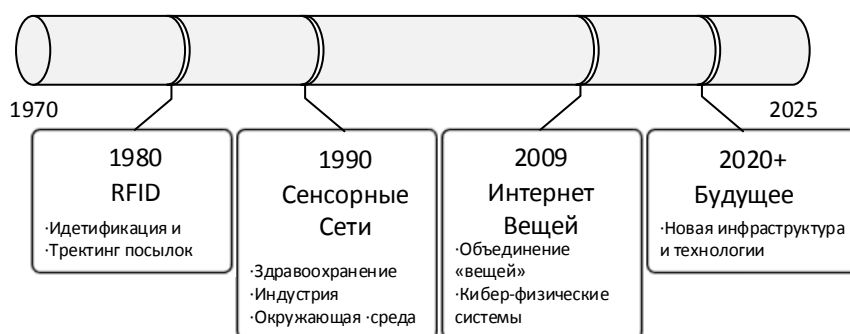


Рис. 1. Развитие технологий до Интернета Вещей

Вследствие такого импульса, эволюция технологии, представленная на [рисунке 1](#), подошла к её текущему состоянию и формированию настоящего



термина Интернета Вещей, где все устройства имеют возможность однозначной идентификации, сенсинга среды и обработки этих данных для дальнейшей передачи.

### **3. Специфика архитектуры сетей для «Интернета Вещей»**

Для достижения целей технологии Интернета Вещей необходима определённая архитектура сетей, которая обладает своеобразной сложной структурой.

Основная цель IoT заключается в объединении различных систем и устройств по всему миру, при этом использование неоднородных сетей является очевидным решением или очевидной необходимостью [6], что ведёт к интеграции сервисно-ориентированной архитектуры, которая была неоднократно исследована для применения в Беспроводных Сенсорных Сетях и Автомобильных Беспроводных Сетях [7, 8]. Как правило, рекомендованное разделение происходит на четыре основных уровня [9]:

- Уровень взаимодействия со средой (RFID, Wireless sensors, и т. д.)
- Сетевой уровень – отвечающий непосредственно за передачу данных (WLAN, Internet, Cellular Network, и т. д.),
- Сервисный уровень – для обработки и преобразования информации (бизнес логика, базы данных),
- Уровень взаимодействия с пользователем или приложениями (интерфейсы, графические приложения, терминалы, и т. д.).

С точки зрения архитектуры сети Интернета Вещей, как правило, выделяют несколько основных критериев оценки, такие как: лёгкость модернизации, модульность, масштабируемость сети. Это подводит нас к выводу о необходимости адаптивной архитектуры сети, что, в свою очередь, позволит устройствам подстраиваться под изменения или же изменять саму сеть в зависимости от различных условий функционирования.

Однако структуру IoT нельзя рассматривать только с точки зрения архитектуры в целом, необходимо учитывать влияние каждого из предложенных уровней для оценки их возможного взаимовлияния на систему. Интернет Вещей можно представить как всемирную сеть взаимодействующих физических объектов, которыми можно управлять удалённо. А так как все больше устройств оборудуют RFID-метками и беспроводными интерфейсами, значительно облегчается их дальнейшее автоматическое использование [10]. В то же время, нельзя пренебрегать важностью сетевого уровня, который отвечает непосредственно за взаимодействие всех устройств с целью обмена информацией. Также данный уровень отвечает за внедрение сенсоров в уже существующие сети предприятий, обеспечивая лёгкую интегрируемость новых устройств [11]. В то же время, этот уровень отвечает за обеспечение качества связи, должного уровня безопасности, обработки сигналов и данных. С другой стороны, промежуточный сервисный уровень функционирует как преобразователь данных в воспринимаемый конечным

пользователем вид (от сигналинга и до баз данных). Уровень взаимодействия с пользователем или интерфейсный уровень занимается проблемами стандартизации данных с сервисного уровня. Однако из-за разнообразия устройств различных производителей со специфическими протоколами передачи данных в условиях неоднородности сетей, порождается огромное количество проблем несогласованного взаимодействия между технологиями.

#### **4. Технологии связи в сенсорных сетях**

Эволюционные процессы коснулись и технологий связи в сенсорных сетях. Переход от классических подходов к новаторским определяет и дальнейшее развитие Интернета Вещей.

На текущий момент, используемые технологии связи в Интернете Вещей можно разделить на три основные группы [12]: проводные, беспроводные капиллярные и сотовые сети. Данный раздел кратко описывает преимущества этих решений.

В первую очередь, хочется упомянуть классические решения проводных сетей, где ключевым фактором было соединение каждого сенсора с соответствующим шлюзом посредством выделенного кабеля. Такие сети принято считать самыми надёжными и безопасными. В то же время, физическое соединение позволяло получать высокоскоростные соединения с низкой задержкой. Однако для передачи пакетов малого размера, которыми оперируют сенсоры, пропускная способность канала не является ключевым фактором, а дороговизна развёртывания сети, сложность изменения топологии, отсутствие мобильности и вандализм негативно повлияли на развитие проводных сенсорных сетей.

Следующей популярной технологией являются беспроводные капиллярные сети. Основной характеристикой данной группы можно считать общий беспроводной канал связи (WiFi, ZigBee, BtLE, etc.) [13]. Такие сети заявили себя как недорогие, легко масштабируемые и обладающие низким энергопотреблением. С другой стороны, они функционируют на очень небольших расстояниях, имеют низкую пропускную способность, слабую защищённость канала и высокую интерференцию. На данный момент беспроводные капиллярные сети являются наиболее широко распространённым решением.

Хорошим решением в беспроводных технологиях считаются беспроводные сотовые сети с отличным покрытием, высоким уровнем мобильности и хорошей инфраструктурой. Также стоит упомянуть, что сотовые сети являются априори более защищёнными, так как ответственность за ущерб несёт оператор. К сожалению, этот фактор делает их крайне дорогими в использовании и обслуживании, в дополнение к низкой энергоэффективности и высоким задержкам. Общее соотношение между двумя флагманскими технологиями беспроводной связи представлено на рисунке 2.

и высоким задержкам. Общее соотношение между двумя флагманскими технологиями беспроводной связи представлено на [рисунке 2](#).

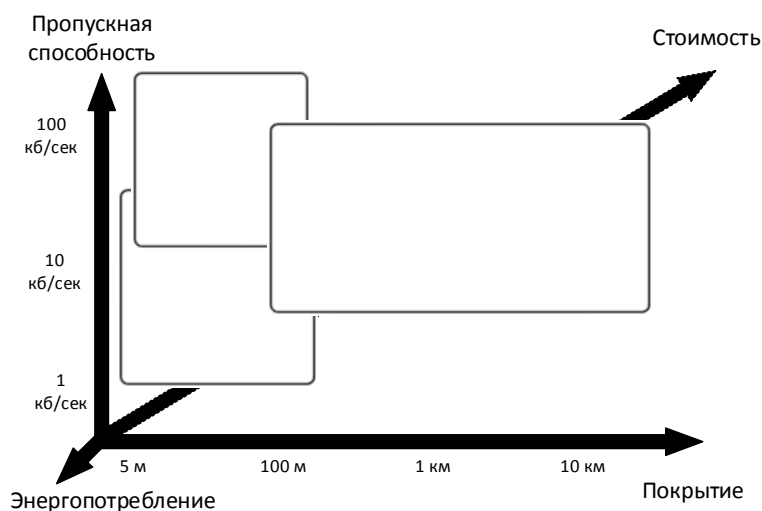


Рис. 2. Сравнение беспроводных технологий связи в условиях Интернета Вещей

Подводя итоги раздела, хочется обратить внимание на то, что капиллярные технологии связи для БСС никогда не будут полностью вытеснены с рынка из-за множественного использования в промышленности. Даже в случае решения операторов о повсеместной интеграции сенсорных сетей, объёмы обрабатываемой информации потребуют дополнительных решений как для передачи, так и для обработки Больших Данных внутри сетей, что повлечёт за собой дополнительные затраты.

## 5. Основные критерии оценки, проблемы и пути дальнейшего развития

Несмотря на большие сроки и относительные успехи в эволюционном пути Интернета Вещей, эти сети могут быть отнесены лишь к развивающимся [14]. Это связано с тем, что масштабно развёрнутыми можно считать лишь их редких представителей [15], а основными критериями оценки являются энергоэффективность (как долго устройство может быть активно без замены источника питания), время отклика (период, необходимый для передачи и обработки сообщения), пропускная способность (максимальный объем данных, переданный по сети за единицу времени), масштабируемость (количество поддерживаемых устройств), топология сети (порядок взаимодействия устройств) и информационная безопасность. Таким образом, согласно данной классификации дизайнеры сети могут балансировать между определёнными запросами промышленности для достижения конкретных задач при планировке данных сетей.

Учитывая тот факт, что даже общепринятые к использованию технологии Интернета Вещей все ещё находятся в процессе развития, остаются открытыми множество вопросов, таких как стандартизация, используемая технология, безопасность и конфиденциальность [16]. Дальнейшие исследо-

вания видятся необходимыми и для более точной оценки угроз, рисков, перспектив и оптимизации работы Интернета Вещей в целом.

Быстрый рост IoT влечёт за собой проблемы, связанные со стандартизацией процесса взаимодействия между различными устройствами на сервисном уровне. Трепетное отношение к данному процессу поможет в дальнейшем охватить больший спектр сенсоров по всему миру, что значительно повысит качество обслуживания и облегчит работу для сервиса оборудования [17], и повлечёт за собой развитие IoT в целом, а не только на уровне предприятий. В то же время, переработка текущих протоколов и разработка новых является крайне ёмкой задачей. Комитету по стандартизации всей системы IoT не суждено появиться в первую очередь из-за необъятности системы, что не позволит влиять на неё с целью общей оптимизации и внедрения единообразия в используемых технологиях.

С другой стороны, не менее важной технологической проблемой в развитии Интернета Вещей является разработка подходящей архитектуры сети. Также наличие неоднородности в сети ведёт к возрастанию задержки, увеличению количества конфликтов при передаче и прочим проблемам распространения сигналов. Множественный случайный доступ был и остаётся одной из глобальных проблем, терзающих многие умы по всему миру [18–20].

Проблемой является и отсутствие общепринятого языка взаимодействия устройств, что затрудняет модернизацию сервисного уровня, т. к. преобразование сигналов на сетевом уровне и для интерфейсов является зависимым от производителей оборудования. К сожалению, IoT основан на классических сетях передачи данных, которые разрабатывались для специфических нужд. Таким образом, появляется необходимость в разработке дизайна подходящего именно для конкретных запросов развертывания сенсорных сетей, что противоречит самой концепции Интернета Вещей. Всё это ведёт к необходимости доработки текущих решений до более универсальных, что в свою очередь, является задачей, требующей титанических временных затрат. Также стоит упомянуть о необходимости анализа больших объёмов данных, порождаемых как сенсорами, так и уже существующими пользователями беспроводных сетей.

Необходимо отметить тот факт, что большинство современных беспроводных сетей испытывают постоянное давление со стороны двух глобальных проблем – безопасности и конфиденциальности данных [21]. Для Интернета Вещей данные факторы играют огромную роль из-за специфики развёртывания, сложности и нестабильности сети. Для обеспечения безопасности на данный момент используются существующие решения БСС, но каждое такое решение должно быть тщательно исследовано в условиях индустрии, так как требования безопасности при обработке коммерческой информации значительно выше, чем при личном использовании. Неоспорим и тот факт, что беспроводные сенсорные сети подвергаются значительно более высокому количеству атак, чем традиционные беспроводные [22].

Говоря о возможных путях развития Интернета вещей, можно выделить несколько основных трендов [23]:

В первую очередь, хочется сфокусироваться на наиболее популярном векторе соединения всех «Smart»-объектов во всемирной мировой сети Интернет. Использование веб-технологий может намного упростить разработку приложений IoT, а в особенности при модификации уже существующих протоколов, которые могут значительно облегчить взаимодействие различных устройств [24].

Другим развивающимся трендом является популярный сектор Интернета Нано Вещей, который может быть описан наилучшим образом с точки зрения объединения устройств очень малого размера с капиллярными сетями, а далее и с сетью Интернет [25, 26]. Однако, поскольку такие устройства взаимодействуют посредством электромагнитных полей, появляется множество новых проблем реализации и оптимизации протоколов, разработанных именно для нано-систем.

Путь развития Интернета Вещей на данном этапе становления не так очевиден, но использование беспроводных технологий, как оптимального решения для коммуникации множества устройств, остаётся очевидным как минимум на уровне передачи данных к первому коммутационному устройству [27]. Без сомнения, такое утверждение подразумевает огромную и длительную работу над стандартами и протоколами как со стороны науки, так и со стороны индустрии с целью достижения общей цели – разработки и внедрения концепции Интернета Вещей.

## **6. Заключение**

Интернет Вещей, как сложная комбинированная развивающаяся система, объединит множество различных устройств с возможностями взаимодействия со средой, идентификации, обработки и передачи информации. Беспроводные сенсоры становятся все меньше, энергоэффективнее и мощнее, что делает их использование практически незаменимым для повсеместного использования в индустрии для мониторинга, трекинга и управления системами. В свою очередь, эти аспекты усиливают научный интерес к данной области исследования, что влечёт за собой пристальное внимание к современным технологиям беспроводной связи.

В статье приведен обзор исследований в области Интернета Вещей, определены эволюционные цепочки и разнородные аспекты развития технологии, выявлены основные проблемы, для решения которых ставятся определённые оптимизационные задачи к современным дизайнерам беспроводных сетей.

## **Библиографический список**

1. **Kranenburg, R. van** The Internet of Things: A Critique of Ambient Technology and the All-Seeing Network of RFID / R. van Kranenburg. – Institute of Network Cultures, 2008.

2. **Кучерявый, А. Е.** От е-России к и-России: тенденции развития электросвязи / А. Е. Кучерявый, Е. А. Кучерявый // Электросвязь. – 2005. – № 5.
3. **Гепко, И. А.** Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития / И. А. Гепко, В. Ф. Олейник, Ю. Д. Чайка, А. В. Бондаренко. – М. : ЭКМО, 2009.
4. **Кучерявый, А. Е.** Самоорганизующиеся сети / А. Е. Кучерявый, А. В. Прокопьев, Е. А. Кучерявый. – СПб. : Любавич, 2011.
5. **Тан, L.** Future internet: The Internet of Things / L. Tan, and N. Wang // in Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICASTE), August 20-22, 2010, PP.V5–376–380.
6. **Кучерявый, А. Е.** Интернет Вещей / А. Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2013. – № 1. – С. 17–20.
7. **Vinel, A.** A simple analytical model for the periodic broadcasting in vehicular ad-hoc networks / A. Vinel, V. Vishnevsky, and Y. Koucheryavy // in GLOBECOM Workshops, 2008 IEEE, 30 2008-Dec. 4 2008, PP. 1–5.
8. **Campolo, C.** A. Vinel, A. Molinaro, and Y. Koucheryavy, Modeling broadcasting in IEEE 802.11 p/WAVE vehicular networks / C. Campolo, A. Vinel, A. Molinaro, and Y. Koucheryavy, // Communications Letters, IEEE 15, no. 2 (2011): PP. 199–201.
9. **Andreev, S.** Energy-efficient client relay scheme for machine-to-machine communication / S. Andreev, O. Galinina, and Y. Koucheryavy // In Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE, PP. 1–5. IEEE, 2011.
10. **Atzor, L.** The Internet of Things: a survey / L. Atzor, A. Iera, & G. Morabito // Computer Networks, 54 (15), 2787–2805, 2010.
11. **Uckelmann, D.** An architectural approach towards the future internet of things, in Architecting the Internet of Things / D. Uckelmann, M. Harrison, and F. Michahelles. – PP. 1–24, Springer, 2011.
12. **Dohler, M.** Machine-to-Machine: An Emerging Communication Paradigm / M. Dohler, J. Alonso, and T. Watteyne // Globecom, 2010.
13. **Кучерявый, А. Е.** Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчета / А. Е. Кучерявый, А. И. Парамонов, Е. А. Кучерявый. – М. : ФГУП ЦНИИС, 2008.
14. **Georgakakis, E.** An Analysis of Bluetooth, Zigbee and Bluetooth Low Energy and Their Use in WBANs[C] / E. Georgakakis, S. A. Nikolidakis, D. D. Vergados, et al. // In: Springer, 2011. – PP. 168–172.
15. **Atzori, L.** The Internet of things: a survey / L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito // Computer Networks, vol. 54, no. 15, PP. 2787–2805, 2010.
16. **Miorandi, D.** Internet of things: vision, applications and research challenges / D. Miorandi, S. Sicari, F. De Pellegrini, and I. Chlamtac // Ad Hoc Networks, vol. 10, no. 7, PP. 1497–1516, 2012.
17. **Bandyopadhyay, D.** Internet of things: applications and challenges in technology and standardization / D. Bandyopadhyay, and J. Sen // Wireless Personal Communications, vol. 58, no. 1, PP. 49–69, 2011.



18. **Bianchi, G.** Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function / G. Bianchi // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 18, no. 3, PP. 535–547, 2000.
19. **Bordenave, C.** Random multi-access algorithms – a mean field analysis / C. Bordenave, D. McDonald, and A. Proutire // Rapport de Recherche, vol. 5632, PP. 1–12, 2005.
20. **Андреев, С. Д.** Централизованное управление множественным случайным доступом в сетях передачи информации при высокой загрузке: дисс. ... канд. техн. наук / С. Д. Андреев. – СПб. : СПбГУАП, 2009.
21. **Roman, R.** Securing the Internet of Things / R. Roman, P. Najera, and J. Lopez // Computer, vol. 44, no. 9, PP. 51–58, 2011.
22. **Wan, J.** Managing IT service management implementation complexity from the perspective of the Warfield version of systems science / J. Wan, J. Jones // Enterprise Information Systems, vol. 7, no. 4, PP. 490–522, 2013.
23. **Clarke, J.** Trust & security RTD in the internet of things: opportunities for international cooperation / J. Clarke, R. Castro, A. Sharma, J. Lopez, and N. Suri // in Proceedings of the First International Conference on Security of Internet of Things, pp. 172-178). ACM, 2012.
24. **Guinard, D.** Towards the Web of Things: Web Mashups for embedded devices / D. Guinard and Trifa // Proceedings of the International World Wide Web Conference, 2009.
25. **Akyildiz, I. F.** The Internet of Nano-Things / I. F. Akyildiz and J. M. Jornet // IEEE Wireless Communications, 17 (6), 58–63, 2010.
26. **Кучерявый, Е. А.** Интернет Нановещей и наносети / Е. А. Кучерявый, С. Баласупрамиян // Электросвязь. – 2014. – № 4.
27. **Гольдштейн, Б. С.** Сети связи пост-NGN / Б. С. Гольдштейн, А. Е. Кучерявый. – СПб. : БХВ, 2013.

## **Аннотация**

*Интернет Вещей «IoT» предоставил многообещающий спектр возможностей для развёртывания системы контроля предприятий за счёт использования широко распространённых систем сенсоров, RFID-ов и прочих беспроводных устройств связи.*

*В основе написания статьи лежит произошедший в последнее время импульс в развитии беспроводных технологий. Данная работа может послужить сжатым обзором концепции «Интернета Вещей», ключевых технологий связи и приложений. Также, в дополнение к рассмотрению основных трендов и проблем, в статье приводится текущее положение исследований в области IoT.*

**A. Omjotov**

*The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications*

**Y. Koucheryavy**

*Tampere University of Technology*

**S. Andreev**

*Peoples' Friendship University of Russia*

## **ABOUT THE WIRELESS TECHNOLOGY ROLE FOR THE DEVELOPMENT OF "INTERNET OF THINGS"**

### **Annotation**

*The Internet of Things technology offered a wide specter of possibilities for the massive industrial control system by the use of well-used sensors, RFID-systems and other wireless networks.*

*Such an improvement lays in the idea of this paper, which can be introduced as a short survey on the Internet of Things concept, its key technologies and applications. Moreover, this work observes current IoT research situation and the main trends overview.*

**Keywords:** Internet of Things, wireless communications devices, automation control systems, wireless sensor networks, concept overview.

**Омётов Александр Ярославович** – аспирант кафедры «Сети связи и передача данных» Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»

**Кучерявый Евгений Андреевич** – кандидат технических наук, PhD, профессор, Технологический университет г. Тампере, Тампере, Финляндия

**Андреев Сергей Дмитриевич** – доцент, Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Российский университет дружбы народов»

## **РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОКОЛОВ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ЯДРАМИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРОЦЕССОРА**

*многоядерные системы, центральный процессор, беспроводной доступ к памяти, широкополосный канал беспородного доступа, протоколы множественного доступа.*

### **I. Введение**

Центральный Процессор (ЦП) – ключевой элемент для большинства современных электронных устройств: от персональных компьютеров до мобильной и носимой электроники. Производительность ЦП наряду с объемом и скоростью памяти во многом определяет вычислительные возможности устройства. В связи с этим, значительные усилия ученых и инженеров направлены на поиск новых решений, обеспечивающих дальнейший рост производительности ЦП. В частности, Гипотеза Хауса предполагает увеличение количества операций выполняемых ЦП в единицу времени в среднем в два раза каждые 18 месяцев.

В течение последних лет производительность процессоров увеличилась незначительно по сравнению с прогрессом, происходившим ранее [1]. Причиной этого можно назвать отсутствие качественных сдвигов в технологии производства транзисторов и приближение к предельно возможным значениям тактовой частоты. Для преодоления этих ограничений была предложена концепция многоядерности, предлагающая разделить ЦП на независимые вычислительные модули – *ядра*. В подобной системе несколько отдельных ядер одного процессора могут выполнять независимые задачи параллельно друг с другом. Однако в реальных вычислительных системах большинство задач являются зависимыми друг от друга. Иными словами, результат выполнения одной операции зависит от промежуточных/финальных результатов других. Таким образом, для эффективной работы многоядерной системы требуется либо предварительное разделение множества всех задач на наборы независимых операций, либо создание эффективного механизма обмена информацией между ядрами. Первый способ подходит лишь для очень небольшого множества приложений. Например, при проведении численного моделирования возможно разделение всего множества задач по входному потоку (на подмножества независимых сценариев). Второй способ значительно более универсален и широко распространен, однако требует внесения изменений в архитектуру ЦП.

Одним из наиболее распространенных методов организации обмена информацией между ядрами является предоставление механизма общего доступа к нескольким блокам кэш-памяти – внутренней памяти процессора. Например, именно по такому принципу построена архитектура процессоров Intel Haswell [18] (рис. 1). Для реализации указанного подхода требуется проложить двустороннюю шину данных от кэш-памяти к каждому ядру, а также обеспечить корректное мультиплексирование/демультиплексирование сигналов, идущих по этим шинам. Однако, данный подход имеет целый ряд технических ограничений, делающих крайне сложным создание систем с количеством ядер большим 8–16.

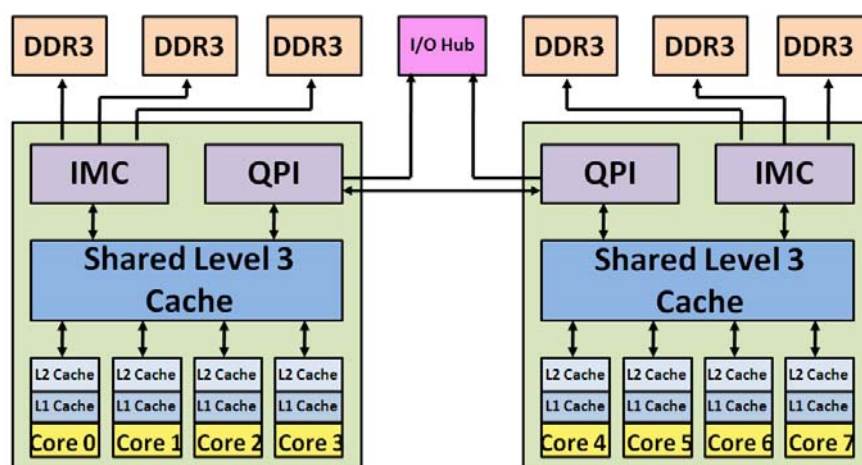


Рис. 1. Архитектура Многоядерного ЦП на примере Intel Haswell

Одним из вариантов решения задачи является замена проводных шин между ядрами и кешем на беспроводной канал связи. Эта концепция получила название Wireless Networks on Chips (WNoC, [19]). Основной идеей является замена проводных шин на передатчики и приемники беспроводного сигнала, подключенные ко всем ядрам и кеш-памяти. Такой подход позволяет избавиться от крайне сложных устройств мультиплексирования высокоскоростных шин и предоставить требуемую масштабируемость и расширяемость решения. В то же время, использование предложенного подхода накладывает ряд ограничений на канал связи, в частности на скорость и надежность передачи информации.

На сегодняшний день решения, предложенные в рамках концепции WNoC не в полной мере удовлетворяют заявленным требованиям [19–21]. Одним из основных ограничений является недостаточно высокая скорость передачи данных по сравнению с проводными решениями. Для решения этой проблемы в данной статье предлагается построение системы WNoC для связи между ядрами процессора с использованием беспроводного канала 0.1–0.54 ТГц. Указанный канал, с одной стороны, обладает очень высокой пропускной способностью (до нескольких терабит в секунду), а с другой – крайне низким уровнем молекулярного шума, что должно обес-

печить высокую надежность передачи данных. В работе приводится расчет характеристик физического уровня, а также сравнение эффективности двух алгоритмов множественного доступа: 1) на основе жесткого расписания и 2) с немедленным доступом.

Изложение построено следующим образом. В разделе II рассматривается архитектура существующих ЦП и формулируется исследовательская задача. В разделе III описываются основные характеристики беспроводного канала 0.1–0.54 ТГц. Раздел IV посвящен архитектуре предлагаемого решения, а также методике расчета основных количественных характеристик. Численные результаты приведены в разделе V, а основные выводы по статье перечислены в разделе VI.

## **II. Архитектура Многоядерного Процессора**

Одним из значительных событий в истории развития процессоров можно назвать появление кеш-памяти [2] – промежуточного буфера между оперативной памятью (ОЗУ) и регистрами процессора, отличающегося средним временем обращения (больше, чем к регистру, но меньше, чем к оперативной памяти) и средним объемом памяти (большим, чем суммарный объем регистров, но меньшим, чем объем ОЗУ). Кеш-память используется для хранения информации, которая может быть запрошена в ближайшее время с высокой вероятностью и, таким образом, уменьшает среднее время доступа к данным, которые иначе пришлось бы запрашивать из ОЗУ. В современных процессорах кеш-память строится по иерархическому принципу и состоит из нескольких уровней (обычно, до трех: от первого, наименьшего по объему и времени доступа, до третьего, наибольшего по объему и времени доступа). Несмотря на сложность построения, такой подход имеет преимущество с точки зрения стоимости конечного устройства, поскольку требует существенно меньшего объема сверхбыстрой и сверхдорогой кеш-памяти первого уровня.

В многоядерных системах помимо выполнения основной функции, кэш-память также может служить для организации взаимодействия между ядрами процессора. Например, в чипах компании Intel на платформе Haswell [18] каждое из ядер имеет собственную кэш-память (кэш первого и второго уровней), а кеш третьего уровня является общим на несколько ядер. Таким образом, результаты выполнения операций на одном из ядер могут быть оперативно получены другим ядром, что снижает время простоя, и, следовательно, повышает общую производительность системы. Аналогичным способом организовано взаимодействие между ядрами в решениях компаний AMD.

К сожалению, данный подход является плохо масштабируемым на случай большого числа ядер в силу сложности мультиплексирования/демультиплексирования потоков данных от множества высокоскоростных шин. Для обхода этой проблемы существующие ЦП с количе-

ством ядер большим четырех строятся по иерархическому принципу: кеш третьего уровня объединяет ядра в кластеры по четыре, а для связи между кластерами используется специальная шина, например, QPI [3]. Таким образом, возможно построение многоядерного ЦП из 8 (или 12 при размере кластера в 6) ядер. Пример данной архитектуры приведен на рисунке 1.

Однако, дальнейшее увеличение числа ядер при сохранении архитектуры невозможно, поскольку шины связи QPI работают в режиме «точка-точка». В то же время, увеличение числа уровней в иерархической модели ведет к значительному росту задержки при передаче данных между ядрами из разных кластеров. Аналогичные проблемы возникают и при попытке проложить единую шину обмена данных через каждое ядро/кластер. Таким образом, стоит признать, что существующие подходы к организации межъядерного взаимодействия во многом себя исчерпали.

На сегодняшний день, актуальной является задача создания альтернативной технологии, позволяющей ядрам эффективно обмениваться данными друг с другом. Основными требованиями к предлагаемому решению являются: 1) высокая масштабируемость, как минимум, до нескольких сотен ядер, 2) высокая надежность передачи данных, т. е. информация не должна изменяться или пропадать в процессе обмена и 3) низкая задержка при передаче, что гарантирует отсутствие простоев в работе ЦП. В последующих разделах предложен подход к решению данной задачи, основанный на использовании беспроводного канала связи.

### **III. Анализ беспроводного канала связи в диапазоне 0.1–0.54 ТГц**

В качестве базисной технологии для организации взаимодействия между ядрами предлагается использование беспроводного канала связи в частотном диапазоне 0.1–0.54 ТГц. К преимуществам использования данного диапазона стоит отнести очень высокую емкость канала, низкий уровень шума, а также миниатюрный размер соответствующих передающих и приемных устройств. В данном разделе приведена методика расчета основных характеристик физического канала связи с учетом современного уровня развития электроники, а также специфики приложения.

Для оценки достижимой скорости передачи данных на физическом уровне используется две оценки. Верхняя оценка базируется на максимальной емкости канала, достижима при использовании оптимальной модуляционно-кодовой схемы (Раздел III-C). Нижняя оценка основана на пропускной способности канала связи «точка-точка» при использовании простейшей двухуровневой амплитудной манипуляции – ON/OFF keying или ООК, Раздел III-D – схемы, реализуемой для терагерцового диапазона на текущем уровне развития электроники [22, 23]. Наличие одновременно верхней и нижней оценок позволяет оценить работу системы во всем диапазоне значений, в зависимости от выбранной модуляционно-кодовой схемы (фактически, от сложности используемых устройств связи).



## А. Особенности беспроводного канала связи

Рассмотрим свойства беспроводного канала в частотном диапазоне 0.1–10 ТГц. Стоит отметить, что тепловой шум при использовании антенн на основе, например, графена еще не изучен до конца, но предполагается, что он будет достаточно малым [7–9]. Это предположение основано на ряде особенностей графена – материала, предлагаемого для использования в антеннах.

С учетом отмеченного факта, мощность на приемнике может быть выражена в виде  $P_{Rx} = P_{Tx} - L_A(f, d) - L_P(f, d)$ , где  $P_{Tx}$  – спектральная плотность мощности передаваемого сигнала,  $P_{Rx}$  – спектральная плотность мощности принимаемого сигнала,  $L_P(f, d)$  – затухание сигнала в свободном пространстве, а  $L_A(f, d)$  – спектральная плотность мощности молекулярной абсорбции.

Спектральную плотность мощности молекулярной абсорбции можно вычислить по формуле  $L_A(f, d) = 1/\tau(f, d)$ , где  $f$  – рабочая частота,  $\tau(f, d)$  – пропускательность среды на расстоянии  $d$ , который может быть найден через закон Бугера-Ламберта-Бера, как  $\tau(f, d) = e^{-K(f)d}$ , где  $K(f)$  – коэффициент поглощения.

Наконец, затухание сигнала в свободном пространстве выражается как  $L_P(f, d) = (4\pi f d/v)^2$ , где  $v$  – скорость света в интересующей нас среде,  $d$  – расстояние между приемником и передатчиком,  $f$  – интересующая нас частота.

В дополнение к молекулярной абсорбции и потерям при распространении на принятый сигнал так же действует так называемый «молекулярный шум». Молекулярный шум вызывается поглощением электромагнитной энергии излучения и последующим излучением части этой энергии в канал. Спектральная площадь мощности молекулярного шума может быть выражена через формулу  $P_M(f, d) = k_B B [N_M(f, d) + N_A(f)]$ , где  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $B$  – полоса пропускания канала,  $N_M(f, d) = T[1 - \tau(f, d)]$  – температура молекулярного шума,  $N_A(f)$  – температура других источников шума на частоте  $f$ .

Молекулярный шум привносит ряд особенностей в канал связи. Во-первых, молекулярный шум образуется только в ответ на поглощение электромагнитных волн молекулами. Таким образом, шум в канале существует только тогда, когда передатчик излучает энергию. Назовем это явление «самоиндуцированный шум». Это одна из особенностей, которую никогда не наблюдали в сетях связи, работающих на частотах менее 100 ГГц.

Во-вторых, существует так называемый эффект релаксации молекулярного шума, делающий терагерцовый канал еще более необычным. Релаксация шума – это процесс постепенного снижения мощности шума после передачи импульса. Время молекулярной релаксации,  $T_R(f, d)$ , определяется как количество времени, необходимого для того, чтобы амплитуды

возбужденных молекул стал ниже, чем 10 %. Это сложная функция от большого количества параметров, в том числе и от агрегатного состояния вещества. Согласно работам [10, 11], время релаксации  $T_R$  занимает как минимум одну пикосекунду. В работе [12] было предложено моделирование этого эффекта используя экспоненциальную функцию вида  $R(f, t, d) = R_{f,A}(d)e^{-\gamma t}$ , где  $R_{f,A}(d)$  – амплитуда шума в конце импульса на расстоянии  $d$ ,  $\gamma$  – скорость молекулярной релаксации, которая может быть оценена через время  $T_R$ .

С учетом вышесказанного, принятый сигнал на расстоянии  $d$  может быть представлен во временной области следующим выражением  $P(f, t, d) = [S(f, t, d) + N(f, t, d)]R(f, t, d)$ .

## В. Особенности беспроводного канала связи

На рисунке 2 показаны полные потери в канале вызванные молекулярной абсорбцией и распространением для частот 0.1–3 ТГц на различном расстоянии от передатчика. Потери, вызванные молекулярной абсорбцией, выражаются в небольших пиках на различных частотах, в то время как потери вследствие распространения нелинейно увеличиваются с увеличением частоты. Важно отметить, что есть промежутки частот, на которых потери из-за молекулярной абсорбции очень малы. Так как коэффициент пропускания среды, определяющий потери абсорбции, также является одним из важнейших факторов, влияющих на молекулярный шум, последний слабо выражен на этих частотах.

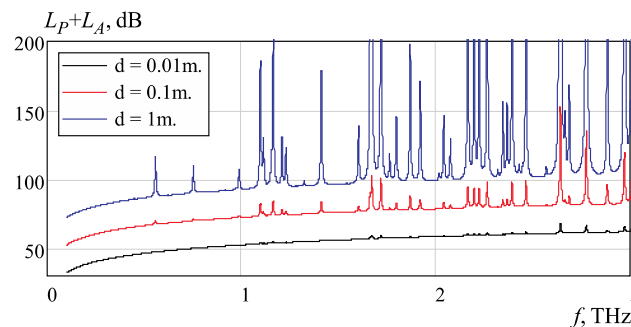


Рис. 2. Общие потери вследствие абсорбции и распространения

Свойство абсорбции электромагнитного излучения терагерцового канала мешает нам использовать весь диапазон частот от 0.1 до 10 ТГц и требует более разумного выбора спектра частот. В работе [12] было предложено использовать так называемые окна прозрачности этого диапазона. В таких окнах пропускательность рассматриваемой среды  $\tau(f, d)$  выше, чем 98 %. При работе в этих окнах, как молекулярная абсорбция, так и ассоциированный молекулярный шум пренебрежимо малы. Следует отметить, что полоса пропускания окон, определенная указанным образом, может

уменьшаться с увеличением расстояния. Из всех окон, описанных в работе [12], мы предлагаем использовать первое окно прозрачности – 0.1–0.54 ТГц, т. к. полоса пропускания для него достаточно высока – порядка 440 GHz – и позволяет добиться очень высоких скоростей передачи. Кроме того выбранное окно находится в начале терагерцового диапазона, что, возможно, облегчит создание антенн и приемопередатчиков [15].

### С. Емкость канала и отношение сигнал/шум

Емкость канала,  $C(d)$ , оценивается по теореме Шеннона  $\int_{B(d)} \log_2 \left( 1 + \frac{P(f)}{L_P(f,d)L_A(f,d)N_M(f,d)} \right) df$ , где  $C(d)$  – емкость канала;  $\Delta f$  – полоса пропускания;  $P(f_i)$  – излучаемая мощность сигнала на частоте  $f_i$ ;  $L_P(f_i, d)$  – потери распространения;  $N_0$  – мощность молекулярного шума на один Гц.

Емкость канала первого окна прозрачности (0.1–0.54 ТГц) для разных излучаемых мощностей импульса показана на рисунке 3. Номинальная мощность графеновых передатчиков зависит от множества факторов [14]. В большей части исследований предлагается использовать значения около 0.1 аJ на импульс [12, 13]. Стоит заметить, что значение энергии на импульс однозначно определяет как отношение сигнал/шум, так и емкость канала. В дальнейшем мы будем использовать значение 0.1 аJ. Также необходимо упомянуть, что процесс передачи рассматривается здесь при нормальных условиях ( $T = 296$  К,  $p = 760$  мм ртутного столба, и 1,8 % молекул пара). Однако, температура вокруг работающего процессора может быть значительно выше, чем  $T = 296$  К. Это значит, что данные на рисунке 3 представляют собой нижнюю границу достижимой емкости канала. Также можно заметить, что емкость канала порядка нескольких терабит в секунду теоретически достижима на расстоянии в несколько сантиметров.

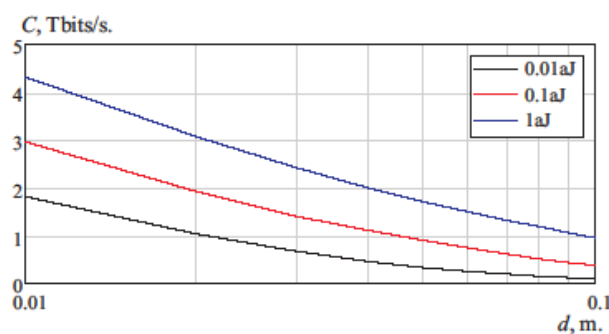


Рис. 3. Емкость канала для некоторых значений мощности

Фактор, определяющий достижимую дальность связи – отношение сигнал-шум. На рисунке 4 показано отношение сигнал-шум 0.1–0.54 ТГц как функция от расстояния  $d$  для  $P_{Tx} = 0.1$  аJ. Отметим, что на расстоянии

3 см. значение отношение сигнал-шум находится в районе 4 dB (точное значение – 4.376 dB). Иными словами, на расстоянии до 3 см возможен уверенный прием и декодирование сигнала, что вполне соотносится с расстоянием от центра до углов современного процессора (например, размер корпуса для шестиядерного процессора Intel Core i7-3930K составляет 52 на 45 мм [17]).

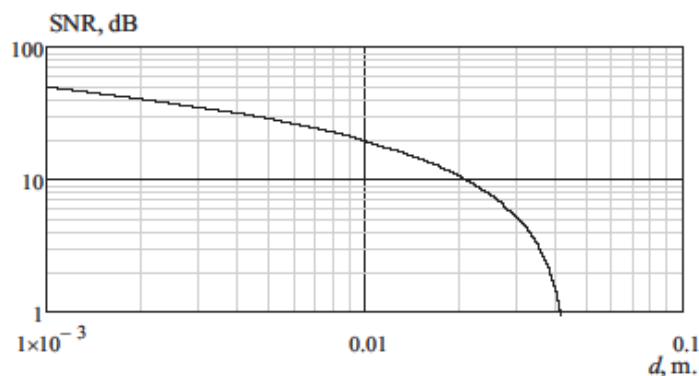


Рис. 4. Отношение сигнал/шум

#### **D. Пропускная способность и вероятность ошибки для ON/OFF keying**

Теорема Шеннона дает верхнюю оценку емкости канала, которая достижима теоретически. Отношение сигнал-шум также дает только общее представление о канале. Для оценки канала для конкретной модуляционно-кодировой схемы важны такие параметры, как пропускная способность и вероятность ошибки. Согласно работе [16], решение о том, какое значение было принято, принимается по следующей формуле

$$Pr\{0\} = \Pr\left\{\int_0^{2T} ([S(t, d) + N(t, d)]R(t, d))^2 dt < P_T(d)\right\},$$

где  $Pr\{0\}$  – вероятность декодирования логического нуля,  $P_T(d)$  – порог детектирования импульса,  $S(t, d)$  – импульс на расстоянии  $d$ ,  $N(t, d)$  – шум на расстоянии  $d$ ,  $R(t, d)$  – шум релаксации. Применяя эту методологию, можно показать, что значение пропускной способности равно 0.3 Тбит/с. для импульса длиной 3.76 пикосекунд (выбор длительности импульса определяется шириной окна прозрачности, 440 ГГц). Также в данной работе было продемонстрировано, что для указанной модуляционно-кодировой схемы на дальности в несколько сантиметров при правильном выборе порога вероятность ошибки пренебрежимо мала. Следовательно, с высокой степенью достоверности можно предположить, что рассматриваемый канал связи свободен от ошибок.

#### IV. Архитектура и ключевые метрики предлагаемого решения

В данной работе предлагается заменить изображенное на рисунке 1 проводное соединение между кешем второго и третьего уровней на беспроводной канал связи. В такой системе у каждого ядра есть своя кеш-память первого и второго уровня и устройство, позволяющее передавать и принимать сигналы в некотором диапазоне (рис. 5). Здесь и далее мы будем рассматривать абонентов, обменивающихся информацией между собой в терагерцовом диапазоне, конкретнее – в его первом окне прозрачности (0.1–0.54 ТГц). Использование столь высокочастотного канала должно позволить создавать процессоры с большим количеством ядер без использования сложных мультиплексоров и аналогичных решений, ограничивающих масштабируемость.

Поскольку обмен информацией между ядрами по-прежнему идет через кеш третьего уровня, закономерным является сохранить текущую логику работы ЦП, при которой взаимодействие инициируется ядрами, а кэш лишь выполняет поступающие запросы. Для упрощения, в работе рассматриваются лишь основные (наиболее часто используемые) типы запросов: на чтение и на запись данных. Предлагаемый запрос на запись данных имеет размер 96 бит и состоит из трех блоков – 1 бит на тип запроса, 31 бит (адресация до  $2^{31} \sim 2 \cdot 10^9$  ячеек памяти – до 16 ГБайт данных), а также 64 бита (разрядность современных процессоров) отводится собственно на сами данные. Запрос на чтение данных имеет схожую структуру заголовка: тип запроса и 31-битный адрес ячейки памяти, из которой необходимо прочесть данные. В ответ на запрос посылается 64 бита данных. Таким образом, на чтение и запись данных требуется время, равное времени передачи 96 бит информации.

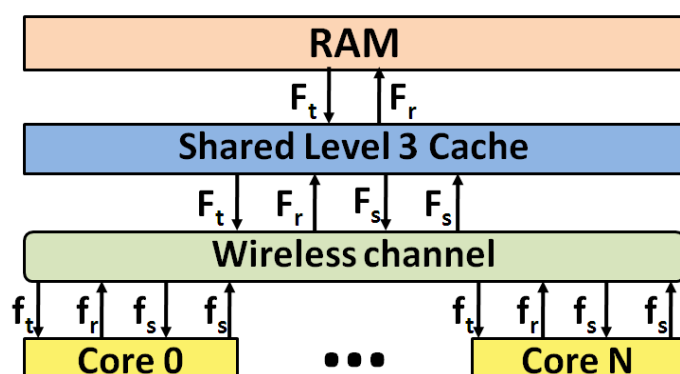


Рис. 5. Предлагаемая архитектура ЦП с беспроводной связью

##### А. Рассматриваемые дисциплины множественного доступа

Выбор дисциплины множественного доступа для предлагаемой системы не является очевидным. С одной стороны известно, что использование системы со строгим расписанием при отсутствии ошибок в канале свя-

зи позволяет гарантированно доставить все отправленные пакеты. С другой стороны, система с немедленным (случайным) доступом может оказаться более выгодной с точки зрения средней задержки при передаче сообщения. В данной статье сделана попытка рассмотреть дисциплины разных типов и границы применимости каждой из них с учетом специфики решаемой задачи.

Для сравнения были взяты две диаметрально противоположные по своей идее дисциплины множественного доступа. Первая из них - это система, в которой составлено четкое расписание моментов, в которые каждое из ядер может начинать передачу. Вторая – это случайный множественный доступ, реализованный с помощью алгоритма АЛОХА с немедленной передачей сгенерированного пакета [5, с. 49].

Для более детального описания дисциплин выхода абонентов в канал определим допущения, при которых мы будем рассматривать предложенные подходы. Пусть у нас имеется  $M$  абонентов – ядер процессора, и 1 абонент, принимающий сообщения – кеш третьего уровня. У каждого из  $M$  абонентов есть буфер, позволяющий хранить ровно одно сообщение, сгенерированное абонентом. Это допущение весьма реалистично с учетом скорости работы современных вычислительных ядер, требований по задержке при передаче данных, а также требований по экономии места на кристалле ЦП. Реализация очереди заявок на передачу в этих условиях представляется весьма сомнительной. Время в системе поделено на слоты, которые пронумерованы, и за каждый из которых может быть передано ровно одно сообщение. Время для всех абонентов синхронизировано. При попытке передачи нескольких сообщений в один и тот же слот все сообщения не будут корректно декодированы. В конце каждого слота каждый абонент знает результат передачи, что может быть реализовано с помощью простейшей обратной связи. Поскольку вычисления на различных ядрах, по умолчанию, никак не синхронизированы друг с другом, в качестве входного потока предлагается один из наиболее случайных динамических потоков – поток Бернулли.

#### *Алгоритм передачи с расписанием*

В этом алгоритме каждый абонент имеет право передавать пакеты данных только в определенные слоты, например, абонент с номером 1 имеет право передавать пакеты в слоты с номерами 1,  $M+1$ ,  $2M+1$  и т. д. В такой системе конфликты невозможны, поэтому каждый абонент в конце слота знает, какое из двух событий – «Успех» (один абонент передал сообщение, остальные абоненты не передавали ничего) или «Пусто» (ни один из абонентов не передавал сообщения) произошло в данном слоте. При отсутствии ошибок в канале связи любое переданное сообщение будет успешно декодировано на приемной стороне.



### *Алгоритм АЛОХА с немедленной передачей*

Для этого алгоритма каждый абонент в конце слота знает, какое из трех событий – «Успех» (один абонент передал сообщение, остальные абоненты не передавали ничего), «Неудача» (два и более абонентов передавали сообщение) или «Пусто» (ни один из абонентов не передавал сообщения) произошло в данном слоте. Если сообщение поступило в буфер пользователя (размером в одно сообщение), то оно передается в следующий слот. Если передача произошла успешно, то сообщение удаляется из буфера, в противном случае в каждом из следующих слотов абонент пытается передать сообщение с вероятностью  $p_i$ . В случае успешной передачи сообщения оно удаляется из буфера, в случае конфликта процесс повторяется.

Анализ характеристик описанных выше дисциплин обслуживания в насыщенном режиме был произведен во многих работах, результаты которых суммированы в [5]. Очевидно, что в таких условиях система со случайным доступом проигрывает системе с расписанием. Однако, реальный режим работы системы является ненасыщенным, и именно такой режим будет рассмотрен в данной статье. Стоит отметить, что в этой работе мы учитываем только трафик, идущий от кеша второго уровня к кэшу третьего уровня, т. к. в трафике, идущем в обратном направлении, нет конкуренции за право передачи сообщения - все данные передает кеш третьего уровня, и применение каких-либо алгоритмов со случайным доступом оказывается неразумным. Также без потери общности можно предположить, что результаты вычислений на каждом ядре обрабатываются следующим образом: некоторый процент остается кеш-памяти первого и второго уровней, так как требуется для дальнейших расчетов, а остальная часть уходит в кеш-память третьего уровня, так как потребность в ней у текущего ядра отпадает. Для формализации такой системы можно ввести параметр  $\rho$  который изменяется от 0 до 1 и обозначает долю от общего количества данных, уходящую в кеш третьего уровня. Для потока Бернулли вероятностью появления нового сообщения в текущий слот выражается как  $y = \rho \cdot x \cdot T$ , где  $x$  – количество данных, генерируемых каждым ядром в единицу времени (для сравнения взято максимально достижимое значение производительности одного ядра в 22 миллиарда операций с плавающей точкой в секунду [6]), а  $T$  – длительность одного слота.

### **В. Расчет основных метрик**

Помимо непосредственно производительности ядра и числа ядер, следует дополнительно рассмотреть две метрики, существенно влияющие на производительность многоядерной системы. Это задержка на доступ к кеш-памяти ("latency") и пропускная способность канала связи.

Задержкой при передаче сообщения в рассматриваемой системе является величина, равная интервалу времени от момента поступления сообщения в буфер ядра до момента попадания его в кеш-память третьего уровня (задержка при записи) или интервалу времени от момента поступления запроса на чтение в буфер ядра до момента получения данных (задержка на чтение). В силу идентичности запросов на чтение и на запись (см. предыдущий раздел) численные значения задержки на чтение и на запись в системе будут совпадать.

Под пропускной способностью канала связи мы будем понимать количество полезных данных, переданных через систему за единицу времени. Величина пропускной способности для системы с расписанием зависит от вероятности того, что для каждого абонента в отрезок в  $N$  слотов (от одного слота, в который он имеет право передавать, до другого) в буфер придет сообщение, длины слота и длины сообщения. Численное значение вычисляется по следующей формуле

$$S_{sc} = \frac{(1 - (1 - y)^{2N}) \cdot L}{T},$$

где  $y$  – с вероятностью генерации сообщения (параметр входного потока);

$N$  – количество ядер;

$L$  – длина передаваемого за один слот сообщения;

$T$  – длина слота.

Задержка для системы с расписанием выражается как

$$D_{sc} = T \cdot \sum_{i=1}^M (1 - y)^i \cdot (M - i)$$

Для расчета пропускной способности алгоритма АЛОХА с немедленной передачей в работе [5] было предложено построение модели системы с использованием марковской цепи, каждое из состояний которой ассоциировано с количеством абонентов, имеющих готовый для передачи пакет. По стационарному распределению этой цепи  $P_n$  можно рассчитать среднее число абонентов, имеющих готовый для передачи пакет как

$$N = \sum_{i=1}^M n \cdot P_n$$

и стационарную вероятность успеха (среднее число успехов в единицу времени)

$$S = \sum_{n=0}^M s(n, y) \cdot P_n$$

где  $s(n, y)$  – вероятность успешной передачи пакета – вычисляется по формуле

$$s(n, y) = (1 - p_t)^n (M - n) y (1 - y)^{M-n-1} + n p_t (1 - p_t)^{(n-1)} (1 - y)^{M-n}.$$

Используя эти две величины, по формуле Литтла [6] можно оценить среднюю задержку передачи сообщения

$$D_{\text{aloha}} = \frac{N}{S} + 1$$

В свою очередь, пропускная способность системы с немедленным доступом рассчитывается по формуле

$$S_{\text{aloha}} = \frac{SL}{T}$$

Таким образом, для обеих дисциплин обслуживания получены выражения для расчета как пропускной способности, так и средней задержки.

## V. Численные результаты

Используя методику расчета, предложенную в предыдущем разделе, можно получить численные значения пропускной способности канала связи и средней задержки для предложенных к рассмотрению дисциплин множественного доступа. Абсолютные значения этих метрик приведены на [рисунках 6а и 6б](#), соответственно. Как следует из графиков, система использующая оптимальную модуляционно-кодую схему демонстрирует существенно лучшие характеристики во всем диапазоне значений, чем система с ООК. То есть задача создания элементной базы для более сложных модуляционно-кодowych схем, чем ON/OFF keying является актуальной.

Сравнивая характеристики дисциплин множественного доступа, стоит отметить, что в силу отсутствия конфликтов при передаче данных, система с расписанием обладает значительно большей пропускной способностью (наиболее заметно при большом числе ядер и высоких значениях  $\rho$ ). В то же время с точки зрения средней задержки на доступ к кеш-памяти, при числе ядер меньше 50, существует диапазон значений  $\rho$  при котором система с немедленной передачей демонстрирует лучшую производительность.

Для более тщательного анализа и оценки границ применимости дисциплин множественного доступа были построены графики разности пропускной способности (рис. 7а) и среднего времени на доступ к кеш-памяти (рис. 7б) в зависимости от параметров системы, количества ядер и коэффициента  $\rho$ . В качестве способа модуляции использовалась схема ООК. Первый график подтверждает ранее сделанные выводы – пропускная способность канала связи для системы с расписанием существенно выше, чем для системы с немедленной передачей на всем диапазоне значений (разность неотрицательна на всей области определения). Также наблюдается явно выраженный рост рассматриваемой метрики при увеличении загрузки системы, как в ответ на увеличение числа ядер в системе, так и при увеличении доли передаваемых данных каждым конкретным ядром (параметр  $\rho$ ).

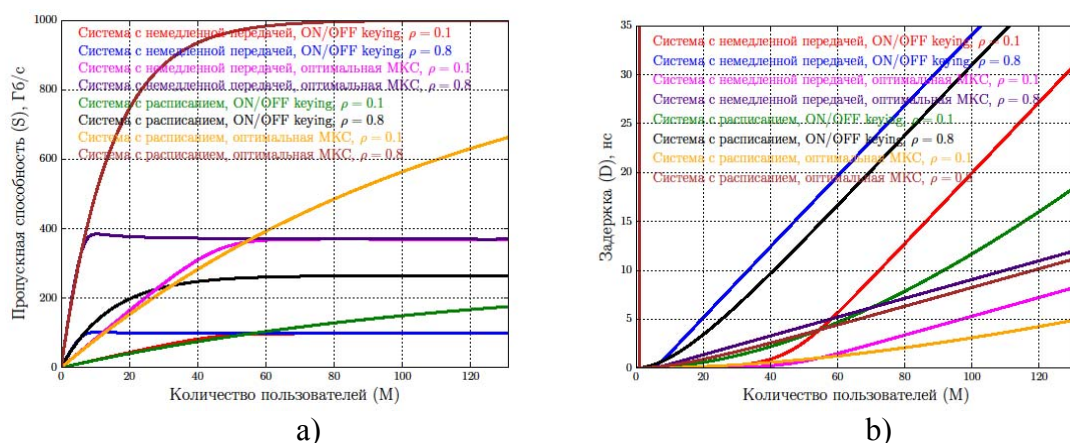


Рис. 6. Зависимость пропускной способности и задержки для систем с расписанием и немедленной передачей:  
 а – пропускная способность канала связи;  
 б – среднее время на доступ к кеш-памяти

Рассматривая среднюю задержку при передаче наибольший интерес представляет темно-красная область, в которой производительность системы с немедленной передачей выше. Подобный эффект достигается комбинацией двух факторов, малого количества ядер, что обеспечивает малое число конфликтов при передаче, а также высоких значений коэффициента  $\rho$ , что повышает вероятность генерации сообщения и увеличивает среднее время ожидания слота для передачи для системы с расписанием. В то же время, при большом числе ядер и при низких значениях  $\rho$  средняя задержка для системы с расписанием становится ниже.

Исходя из представленных результатов, можно сделать вывод о том, что выбор подходящей дисциплины множественного доступа для исследуемого приложения должен производиться в первую очередь с учетом прогнозируемого числа ядер а также степени зависимости выполняемых про-

цессов. То есть, интуитивную гипотезу о том, что в сети с фиксированным количеством узлов и известными параметрами входного трафика система с расписанием должна демонстрировать лучшие характеристики при любых условиях, следует признать несостоятельной.

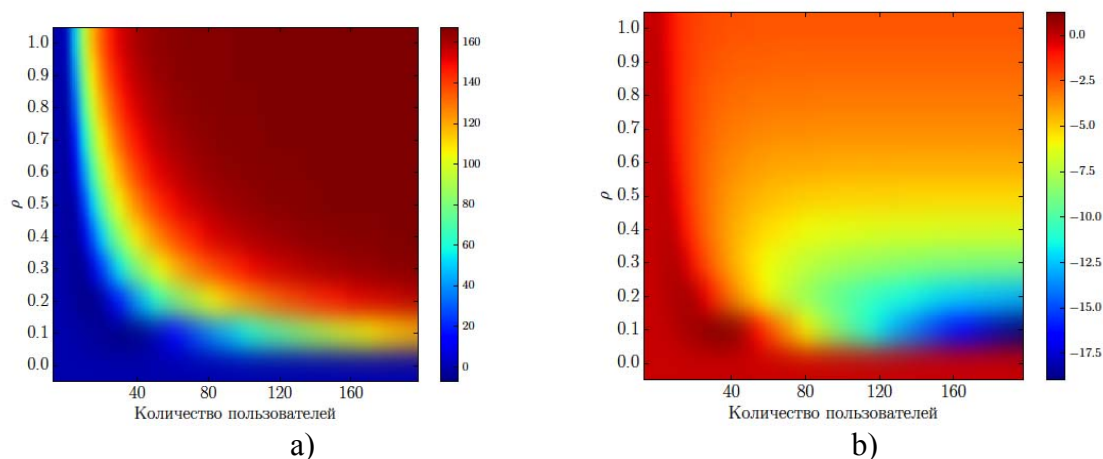


Рис. 7. Разность пропускной способности и задержки между системой с расписанием и немедленной передачей:  
*a* – пропускная способность канала связи;  
*b* – среднее время на доступ к кеш-памяти

## VI. Заключение

Одним из ограничений, сдерживающих дальнейшее развитие много-ядерных процессоров является необходимость организации эффективного обмена данными между ядрами ЦП. В данной статье рассматривается способ решения указанной проблемы с использованием беспроводного канала связи между ядрами и общей кеш-памятью. Для обеспечения высокой скорости обмена предлагается использовать приемопередатчики, работающие в одном из «окон прозрачности» терагерцового диапазона, например, 0.1–0.54 ТГц. С учетом свойств канала строятся верхняя и нижняя оценки пропускной способности. На дальности, сопоставимой с размерами ЦП, расчетные скорости достигают величины в 1 Тб/сек и 300 Гб/сек, соответственно. Затем, с использованием этих значений и при реалистичных характеристиках передаваемого трафика производится сравнение двух дисциплин множественного доступа - с расписанием и с немедленной передачей.

По результатам работы возможно сделать два основных качественных вывода. Во-первых, беспроводной канал связи в диапазоне 0.1–0.54 ТГц обладает достаточной емкостью и приемлемым уровнем шума для организации межъядерного взаимодействия в современных ЦП. Во-вторых, алгоритмы случайного множественного доступа с немедленной передачей



имеют некоторые преимущества с точки зрения средней задержки по сравнению с алгоритмами с фиксированным расписанием в определенном диапазоне входных значений.

Данные выводы позволяют говорить о целесообразности дальнейших исследований в области, как с точки зрения построения более детальной модели коммуникаций внутри ЦП, так и с точки зрения оценки применимости гибридных дисциплин множественного доступа, например, с динамическим расписанием.

### Библиографический список

1. **Kanellos, M.** Moore's Law to roll on for another decade / M. Kanellos. – URL: <http://news.cnet.com/2100-1001-984051.html>
2. **Karbo, Michael** Pc architecture book / Michael Karbo. – URL: <http://cu.edu.ge/~merab/eBooks/Hardware/PC%20Architecture.pdf>
3. **Intel Quickpath** Interconnect Maximizes Multi-Core Performance. – URL: <http://www.intel.com/content/www/us/en/io/quickpath-technology/quick-path-technology-general.html>
4. **Rom, R.** Multiple access protocols: performance and analysis / R. Rom, M. Sidi // Springer-Verlag New York, Inc. New York, NY, USA, 1990
5. **Kinghorn, D.** Haswell Floating Point Performance / D. Kinghorn. – URL: <http://www.pugetsystems.com/blog/2013/08/26/Haswell-Floating-Point-Performance-493/>, 2013.
6. **Kleinrock, Leonard** Queueing Systems Volume I: Theory / Leonard Kleinrock. – New York: Wiley, 1975-1976. J. M.
7. **Jornet, J. M.** Graphene-based plasmonic nano-transceiver for terahertz band communication / J. M. Jornet and I. F. Akyildiz // in Proc. of European Conference on Antennas and Propagation. – 2014.
8. **Tamagnone, M.** Reconfigurable terahertz plasmonic antenna concept using a graphene stack / M. Tamagnone, J. S. Gomez-Diaz, J. R. Mosig, and J. Perruisseau-Carrier // Applied Physics Letters, vol. 101, no. 21, pp. 214102, 2012.
9. **Jornet, J. M.** Graphene-based plasmonic nano-antenna for terahertz band communication in nanonetworks / J. M. Jornet and I. F. Akyildiz // IEEE JSAC, Special Issue on Emerging Technologies for Communications, vol. 12, no. 12, pp. 685–694, Dec. 2013.
10. **Jornet, J. M.** Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band / J. M. Jornet and I. F. Akyildiz // IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 10, no. 10, pp. 3211–3221, October 2011.
11. **Jornet, J. M.** Femtosecond-long Pulse-based Modulation for Terahertz Band Communication in Nanonetworks / J. M. Jornet and I. F. Akyildiz // IEEE Transactions on Communications, vol. 62, no. 5, pp. 1742–1754, May 2014.

12. **Akyildiz, F.** Electromagnetic wireless nanosensor networks / F. Akyildiz and J. M. Jornet // Nano Communication Networks (Elsevier) Journal, vol. 1, no. 1, pp. 3–19, June 2010.
13. **Cid-Fuentes, R. G.** A receiver architecture for pulse-based electromagnetic nanonetworks in the terahertz band,” / R. G. Cid-Fuentes, J. M. Jornet, I. F. Akyildiz, and E. Alarcon // in Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC), Ottawa, Canada, June 2012, pp. 4937–4942.
14. **Wang, Z. L.** Towards self-powered nanosystems: from nanogenerators to nanopiezotronics / Z. L. Wang // Advanced Functional Materials, vol. 18, no. 22, pp. 3553–3567, 2008.
15. **Boronin, P.** Capacity and Throughput Analysis of Nanoscale Machine Communication through Transparency Windows in the Terahertz Band / P. Boronin, V. Petrov, D. Moltchanov, Y. Koucheryavy, J. M. Jornet // (EuCAP), 2014.
16. **Characteristics** of Intel Core i7 3930K CPU. – URL: <http://ark.intel.com/ru/products/63697/Intel-Core-i7-3930K-Processor-12M-Cache-up-to-3-80-GHz>, доступно 26.08.2014
17. **Hammarlund, P.** 4th Generation Intel Core Processor, codenamed Haswell / P. Hammarlund. – URL: <http://research.engineering.wustl.edu/~songtian/pdf/intel-haswell.pdf>, доступно 24 августа 2014.
18. **Ganguly, A.** Scalable hybrid wireless network-on-chip architectures for multicore systems / A. Ganguly, S. Deb, and B. Belzer // IEEE Trans. Comp., vol. 60, no. 10, pp. 1485–1502, Oct. 2011.
19. **Deb, S.** Enhancing performance of Network-on-Chip architectures with millimeter-wave wireless interconnects / S. Deb, A. Ganguly, K. Chang, P. Pande, B. Beizer, and D. Heo // In Proc. IEEE ASAP, pp. 73–80, 2010.
20. **Abadal, S.** Graphene-enabled wireless communication for massive multicore architectures / S. Abadal, E. Alarcon, M. Lemme, M. Nemirovsky, and A. Cabellos-Aparicio // IEEE Com. Mag. vol. 51, no. 11, pp. 137–143, Nov. 2013.
21. **Barker, K.** A performance evaluation of the Nehalem quad-core processor for scientific computing / K. Barker, K. Davis, A. Hoisie, D. Kerbyson, M. Lang, S. Pakin, and J. Sancho // Parallel Proc. Let., vol. 18, no. 4, pp. 453–469, 2008.
22. **Кучерявый, Е. А.** Интернет Нановещей и наносети / Е. А. Кучерявый, С. Баласубраманиям // Электросвязь. – 2014. – № 4.
23. **Майская, В.** Освоение Терагерцовой Щели: Полупроводниковые Приборы Вторгаются в Субмиллиметровый Диапазон / В. Майская // Электроника. – 2011. – № 8 (00114).



## Аннотация

*В последнее время широкое распространение получили многоядерные процессоры, позволяющие нескольким ядрам параллельно производить необходимые вычисления, что приводит к значительному повышению производительности. Однако, у существующих архитектур многоядерных процессоров есть ряд конструктивных ограничений, которые становятся препятствием для дальнейшего увеличения числа ядер. В частности, трудной задачей является организация эффективного обмена результатами вычислений между большим числом ядер. Одним из подходов к решению этой проблемы является замена проводных шин обмена данными на систему беспроводной связи. В данной работе рассматривается возможная архитектура процессора при реализации указанного подхода, приводится расчет основных характеристик системы при использовании беспроводного канала связи в терагерцовом диапазоне, а также производится оценка применимости различных подходов к организации множественного доступа к каналу связи.*

**M. Komar, Y. Koucheryavy, D. Moltchanov, V. Petrov**

*Tampere University of Technology*

## **ON THE WIRELESS CACHE ACCESS IN MULTICORE CPU OVER THE TERAHERTZ BAND**

### Annotation

*Multicore concept has provided a significant increase for the CPU performance. At the same time an efficient technique for inter-core communications is required to obtain a considerable gain. Meanwhile, conventional CPU architecture with wired buses connecting all the cores through the shared cache memory is not scalable enough. In this paper the prospective architecture for CPU with wireless access to cache memory is considered. Major characteristics of terahertz wireless channel under given constraints are derived. Finally, an applicability assessment of different multiple access techniques with respect to the channel properties is performed.*

**Keywords:** Wireless Networks on Chips, WNoC, multicore systems, CPU, wireless cache access, broadband wireless communications, multiple access protocols, terahertz, THz.

**Комар Мария Сергеевна** – исследователь, Технологический университет г. Тампере, Тампере, Финляндия.

**Кучерявый Евгений Андреевич** – кандидат технических наук, PhD, профессор, Технологический университет г. Тампере, Тампере, Финляндия

**Молчанов Дмитрий Александрович** – кандидат технических наук, PhD, доцент, Технологический университет г. Тампере, Тампере, Финляндия.

**Петров Виталий Игоревич** – научный сотрудник, Технологический университет г. Тампере, Тампере, Финляндия

И. А. Богданов, А. Е. Кучерявый

*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича*

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ В ВИДЕ ПОТОКОВ ЛОЖНЫХ СОБЫТИЙ**

*беспроводные сенсорные сети, вторжения, потоки ложных событий, плотность сенсорного поля, расстояние до первого сенсора, вероятность обнаружения.*

### **1. Введение**

Развитие сетей связи в настоящее время осуществляется в соответствии с концепцией Интернета Вещей [1, 2]. Технологической основой для масштабного внедрения концепции Интернета Вещей являются всепроникающие сенсорные сети USN (Ubiquitous Sensor Networks) [3, 4]. Всепроникающие сенсорные сети представляют собой самоорганизующиеся сети [5, 6]. При этом важнейшей характеристикой USN является длительность жизненного цикла, определяемая, в основном, возможностями энергетической системы сенсорной сети [7, 8]. Различные воздействия на энергетическую систему сенсорных сетей рассматриваются как перспективные виды атак наряду с клонированием сенсорных сетей [9]. В [10] было предложено создавать потоки ложных событий (объектов, целей, узлов и т. п.), воздействующих на любые сенсорные узлы сети независимо от их состояния в конкретный момент времени, и призванные уменьшить жизненный цикл сенсорной сети. Действительно, создавая потоки ложных событий, на которые сенсорные узлы должны реагировать, можно постепенно или достаточно быстро лишить энергии сенсорные узлы и сеть в целом [11–13]. Поток ложных событий может рассматриваться как поток вторжений в сенсорную сеть, призванный уменьшить ее жизненный цикл. В [10] было доказано, что вид потока (детерминированный или пуассоновский) влияет на эффективность вторжения, причем детерминированный поток оказывает на длительность жизненного цикла сенсорной сети более сильное воздействие.

Обнаружение ложных событий в сенсорной сети можно рассматривать как задачу слежения за целью [14–16], с той лишь разницей, что в задачах по борьбе с вторжениями источник ложного события при его обнаружении уничтожается. В задачах слежения за целью в сенсорных сетях [17] выделяют следующие возможности для обеспечения требуемых характеристик слежения:

- использование сетевой архитектуры,
- использование специальных алгоритмов,
- использование специальных сенсоров,
- варьирование числа целей,
- использование специальных технологий.

С учетом низкой стоимости одного типового сенсорного узла, далее будем исследовать влияние плотности размещения сенсоров для выявления ложных событий с заданной вероятностью обнаружения.

## 2. Модель и характеристики беспроводной сенсорной сети

Рассмотрим следующую модель сенсорной сети и поступающего потока ложных событий:

- сенсорные узлы расположены на плоской поверхности, ограниченной прямоугольником  $ABCD$ , определяющим сенсорное поле;
- сенсорные узлы способны детектировать наличие ложного события в зоне действия сенсора, которая представляет собой круг радиуса  $r$ ;
- с одной стороны сенсорного поля поступает детерминированный поток ложных объектов с интенсивностью  $\lambda$  и скоростью  $v$ ;
- каждый из ложных объектов, попав в зону действия сенсорного узла, расценивается как событие, приводящее к генерации сообщения данным узлом сети;
- сообщение доставляется через сеть в центр обработки данных. Через некоторое время  $\tau$ , после этого объект считается обнаруженным и исключается из дальнейшего рассмотрения;
- если на пути следования ложный объект не попадает в зону действия ни одного из узлов, то он беспрепятственно проходит через сенсорное поле.

Целью исследования данной модели является определение характеристик сенсорной сети, в первую очередь плотности размещения сенсорных узлов, обеспечивающих заданную вероятность обнаружения ложных событий.

Модель приведена на рисунке 1.

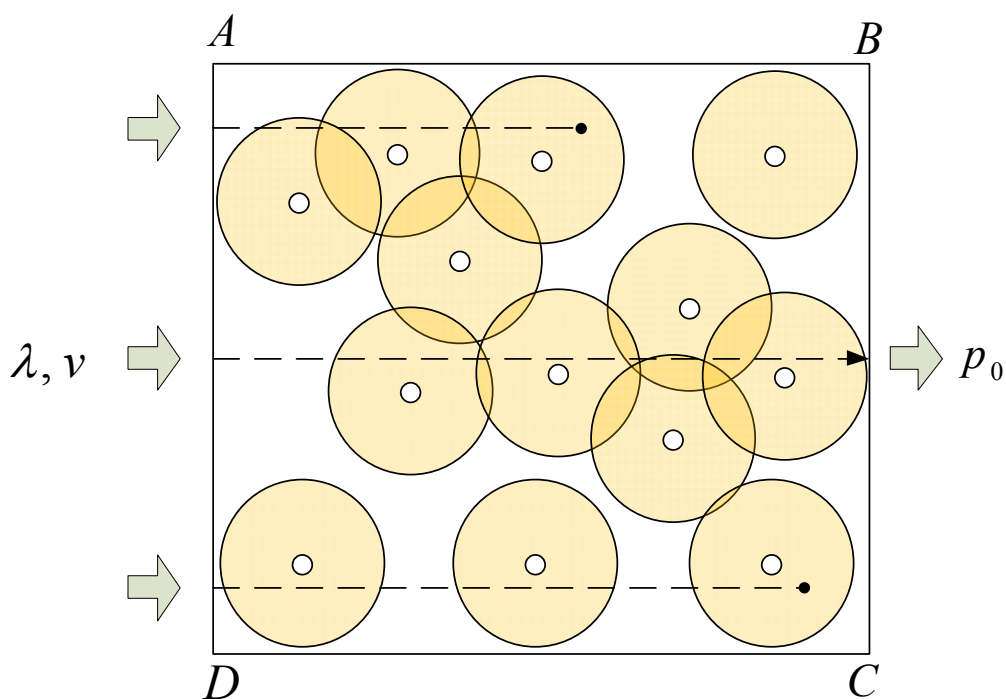


Рис. 1. Поток объектов в сенсорном поле

Рассмотрим далее поставленную задачу применительно к одному ложному объекту, а затем обобщим ее на произвольное число ложных объектов. Предположим, что траектория движения объекта – произвольная линия. Объект попадет в зону действия сенсора, если в прямоугольнике  $abcd$  расположен хотя бы один сенсорный узел сети. Таким образом, обнаружение объекта возможно, когда в фигуре  $afgd$  имеется хотя бы один сенсор (рис. 2).

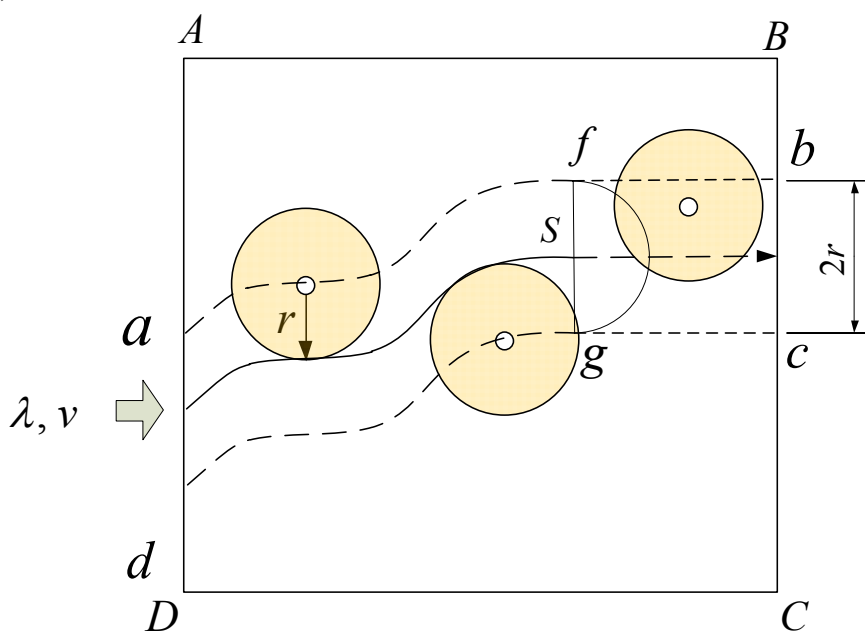


Рис. 2. Модель обнаружения объекта сенсорами

Предположим, что узлы сети (сенсоры) образуют пуассоновское сенсорное поле [1] точек на плоскости. Тогда, вероятность попадания в область площадью  $S$  заданного числа  $m$  точек (узлов) равна

$$p_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \quad (1)$$

где  $a = \rho \cdot S$ ;

$\rho$  – число точек на единицу площади;

$S$  – площадь области.

Вероятность того, что объект будет обнаружен в области  $afgd$ , определяется вероятностью того, что в данной области будет расположено не менее одного узла. Тогда с учетом (1) получаем:

$$p_d = p(m \geq 1) = 1 - p_0 = 1 - e^{-\rho \cdot S}. \quad (2)$$

В общем случае, площадь плоской фигуры  $afgd$  может быть вычислена как интеграл

$$S = \iint_G dx dy. \quad (3)$$

где  $G$  – означает взятие интеграла по контуру фигуры  $afgd$ .

Легко заметить, что в случае равномерного распределения узлов сети по территории (пуассоновского поля) вероятность попадания узла в фигуру  $afgd$  будет тем меньше, чем меньше ее площадь. Следовательно, наименьшая вероятность обнаружения объекта будет в случае, когда траектория его движения имеет минимальную длину, т. е. лежит на прямой линии, перпендикулярной границам зоны обслуживания. Данный случай является наиболее «тяжелым» для сети с точки зрения вероятности обнаружения объекта. Поэтому, рассмотрим далее именно этот случай и определим зависимости между вероятностью обнаружения объекта и такими параметрами сети как радиус действия сенсорного узла и плотность расположения узлов на территории (рис. 3).





Согласно свойствам пуассоновского поля эта вероятность равна

$$p_w = 1 - e^{-\rho \cdot W}, \quad (6)$$

где  $W$  – площадь фигуры  $ktnq$ , описывающей зону обнаружения объекта сенсорами сети.

Зависимость площади  $W$  от пройденного пути  $W(w)$  на участке  $0 \leq w < r$  можно представить как

$$W_1(w) = r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r-w}{r}\right) - (r-w)\sqrt{2rw-w^2} \quad (7)$$

На участке  $w \geq r$  эта зависимость определяется следующим образом:

$$W_2(w) = 2r \cdot w + \frac{\pi \cdot r^2}{2} \quad (8)$$

$$F(w) = \begin{cases} 0 & w < 0 \\ 1 - e^{-\rho \cdot \left( r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r-w}{r}\right) - (r-w)\sqrt{2rw-w^2} \right)} & 0 \leq w < r \\ 1 - e^{-\rho \cdot \left( 2r \cdot w + \frac{\pi \cdot r^2}{2} \right)} & w \geq r \end{cases} \quad (9)$$

Тогда плотность вероятности расстояния, пройденного объектом до первого сенсора, будет равна

$$f(w) = \begin{cases} 0 & w < 0 \\ 2\rho \cdot \sqrt{2rw-w^2} \cdot e^{-\rho \cdot \left( r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r-w}{r}\right) - (r-w)\sqrt{2rw-w^2} \right)} & 0 \leq w < r \\ 2\rho \cdot r \cdot e^{-\rho \cdot \left( 2r \cdot w + \frac{\pi \cdot r^2}{2} \right)} & w \geq r \end{cases} \quad (10)$$

На [рисунке 5](#) приведены функция распределения и плотность вероятности для значений расстояния до первого сенсора, который и обнаружит ложный объект.

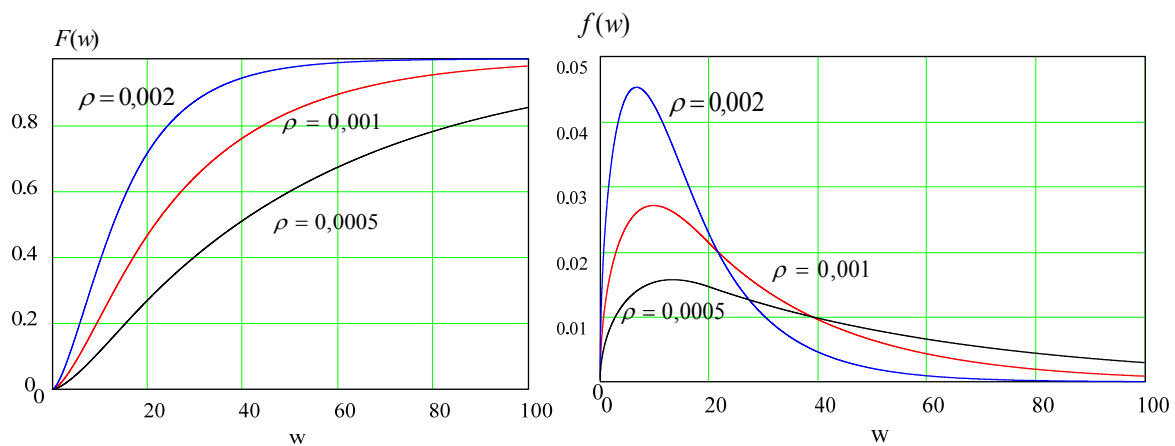


Рис. 5. Функция распределения и плотность вероятности расстояния до первого сенсора

Математическое ожидание пройденного расстояния до первого сенсора (момента обнаружения) можно определить как

$$w_0 = \int_0^{\infty} w \cdot f(w) dw, \quad (11)$$

где  $f(w)$  – функция плотности вероятности (10).

Выражение (11) не приводится к виду аналитической функции от переменных  $\rho$  и  $r$ . Поэтому, рассмотрим зависимость математического ожидания от плотности сенсоров и радиуса их действия  $w_0(\rho, r)$ , полученную численным методом (рис. 6).

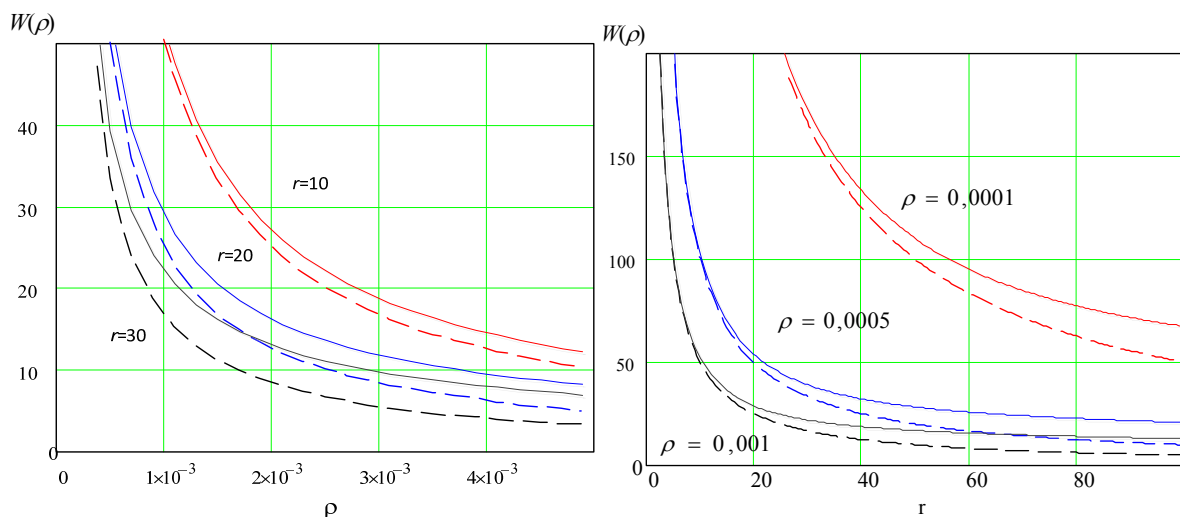


Рис. 6. Зависимость математического ожидания расстояния до обнаружения от плотности сенсоров и радиуса зоны сенсора

На рисунке 6 показаны зависимости, полученные согласно (11) (сплошные линии), и приблизительные оценки (пунктирные линии), полученные из выражения

$$\tilde{w}_0 = \frac{1}{2 \cdot \rho \cdot r} \quad (12)$$

Выражение (12) соответствует случаю, когда  $w \gg r$ , т. е. при рассмотрении вероятности попадания узла сети в прямоугольник со сторонами  $2r$  и  $w$ .

Как можно видеть из рисунка 6, выражение (12) дает некоторую ошибку в сторону занижения длины пути до обнаружения объекта. Величина этой ошибки в области практических значений  $\rho$  и  $r$  не превосходит 20 %, что позволяет использовать (12) для практических расчетов.

Приближенное значение математического ожидания расстояния до первого сенсора можно получить также при допущении, что область обнаружения сенсора представляет собой квадрат, вписанный в круг радиуса  $r$ . Тогда,

$$\hat{w}_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\rho}} + \frac{e^{-\rho \cdot r^2}}{2 \rho \cdot r} (1 + 2 \rho \cdot r^2) \quad (13)$$

По сравнению со значением математического ожидания, выражение (13) дает завышенную оценку математического ожидания.

Рассмотрим случай, когда требуется определить параметры сети, при заданной вероятности обнаружения объекта  $p_0$ . Выражение (9) дает возможность оценить вероятность того, что расстояние до первого сенсора не превысит некоторой величины  $Z$ .

$$p_0 = p(w < Z) = F(w) \quad (14)$$

Из (9) и (14) при условии, что  $w \geq r$ , максимальное расстояние до обнаружения объекта при заданной вероятности обнаружения  $p_0$  составит

$$Z(\rho, r, p_0) = r + \frac{1}{2} \left( \frac{p_0}{\rho \cdot r} - \frac{\pi \cdot r}{2} \right), \quad Z \geq r \quad (15)$$

Выражение (15) дает возможность оценить требуемую длину зоны сенсорного поля для обеспечения гарантированного (с вероятностью  $p_0$ ) обнаружения объекта.

Из (14) при тех же условиях можно получить выражение для выбора необходимой плотности сенсорного поля

$$\rho(Z, r, p_0) = \frac{p_0}{r \cdot \left( 2(Z - r) - \frac{\pi \cdot r}{2} \right)}, \quad Z \geq r \quad (16)$$

Аналогичным образом можно получить и выражение для радиуса действия сенсорного узла  $r$ .

$$r(Z, \rho, p_0) = \frac{\sqrt{2\rho \cdot (2 \cdot Z^2 + p_0(4 - \pi))} + 2\rho \cdot Z}{\rho(4 - \pi)}, \quad Z \geq r \quad (17)$$

Если предположить, что объект пересекает сенсорное поле (как рассмотрено выше), размер которого выбран согласно (15), то на своем пути он попадет в зоны действия некоторого числа сенсоров. Математическое ожидание этого числа может быть получено из (15).

$$n_{\min} = 2rpZ = 2rp \cdot \left( r + \frac{1}{2} \left( \frac{p_0}{\rho \cdot r} - \frac{\pi \cdot r}{2} \right) \right) \quad (18)$$

Выражение (18) может быть использовано для оценки нижней границы числа сообщений (пакетов), передаваемых по сети, при пересечении сенсорного поля объектом по кратчайшему маршруту.

Верхнюю границу числа сообщений можно оценить, предположив что траектория движения объекта произвольна и не выходит за границу сенсорного поля, т. е. объект перемещается внутри поля до того момента, когда будет остановлен. Среднее значение расстояния, пройденного до момента обнаружения, оценим с помощью (12). Остальная часть расстояния определяется временем реакции на событие обнаружения объекта  $\tau$  и скоростью перемещения объекта. Приближенная оценка среднего расстояния составит

$$\tilde{w} = \frac{1}{2\rho \cdot r} + \tau \cdot v \quad (19)$$

Тогда среднее число сообщений может быть определено как

$$\tilde{m} = \begin{cases} 2rp \cdot W_{\max} & \text{при } W_{\max} \leq L \\ 2rp \cdot L & \text{при } W_{\max} > L \end{cases} = \begin{cases} 1 + 2rp \cdot \tau \cdot v & \text{при } W_{\max} \leq L \\ 2rp \cdot L & \text{при } W_{\max} > L \end{cases} \quad (20)$$

Так как мы рассматриваем только зону обслуживания, то можно предположить, что  $W_{\max} \leq L$ , т. е.

$$\tilde{m} = 1 + 2rp \cdot \tau \cdot v \quad (21)$$

Обобщим полученные результаты на произвольное число ложных объектов. При этом будем считать, что:

- моменты поступления объектов в зону действия сети случайны и независимы;
- объекты перемещаются по случайным траекториям, представляющим собой прямые;
- интенсивность поступления объектов равна  $\lambda$ .

Рассмотрим следующую модель. Ложные объекты движутся со стороны границы  $AD$  (рис. 1). При этом точка, в которой объект входит в сенсорное поле, случайна, а величина  $y_{in}$  распределена равномерно на отрезке  $[0; h]$  (рис. 7). Аналогичными свойствами обладает и точка выхода объекта из сенсорного поля: величина  $y_{out}$  распределена равномерно на отрезке  $[0; h]$ .

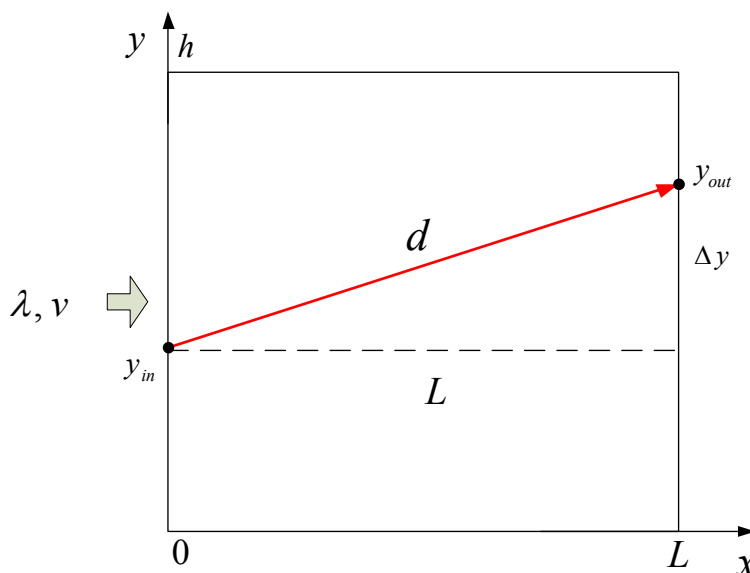


Рис. 7. Модель траектории движения объекта в сенсорном поле

Расстояние, пройденное объектом  $d$ , может быть вычислено следующим образом:

$$d = \sqrt{L^2 - (y_{out} - y_{in})^2} = \sqrt{L^2 - \Delta y^2} \quad (22)$$

Так как величины  $y_{in}$  и  $y_{out}$  имеют равномерное распределение вероятности, то их разность  $\Delta y$  имеет распределение Симпсона (треугольное распределение) [18] на интервале  $[0; h]$

$$f(y) = \begin{cases} 0 & y < 0 \\ 2 \frac{(h-y)}{h^2} & 0 \leq y \leq h \\ 0 & y > h \end{cases} \quad (23)$$

Тогда плотность вероятности расстояния, пройденного объектом, можно определить как

$$f(w) = \begin{cases} 0 & w < L \\ \frac{2w}{h^2} \cdot \left( \frac{h}{\sqrt{w^2 - L^2}} - 1 \right) & L \leq w \leq \sqrt{L^2 + h^2} \\ 0 & w > \sqrt{L^2 + h^2} \end{cases} \quad (24)$$

Соответствующая плотность вероятности приведена на рисунке 8.

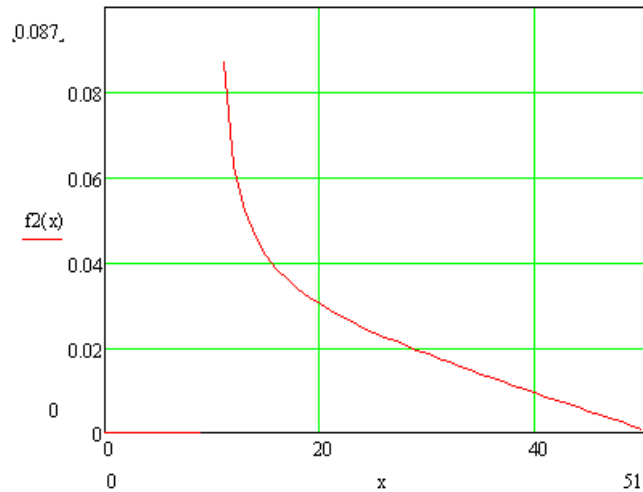


Рис. 8. Плотность вероятности расстояния, пройденного объектом

Из (24) можно определить математическое ожидание расстояния, пройденного объектом до пересечения границы сенсорного поля

$$\hat{w} = \sqrt{L^2 + h^2} + \frac{L^2}{h} \ln \left( \frac{\sqrt{L^2 + h^2} + h}{L} \right) + \frac{2}{3h^2} \left( L^3 - \sqrt{(L^2 + h^2)^3} \right). \quad (25)$$

Проходя через сенсорное поле, объект попадает в зоны обнаружения некоторого числа узлов, в результате чего каждый из этих узлов производит сообщение, которое передается по сети. Число производимых сообщений отражается на параметрах функционирования сети, так как при передаче сообщения узлы сети расходуют энергию, запас которой ограничен.



Число узлов на пути объекта можно оценить на основе свойств сенсорного поля

$$\bar{m} = 2\rho r \cdot \hat{w} \quad (26)$$

С учетом (25) и (26) можно определить плотность вероятности числа передаваемых сообщений (рис. 9) при прохождении объектом сенсорного поля как

$$f(m) = \begin{cases} 0 & m < 2L\rho r \\ \frac{m}{2(\rho r)^2 h^2} \cdot \left( \frac{h}{\sqrt{\left(\frac{m}{2\rho r}\right)^2 - L^2}} - 1 \right) & 2L\rho r \leq m \leq 2\rho r \sqrt{L^2 + h^2} \\ 0 & m > 2\rho r \sqrt{L^2 + h^2} \end{cases} \quad (27)$$

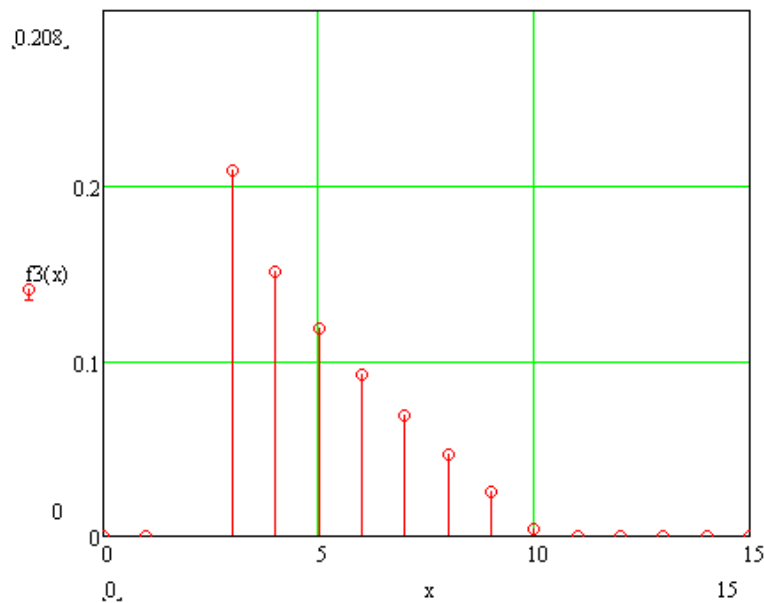


Рис. 9. Плотность вероятности числа сообщений

Математическое ожидание числа сообщений тогда будет равно

$$\bar{m} = 2\rho \cdot r \sqrt{L^2 + h^2} + \frac{4\rho \cdot r}{3h^2} \left( L^3 - \sqrt{(L^2 + h^2)^3} \right) + \frac{2L^2\rho \cdot r}{h} \ln \left( \frac{\sqrt{L^2 + h^2} + h}{L} \right) \quad (28)$$

Из (28) можно определить расход энергии сенсорными узлами и, соответственно, жизненный цикл сенсорной сети. В таблице приведены полученные в статье основные характеристики беспроводной сенсорной сети для выявления вторжений в виде потоков ложных событий. Результаты могут быть использованы для планирования сенсорных сетей, обеспечивающих заданную вероятность обнаружения ложных событий.

ТАБЛИЦА. Основные характеристики сенсорной сети  
для выявления вторжений в виде ложных событий

	Характеристика	Модель
1	Расстояние до первого сенсора (момента обнаружения)	Плотность вероятности $f(w) = \begin{cases} 0 & w < 0 \\ 2\rho \cdot \sqrt{2rw - w^2} \cdot e^{-\rho \left( r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r-w}{r}\right) - (r-w) \cdot \sqrt{2rw - w^2} \right)} & 0 \leq w < r \\ 2\rho \cdot r \cdot e^{-\rho \left( 2r \cdot w + \frac{\pi \cdot r^2}{2} \right)} & w \geq r \end{cases}$
2	Среднее расстояние до первого сенсора	Приближенная оценка снизу $\tilde{w}_0 = \frac{1}{2 \cdot \rho \cdot r}$ Приближенная оценка сверху $\hat{w}_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\rho}} + \frac{e^{-\rho \cdot r^2}}{2\rho \cdot r} (1 + 2\rho \cdot r^2)$
3	Максимальное расстояние до обнаружения объекта при заданной вероятности обнаружения $p_0$	(оценка необходимой длины зоны обслуживания) $Z(\rho, r, p_0) = r + \frac{1}{2} \left( \frac{p_0}{\rho \cdot r} - \frac{\pi \cdot r}{2} \right), \quad Z \geq r$
4	Необходимая плотность сенсорного поля при заданной вероятности обнаружения $p_0$	(оценка необходимой плотности сенсорного поля) $\rho(Z, r, p_0) = \frac{p_0}{r \cdot \left( 2(Z - r) - \frac{\pi \cdot r}{2} \right)}, \quad Z \geq r$
5	Необходимый радиус обнаружения сенсорного узла при заданной вероятности обнаружения $p_0$	(оценка необходимого радиуса обнаружения сенсора) $r(Z, \rho, p_0) = \frac{\sqrt{2\rho \cdot (2 \cdot Z^2 + p_0(4 - \pi))} + 2\rho \cdot Z}{\rho(4 - \pi)}, \quad Z \geq r$
6	Число сообщений, передаваемых в сети при прохождении объекта	$\tilde{m} = 1 + 2\rho \cdot \tau \cdot v$

7	Расстояние, пройденное объектом, до границы сенсорного поля	Плотность вероятности $f(w) = \begin{cases} 0 & w < L \\ \frac{2w}{h^2} \cdot \left( \frac{h}{\sqrt{w^2 - L^2}} - 1 \right) & L \leq w \leq \sqrt{L^2 + h^2} \\ 0 & w > \sqrt{L^2 + h^2} \end{cases}$
8	Среднее расстояние, пройденное объектом, до границы сенсорного поля	$\hat{w} = \sqrt{L^2 + h^2} + \frac{2}{3h^2} \left( L^3 - \sqrt{(L^2 + h^2)^3} \right) + \frac{L^2}{h} \ln \left( \frac{\sqrt{L^2 + h^2} + h}{L} \right)$
9	Число сообщений при пересечении объектом сенсорного поля	Плотность вероятности $f(m) = \begin{cases} 0 & m < 2Lpr \\ \frac{m}{2(pr)^2 h^2} \cdot \left( \frac{h}{\sqrt{\left( \frac{m}{2pr} \right)^2 - L^2}} - 1 \right) & 2Lpr \leq m \leq 2pr\sqrt{L^2 + h^2} \\ 0 & m > 2pr\sqrt{L^2 + h^2} \end{cases}$
10	Математическое ожидание числа сообщений при пересечении объектом сенсорного поля	$\bar{m} = 2p \cdot r \sqrt{L^2 + h^2} + \frac{4p \cdot r}{3h^2} \left( L^3 - \sqrt{(L^2 + h^2)^3} \right) + \frac{2L^2 p \cdot r}{h} \ln \left( \frac{\sqrt{L^2 + h^2} + h}{L} \right)$

### 3. Заключение

По результатам исследований определено значение плотности размещения сенсорных узлов, обеспечивающее заданное значение вероятности обнаружения ложного объекта. Кроме того, найдены такие характеристики беспроводной сенсорной сети как расстояние до первого сенсора (момента обнаружения), радиус обнаружения ложного объекта сенсорным узлом для обеспечения заданного значения вероятности обнаружения, число сообщений, передаваемых в сенсорной сети при прохождении по сенсорному полю ложных объектов. Полученные результаты позволяют сформулировать задачу по оптимизации распределения сенсоров по сенсорному полю, чему будет посвящена следующая статья.

### Библиографический список

1. Кучерявый, А. Е. Интернет Вещей / А. Е. Кучерявый // Электро-связь. – 2013. – № 1.

2. **Гольдштейн, Б. С.** Сети связи пост-NGN / Б. С. Гольдштейн, А. Е. Кучерявый. – СПб. : БХВ, 2013.
3. **Кучерявый, А. Е.** Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчёта / А. Е. Кучерявый, А. И. Парамонов, Е. А. Кучерявый, – ФГУП ЦНИИС, 2008.
4. **Кучерявый, А. Е.** От е-России к и-России: тенденции развития электросвязи / А. Е. Кучерявый, Е. А. Кучерявый // Электросвязь. – 2005. – № 5.
5. **Кучерявый, А. Е.** Самоорганизующиеся сети / А. Е. Кучерявый, А. В. Прокопьев, Е. А. Кучерявый. – СПб. : Любавич, 2011.
6. **Кучерявый, А. Е.** Самоорганизующиеся сети и новые услуги / А. Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2009. – № 1.
7. **Koucheryavy, A.** Cluster head selection for homogeneous Wireless Sensor Networks / A. Koucheryavy, A. Salim // Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2009. ICACT 2009. Phoenix Park, Korea.
8. **Abakumov, P.** The Cluster Head Selection Algorithm in the 3D USN / P. Abakumov, A. Koucheryavy // Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2014. ICACT 2014. Phoenix Park, Korea.
9. **Recommendation X.1311** “Security Framework for Ubiquitous Sensor Networks”. ITU-T, Geneva, February, 2011.
10. **Богданов, И. А.** Характеристика жизненного цикла мобильной сенсорной сети при различных потоках ложных событий / И. А. Богданов, А. И. Парамонов, А. Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2013. – № 1.
11. **Koucheryavy, A.** The mobile Sensor Network Life-Time under Different Spurious Flows Intrusion / A. Koucheryavy, I. Bogdanov, A. Paramonov // LNCS, Springer. 13 th NEW2AN, LNCS 8121, 28–30, August, 2013.
12. **Богданов, И. А.** Анализ особенностей обеспечения сетевой безопасности во всепроникающих сенсорных сетях / И. А. Богданов, А. Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2013. – Выпуск 2 (2). – С. 4–12. – URL: [www.sut.ru/doci/nauka/review/2-13.pdf](http://www.sut.ru/doci/nauka/review/2-13.pdf)
13. **Bhattassali, T.** Sleep Deprivation Attack Detection in Wireless Sensor Networks / T. Bhattassali, R. Chaki, S. Sanyal // International Journal of Computer Applications, v. 40, № 15, February 2012.
14. **Выборнова, А. И.** Модель источника трафика в беспроводных сенсорных сетях слежения за целью / А. И. Выборнова // Электросвязь. – 2014. – № 9.
15. **He, Tian** Achieving Real-Time Target Tracking Using Wireless Sensor Networks / Tian He and all. // 12th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium. April 4–7, 2006, San Jose, California, USA.

16. **Lin, Chih-Yu** Efficient In-Network Moving Object Tracking in Wireless Sensor Networks / Chih-Yu Lin, Wen-Chih Peng, and Yu-Chee Tseng // IEEE Transaction on Mobile Computing. V. 5, issue 8, 2006.

17. **Fayyaz, Mohsin** Classification of Object Tracking Techniques in Wireless Sensor Networks / Mohsin Fayyaz // Wireless sensor Networks, April 2011, № 3.

18. **Крамер, Н. Ш.** Теория вероятностей и математическая статистика / Н. Ш. Крамер. – М. : Юнити, 2014.

#### **Аннотация**

*Потоки ложных событий (объектов, целей, узлов и т. п.) уменьшают жизненный цикл сенсорной сети. Обнаружение ложных событий можно рассматривать как задачу слежения за целью. Для обеспечения требуемых характеристик слежения за целью возможно использование архитектурных решений по построению сенсорного поля. В статье определяется необходимая плотность размещения узлов на сенсорном поле для выявления ложных событий с заданной вероятностью обнаружения.*

**I. Bogdanov, A. Koucheryavy**

*Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications*

#### **WIRELESS SENSOR NETWORK CHARACTERISTICS FOR SPURIOUS EVENT FLOWS INTRUSION DETECTION**

#### **Annotation**

*The spurious flows (objects, goals, nodes etc.) decrease the sensor network life-time. The spurious event detection can be considered as a target tracking task. The sensor field architecture characteristics using for target tracking support in the paper. The required sensor nodes density for given probability detection is defined.*

**Keywords:** Wireless Sensor Network, Intrusion, Spurious Event Flows, Sensor Field Density, Distance to First Sensor, Detection Probability.

**Богданов Игорь Александрович** – аспирант кафедры «Сети связи и передача данных» Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»

**Кучерявый Андрей Евгеньевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сети связи и передача данных» Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»

## **ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ УСЛУГ В СЕТЯХ POST-NGN**

*качество услуг, NGN, post-NGN.*

### **Введение**

Современные сети связи – это инфокоммуникационные сети, предоставляющие большой набор услуг, в том числе мультимедийных. С одной стороны, механизмы обеспечения качества обслуживания хорошо исследованы и разработаны, политики обеспечения QoS внедрены на сетях операторов, а новые технологии последние 5 лет позволяют значительно увеличивать пропускную способность. Но пользователи по-прежнему недовольны качеством услуг [1], и это недовольство имеет под собой объективные причины.

Действительно, пользователи получают больше ресурсов на сетях доступа, но новые услуги становятся все более требовательными к пропускной способности и скорости обработки информации. Появляются новые услуги, которые не контролируются оператором или контролируются крайне слабо – это относится к наложенным приложениям, Интернет-сервисам. Оператору сложно нести ответственность за качество услуги, о которой он, как владелец сетевой инфраструктуры, не поставлен в известность. Появляются новые классы сервисов и услуг с очень жесткими требованиями к основным показателям QoS.

Изменяется и поведение пользователя, предпочитающего мобильный доступ, обеспечивающий ему свободу передвижения, и smart-устройства, открывающие мир интерактивных сервисов, мультимедийных приложений и инструментов. Более того, появляются решения на стыке автоматизации и инфокоммуникаций, для которых пока не разработано методов оценки и обеспечения QoS.

Рассмотрим основные факторы, приводящие к необходимости пересмотра некоторых подходов к оценке и обеспечению качества услуг.

### **1. Анализ изменений структуры трафика**

Прежде всего, обратим внимание на изменение способов доступа пользователей к услугам инфокоммуникаций [2]. На рисунке 1 представ-



лено изменение количества абонентов фиксированного доступа телефонной сети общего пользования и мобильной связи с 2005 по 2013 год согласно данным Международного Союза Электросвязи. Данные для 2014 года получены на основе экстраполяции по результатам первой половины года.

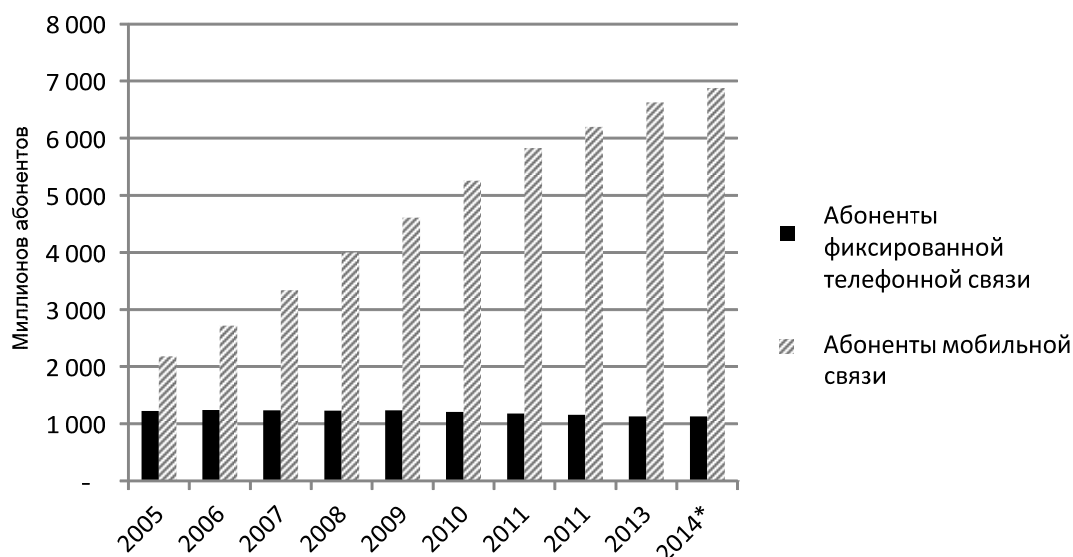


Рис. 1. Изменение количества абонентов фиксированной и мобильной сетей связи

Очевидно, что в последние годы наблюдается существенный рост количества мобильных пользователей, в то же время количество пользователей ТфОП неуклонно снижается. При этом изменяется и структура трафика. Согласно прогнозам CiscoVNI [3], количество так называемого smart-трафика к 2018 году достигнет 90 % от общего количества трафика мобильных устройств.

Предполагается, что структура smart-трафика также претерпит изменения. Сейчас основной трафик смартфонов – это традиционные приложения NGN – видео, веб, телефония – с преобладанием телефонии (по количеству соединений). Однако в ближайшие 5 лет ожидается, что доля видеотрафика существенно возрастет – до 70 %, при этом прогнозируется и существенный рост трафика M2M – до 6 %. Доля трафика телефонии и веб составит 10–15 %.

При этом изменения затронут и сетевые технологии. Появление новых видов трафика, таких как M2M, трафик домашних и муниципальных сетей, сетей автотранспорта и медицинских, окажет существенное влияние на телекоммуникационную составляющую. Прогноз [4] для различных сервисов и услуг представлен в таблице.

Из таблицы видно, что, скорее всего, в ближайшие пять лет сохранится тенденция на увеличение доли трафика видео, повысится мобильность

пользователя, произойдет резкое увеличение устройств с сетевыми модулями M2M.

Кроме изменения пропорций объемов существующих видов трафика, планируется появление новых услуг и сервисов, ориентированных на создание единой среды. Прототипами таких решений являются умный дом, умный город и другие концепции, успешно реализуемые и развивающиеся уже сегодня.

ТАБЛИЦА. Прогноз изменения структуры трафика

Количество активных подключений от общего числа IP-подключений, %	2013	Прогноз на 2018
Количество подключений IPv6, в том числе мобильных	16	47
Подключение к IP-сетям, фиксированные линии связи	56	39
Подключение к IP-сетям, Wi-Fi	41	49
Подключение к IP-сетям, мобильные сети связи	3	12
Трафик сетей метро	49	62
Количество подключений со стационарного ПК	85	48
Количество TV-подключений	6	8
Интернет-видео, корпоративное и пользовательское	57	75
Internet-Video-to-TV	11	14
Трафик домашних и муниципальных сетей	57	63
Количество модулей M2M	0,4	2,8
Скорость подключения свыше 50 Мбит/с	12	22

Изменения структуры трафика приводят к необходимости пересмотра подходов к оценке качества услуг.

## 2. Нормы и требования к показателям качества

Как отмечалось выше, в последнее время существенно изменяется состав услуг, появляются приложения, ориентированные на управление и мониторинг окружающей среды. Таким образом, требования к показателям качества можно разделить на два типа:

– Требования, разработанные с учетом психофизических особенностей человека. Эти требования ориентированы на человеческие органы чувств, применяются к трафику приложений, определяющему инфокоммуникационную среду. Это телефония, аудио, видео, веб-приложения и т. п.

– Требования к трафику управления и мониторинга, в том числе трафику сигнализации: M2M, сенсорных сетей и т. п. При разработке требований к этому типу трафика скорость реакции органов чувств человека не важна, на первый план выходят технические характеристики систем.

К трафику первого типа требования сформулированы, разработаны как субъективные, так и объективные методы оценки. Нормы для таких приложений не зависят от технологии доступа и среды передачи, поэтому задача операторов – предоставление услуг с заданным качеством без учета особенностей транспортного уровня NGN.

Во втором случае пользователь выступает потребителем свойств среды или объектов, сформированных, управляемых и контролируемых посредством специализированных устройств (рис. 2). При этом в качестве сетевой технологии в пределах организуемой среды могут выступать wi-fi, Zigbee и пр., что может оказать существенное влияние на показатели QoS. Отметим, что нормы и требования к показателям качества для таких сетей и приложений еще требуют разработки и уточнения.

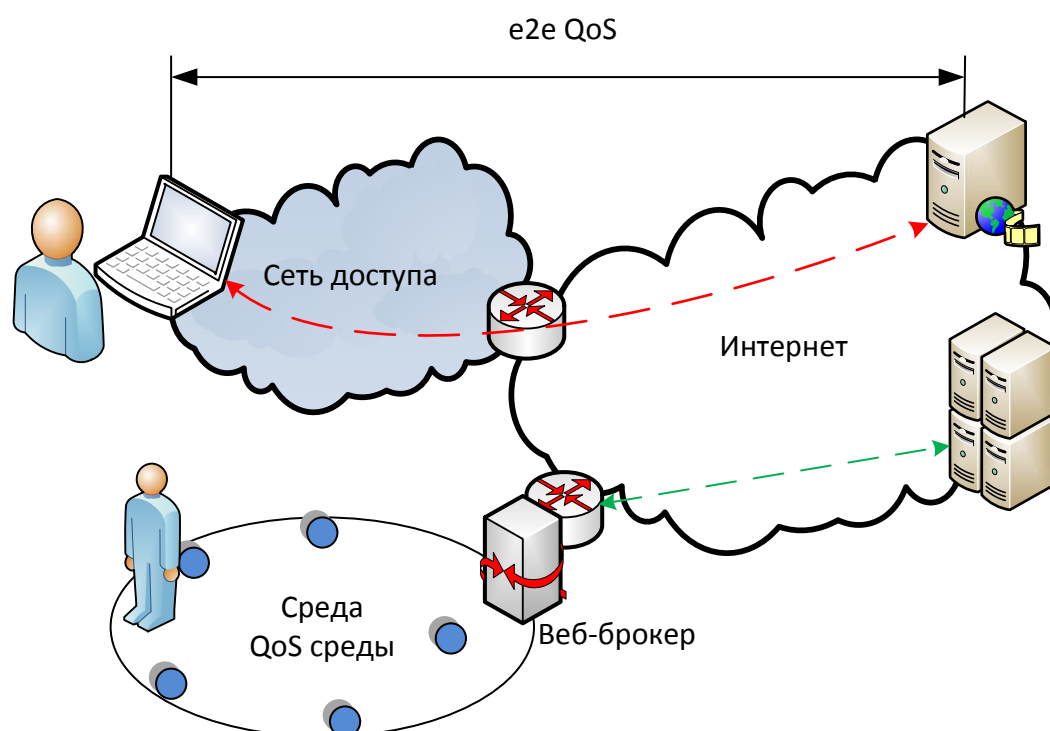


Рис. 2. Зоны контроля качества услуг

### 3. Анализ факторов, затрудняющих управление качеством в современных сетях связи

Традиционные сети связи с точки зрения качества обслуживания были относительно просты, поскольку каждая сеть разрабатывалась исходя из заданных показателей качества услуги. К таким сетям относятся в первую

очередь сети на основе синхронных технологий, созданные для передачи трафика реального времени. С внедрением пакетных сетей задача управления качеством услуг существенно усложнилась. Рекомендации МСЭ определяют набор параметров качества обслуживания и нормы для различных классов трафика, точки контроля параметров сети, методики измерения и механизмы управления качеством. Сложности возникают с оценкой интерактивного трафика, такого как видео и телефония. Для объективной оценки качества недостаточно только технических показателей, важную роль играют субъективные данные. Таким образом, возникла необходимость разработки специальных методик и моделей, которые могут учесть и особенности восприятия пользователем мультимедийной информации, и различие пользователей по классам обслуживания.

Дальнейшее развитие сетей в направлении увеличения доли мультимедийного трафика и расширения спектра услуг приводит к необходимости пересмотра подходов к мониторингу качества и управлению QoS. Согласно открытым данным Роскомнадзора, по итогам 2013 года зафиксировано около 14,5 тыс. жалоб на качество связи, а за первую половину 2014 года абоненты официально высказали свое недовольство 6,5 тыс. раз [1]. Это говорит о сложностях, с которыми сталкиваются операторы при управлении качеством услуг на своих сетях. Причиной сложившейся ситуации в первую очередь являются бурное и неравномерное развитие инфраструктуры, в том числе смена технологий, слабые средства мониторинга и использование устаревших механизмов обеспечения QoS.

При этом современные сети связи согласно концепции NGN должны поддерживать независимое развитие уровней. Это значит, что внедрение новых услуг на сетях операторов не должно сказываться на качестве уже предоставляемых и, в то же время, соответствовать требованиям новых сервисов. При этом независимое развитие уровней часто приводит к существенному ухудшению качества, так как не всегда можно учесть влияние факторов физической среды и инфраструктуры, что особенно часто наблюдается на беспроводных участках сетей доступа. Внедрение новых сетевых технологий и оборудования на нижних уровнях часто приводит к необходимости реализации процедур совместимости отдельных сетей и/или сегментов сети, которые вносят дополнительные сетевые задержки и являются потенциальными источниками потерь и отказов в обслуживании.

Следующим фактором, существенно ухудшающим возможности операторов по предоставлению новых услуг заданного качества, является использование механизмов управления сетью, ориентированных на традиционные приложения в рамках tripleplay. Эти приложения предсказуемы с точки зрения поведения трафика и ожидаемой нагрузки. Однако, появление новых услуг наложенного типа создает определенные сложности. Выделим три типа таких услуг:

1. Предоставляемые операторами услуг, не владеющими инфраструктурой или имеющими для этого ограниченные технические средства, в том числе облачные (например, login-серверы). К ним относятся интернет-мессенджеры, операторы IP-телефонии и видеоконференцсвязи и т.п. Трафик этого типа мультимедийный, реального времени или чувствительный к задержкам, существенного объема, имеющий временные зависимости.

2. Ориентированные на поддержание функционирования программного обеспечения на стороне пользователя или услуга по расписанию. Это обновления программного обеспечения, синхронизация данных с облачными ресурсами, обновления статуса пользователя в социальных сетях и интернет-мессенджерах. Для трафика этого типа услуг характерно наличие расписания и чаще всего небольшие объемы данных, низкая чувствительность к задержкам, низкий приоритет.

3. OTT: торренты, интернет-телевидение, интернет-радио, медиа-библиотеки и т. п. Трафик характеризуется сильными временными зависимостями, большим объемом, может иметь вещательный характер (например, online-трансляции) или peer-to-peer.

Эти услуги создают несанкционированные и плохо предсказуемые нагрузки на сеть, иногда приводящие к перегрузкам, по своим последствиям аналогичные DDOS-атакам. При этом на сети оператора обычно реализованы проектные решения, поддерживающие политику управления трафиком, ориентированную на предсказуемые нагрузки и недогруженные сети, оставшуюся в наследство от традиционного подхода к построению сетей связи. Отметим, что мобильность пользователя также является важным фактором, затрудняющим предоставление услуги с заданным качеством, в том числе за счет низкой предсказуемости нагрузок.

Еще одной важной проблемой управления качеством является наличие пользователей разных уровней обслуживания. Механизмы, применяемые на сети для обеспечения заданного качества высокоприоритетным пользователям – такие, как резервирование и балансировка – могут негативно сказываться на показателях QoS низкоприоритетных услуг. Однако пользователи в силу психологических особенностей не всегда готовы смириться с ухудшением показателей, если они ниже максимально заявленных оператором.

Традиционный подход подразумевает, что о несоответствующем качестве услуг пользователь сообщает оператору самостоятельно посредством обращения в службу поддержки. Также оператор проводит измерения для внутреннего контроля состояния сети. Регулярные проверки качества связи проводят и надзорные органы. Таким образом, информация о состоянии сети и качестве предоставляемых услуг поступает из трех источников, один из которых – пользователь, обратившийся в техподдержку – отличается субъективностью и зачастую повышенной эмоциональностью. Более того, на сегодняшний момент оператор не имеет средств для незави-

независимой оценки качества на стороне пользователя. То есть, обратная связь с пользователями оказывается крайне слабой и не отражающей реальное положение.

Дополнительно возникает задача необходимости учета информационной безопасности как одного из важных факторов. Поскольку современные устройства представляют собой программно-аппаратные решения с преобладанием программной части, то угрозы компьютерных сетей распространяются и на инфокоммуникационные сети. Уязвимости телекоммуникационных сетей при этом сохраняются.

#### **4. Анализ проблем обеспечения качества услуг post-NGN**

Согласно Рекомендации Y.2063 [5], при организации приложений WoT(Web of Things) [6] подключение устройств организации среды к общему инфокоммуникационному пространству может потребовать специализированного шлюза, так называемого веб-брокера (см. [рис. 2](#)). Аналогичная архитектура свойственна локальным сетям, использующим NAT. В этом случае часть трафика остается и обслуживается внутри сети, а политика управления сетью не зависит от провайдера более высокого уровня.

Автоматизированную инфокоммуникационную среду также можно рассматривать как сеть, реализующую собственную политику обслуживания и управления. В этом случае трафик необходимо разделять на внутренний, организующий инфокоммуникационное пространство и обеспечивающий приемлемое для пользователя функционирование среды, и внешний, для синхронизации с облачными услугами и дистанционного управления. Отметим, что сеть инфокоммуникационной среды, реализованная на основе технологий семейства IEEE 802.11 и т. п., требует особого подхода при разработке механизмов обеспечения качества сервисов и услуг. Это связано с особенностями радиоканала, имеющего очень слабые механизмы QoS, существенным влиянием среды передачи и спецификой разделения ресурсов. Сенсорные сети также чувствительны к проблемам энергосбережения, а самоорганизация [7] может послужить дополнительным дестабилизирующим фактором.

Отдельно имеет смысл отметить сети VANET, характеризующиеся высокими скоростями и постоянной перестройкой объектов внутри образованной структуры. В таких сетях большое влияние на качество услуг будут оказывать процедуры маршрутизации, присоединения и отсоединения от группы, подключения новых видов услуг.

#### **Заключение**

На данном этапе развития сетей связи в условиях перехода от NGN к post-NGN можно выделить следующие основные проблемы, требующие дополнительных исследований:



1. Изменение пользовательских предпочтений в пользу мобильного доступа и более активного использования smart-устройств и мультимедийных приложений, а также появление новых видов услуг, создающих нагрузки с низкой предсказуемостью требуют разработки новых механизмов обеспечения QoS, преимущественно на верхних уровнях.

2. Активное использование в качестве доступа беспроводных сетей, особенно на основе технологий семейства IEEE 802.11, требует анализа и разработки механизмов сопряжения множеств показателей качества при выгрузке трафика из сети доступа в транспортную сеть. Учитывая активное внедрение сетей LTE, важной задачей является разработка механизмов для Wi-Fi/LTE.

3. Компьютеризация телекоммуникационного оборудования, особенно пользовательского как находящегося в зоне повышенного риска, приводит к необходимости внесения обеспечения информационной безопасности в множество показателей качества услуг.

4. Взаимопроникновение задач автоматизации среды и инфокоммуникаций ставит вопросы разработки новых критериев качества услуг, являющихся производной от свойств и функционирования среды и т. п.

5. Слабые возможности пользователя по контролю качества услуг и низкая эффективность существующей обратной связи приводят к необходимости разработки независимых средств мониторинга. Существующие модели оценки качества могут быть расширены, адаптированы к использованию неподготовленными экспертами (рядовыми пользователями) и реализованы как программные средства для оконечных устройств.

## Библиографический список

1. **Роскомнадзор.** Федеральная служба по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. – URL: <http://rkn.gov.ru/>

2. **ITU-T:** Key ICT indicators for developed and developing countries and the world (totals and penetration rates).

3. **Cisco VNI:** Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013–2018. – URL: [http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white\\_paper\\_c11-520862.html](http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.html)

4. **Cisco VNI** Forecast Highlights. – URL: [http://www.cisco.com/web/solutions/sp/vni/vni\\_forecast\\_highlights/index.html](http://www.cisco.com/web/solutions/sp/vni/vni_forecast_highlights/index.html)

5. **Recommendation Y. 2063.** Framework of the WEB of Things. ITU-T, Geneva (July 2012).

6. **Гольдштейн, Б. С.** Сети связи пост-NGN / Б. С. Гольдштейн, А. Е. Кучерявый. – СПб. : БХВ-Петербург, 2013.

7. **Кучерявый, А. Е.** Самоорганизующиеся сети / А. Е. Кучерявый, А. В. Прокопьев, Е. А. Кучерявый. – СПб. : Любавич, 2011.

## **Аннотация**

*В статье анализируются проблемы обеспечения качества услуг в современных сетях связи. Показано, что возникает необходимость расширения множества показателей качества. Формулируются проблемы обеспечения качества, требующие исследования и разработки в ближайшей перспективе.*

**O. Simonina**

*Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications*

## **OBJECTIVES OF QUALITY MANAGEMENT SERVICES IN NETWORKS POST-NGN**

## **Annotation**

*In article are analyzed problems of ensuring quality of services in modern communication networks. It is shown that there is a need of expansion of a set of parameters of quality. Problems of providing the qualities demanding research and development in the short term are formulated.*

**Keywords:** quality of services, NGN, post-NGN.

**Симонина Ольга Александровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сети связи и передача данных» Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»

## **ПЕРСОНАЛЬНАЯ ЦИФРОВАЯ МОБИЛЬНАЯ РАДИОСВЯЗЬ ПОСРЕДСТВОМ VANET**

VANETs, Digital radio, Voice.

### **Введение**

Интеллектуальные транспортные системы (ИТС) на основе беспроводной самоорганизующейся сети VANET стандарта 802.11p [1], могут использоваться не только для повышения эффективности и безопасности дорожного движения, но и для повышения информативности, комфорта водителя транспортного средства. Это достигается за счет расширения спектра служб, предоставляемых сетью. Основной предоставляемой службой таких сетей является служба транспортной безопасности, а дополнительными: мультимедиа, телеметрия, и др. Полный список служб описывается в группе стандартов IEEE 1609 [2]. Повышение транспортной безопасности обеспечивается за счет своевременного информирования других участников дорожного движения о заторе или дорожно-транспортном происшествии. Помимо этого, повышение безопасности осуществляется путем создания служб автоматического информирования об опасности или возможности столкновения. Чтобы повысить интерактивность и информативность этих служб, дать возможность согласовать свои действия, водителям необходимо иметь средства персональной радиосвязи. Кроме того, в частных случаях служба автоматического информирования будет неспособна выполнять свои задачи. Для решения данной проблемы предлагается подсистема персональной цифровой мобильной радиосвязи (ЦМР) ИТС на основе сети VANET.

### **Анализ использования персональных цифровых мобильных технологий радиосвязи**

На текущий момент на рынке присутствуют устройства стандартов DMR (Digital Mobile Radio) и TETRA (TErrestrial Trunked Radio). Оба этих стандарта разработаны Европейским Институтом Телекоммуникационных Стандартов (ETSI)

Стандарты TETRA (ETSI Standard 300 392) и DMR (ETSI Standard 102 361) это стандарты цифровой профессиональной мобильной радиосвязи,

используемые для создания систем подвижной полудуплексной наземной связи. Данные стандарты описывают физические и канальные уровни модели OSI. Оба стандарта поддерживают передачу голосовых кодированных данных, сообщений, телеметрии и имеют поддержку пакетной передачи данных по протоколам IP. Такие решения позволяют, организовывать системы передачи речи, телеметрии и использовать для организации работы систем мониторинга. На текущий момент, сети связи стандарта DMR и TETRA обеспечивают работу служб скорой медицинской помощи, структур МВД, банков и т. д.

В таблице 1 проведен краткий сравнительный анализ стандартов связи.

ТАБЛИЦА 1. Анализ стандартов систем

Стандарт	DMR	TETRA	VANET(802.11p)
Частоты работы	66–960 МГц.	150–900 МГц	5 850–5 925 МГц
Скорость передачи данных	Около 2 Кбит/с	До 500 Кбит/сек	До 27 Мбит/сек
Дальность связи между узлами	До 232 км	До 58 км	До 1 км
Мощность передат.	1–10 Вт	1–10 Вт	1 мВт – 1 Вт
Ширина канала	6,25 КГц	150 КГц	10 МГц
Поддержка протоколов IP	Имеется	Имеется	Имеется

Отличительной особенностью сети стандарта 802.11p является высокая скорость передачи данных и малая дальность связи. В сетях VANET дальность передачи голосовых данных может быть увеличена за счет ретрансляции и масштабируемости сети другими узлами, и ограничена при необходимости путем использования специальных географических протоколов маршрутизации. Исследования [3], направленные на оценку качества передачи VoIP по VANET подтверждают возможность передачи голоса по данной сети. Так как имеется возможность передачи голоса, соответственно, возможно организовать работу службы полудуплексной персональной цифровой мобильной радиосвязи VANET. На текущий момент не существует служб, сервисов и приложений для сети VANET обеспечивающего возможность организации цифровой мобильной радиосвязи.

### **Построение подсистемы персональной цифровой мобильной радиосвязи для VANET.**

В данной работе предлагается модель подсистемы (ЦМР). Схема связей в модели изображена на рисунке 1.

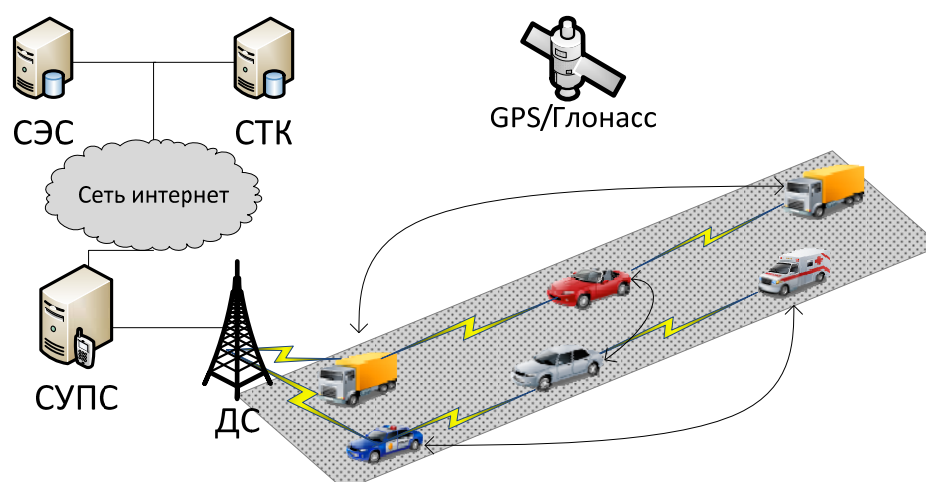


Рис. 1. Модель подсистемы

Модель подсистемы состоит из транспортных средств (ТС), дорожной станции (ДС), сервиса управления подсистемой связи (СУПС), и серверов получателей услуг связи: экстренные службы, транспортные компании и тп. Дорожная станция взаимодействуя с СУПС выполняет функцию трансивера и ретранслятора для сети. СУПС является шлюзом доступа к ЦМР для общественных сетей, а также защищает ЦМР от неправомерного доступа, как со стороны общественных сетей, так и со стороны сети VANET. Спутники глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) совместно с приемниками ГНСС используются для синхронизации времени переключения между каналом управления ССН и службы SCH [4]. Каналы связи VANET устанавливаются согласно архитектурам V2V и V2I предложенными организациями ETSI ([www.etsi.org](http://www.etsi.org)), Car-to-Car Consortium ([www.car-to-car.org](http://www.car-to-car.org)) и IEEE ([www.ieee.org](http://www.ieee.org)) [5–8]. Помимо физического канала связи образуются логические каналы, которые используются для разделения на группы вызовов. Выделяется четыре основных группы вызовов:

1. Экстренные вызовы.
2. Групповые вызовы.
3. Одиночные вызовы.
4. Общие вызовы.

Экстренные вызовы используются для предупреждения всех участников дорожного движения об опасности и могут быть использованы специальными службами.

Групповые вызовы используются для общения внутри определенной группы, таких как экстренные службы, полиция, транспортные компании с возможностью подключения участников из внешних сетей связи.

Одиночные вызовы используются для связи между двумя ТС или ТС и участником внешней сети.

Общие вызовы – это канал доступный любому участнику дорожного движения, для общения между участниками дорожного движения.

Так как подсистема использует ресурсы множества доступных ТС связанных в сеть передачи данных, она представляет собой систему массового обслуживания (СМО). Эффективность работы данной системы зависит от интенсивности  $\lambda$  поступления запросов на обслуживание (пакетов голосовых данных) и интенсивности  $\mu$  обслуживания заявок (получение возможности передачи данных). Интенсивность обслуживания заявок зависит от количества ТС в географической зоне и критериев доступа к каналу. Интенсивность нагрузки определяется как

$$P_{load} = \frac{\lambda}{\mu}.$$

Если предположить, что для каждого ТС, интенсивность поступления и интенсивность обслуживания образуют два стационарных потока, а канал может быть занятым или свободным, то уравнения Колмогорова [9] для вероятности состояний будет иметь вид

$$\lambda p_{ready} = \mu p_{busy}.$$

Так как,  $p_{ready} + p_{busy} = 1$ , то вероятность того, что канал свободен для передачи данных определяется как

$$p_{free} = p_{ready} = \frac{1}{\sum \frac{P_{load}^k}{k!}}.$$

Вероятность того, что канал занят определяется по обратной формуле

$$p_{busy} = 1 - p_{free}.$$

Вероятность поступления заявок от каждого ТС по отношению к СМО вычисляется по формуле распределения Пуассона:

$$P_m(t) = \frac{(\lambda t)^m}{m!} e^{-\lambda t}.$$

Стоит отметить, что не все заявки могут быть обработаны, из-за отсутствия доступности узла по причине интерференций, замираний и дру-

гих особенностей распространения сигнала. В данной работе не предпринимается попыток для решения этой проблемы, но при моделировании это учитывалось системой симуляции.

### **Физический и каналный уровень ЦМР. Механизмы QoS.**

Физический канал передачи данных и доступ к среде обеспечивается технологией DSRC (Dedicated Short-Range Communications) [10], который описывается группой стандартов IEEE 1609. Данная технология предназначена для соединения ТС с множеством других стационарных и подвижных объектов. DSRC работает в диапазоне частот 5 850–5 925 МГц. Таким образом полоса в 75 МГц, разделяется на 7 каналов по 10 МГц, и используется для различных приложений. Центральный канал шириной 5 МГц является управляющим каналом, передающим набор служб, работающих в данной географической зоне.

Физический и каналный уровни основаны на спецификации стандарта IEEE 802.11p, который предназначен специально для сетей транспорта. Согласно этому документу механизм CSMA/CA использует упрощенный механизм избегания коллизий, путем обнаружения несущей. Стандарт 802.11p использует серию улучшений, описанных в спецификации 802.11e [11], которые отвечают за обеспечения качества обслуживания. В частности, методы 802.11e обеспечивают приложениям VoIP и потокового мультимедиа серию улучшений QoS за счет механизмов (EDCF/EDCA), в которых различные приложения определяют параметры AIFS и CW, которые необходимы для определения приоритета доступа. При передаче данных с использованием механизмов (EDCF/EDCA) образуется очередь пакетов.

### **Протоколы маршрутизации ЦМР.**

Протокол маршрутизации обеспечивает построение маршрута передачи данных от источника до адресата при наличии промежуточных узлов в сети. При расчете маршрута алгоритм маршрутизации может использовать информацию о географическом положении узла, уровне сигнала и др.

Выделенные группы вызовов, разделяются типами связи, между собой. Одиночные вызовы устанавливают связь типа один к одному, групповые – один к нескольким, общие и экстренные – один ко многим. Поэтому исходя из задачи возможно выделить группы протоколов по типу передачи:

1. Unicast – односторонняя передача трафика единственному узлу сети.
2. Multicast – многоадресная передача трафика, подразумевающая одновременную передачу от одного узла сети, другим узлам, входящим в состав определенной группы и доступным для приема.



3. Broadcast – многоадресная передача трафика, подразумевающая передачу от одного узла сети, другим узлам, доступным для приема.

Для оптимизации скоростных характеристик протоколов возможно использовать информацию от навигационных систем, т. к. каждое транспортное средство оснащается приемником ГНСС. Маршруты передачи данных формируются на основе географического местоположения и направления движения узла, скорости. Эта информация используется протоколом маршрутизации при формировании маршрута передачи данных.

Протоколы, использующие информацию о своем местоположении, и работающие с определенной группой абонентов, находящейся в определенной географической зоне относятся к типу Geocast (географические), которые при слиянии с протоколами выделенной группы протоколов способны определять территорию, на которой данные распространяются между узлами и направление распространения. Существует большое количество различных протоколов, способных обеспечить различные режимы передачи данных. Обзор существующих протоколов выполнен в [12–14]. Возможными вариантами протоколов являются:

1. Географические протоколы одиночной маршрутизации (GPSR).
2. Географические широковещательные протоколы маршрутизации (DRG).
3. Географические протоколы групповой передачи (ROVER).
4. Протоколы маршрутизации, основанные на дорожных состояниях (RBVT).

## **Кодек ЦМР**

Речь при передаче по цифровым каналам связи от устройства записи до устройства воспроизведения предварительно проходит большое количество подсистем, таких как: ЦАП/АЦП, DSP, кодек. В современных ЦМР центральным местом является алгоритм речевого кодирования (кодек). Целью использования кодека является уменьшение скорости битового потока при сохранении исходного сигнала таким образом, чтобы при декодировании на приемнике он был различим.

В исследовании [15] выполнен анализ применения различных кодеков в сетях VANET, стандартизированных ITU-T и ETSI. В работе сравнивались такие характеристики QoS такие как: потеря пакетов, end-to-end задержка, метрика MOS (Mean Opinion Score). При моделировании были получены результаты, которые свидетельствуют о том, что кодек G.723.1.A обеспечивает лучшие совокупные показатели характеристик для данной сети. Поэтому для моделирования системы был выбран данный кодек.

## Моделирование

Для того чтобы оценить возможность функционирования предлагаемой системы была использована связка комплекса программного обеспечения OMNETPP [16], MIXIM [17], Veins [18] и Google Earth. OMNETPP, Veins, MIXIM, формируют программную среду симуляции, которая включает в себя модель среды распространения радиоволн, физический и канальный уровень, стек протоколов. Google Earth используется для визуализации симуляции.

При моделировании потоков, каждым ТС передавался аудио поток кодека продолжительностью 5 секунд, битовой скоростью 6,3 кбит/с, где в каждую секунду поток состоял из 30 семплов по 24 байт каждый. Каждый переданный пакет состоял из четырех семплов, совокупный объем которого 768 бит. Таким образом, передаваемые данные представляли собой посылку, состоящую из 38 UDP пакетов. Выбор продолжительности аудио потока основывался на анализе записи переговоров сотрудников МВД при исполнении служебных обязанностей. Радиограммы и маркеры начала и конца показаны на [рисунке 2](#).

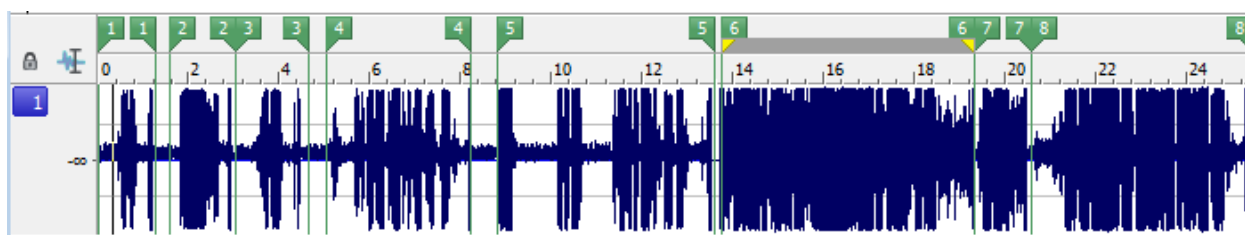


Рис. 2. Радиограммы

В данной записи максимальное время передачи радиограммы составило 5,7 секунды, минимальное 1,3 секунды. При полном анализе записи, средняя инертность радиограмм варьируется от 1 до 10 секунд, в которых 80 % радиограмм не превышают значение в 5 секунд. Исходя из этого, при моделировании была выбрана данная продолжительность.

ТАБЛИЦА 2. Параметры симуляции

Технология	DSRC(IEEE 1609)
Стандарт	802.11p
Частота канала управления	5 890 МГц
Частота канала службы	5 870 МГц
Мощность передатчика	100 мВт
Чувствительность приемника	-94 дБм
Скорость соединения	18 М/бит
Минимальный интервал между вызовами	5 сек
Время симуляции	60 сек

Для моделирования голосовых вызовов использовались детерминированные и случайные потоки вызовов. Использование детерминированного потока обосновано тем что критерием доступа к каналу для детерминированного распределения является его гарантированное освобождение в момент времени  $t_n$ . В детерминированном потоке момент голосового вызова  $t_n$  на различных узлах определяется по формулам

$$t_n = t_c + t_{delay},$$

$$t_{delay} = t_{delay_{n-1}} + Int,$$

где  $Int$  – минимальный интервал между вызовами.

При использовании модели случайного потока вызовов, момент голосового вызова  $t_n$  на различных узлах определяется по формулам

$$t_n = t_c + t_{off},$$

$$t_{off} = f[0,1) * (Int / 2),$$

где  $t_c$  – Текущее время.

Использование случайного потока вызова обосновано тем что, с помощью него возможно оценить емкостную нагрузку использования канала несколькими узлами сети.

Моделирование производилось для экстренных и общих моделей вызовов. Моделируемые транспортные средства со скоростью 30 м/с перемещались на плоскости размером 1 000 x 1 000 метров в произвольном направлениях, количество транспортных средств изменялось в зависимости от итерации симулирования. Время симуляций 2 000 сек.

Моделирование проводилось с использованием модели распространения сигнала в среде и модели физического и канального уровней согласно стандарту 802.11р. Для работы подсистемы использовалось два канала передачи данных: канал управления CCH и канал службы SCH. По каналу CCH передавался анонс узла [19], начинающего передачу, затем осуществлялось переключение на канал SCH где выполняется передача голосовых данных.

В симуляции использовались две из четырех групп вызовов: общие и экстренные поэтому использовался географический широковещательный протокол DRG.

В качестве анализируемых параметров были использованы метрики такие как: количество успешно принятых пакетов, время нахождения канала в занятом состоянии, и общие количество потерянных пакетов. Общее количество потерянных пакетов складывается из количества пакетов, по-

терянных по причине низкой разницы уровня сигнал/шум и невозможности приема пакета из-за нахождения в режиме передачи. Различные VoIP приложения могут функционировать при потерях до 10 %, при потерях до 1 % поток считается качественным [20].

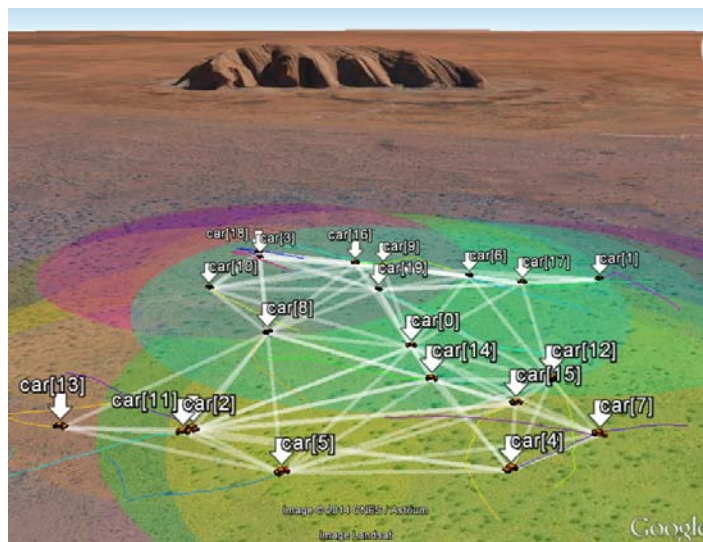


Рис. 3. Графический интерфейс симулятора

Для симуляции был использован персональный компьютер со следующими характеристиками: Intel Core Quard 2 400 МГц/RAM 4 Гб/GT9600M; под управлением операционной системы Windows 8.1

## Результаты и анализ

Результаты, полученные в ходе моделирования, усреднялись в зависимости от количества автомобилей, участвующих в симуляции. На первом этапе симулировалась детерминированная модель вызовов. При детерминированном распределении момента вызова, потери на канале крайне малы или отсутствуют. Это связано с тем, что канал гарантированно не используется во время начала передачи и нет двух одновременно передающих узлов (рис. 4).

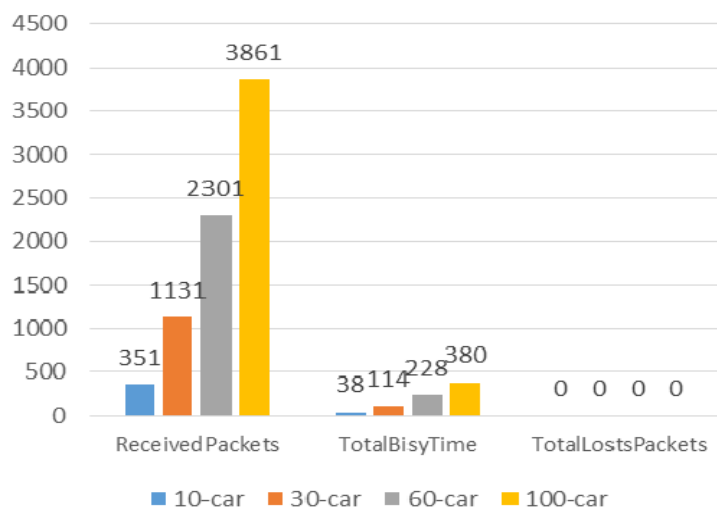


Рис. 4. Модель детерминированных вызовов

Если представить модель сети, в которой критерием доступа к каналу будет отсутствие передачи на нем в текущий момент времени, то получится максимально эффективная система связи. Минусами такой системы будет низкая емкость и длительное ожидание освобождения канала, нерациональное использование канала.

На втором этапе симулировалась модель случайных потоков вызовов. На практике данная модель встречается чаще и более точно отражает распределение вызовов. В данной модели начинается увеличение общих потерь в зависимости от количества ТС в географической зоне (рис. 5).

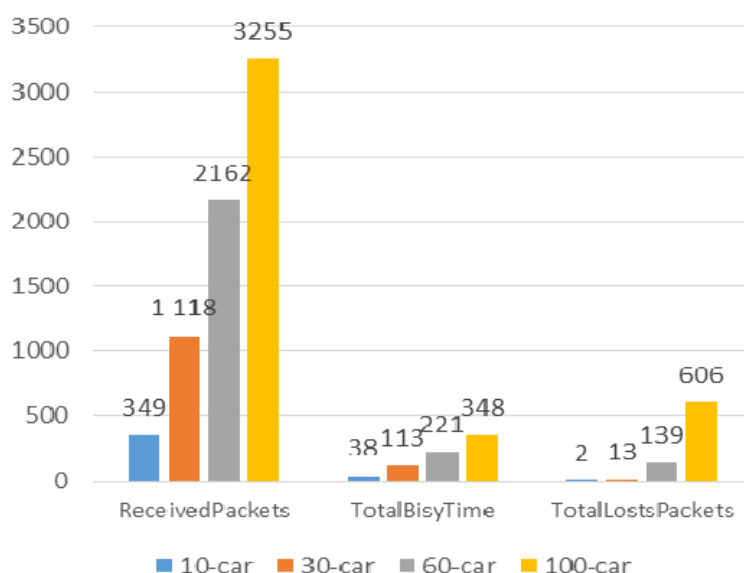


Рис. 5. Модель случайных вызовов

Значение общей занятости канала для обеих моделей постоянно. Это связано с тем что в совокупности количество передаваемых данных не изменилось. Процент потерь относительно общего количества переданных пакетов: 10 ТС – 0,57 %, 30 ТС – 1,16 %, 60 ТС – 6,425 %, 100 ТС – 18,61 %.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что система связи будет функционировать в сети VANET. При использовании модели детерминированного времени вызовов, система сможет обеспечить качественную передачу в независимости от количества транспортных средств. При использовании модели случайного времени вызова, увеличение количества транспортных средств сказывается на качестве передачи данных. При сохранении высокого качества передачи речи система способна обеспечить обработку до 30-ти заявок на обслуживание, при случайном распределении.

### Библиографический список

1. **IEEE 802.11p-2012** – IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments, 2012.
2. **IEEE P1609.4-2010** – IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE), 2010.
3. **Brak, Said El** Speech Quality Evaluation Based Codec for VoIP over 802.11P, Said El Brak, M. Bouhorma, A Abdelhakim International Journal of Wireless & Mobile Networks, 2013.
4. **IEEE P1609.4-2010** – IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)--Multi-channel Operation, 2010.
5. **Car 2 Car** Communication Consortium Manifesto. Overview of the C2C–CC System. – URL: [www.car-to-car.org](http://www.car-to-car.org)
6. **ETSI TS 102 636–3 V1.1.1 (2010–03)**: In-telligent Transport Systems (ITS); Vehi-cular Communications; GeoNetworking; Part 3: Network architecture. – European Telecommunications Standards Institute, 2010.
7. **Draft ETSI EN 302 665 V1.0.0 (2010–03)**: Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture. – European Telecommunications Standards Institute, 2010.6.
8. **Draft Standard** for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Architecture. – IEEE P1609.0/D0.1. – Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010.
9. **Вентцель, Е. С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология / Е. С. Вентцель. – 2-е изд., стер. – М. : Наука, 1988. – 208 с.
10. **Vehicle Safety** Communications Project Final Report, U. S. Dept. Trans., Nat. Highway Traffic Safety Admin., Rep. DOT HS 810 591. 2006.

11. **IEEE 802.11e-2005** – IEEE Standard for Information technology--Local and metropolitan area networks--Specific requirements--Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements
12. **Venkatesh**, A Indra, R Mural, Routing Protocols for Vehicular Adhoc Networks (VANETs): A Review, Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences, 2014.
13. **Lin, Yun-Wei** Routing Protocols in Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey and Future Perspectives / Yun-Wei Lin, Yuh-Shyan Chen, Sing-Ling Lee // Journal of Information Science and Engineering. – 2010. – № 3.
14. **Josiane Nzouonta-Domgang**, Road-Based Routing In Vehicular Ad Hoc Networks, Dissertation, 2009.
15. **Brak, Said El** Voice over VANETs(VoVAN): QoS Performance Analysis of Different Voice CODECs in Urban VANET Scenarios / Said El Brak, M. Bouhorma, A Abdelhakim // International Journal of Wireless & Mobile Networks, 2013.
16. **OMNeT++** Network Simulation Framework. – URL: <http://www.omnetpp.org>
17. **MiXiM** (mixed simulator). – URL: <http://mixim.sourceforge.net/>
18. **Veins** – open source vehicular network simulation framework. – URL: <http://veins.car2x.org/>
19. **Overview of Wireless Access in Vehicular Environment (WAVE) Protocols and Standards** / Shereen A. M. Ahmed, Sharifah H. S. Ari // Indian Journal of Science and Technology, 2013.
20. **William, W. C.** VoIP Service Quality Measuring and Evaluating Packet-Switched Voice. 1st edition. USA: McGraw-Hill Networking Professional, 2002.

#### **Аннотация**

*Интеллектуальные транспортные системы на основе сети VANET являются одним из актуальных направлений исследований во всем мире. Построение и использование сети VANET позволит решить множество проблем и задач. В данной статье проводится анализ и оценка возможности использования данной сети для организации персональной цифровой мобильной радиосвязи.*



**P. Shilin**

*Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications*

## **DIGITAL MOBILE RADIO VIA VANET**

### **Annotation**

*Intelligent transport systems based on VANET is one of the important areas of research throughout the world. Construction and use of VANET will solve many problems and challenges. One such task is the organization of voice communication between drivers of vehicles. This article analyzes and evaluates the possibility of using the network for the organization of personal digital mobile radio.*

**Keywords:** VANETs, Digital radio, Voice.

**Шилин Павел Анатольевич** — аспирант кафедры «Сети связи и передача данных» Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ ПРЕДСКАЗАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ СЕТЕВОГО ТРАФИКА**

*прогнозирование трафика, краткосрочное прогнозирование, анализ временных рядов.*

### **Введение**

Задача прогнозирования поведения некоторого стохастического процесса на основании его предыстории является фундаментальной научной проблемой. Существует множество подходов и способов её решения в различных областях, и телекоммуникации в данном случае не являются исключением. Прогнозирование требуется при планировании нагрузок, выработке стратегии развития сети, и, конечно, в системах адаптивного управления трафиком. На сегодняшний день есть два базовых подхода к управлению сетевым трафиком [1]: offline- и online-методы, и оба типа требуют предсказания поведения трафика. Разница между упомянутыми методами заключается в длительности прогнозируемого интервала, называемого горизонтом прогноза: для offline-методов горизонт прогноза составляет часы и дни, в то время как online-методы работают с краткосрочными прогнозами от нескольких секунд до минут. Ввиду растущей непредсказуемости пользовательских нагрузок [2] наиболее перспективной на данный момент видится группа online-подходов, позволяющих быстро реагировать на происходящие изменения в сети. В данной работе проведена экспериментальная оценка эффективности работы сравнительно простых методов, позволяющих осуществлять полностью автоматизированное краткосрочное прогнозирование.

### **Методы прогнозирования временных рядов**

Прогнозирование интенсивности сетевого трафика, ввиду значительной сложности детерминированного моделирования, целесообразно проводить с помощью универсальных статистических методов, представляющих развитие процесса в виде некоторого абстрактного временного ряда. Данному вопросу посвящено довольно большое количество исследований. Ранние подходы [3, 4] предполагают использование дробно-

интегрированных моделей (FARIMA) для прогнозирования сетевого трафика на достаточно длительных интервалах. Также могут использоваться модели ARIMA, типичными примерами являются работы [5, 6]. Другое общее направление основано на применении нейронных сетей для прогнозирования [6, 7].

Указанные подходы показывают достаточно высокую точность даже в случае долгосрочного прогнозирования. Однако всем им присущи некоторые недостатки, затрудняющие их использование в системах адаптивного управления трафиком. Так любые интегрированные модели (ARIMA/FARIMA/SARIMA) требуют «тонкой настройки» – выбора соответствующих параметров на основании анализа временного ряда, проведенного экспертом. Нейронные сети способны работать полностью автономно, однако требуют определенного времени на обучение. В условиях непредсказуемых нагрузок паттерны пользовательского трафика могут меняться довольно часто, что будет приводить к переобучению сети. Помимо всего прочего, реализация указанных подходов характеризуется высокой вычислительной сложностью, особенно это касается моделей, построенных на нейронных сетях. На основании этого можно заключить, что указанные методы не соответствуют требованиям, предъявляемым к системам адаптивного online-управления трафиком, а именно: автономность, адаптивность и относительная простота реализации. В то же время некоторые исследователи [8] отмечают, что разница в точности прогнозирования сетевого трафика, выполненного указанными сложными и относительно простыми линейными методами, не является статистически значимой. Руководствуясь вышеизложенными соображениями, рассмотрим некоторые простые методы прогнозирования, удовлетворяющие заданным критериям.

В общем случае процесс прогнозирования состоит из декомпозиции временного ряда и дальнейшего предсказания поведения полученных составляющих. Декомпозиция может представлять собой представление процесса в виде суммы (аддитивная модель) или произведения (мультипликативная) нескольких ненаблюдаемых компонент [9]. Ввиду того, что адаптивная мультипликативная модель довольно неустойчива в случае взрывного характера предсказываемого временного ряда (именно такой динамикой обладает реальный сетевой трафик), далее будем рассматривать только аддитивные модели.

$$X(t) = \mu(t) + S(t) + e(t),$$

здесь  $X(t)$  – исследуемый временной ряд,  $\mu(t)$  – модель тренда,  $S(t)$  – сезонная составляющая ряда,  $e(t)$  – случайный стационарный остаток. В

случае краткосрочного прогнозирования мы можем пренебречь сезонной гармонической составляющей, сосредоточившись на тренде и остатке [10].

### *Полиномиальная аппроксимация*

Метод основан на аппроксимации отрезка временного ряда с помощью полинома заданной степени  $P_k$ .

$$P_k(x_t) = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_{t-i}^i$$

Здесь  $a_0, \dots, a_n$  – коэффициенты аппроксимирующего полинома,  $x_{t-1}, \dots, x_{t-n}$  – известные значения временного ряда, по которым строится прогноз,  $k$  – степень полинома. Неизвестные коэффициенты находятся с помощью метода наименьших квадратов, представляющего собой решение оптимизационной задачи минимизации квадратичной ошибки между исходными и рассчитанными с помощью полинома значениями.

$$\sum_{i=1}^n (f(x_i) - P_k(x_i))^2 \rightarrow \min; \quad n \geq k + 1,$$

где  $f(x_i)$  – исходное  $i$ -е значение временного ряда,  $P_k(x_i)$  –  $i$ -е значение, рассчитанное с помощью аппроксимирующего полинома,  $n$  – длина отрезка исходного временного ряда. Следует отметить, что данная задача имеет аналитическое решение для любой заданной степени полинома, т. е. не требует привлечения затратных численных методов.

### *Полиномиальная экстраполяция*

Метод экстраполяции также представляет отрезок исходного временного ряда в виде некоторого полинома заданной степени. Отличие данного метода от рассмотренной аппроксимации заключается в том, что полученный полином обязан проходить строго через исходные точки. Следствием этого является жесткое ограничение на длину отрезка исходного временного ряда, на основании которого строится прогноз для следующей точки:  $n = k + 1$ .

### *Сглаживание с помощью формул Спенсера*

Известным методом выделения тренда из данных являются формулы Спенсера [11]. В данной работе рассматриваются модифицированные варианты для 5 и 7 точек.

$$x_t[5] = \frac{1}{35}[-28x_{t-5} + 77x_{t-4} - 28x_{t-3} - 98x_{t-2} + 112x_{t-1}]$$

$$x_t[7] = \frac{1}{21}[-12x_{t-7} + 18x_{t-6} + 12x_{t-5} - 9x_{t-4} - 24x_{t-3} - 12x_{t-2} + 48x_{t-1}]$$

Фактически данные выражения являются фильтрами, блокирующими высокочастотный шум случайного стационарного остатка.

### *Линейное предсказание*

Данный метод является разновидностью авторегрессионного, основываясь на представлении случайного процесса в виде инвариантной по времени линейной системы [12].

$$\hat{y}(n) = -\sum_{k=1}^p a_k y(n-k)$$

Неизвестные весовые параметры  $\{a_k\}$  могут быть найдены минимизацией суммарной квадратичной ошибки на сегменте длиной  $n$ .

$$\sum_n [y(n) - \hat{y}(n)]^2 \rightarrow \min_{\{a_k\}}$$

Преимуществом данного метода перед рассмотренными ранее является то, что здесь при прогнозировании учитывается корреляционная структура процесса.

### *Экспоненциальное сглаживание*

Экспоненциальное сглаживание может считаться разновидностью взвешенного среднего, причем учитываются все предыдущие значения ряда, взятые с экспоненциально убывающими весовыми коэффициентами. В данной работе рассматриваются следующие три модели:

1. простое экспоненциальное сглаживание (модель N-N),
2. экспоненциальное сглаживание с аддитивным трендом (модель A-N),
3. экспоненциальное сглаживание с затухающим аддитивным трендом (модель DA-N).

Соответствующие выражения [13] приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Модели экспоненциального сглаживания

Модель N-N	Модель A-N	Модель DA-N
$S_t = \alpha X_t + (1 - \alpha)S_{t-1}$ $\hat{X}_t(m) = S_t$	$S_t = \alpha X_t + (1 - \alpha)(S_{t-1} + T_{t-1})$ $T_t = \gamma(S_t - S_{t-1}) + (1 - \gamma)T_{t-1}$ $\hat{X}_t(m) = S_t + mT_t$	$S_t = \alpha X_t + (1 - \alpha)(S_{t-1} + \phi T_{t-1})$ $T_t = \gamma(S_t - S_{t-1}) + (1 - \gamma)\phi T_{t-1}$ $\hat{X}_t(m) = S_t + \sum_{i=1}^m \phi^i T_t$

### Экспериментальная оценка точности

Для оценки точности краткосрочного прогнозирования временного ряда рассмотренными методами была проведена серия численных экспериментов. В каждом эксперименте осуществлялась итеративная процедура предсказания значения временного ряда на один шаг вперед на основании наблюдаемого ранее участка ряда. Таким образом, в результате эксперимента производится  $N - n$  предсказаний, где  $N$  – общая длина тестового временного ряда, а  $n$  – размер интервала истории значений, используемого для прогноза, называемый периодом основания прогноза.

Тестовые временные ряды с шагом 1 секунда получены из различных образцов реального агрегированного сетевого трафика, собранного в центрах обработки данных [14]. Каждый временной ряд представлен в четырех вариантах:

1. оригинальный, шаг – 1 секунда,
2. усредненный, шаг – 5 секунд,
3. усредненный, шаг – 11 секунд,
4. усредненный, шаг – 21 секунда,

Оценка точности прогнозирования производится с помощью значения средней абсолютной процентной ошибки (MAPE).

$$MAPE = \frac{1}{n - k} \sum_{i=k}^n \left| \frac{X_i - \hat{X}_i}{X_i} \right|,$$

где  $n$  – длина тестового временного ряда,  $k$  – длина отрезка, используемого для первичной оценки параметров прогнозирования (период основания прогноза),  $\hat{X}_i$  – спрогнозированное, а  $X_i$  – реальное значение  $i$ -й точки.

Точность прогноза по MAPE определяется следующим образом [greben]:

- Прогноз высокой точности.  $MAPE < 10\%$ .
- Хороший прогноз.  $10\% < MAPE < 20\%$ .
- Удовлетворительный прогноз.  $20\% < MAPE < 50\%$ .
- Неудовлетворительный прогноз.  $MAPE > 50\%$ .

Для дополнительной оценки рассчитывается дисперсия по ряду значений отдельных показателей MAPE. Полученные в результате численных экспериментов результаты дают совокупную оценку точности прогнозирования выбранным методом, причем в качестве основной статистической характеристики используется медиана, дающая наиболее робастные оценки в данном случае.

### *Исследование степеней аппроксимирующих полиномов*

Результаты проведенного эксперимента представлены на [рисунке 1](#).

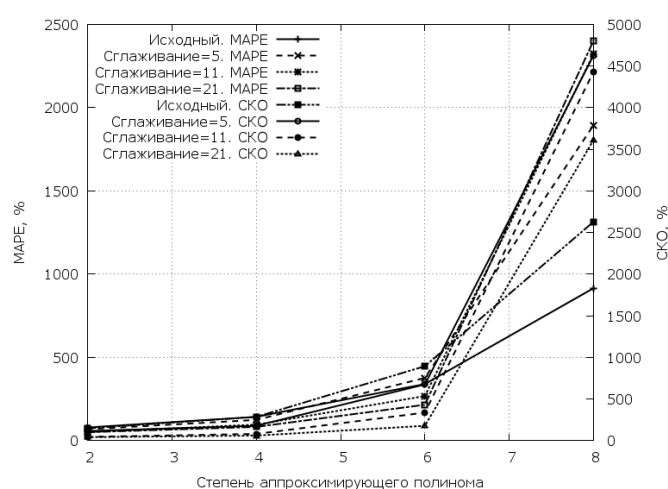


Рис. 1. Точность предсказания аппроксимирующими полиномами

Очевидно, увеличение степени аппроксимирующего полинома приводит к нестабильности получаемых прогнозов и, как следствие, значительному росту ошибок предсказаний. Все полученные результаты находятся в области неудовлетворительной точности.

### *Сравнение точности предсказания аппроксимирующими и экстраполяционными полиномами малых степеней*

В данном эксперименте сравнивается точность предсказания полиномами на базе аппроксимации и экстраполяции значений ряда (рис. [2–3](#)).



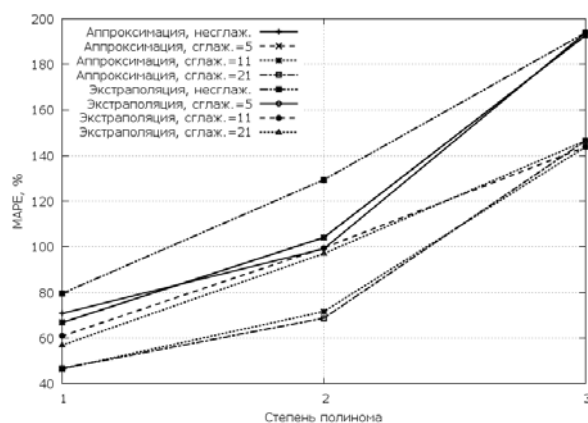


Рис. 2. Ошибка предсказания полиномами малых степеней

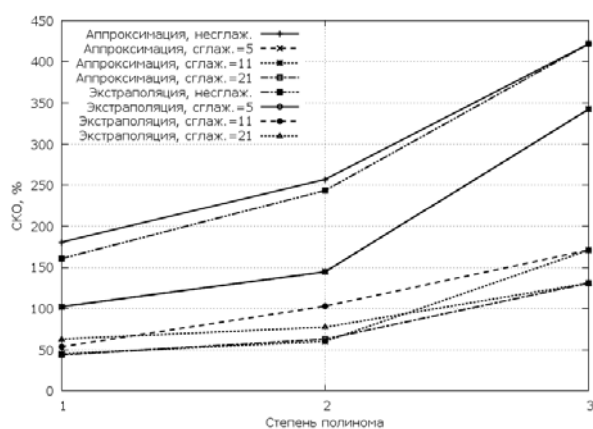


Рис. 3. Разброс ошибок предсказания

Как нетрудно видеть, наивысшая точность предсказания (см. [рис. 2](#)), а также наименьший разброс результатов (см. [рис. 3](#)) достигаются в случае применения линейной аппроксимации к ряду с максимальным усреднением – шаг 21 секунда. Также можно отметить, что аппроксимация показывает более высокую точность по сравнению с экстраполяцией во всех случаях, однако даже лучшие результаты лежат у границы области неудовлетворительного прогноза.

### *Исследование зависимости точности предсказания от периода основания прогноза*

В данном эксперименте исследуется точность предсказания с помощью линейного аппроксимирующего полинома при различных значениях периода основания прогноза (см. [рис. 4](#)).

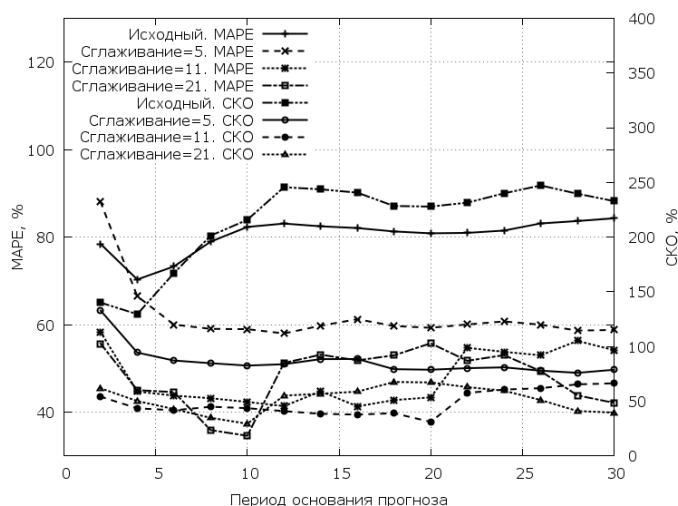


Рис. 4. Зависимость точности предсказания от периода основания прогноза

Как можно видеть из [рисунка 4](#), точность прогнозирования имеет тенденцию к увеличению с ростом длины периода основания прогноза до некоторого порогового значения, после достижения которого остается приблизительно постоянной или даже может уменьшаться (как в случае ряда с шагом 21 секунда). Таким образом, можно заключить, что существует некоторая оптимальная длина периода основания прогноза, находящаяся для метода линейной аппроксимации в диапазоне 5–10 точек.

#### *Исследование точности предсказания с помощью модифицированных формул Спенсера для 5 и 7 точек*

В данном эксперименте исследованию подвергаются методы экстраполяции выделенного тренда, основанные на модифицированных формулах Спенсера для 5 и 7 точек.

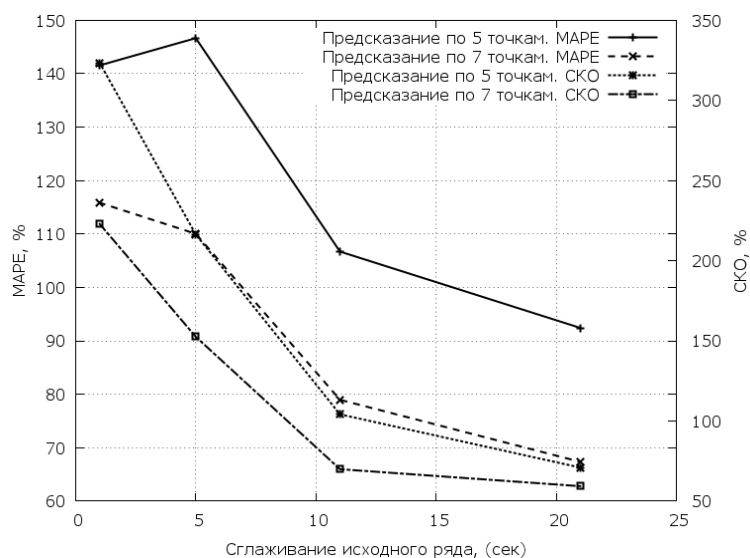


Рис. 5. Точность прогнозирования с помощью формул Спенсера

Полученные зависимости (см. [рис. 5](#)) демонстрируют значительный рост точности прогнозирования при увеличении шага сглаживания временного ряда, однако результаты лежат за пределами допустимой точности прогнозирования.

### *Исследование метода линейного предсказания*

В данном эксперименте оценивается влияние двух различных параметров на точность линейного метода предсказания: длины анализируемого интервала временного ряда (см. [рис. 6–7](#)), на основании которого строится корреляционная матрица, и порядка предсказывающего фильтра (см. [рис. 8–9](#)).

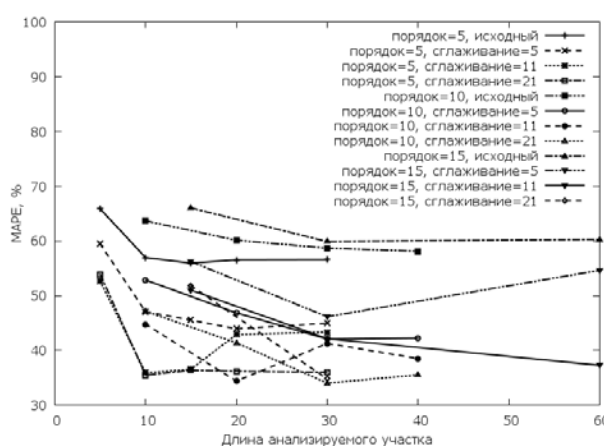


Рис. 6. Влияние длины интервала на среднюю ошибку предсказания

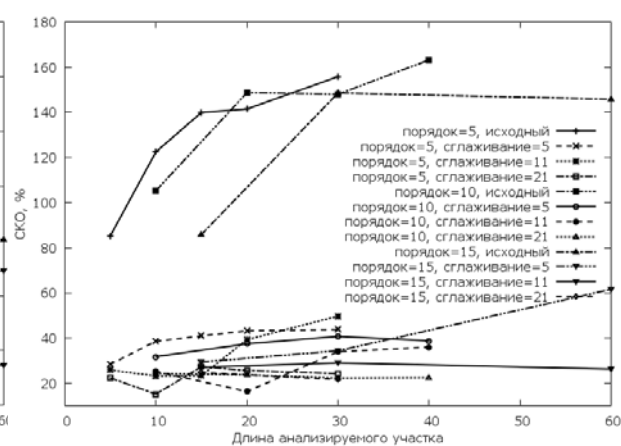


Рис. 7. Влияние длины интервала на разброс ошибок предсказания

Анализируя полученные результаты можно заключить, что точность предсказания возрастает до некоторого порогового значения, после чего меняется слабо (см. [рис. 6](#)). Наилучшая точность (около 30–35 %) была достигнута на максимально сглаженных временных рядах.

Увеличение порядка предсказывающего фильтра, как показывают эксперименты (см. [рис. 8](#)), во всех рассмотренных случаях приводит к ухудшению точности прогноза. Таким образом, наилучшего качества прогнозирования можно достичь использованием предсказывающего фильтра малого порядка (здесь: 3–7) на временных рядах, подвергнутых значительному усреднению.

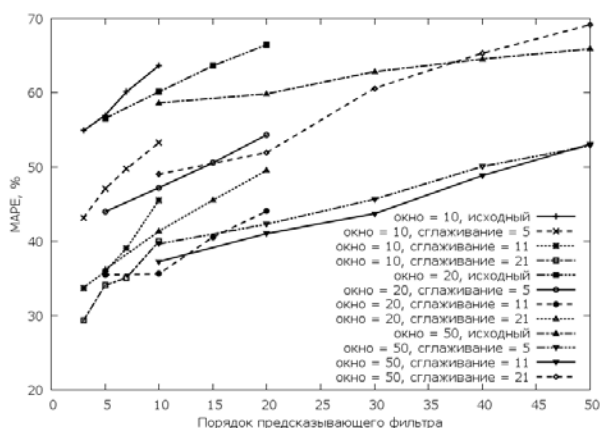


Рис. 8. Влияние порядка предсказывающего фильтра на среднюю ошибку предсказания

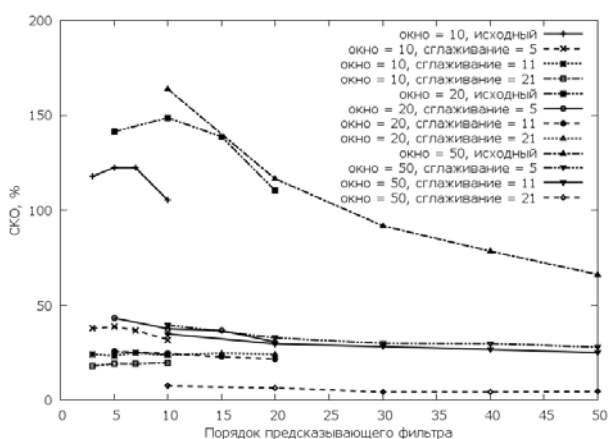


Рис. 9. Влияние порядка предсказывающего фильтра на разброс ошибок предсказания

### *Исследование прогнозирования с помощью метода экспоненциального сглаживания*

В данном эксперименте изучается влияние размера интервала, на котором производится подбор значений параметров соответствующих моделей экспоненциального сглаживания, на точность предсказания. Рассматриваются две базовые стратегии адаптации параметров:

1. Пошаговая адаптация. Параметры подбираются на каждом шаге прогнозирования.
2. Интервальная адаптация. Значения параметров определяются и остаются постоянными для некоторого участка временного ряда.

Нижняя граница диапазона значений размера интервала адаптации выбрана равной 10 точкам для слабо сглаженных рядов (1–5 секунд), и 5 точкам – для более сглаженных (11–21 секунда). Это связано с тем, что меньшие значения вносят нестабильность в процесс предсказания. Результаты проведенных экспериментов для временных рядов с различным шагом усреднения приведены на [рисунках 10–17](#).

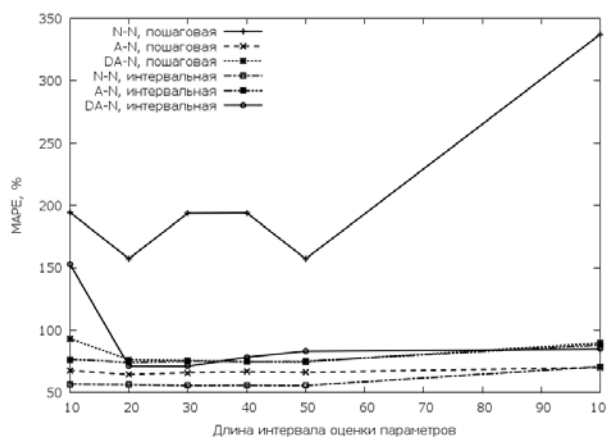


Рис. 10. Ошибка предсказания  
(шаг ряда: 1 сек)

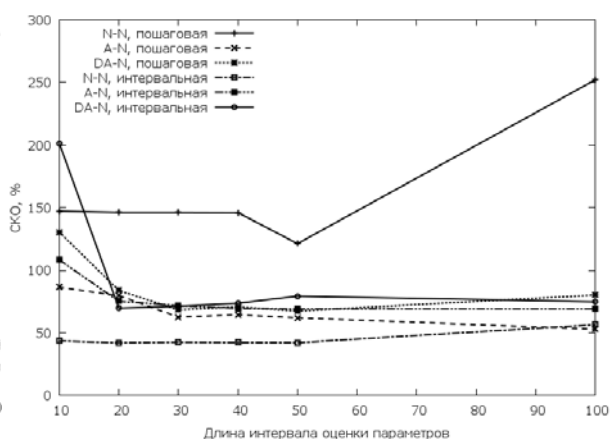


Рис. 11. Разброс ошибки  
предсказания (шаг ряда: 1 сек)

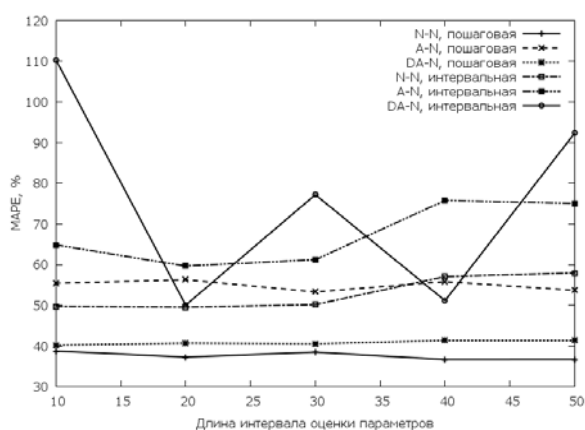


Рис. 12. Ошибка предсказания  
(шаг ряда: 5 сек)

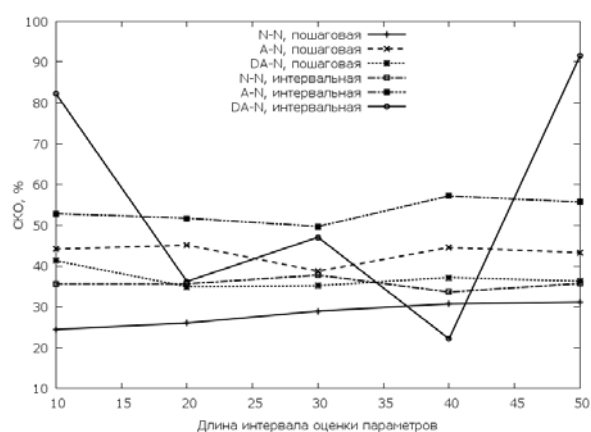


Рис. 13. Разброс ошибки  
предсказания (шаг ряда: 5 сек)

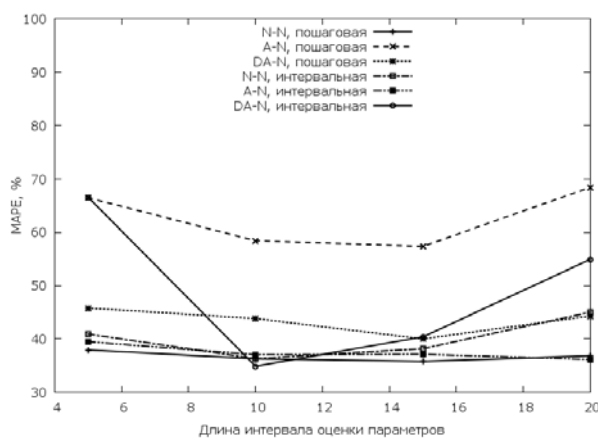


Рис. 14. Ошибка предсказания  
(шаг ряда: 11 сек)

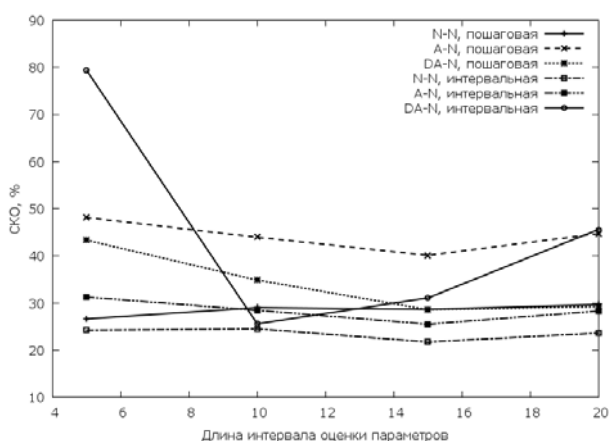


Рис. 15. Разброс ошибки  
предсказания (шаг ряда: 11 сек)

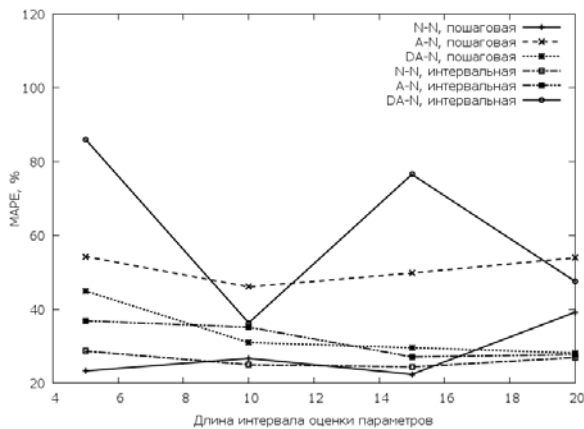


Рис. 16. Ошибка предсказания  
(шаг ряда: 21 сек)

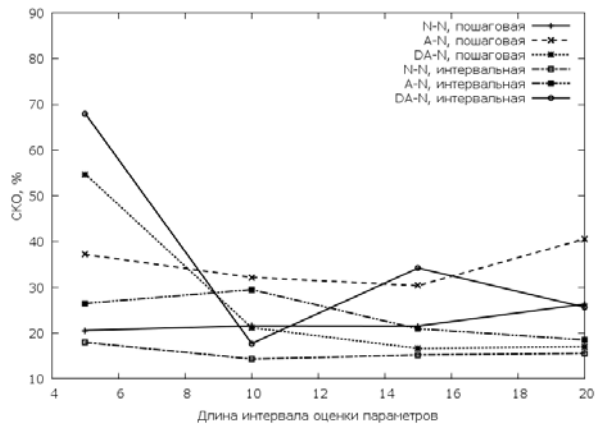


Рис. 17. Разброс ошибки  
предсказания (шаг ряда: 21 сек)

Согласно полученным результатам, наибольшее влияние на точность предсказания методами экспоненциального сглаживания оказывает усреднение тестового временного ряда. Наивысшую точность в проведенных экспериментах показал метод простого экспоненциального сглаживания (модель N-N) предсказывающий поведение временного ряда, усредненно-го с шагом 21 секунда: около 20 % MAPE, что соответствует границе между хорошим и удовлетворительным качеством прогнозирования. Варьирование размера интервала адаптации параметров данной модели в пределах 5–20 точек не даёт ощутимого изменения точности, а, следовательно, из соображений снижения вычислительной сложности процесса целесообразно использовать наименьший устойчивый интервал – 5–15 точек. Также необходимо отметить, что разница в точности прогнозирования методом N-N с пошаговой и интервальной адаптацией параметров не является значимой, тогда как вычислительная сложность интервального подхода значительно ниже.

## Заключение

В статье проведено экспериментальное исследование возможности применения простых линейных методов прогнозирования временных рядов для предсказания поведения реального сетевого трафика. Результаты исследования показывают, что некоторые из рассмотренных методов способны предсказывать поведение сетевого трафика с удовлетворительной и даже хорошей точностью, что в сочетании с полной автономностью, быстрой реакцией на происходящие изменения и относительной простотой реализации позволяет использовать их в системах динамического управления сетями связи. Наилучшую точность прогнозирования показал метод простого экспоненциального сглаживания с интервальной адаптацией параметра на участке 10–15 точек, работающий с временным рядом с шагом

21 секунда. Полученная средняя абсолютная процентная ошибка прогнозирования не превышает 20 %.

### **Библиографический список**

1. **Awduche, D. et al.** Overview and principles of Internet traffic engineering. RFC 3272, may, 2002.
2. **Dort-Golts, A.** Load balancing algorithm exploiting overlay techniques / A. Dort-Golts, O. Simonina // Advanced Communication Technology (ICACT), 2014 16th International Conference on. – IEEE, 2014. – С. 912–920.
3. **Shu, Y.** Traffic prediction using FARIMA models In: Communications, 1999 / Shu Y. et al. // ICC'99. 1999 IEEE International Conference on. IEEE, 1999. PP. 891–895.
4. **Xue, F.** Modeling and predicting long-range dependent traffic with FARIMA processes / F. Xue, T. T. Lee // In: Proc. International symposium on communication, Kaohsiung, Taiwan. 1999.
5. **Grebennikov, A.** A prediction method of network traffic using time series models / A. Grebennikov, Y. Krukov, D. Chernyagin. – PP. 110, 2011.
6. **Rutka, G.** Network Traffic Prediction using ARIMA and Neural Networks Models / G. Rutka // In: Electronics and Electrical Engineering, 2008. – PP. 47–52.
7. **Guang, Sun** Network Traffic Prediction Based on The Wavelet Analysis and Hopfield Neural Network / Sun Guang // International Journal of Future Computer and Communication 2.2 (2013): 101–105.
8. **Klevecka, I.** Forecasting network traffic: a comparison of neural networks and linear models / I. Klevecka // In: Proceedings of the 9th International Conference: Reliability and Statistics in Transportation and Communication, RelStat. 2009. – PP. 21–24.
9. **Koopman, S. J.** State space and unobserved component models / S. J. Koopman, N. Shephard. – Cambridge University Press, 2004.
10. **Dort-Golts, A.** Short-Term Forecasting: Simple Methods to Predict Network Traffic Behavior / A. Dort-Golts // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. – Springer International Publishing, 2014. – С. 375–388.
11. **Kendall, M. G.** The advanced theory of statistics. Vols. II and III / M. G. Kendall, A. Stuart. – Charles Griffin Publishers, Nueva York, 1961.
12. **Makhoul, J.** Linear prediction: A tutorial review / J. Makhoul // In: Proceedings of the IEEE. 1975. – PP. 561–580.
13. **Gardner, Jr. E. S.** Exponential smoothing: The state of the art. Part II. / Jr. E. S. Gardner // International Journal of Forecasting. 2006. – PP. 637–666.



14. **Benson, T.** Network traffic characteristics of data centers in the wild / T. Benson, A. Akella, D. A. Maltz // In: Proceedings of the 10th ACM SIGCOMM conference on Internet measurement. ACM, 2010. – PP. 267–280.

#### **Аннотация**

*В представленной работе рассматриваются простые линейные методы прогнозирования, основанные на анализе временных рядов. Экспериментальным путем анализируется эффективность применения таких методов для предсказания интенсивности реального сетевого трафика.*

**A. Dort-Golts**

*Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications*

#### **EXPERIMENTAL RESEARCH OF LINEAR SHORT-TERM FORECASTING METHODS FOR THE TASK OF REAL NETWORK TRAFFIC PREDICTION**

#### **Annotation**

*In this paper linear forecasting methods based on time series analysis are considered. Efficiency of all suggested methods has been examined in a series of numerical experiments for the task of real network traffic forecasting.*

**Keywords:** network traffic forecasting, short-term forecasting.

**Дорт-Гольц Антон Александрович** – аспирант кафедры «Сети связи и передача данных» Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»

## **МАСШТАБИРУЕМОСТЬ И НАДЁЖНОСТЬ ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЕЙ**

*ПКС, программно-конфигурируемая сеть, отказоустойчивость, масштабируемость.*

Программно-конфигурируемые сети (ПКС) начали своё развитие относительно недавно, в 2006 году. За прошедшее время ими довольно серьёзно заинтересовались как научное сообщество, так и крупные коммерческие компании (Google, Facebook, Cisco, Oracle, Juniper), появились первые промышленные внедрения ПКС в центрах обработки данных.

ПКС это сеть передачи данных, которая логически разделена на два уровня: уровень передачи данных (УПД), и уровень управления сетью (УУС). УПД включает в себя все передающие устройства (ПУ) сети (маршрутизаторы, коммутаторы, ...). УУС состоит из множества контроллеров ПКС, программно-аппаратных комплексов, управляющих процессом передачи данных во всей сети. УУС логически можно разделить на сетевую операционную систему (СОС) и управляющие программы, работающие на базе СОС. СОС занимается опросом состояния ПУ, построением и актуализацией целостного представления о состоянии сети и передачей ПУ управляющих команд. Управляющая программа в свою очередь получает от СОС состояние сети, анализирует его в соответствии со своими задачами и конфигурациями, вырабатывает управляющие команды для отдельных ПУ. УУС управляет УПД по специальному протоколу, реализующему независимый от производителя интерфейс управления отдельными ПУ. Наиболее популярной реализацией такого протокола на сегодняшний день является OpenFlow. Различные его версии уже поддерживаются такими производителями сетевого оборудования как CISCO, HP, IBM, Juniper, NEC, Brocade [1, 2].

При такой организации сеть логически представляет из себя единый маршрутизатор, который может быть легко запрограммирован, сконфигурирован и дополнен недостающими модулями бизнес-логики (балансировки нагрузки, оптимизации маршрутов, применения политик обслуживания, реализации требуемого QoS, обеспечения отказоустойчивости, анализа трафика, контроля доступа, безопасности, мониторинга состояния сети, проверки оборудования и каналов связи, выработки рекомендаций по оптимизации и усовершенствованию сети), а управляемые им ПУ могут быть

более простыми, менее требовательными к аппаратным и программным ресурсам, а значит и более дешевыми.

За счёт централизации в ПКС достигаются: меньшая подверженность сети ошибкам конфигурации, быстрота обнаружения и решения проблем в работе сети, большая надёжность (резервирование ПУ, мониторинг их состояния, выработка рекомендаций по повышению надёжности работы сети), безопасность и масштабируемость, быстрый отклик сети на изменяющиеся условия её существования, административные и пользовательские требования. Появляется возможность управлять действительно сетью, а не различными единицами оборудования со своими особенностями.

ПКС открывает новые возможности в виртуализации ресурсов сети. Контроллеры и программные коммутаторы могут запускаться и работать в виртуальных машинах на доступном серверном оборудовании. Их создание и обновление при необходимости даёт сети возможность быстро развёртывать новые сетевые сервисы (NFV), быстро адаптироваться под изменяющиеся условия работы, появляющиеся ресурсы и встающие задачи.

По своей природе сети с централизованным управлением работают медленнее и более подвержены проблемам отказоустойчивости и масштабируемости, чем распространённые сейчас децентрализованные асинхронные сети (IP). Краеугольный камень обеих этих проблем это контроллер ПКС. Каждый ПУ получает от него свою таблицу потоков – набор правил обработки трафика. Каждый поток описывается сигнатурой пакета, последовательностью действий, которые необходимо выполнять с соответствующими сигнатуре пакетами, и временем жизни. Если ПУ получает пакет, для которого у него нет потока с подходящей сигнатурой, то он может либо проигнорировать его, либо отправить контроллеру запрос на определение нового потока и, дождавшись его, обработать пакет. Во втором случае временная задержка обработки пакета складывается из поиска потока в таблице (процессор, память), запроса к контроллеру на определение нового потока (сеть), генерации контроллером нового потока (очередь обработки, процессор, память), ответа контроллера с определением нового потока (сеть), обновления таблицы потоков ПУ (процессор, память), применения полученного правила (процессор) и получается довольно большой, хотя её верхнее значение ограничено для многих видов трафика.

В работе контроллера по определению новых потоков можно выделить три стратегии [3]:

- *Реактивная.* Правила обработки потоков определяются по запросу от ПУ. Позволяет экономить место в таблицах потоков (размер которых ограничен в аппаратных и программных реализациях) ПУ, но приводит к относительно большим задержкам в обработке пакетов, большой загрузке контроллера и большому количеству служебного трафика в сети.

- *Проактивная.* Контроллер распределяет ПУ правила обработки пакетов, не дожидаясь их непосредственного запроса со стороны ПУ, стара-

ясь предвосхитить потребность в них. Для определения правил может использоваться различная информация об устройстве сети, статистике и истории возникавших в ней нагрузок, сведения с граничных ПУ. Стратегия позволяет ПУ не тратить время на запросы правил обработки потоков, но может приводить к переполнению таблиц потоков ПУ. В таком случае приходится либо строить более сложные иерархии ПУ, либо учить контроллер решать задачу оптимизации таблицы потоков.

- *Активная (гибридная).* Гибрид первых двух, позволяющий сочетать гибкость настройки маршрутов для одних видов трафика и скорость обработки для других.

Единый контроллер является единой точкой отказа сети и, в силу ограниченности своих вычислительных мощностей, главным ограничителем её масштабируемости. Для преодоления этой проблемы контроллер делается распределённым, работающим одновременно на нескольких вычислительных устройствах, расположенных в разных сегментах сети и обслуживающих приписанные ПУ. Наличие в сети нескольких контроллеров с согласованным состоянием позволяет повысить локальность расположения контроллера и относящихся к нему ПУ, а значит, уменьшить сетевые задержки в обмене данными между ними. Так как все контроллеры находятся в согласованном состоянии, то в случае потери связи с основным контроллером у ПУ есть возможность использовать альтернативный без необходимости перестройки таблицы потоков. К сожалению, функционирование распределённого контроллера во многом зависит от связности, синхронизации и согласованности работы контроллеров. Получается, что устройство, призванное обеспечивать связность и работоспособность сети, само от неё зависит. Эта проблема решается как алгоритмически, так и созданием избыточного количества контроллеров, выбором правильного их расположения, топологии и иерархии связей.

Распределённые системы по своей природе более отказоустойчивы, чем централизованные. Ситуация выхода отдельного ПУ из строя может решаться либо в режиме реального времени, обращением смежных ПУ к контроллеру (который может быть недоступен одновременно с ПУ), либо заранее, предзагрузкой в смежные ПУ альтернативных маршрутов на этот случай, либо повышением самостоятельности ПУ как в выборе альтернативного контроллера, так и в определении аварийного маршрута (Diffane, DevoFlow). Большое количество исследователей в разных командах пытаются найти оптимальный баланс между централизованностью и распределённостью ПКС, как физической, так и логической. Промышленным ответом на этот вопрос является внутренняя программно-конфигурируемая сеть “G-scale” компании Google, объединяющая двенадцать центров обработки данных по всему миру. Внутри ЦОДов маршрутизацией управляют кластера контроллеров ПКС, а между ЦОДами работают традиционные протоколы маршрутизации, такие как BGP и IS-IS. Компания утверждает,

что, постепенно оптимизируя маршрутизацию, им удалось достичь 95 % использования сетевых ресурсов [4].

За прошедшие годы исследований ПКС были найдены решения множества важных вопросов и проблем в этой области. В основной своей массе они относятся к ПКС, ровно как и ко всем сетям передачи данных, но в ПКС многие из них решаются проще за счёт гибкости программного обеспечения, больших возможностей виртуализации и масштабируемости. Производительность и функциональность ПКС контроллеров и ПУ будет со временем расти с выходом новых поколений специализированных микросхем и оптимизацией программного обеспечения. Многие из упомянутых ограничений и проблем масштабируемости и надёжности ПКС ждут решения. Это лишь вопрос времени.

### Библиографический список

1. **Yeganeh, Soheil Hassas** University of Toronto: О масштабируемости программно-конфигурируемых сетей / Soheil Hassas Yeganeh, Amin Tootoonchian, Yashar Ganjali // IEEE Communications Magazine, февраль 2013.

2. **Pepelnjak, Ivan** OpenFlow/ПКС не серебряная пуля в масштабируемости сети / Ivan Pepelnjak. – URL: <http://highscalability.com/blog/2012/6/4/openflowsdn-is-not-a-silver-bullet-for-network-scalability.html>.

3. **Salisbury, Brent** OpenFlow, проактивные или реактивные потоки / Brent Salisbury. – URL: <http://networkstatic.net/openflow-proactive-vs-reactive-flows/>

4. **Ritter, Michael** Вездесущие ПКС / Michael Ritter. – URL: <http://blog.advaoptical.com/omnipresent-sdn/>

### Аннотация

*В данной статье описываются подходы к масштабированию и повышению надёжности работы программно-конфигурируемых сетей, анализируются их преимущества и ограничения.*

**A. Solozobov**

*The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications*

### SCALABILITY AND RELIABILITY OF SOFTWARE-DEFINED NETWORKS

### Annotation

*This article describes different approaches of scaling and raising reliability of software-defined networks, analyzes their odds and limits.*

**Keywords:** SDN, software-defined network, scalability, reliability.

**Солозобов Андрей Сергеевич** – аспирант кафедры «Сети связи и передача данных» Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», Andrei.Solozobov@gmail.com

**А. В. Ульянов, И. В. Гришин***Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича***АЛГОРИТМ НЕЛИНЕЙНОЙ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ  
СИГНАЛОВ С OFDM***адаптивная нелинейная фильтрация, эквалайзер с усилением нуля, ортогональное частотное мультимплексирование, межсимвольные искажения, циркулярная матрица, квадратурно-амплитудная модуляция.***Постановка задачи**

Системы передачи с OFDM используют принцип согласования гауссовского канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) не только с приемником но и с самим передаваемым сигналом. Принцип согласования передаваемого сигнала и гауссовского канала с МСИ основан на разбиении полосы частот, отводимой под передачу сигналов, на совокупность  $N$  подканалов, в каждом из которых передаются низкоскоростные сигналы с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ) [1, 2].

Выражение, описывающее передачу многомерного сигнала OFDM в канале, имеет вид:

$$\mathbf{y}^i = \mathbf{H}\mathbf{x}^i + \mathbf{n}^i, \quad (1)$$

где  $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M-1} & & h_0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & h_{M-1} \end{bmatrix}$  –  $(N + M - 1) \times N$  матрица аperiодической сверт-

ки,  $h_0 \dots h_{M-1}$  – отсчеты импульсной характеристики канала;

$\mathbf{x}^i = [x_0 \dots x_{N-1}]^T$  – вектор отсчетов сигнала OFDM на входе канала;

$\mathbf{y}^i = [y_0 \dots y_{N-1+(M-1)}]^T$  – вектор отсчетов сигнала OFDM на выходе канала;

$\mathbf{n}^i = [n_0 \dots n_{N-1+(M-1)}]^T$  – вектор АБГШ,  $i$  – индекс момента времени,  $M$  – длина весовой последовательности канала.

Из (1) видно, что сигнал на выходе канала имеет количество отсчётов большее, чем сигнал на входе. Для передачи по каналу с МСИ сигнала,



представляющего последовательности блоков из  $N$  символов модель наблюдения (1) будет преобразована:

$$\mathbf{y}^i = \mathbf{H}_0 \mathbf{x}^i + \mathbf{H}_1 \mathbf{x}^{i-1} + \mathbf{n}^i, \quad (2)$$

$$\text{где } \mathbf{H}_0 = \begin{bmatrix} h_0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & & \vdots \\ h_{M-1} & \dots & h_0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & h_{M-1} & \dots & h_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 0 & \dots & h_{M-1} & \dots & h_1 \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ 0 & & 0 & & h_{M-1} \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{x}^i = [x_0 \dots x_{N-1}]^T, \quad \mathbf{n}^i = [n_0 \dots n_{N-1}]^T, \quad \mathbf{y}^i = [y_0 \dots y_{N-1}]^T.$$

Устранение явления межсимвольной интерференции в системах с OFDM осуществляется добавлением циклического префикса, представляющего копию последних  $N_3$  отсчетных значений символа OFDM. Математически периодическое продолжение вектора сигнала представлено выражением:  $\mathbf{x}_{N_0}^i = \mathbf{M} \mathbf{x}^i$ ,

$$\text{где } \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{N_3 \times (N-N_3)} & \mathbf{I}_{N_3} \\ \mathbf{I}_N & \end{bmatrix} - N_0 \times N \text{ блочная матрица, } N_0 = N + N_3 \text{ тогда}$$

$$\mathbf{x}_{N_0}^i = \mathbf{M} \mathbf{x}^i = [x_{N-N_3} \dots x_{N-1} x_0 \dots x_{N-1}]^T. \quad (3)$$

Вектор выходного сигнала  $\mathbf{y}^i$  будет иметь размерность  $N_0 + M - 1$ , что приводит к наложению последних  $M - 1$  отсчетов символа OFDM, на последующий передаваемый символ (область циклического префикса символа). Устранение влияния МСИ возможно путем удаления циклического префикса на приемной стороне, который не несет полезной составляющей. Выделим на приемной стороне  $N$  элементов, начиная с  $N_3$ :

$$\mathbf{y}_N^i = \mathbf{S}_{N_0 \times N}^T \mathbf{y}_{N_0}^i, \text{ где } \mathbf{S}_{N_0 \times N}^T = [\mathbf{0}_{(N_3-1) \times N} \quad \mathbf{I}_N]. \quad (4)$$

Тогда с учетом выражений (1–4) для матриц  $\tilde{\mathbf{H}}_0 = \mathbf{S}_{N_0 \times N}^T \mathbf{H}_0 \mathbf{M}$ ,  $\tilde{\mathbf{H}}_1 = \mathbf{S}_{N_0 \times N}^T \mathbf{H}_1 \mathbf{M}$  будут справедливы следующие утверждения:

$$\tilde{\mathbf{H}}_0 = \begin{bmatrix} h_0 & \dots & 0 & h_{M-1} & \dots & h_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ h_{M-1} & & h_0 & \vdots & \ddots & h_{M-1} \\ 0 & h_{M-1} & & h_0 & & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & h_{M-1} & \dots & h_0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{H}}_1 = \mathbf{0}_N \text{ для } N_3 \geq M-1, \quad (5)$$

$$\tilde{\mathbf{H}}_0 = \begin{bmatrix} h_0 & \dots & 0 & h_{N_3} & \dots & h_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & 0 & h_{M-1} & & h_{N_3} \\ h_{M-1} & & h_0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & & & \ddots & h_{M-1} & \\ 0 & \ddots & & h_0 & & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & h_{M-1} & \dots & h_0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{H}}_1 = \begin{bmatrix} 0 & \dots & h_{M-1} & \dots & h_{N_3+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & & h_{M-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Выражение (6) справедливо для  $\forall N_3 < M-1$ .

Матрица  $\tilde{\mathbf{H}}_0$  в выражении (5) является циркулярной  $\tilde{\mathbf{H}}_0 = \mathbf{H}_\text{ц}$ , поэтому может быть представлена подобной ей диагональной матрицей собственных значений канала:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{\Lambda}}_0 &= \frac{1}{N} \mathbf{W}_N \mathbf{S}_{N_0 \times N}^T \mathbf{H}_0 \mathbf{M} \mathbf{W}_N^H = \frac{1}{N} \mathbf{W}_N \mathbf{H}_\text{ц} \mathbf{W}_N^H = \text{diag}[\dot{\lambda}_0 \dots \dot{\lambda}_{N-1}] \\ \dot{\mathbf{\Lambda}}_1 &= \frac{1}{N} \mathbf{W}_N \mathbf{S}_{N_0 \times N}^T \mathbf{H}_1 \mathbf{M} \mathbf{W}_N^H = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\mathbf{W}_N$ ,  $\mathbf{W}_N^H$  – матрицы ДПФ/ОДПФ.

С учетом (7) выражение (2) может быть представлено в виде:

$$\mathbf{y}^i = \frac{1}{N} \mathbf{W}_N^H \dot{\mathbf{\Lambda}}_0 \mathbf{W}_N \mathbf{W}_N^H \dot{\mathbf{X}}^i + \frac{1}{N} \mathbf{W}_N^H \dot{\mathbf{\Lambda}}_1 \mathbf{W}_N \mathbf{W}_N^H \dot{\mathbf{X}}^{i-1} + \frac{1}{N} \mathbf{W}_N^H \dot{\mathbf{N}}^i, \quad (8)$$

где  $\dot{\mathbf{X}}^i$ ,  $\dot{\mathbf{X}}^{i-1}$  – комплексные кадры данных передаваемого сигнала в моменты времени  $i$ ,  $i-1$ ,  $\dot{\mathbf{N}}$  – комплексный кадр АБГШ.

Умножив правую и левую части выражения (8) на  $\mathbf{W}_N$  и учитывая, что  $\frac{1}{N} \mathbf{W}_N^H \mathbf{W}_N = \mathbf{I}_N$ , приходим к выражению:

$$\dot{\mathbf{Y}}^i = \dot{\mathbf{\Lambda}}_0 \dot{\mathbf{X}}^i + \dot{\mathbf{\Lambda}}_1 \dot{\mathbf{X}}^{i-1} + \dot{\mathbf{N}}^i, \quad (9)$$

где  $\dot{\mathbf{Y}}^i$  – комплексный данных принимаемого сигнала.

Выражения (3, 8) являются математической моделью канала во временной области, в то время как (9) представляет собой математическую модель канала многочастотных дискретных систем передачи в частотной области [3]. В случае, если выполняется условие  $L_3 \geq L - 1$ , матрица  $\dot{\mathbf{\Lambda}}_1$  является нулевой. Тогда достаточным условием для восстановления вектора сообщения достаточно, чтобы весовые коэффициенты эквалайзера удовлетворяли условию:

$$\dot{K}_n = \dot{\lambda}_n^{-1}, \quad n \in [0 \dots N - 1]. \quad (10)$$

В случае, если длина защитного интервала является недостаточной, матрица  $\dot{\mathbf{\Lambda}}_1 \neq 0$ , а матрица  $\dot{\mathbf{\Lambda}}_0$  не является диагональной. В итоге КАМ сигнал каждого из  $N$  каналов  $\dot{\mathbf{Y}}_n^i$  определяется суммой искаженного полезного сигнала, сигнала МСИ КАМ сигнала предыдущего момента времени и сигналов межканальных переходов первого (МКП-1) и второго рода (МКП-2), определяемых передачей энергии с оставшихся  $N-1$  каналов в текущий (МКП-1) и предыдущий (МКП-2) моменты времени. Условие восстановления исходного комплексного кадра данных  $\dot{\mathbf{X}}^i$  (10) не выполняется, и количество весовых коэффициентов эквалайзера, при которых возможна коррекция МСИ и МКП, возрастает пропорционально  $N^2$ . Очевидно, что при  $N \gg 1$  объемы вычислений в процессе цифровой обработки становятся чрезвычайно большими. Уменьшить количество операций умножения и сложения возможно, реализуя эквалайзер с учётом правил формирования комплексного кадра данных. Известно, что в процессе передачи дискретных многочастотных символов на  $K$  несущих частотах информация не передаётся. Таким образом, достаточно осуществить коррекцию  $M=N-K$  несущих с целью устранения МСИ и МКП [4].

### Алгоритм компенсации МСИ и МКП

Составим диагональную матрицу  $\mathbf{S}_1 = \text{diag}[S_0 \dots S_{N-1}]$ , где  $S_n = 1$ , если несущая частота используется для передачи данных,  $S_n = 0$ , если несущая не используется [4]. В таком случае выражение (10) может быть записано как

$$\mathbf{S}_1^T \dot{\mathbf{K}} \mathbf{W} [\tilde{\mathbf{H}}_0 \quad \tilde{\mathbf{H}}_1] \mathbf{W}^H \mathbf{S}_1 / N = \mathbf{S}_1^T [\mathbf{0}_N \quad \mathbf{I}_N] \mathbf{s}_1 \quad (11)$$

Отбрасывание нулевых строк и столбцов в обеих частях (11) позволяет прийти к выражению

$$(\mathbf{S}'_1)^T \dot{\mathbf{K}} \mathbf{W} [\tilde{\mathbf{H}}_0 \quad \tilde{\mathbf{H}}_1] \mathbf{W}^H \mathbf{S}'_1 / N = (\mathbf{S}'_1)^T \dot{\mathbf{K}} \mathbf{W} \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{W}^H \mathbf{S}'_1 / N = [\mathbf{0}_{N-K} \quad \mathbf{I}_{N-K}], \quad (12)$$

где  $\mathbf{S}'_1$  – матрица, получаемая из матрицы  $\mathbf{S}_1$  путём отбрасывания нулевых столбцов.

Представим  $\tilde{\mathbf{H}}$  в (12) в виде суммы двух матриц:  $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{H}_\text{ц} + \mathbf{H}_\text{err}$ , где  $\mathbf{H}_\text{ц} = [\mathbf{0}_N \quad \tilde{\mathbf{H}}_1 + \tilde{\mathbf{H}}_0 \mathbf{T}]$  – циркулярная матрица канала,  $\mathbf{H}_\text{err} = [\tilde{\mathbf{H}}_0 \quad -\tilde{\mathbf{H}}_0 \mathbf{T}]$  – матрица ошибки,  $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{M \times (N-M)} & \mathbf{I}_M \\ \mathbf{I}_{N-M} & \mathbf{0}_{(N-M) \times M} \end{bmatrix}$  – матрица перестановки.

Подставляя  $\mathbf{H}_\text{ц}$  и  $\mathbf{H}_\text{err}$  в (12) и раскладывая выражение на составляющие, получаем:

$$(\mathbf{S}'_1)^T \dot{\mathbf{K}} \mathbf{W} (\tilde{\mathbf{H}}_1 + \tilde{\mathbf{H}}_0 \mathbf{T}) \mathbf{W}^H \mathbf{S}'_1 / N = \mathbf{I}_{N-K} \quad (13)$$

$$\pm (\mathbf{S}'_1)^T \dot{\mathbf{K}} \mathbf{W} \tilde{\mathbf{H}}_0 \mathbf{W}^H \mathbf{S}'_1 / N = \mathbf{0}_{N-K} \quad (14)$$

Так как  $\tilde{\mathbf{H}}_1 + \tilde{\mathbf{H}}_0 \mathbf{T} = \mathbf{H}_\text{ц}$ ,  $\mathbf{W} (\tilde{\mathbf{H}}_1 + \tilde{\mathbf{H}}_0 \mathbf{T}) \mathbf{W}^H / N = \dot{\mathbf{\Lambda}}$ .

Следующим этапом формирования матрицы весовых коэффициентов фильтра-корректора является представление матрицы весовых коэффициентов  $\dot{\mathbf{K}}$  в виде суммы

$$\dot{\mathbf{K}} = \dot{\mathbf{K}} \mathbf{I}_N = \dot{\mathbf{K}} (\mathbf{S}_0 + \mathbf{S}_1) = \dot{\mathbf{K}} \mathbf{S}_0 + \dot{\mathbf{K}} \mathbf{S}_1 = \dot{\mathbf{K}}_0 + \dot{\mathbf{K}}_1 = \mathbf{S}'_1 \dot{\mathbf{K}}'_0 (\mathbf{S}'_0)^T + \mathbf{S}'_1 \dot{\mathbf{K}}'_1 (\mathbf{S}'_1)^T, \quad (15)$$

где  $\mathbf{S}_0 = \mathbf{I}_N - \mathbf{S}_1$  – матрица, выделения неиспользуемых несущих частот,

$\mathbf{S}'_0$  – матрица, получаемая из матрицы  $\mathbf{S}_0$  путём отбрасывания нулевых столбцов,

$\dot{\mathbf{K}}'_0$  – матрица, получаемая из матрицы  $\dot{\mathbf{K}}_0$  путём отбрасывания нулевых столбцов и строк,  $\dot{\mathbf{K}}'_1$  – матрица, получаемая из матрицы  $\dot{\mathbf{K}}_1$  путём отбрасывания нулевых столбцов и строк.

Таким образом, матрица  $\dot{\mathbf{K}}_0$  в (15) является матрицей весовых коэффициентов эквалайзера для неиспользуемых несущих частот, матрица  $\dot{\mathbf{K}}_1$  – для используемых несущих частот.

Подстановка (15) в (13) даёт следующее выражение:

$$\dot{\mathbf{K}}'_0 (\mathbf{S}'_0)^T \dot{\mathbf{\Lambda}} \mathbf{S}'_1 + \dot{\mathbf{K}}'_1 (\mathbf{S}'_1)^T \dot{\mathbf{\Lambda}} \mathbf{S}'_1 = \mathbf{0} + \dot{\mathbf{K}}'_1 \dot{\mathbf{\Lambda}} = \mathbf{I}_{N-K}, \quad (16)$$

где  $\dot{\mathbf{\Lambda}}'$  – матрица, получаемая путём отбрасывания нулевых столбцов и строк в матрице  $\dot{\mathbf{\Lambda}}$  соответственно.

Решение выражения (16) не зависит от матрицы  $\dot{\mathbf{K}}'_0$  и находится при

$$\dot{\mathbf{K}}_1' = \left( (\mathbf{S}_1')^T \dot{\mathbf{\Lambda}} \mathbf{S}_1' \right)^{-1} = (\dot{\mathbf{\Lambda}}')^{-1}. \quad (17)$$

Нахождение матрицы  $\dot{\mathbf{K}}_0'$  осуществляется путём решения (14). Достаточным условием для решения этих уравнений является

$$(\mathbf{S}_1')^T \dot{\mathbf{K}} \mathbf{W} \tilde{\mathbf{H}}_0 = \mathbf{0}_{(N-K) \times N}. \quad (18)$$

Так как матрица  $\tilde{\mathbf{H}}_0$  – верхняя треугольная матрица, достаточно, чтобы  $(\mathbf{S}_1')^T \dot{\mathbf{K}} \mathbf{W}$  имело вид  $\begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(N-K) \times (M-N_3-1)} & \mathbf{A}_{(N-K) \times N-(M-N_3-1)} \end{bmatrix}$ , где  $\mathbf{A}_{(N-K) \times N-(M-N_3-1)}$  – матрица произвольных значений. Подобного результата можно достигнуть без использования матрицы произвольных значений  $\mathbf{A}_{(N-K) \times N-(M-N_3-1)}$ :

$$(\mathbf{S}_1')^T \dot{\mathbf{K}} \mathbf{W} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{M-N_3-1} \\ \mathbf{0}_{(N-(M-N_3-1)) \times (M-N_3-1)} \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{(N-K) \times (M-N_3-1)}. \quad (19)$$

Подставляя (15) в (19), получим:

$$\dot{\mathbf{K}}_0' (\mathbf{S}_0')^T \mathbf{W} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{M-N_3-1} \\ \mathbf{0}_{(N-(M-N_3-1)) \times (M-N_3-1)} \end{bmatrix} = -\dot{\mathbf{K}}_1' (\mathbf{S}_1')^T \mathbf{W} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{M-N_3-1} \\ \mathbf{0}_{(N-(M-N_3-1)) \times (M-N_3-1)} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

где  $\mathbf{W} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{M-N_3-1} \\ \mathbf{0}_{(N-(M-N_3-1)) \times (M-N_3-1)} \end{bmatrix} = \mathbf{W}_0$ , тогда путём представления матрицы  $\dot{\mathbf{K}}$  в виде суммы  $\dot{\mathbf{K}} = \dot{\mathbf{K}}_0' + \dot{\mathbf{K}}_1'$  можно прийти к выражению

$$\dot{\mathbf{K}}_0' (\mathbf{S}_0')^T \mathbf{W}_0 = -\dot{\mathbf{K}}_1' (\mathbf{S}_1')^T \mathbf{W}_0. \quad (20a)$$

Исходя из выражения (20a), матрица  $\dot{\mathbf{K}}_0'$  находится как

$$\dot{\mathbf{K}}_0' = -\dot{\mathbf{K}}_1' (\mathbf{S}_1')^T \mathbf{W}_0 \left( (\mathbf{S}_0')^T \mathbf{W}_0 \right)^{-1} = -(\dot{\mathbf{\Lambda}}')^{-1} (\mathbf{S}_1')^T \mathbf{W}_0 \left( (\mathbf{S}_0')^T \mathbf{W}_0 \right)^{-1}. \quad (21)$$

Матрица весовых коэффициентов фильтра-корректора определяется:

$$\dot{\mathbf{K}} = \mathbf{S}_1' \dot{\mathbf{K}}_0' (\mathbf{S}_0')^T + \mathbf{S}_1' \dot{\mathbf{K}}_1' (\mathbf{S}_1')^T = \mathbf{S}_1' (\dot{\mathbf{\Lambda}}')^{-1} \left( (\mathbf{S}_1')^T - (\mathbf{S}_1')^T \mathbf{W}_0 \left( (\mathbf{S}_0')^T \mathbf{W}_0 \right)^{-1} (\mathbf{S}_0')^T \right). \quad (22)$$

Матрица в выражении (22) имеет ненулевые значения только на главной диагонали в строках используемых несущих частот и в вектор-

столбцах неиспользуемых несущих, что позволяет восстанавливать параметры сигнала при относительно небольшом объеме вычислений.

Из (21) видно, что адаптивная подстройка необходима только для элементов матрицы  $\dot{\mathbf{K}}_1$ . Учитывая, что недостатком линейного поиска оптимальных значений является то, что линейные фильтры оптимальны только при выделении нормального случайного сигнала из аддитивной смеси с нормальным шумом. На практике эти условия часто не выполняются. Значительный интерес представляет синтез нелинейных алгоритмов, осуществляющих оптимальную или квазиоптимальную обработку сигнала.

Для определения весовых коэффициентов фильтра оценителя необходимо осуществить нелинейную фильтрацию сигнала одного подканала многочастотной системы передачи с OFDM, а затем решить задачу интерполяции для нахождения коэффициентов подстройки остальных подканалов. Синтезируем нелинейный алгоритм адаптации, основанный на измерении амплитуды и фазы сигнала.

В соответствии с критерием минимума СКО поиск оптимальных параметров фильтра  $\tilde{\mathbf{K}}_1^i$  осуществляется согласно выражению:

$$\dot{\mathbf{K}}_1^{i+1} = \dot{\mathbf{K}}_1^i - 2\mu \frac{df(\dot{\mathbf{K}}_1^i)}{d\dot{\mathbf{K}}_1^i}.$$

Поскольку модель наблюдения нелинейна относительно вектора  $\tilde{\mathbf{K}}_1^i$ , оценитель должен быть нелинейным устройством. Алгоритм нелинейной адаптации будет иметь вид

$$\hat{\mathbf{K}}_1^{i+1} = \dot{\mathbf{K}}_1^i + \hat{\mathbf{K}}_\varphi^i \{ \varphi^i - h[\dot{\mathbf{K}}_1^{i-1}, \dot{\mathbf{Y}}^i] \}. \quad (23)$$

Согласно алгоритму нелинейной адаптации оценителя (23), используя алгоритм стохастической аппроксимации градиента, результирующий алгоритм нелинейной адаптации будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \text{Re}(\dot{\mathbf{K}}_1^{i+1}) &= \text{Re}(\dot{\mathbf{K}}_1^i) - \mu \left[ \frac{\partial f_U}{\partial [\text{Re}(\dot{\mathbf{K}}_1^i)]} \boldsymbol{\varepsilon}_U^i + \frac{\partial f_\varphi}{\partial [\text{Re}(\dot{\mathbf{K}}_1^i)]} \boldsymbol{\varepsilon}_\varphi^i \right] \\ \text{Im}(\dot{\mathbf{K}}_1^{i+1}) &= \text{Im}(\dot{\mathbf{K}}_1^i) - \mu \left[ \frac{\partial f_U}{\partial [\text{Im}(\dot{\mathbf{K}}_1^i)]} \boldsymbol{\varepsilon}_U^i + \frac{\partial f_\varphi}{\partial [\text{Im}(\dot{\mathbf{K}}_1^i)]} \boldsymbol{\varepsilon}_\varphi^i \right], \end{aligned} \quad (24)$$

где  $\boldsymbol{\varepsilon}_U^i = \mathbf{U}^i - \hat{\mathbf{U}}^i$  – вектор отклонения амплитуды в  $i$ -й момент времени от номинального значения,

$$(\mathbf{\varepsilon}_U^i)^T = [\varepsilon_{U,0}^i \dots \varepsilon_{U,N-1}^i] (\mathbf{U}^i)^T = [U_0^i \dots U_{N-1}^i] (\hat{\mathbf{U}}^i)^T = [\hat{U}_0^i \dots \hat{U}_{N-1}^i],$$

$$U_n^i = \sqrt{[\operatorname{Re}(\dot{X}_n^i)]^2 + [\operatorname{Im}(\dot{X}_n^i)]^2}, \hat{U}_n^i = \sqrt{[\operatorname{Re}(\hat{X}_n^i)]^2 + [\operatorname{Im}(\hat{X}_n^i)]^2},$$

$\mathbf{\varepsilon}_\varphi^i = [\varepsilon_{\varphi,0}^i \dots \varepsilon_{\varphi,N-1}^i]$  – фазовая ошибка, вырабатываемая в решающей схеме.

$$\varepsilon_{\varphi,n}^i = \varphi_n^i - \hat{\varphi}_n^i = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Re}(\dot{X}_n^i)}{\operatorname{Im}(\dot{X}_n^i)} - \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Re}(\hat{X}_n^i)}{\operatorname{Im}(\hat{X}_n^i)}.$$

Для нахождения частных производных необходимо определить модели наблюдения за изменением фазы  $h_\varphi$  и амплитуды  $h_U$  сигнала.

Если  $\hat{\mathbf{K}}_1^i = \tilde{\mathbf{K}}_1^i$ , то  $\hat{\mathbf{X}}^i = \tilde{\mathbf{X}}^i$  и

$$\varepsilon_{\varphi,n \min}^i = \varphi_n^i - \tilde{\varphi}_n^i. \quad (25)$$

Из (30) можно придти к выражению:

$$\varphi_n^i = \tilde{\varphi}_n^i + \varepsilon_{\varphi,n \min}^i = h_\varphi [\mathbf{Y}_{C,n}^i, \mathbf{Y}_{S,n}^i, \tilde{\mathbf{K}}_{C,n}, \tilde{\mathbf{K}}_{S,n}] + \varepsilon_{\varphi,n \min}^i, \quad (26)$$

где  $\mathbf{Y}_{C,n}^i = [Y_{C,n}^i \dots Y_{C,n}^{i-M}]$ ,  $\mathbf{Y}_{S,n}^i = [Y_{S,n}^i \dots Y_{S,n}^{i-M}]$ .

Находим частные производные от модели наблюдения изменения фазы сигнала, представленной в (31)

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_\varphi}{\partial \tilde{\mathbf{K}}_{C,n}} &= \frac{\mathbf{Y}_{S,n}^i \cdot \operatorname{Re}(\hat{X}_n^i) - \mathbf{Y}_{C,n}^i \cdot \operatorname{Im}(\hat{X}_n^i)}{(\hat{U}_n^i)^2} \\ \frac{\partial h_\varphi}{\partial \tilde{\mathbf{K}}_{S,n}} &= \frac{\mathbf{Y}_{C,n}^i \cdot \operatorname{Re}(\hat{X}_n^i) + \mathbf{Y}_{S,n}^i \cdot \operatorname{Im}(\hat{X}_n^i)}{(\hat{U}_n^i)^2}. \end{aligned} \quad (27)$$

Аналогично определим модель наблюдения изменения амплитуды сигнала в  $n$ -м подканале.

$$\begin{aligned} U_n^i &= \sqrt{[\operatorname{Re}[\hat{X}_n^i(\tilde{\mathbf{K}}_{C,n}, \tilde{\mathbf{K}}_{S,n})]]^2 + [\operatorname{Im}[\hat{X}_n^i(\tilde{\mathbf{K}}_{C,n}, \tilde{\mathbf{K}}_{S,n})]]^2} + \varepsilon_{U,n \min}^i = \\ &= h_U [\mathbf{Y}_{C,n}^i, \mathbf{Y}_{S,n}^i, \tilde{\mathbf{K}}_{C,n}, \tilde{\mathbf{K}}_{S,n}] + \varepsilon_{U,n \min}^i \end{aligned} \quad (28)$$

и соответствующие частные производные



$$\begin{aligned}\frac{\partial h_U}{\partial \tilde{\mathbf{K}}_{C,n}} &= \frac{\mathbf{Y}_{S,n}^i \cdot \text{Re}(\hat{X}_n^i) + \mathbf{Y}_{C,n}^i \cdot \text{Im}(\hat{X}_n^i)}{\hat{U}_n^i} \\ \frac{\partial h_U}{\partial \tilde{\mathbf{K}}_{S,n}} &= \frac{\mathbf{Y}_{C,n}^i \cdot \text{Re}(\hat{X}_n^i) - \mathbf{Y}_{S,n}^i \cdot \text{Im}(\hat{X}_n^i)}{\hat{U}_n^i}.\end{aligned}\quad (29)$$

С другой стороны

$$\begin{aligned}\text{Re}(\hat{X}_n^i) &= \hat{U}_n^i \cos[\hat{\phi}_n^i] \\ \text{Im}(\hat{X}_n^i) &= \hat{U}_n^i \sin[\hat{\phi}_n^i].\end{aligned}\quad (30)$$

Аналогичным образом получаем

$$\mathbf{Y}_{C,n}^i = \begin{bmatrix} U_n^i \cos \phi_n^i \\ \vdots \\ U_n^{i-M} \cos \phi_n^{i-M} \end{bmatrix}, \mathbf{Y}_{S,n}^i = \begin{bmatrix} U_n^{i-M} \sin \phi_n^i \\ \vdots \\ U_n^{i-M} \sin \phi_n^{i-M} \end{bmatrix}, \quad (31)$$

где  $U_n^{i-m}, \phi_n^{i-m}$  – модуль и фаза сигнала на  $m$ -м отводе линии задержки фильтра.

Подставив (27) и (29) в (24) с учетом (30) и (31), получаем следующий алгоритм подстройки на  $m$ -м отводе фильтра  $n$ -го подканала  $\dot{k}_{n,m}^i$ .

$$\begin{aligned}\text{Re}(\dot{k}_{n,m}^{i+1}) &= \text{Re}(\dot{k}_{n,m}^i) - \mu U_n^{i-m} \left\{ \varepsilon_{U,m}^i \cos[\hat{\phi}_n^i - \phi_n^{i-m}] + \frac{\varepsilon_{\phi,m}^i}{\hat{U}_n^i} \sin[\hat{\phi}_n^i - \phi_n^{i-m}] \right\} \\ \text{Im}(\dot{k}_{n,m}^{i+1}) &= \text{Im}(\dot{k}_{n,m}^i) - \mu U_n^{i-m} \left\{ \varepsilon_{U,m}^i \sin[\hat{\phi}_n^i - \phi_n^{i-m}] + \frac{\varepsilon_{\phi,m}^i}{\hat{U}_n^i} \cos[\hat{\phi}_n^i - \phi_n^{i-m}] \right\}.\end{aligned}\quad (32)$$

Поскольку обе модели наблюдения (26) и (28) являются нелинейными относительно вектора оцениваемых параметров, данный алгоритм является алгоритмом нелинейной фильтрации, основанным на измерении амплитуды и фазы сигнала.

Данный алгоритм применим для любого подканала многочастотной системы передачи с OFDM. На рисунке 1 представлены сигнальные созвездия 35 и 58 подканалов 128-канального сигнала, переданного по каналу с МСИ и АБГШ после процесса адаптации при значении SNR в канале 30 дБ.

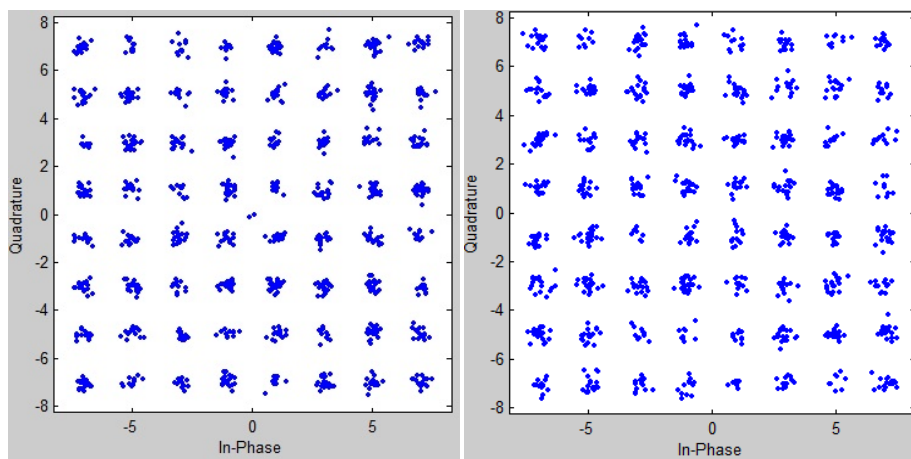


Рис. 1. Сигнальные созвездия на выходе нелинейного фильтра

Для уменьшения количества вычислений при поиске коэффициентов подстройки всех подканалов фильтра оценителя, можно принять во внимание тот факт, что коэффициенты передачи соседних подканалов сигналов с OFDM сильно коррелированы между собой и первоначально осуществить грубую подстройку. Таким образом, поиск коэффициента подстройки для каждого  $i+1$ -го подканала осуществляется относительно найденного коэффициента для  $i$ -го подканала.

Таким образом, с помощью нелинейного алгоритма можно найти матрицу  $\mathbf{K}_1$  фильтра, необходимую для определения матрицы коэффициентов подстройки  $\mathbf{K}$ , представленной графически на [рисунке 2](#). На главной диагонали этой матрицы расположены коэффициенты подстройки информационных подканалов, а остальные ненулевые коэффициенты отвечают за компенсацию МСИ и МКП в многочастотном сигнале.

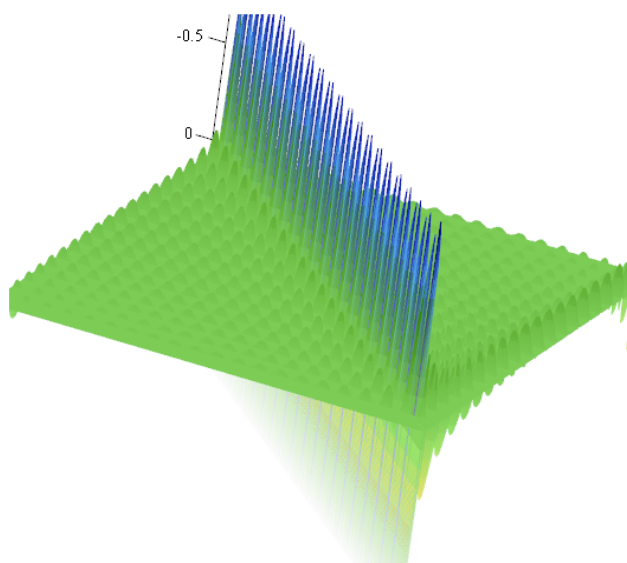


Рис. 2. Графическое представление матрицы коэффициентов фильтра

Для оценки результатов работы было проведено имитационное моделирование системы передачи с OFDM на 256 информационных подканалов с длиной циклического префикса 1/4, 1/8, 1/16 в среде MATLAB. В качестве канала передачи была использована модель канала с МСИ и АБГШ с затуханием 10–30 дБ и уровнем АБГШ 15–30 дБ. На [рисунках 3 и 4](#) представлены обучающие кривые для линейного и нелинейного алгоритмов адаптации для 5 и 125 подканалов системы передачи с ЦП = 1/16 и SNR = 25 дБ.

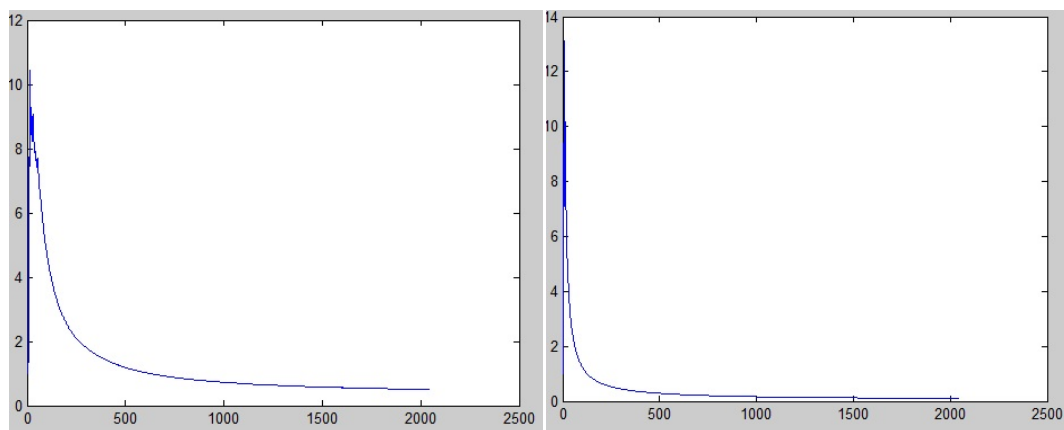


Рис. 3. Кривые обучения фильтров для 5 подканала

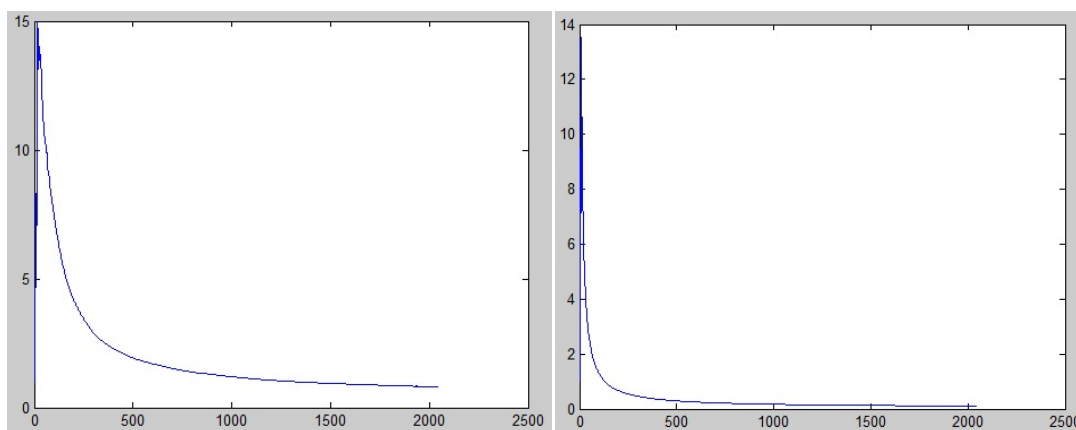


Рис. 4. Кривые обучения фильтров для 125 подканала

Таким образом, можно сделать вывод, что скорость сходимости нелинейного алгоритма значительно выше, нежели у линейного. Для примера, на [рисунке 5](#) представлено сигнальное созвездие на выходе фильтров для 125 подканала после 600 отсчетов переданного сигнала. Как видно из рисунков, нелинейный алгоритм успевает сойтись с достаточной точностью, в отличие от линейного.

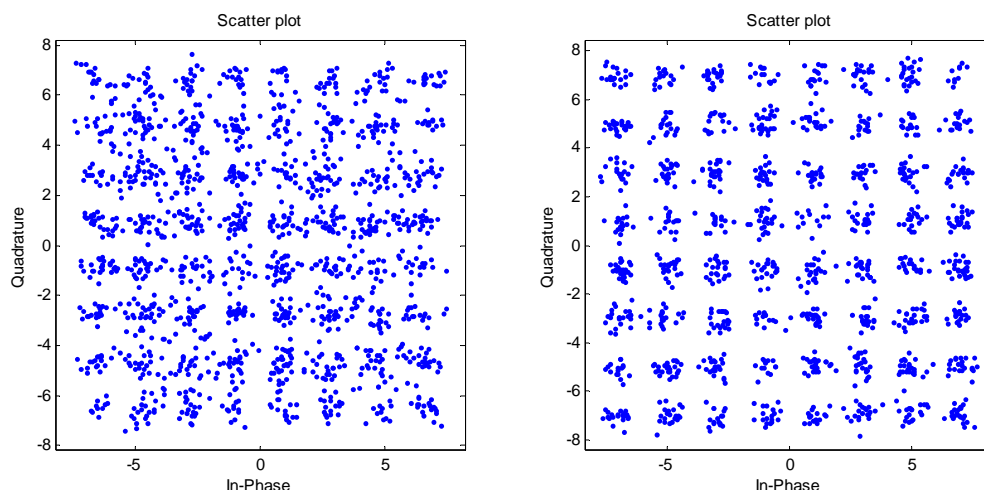


Рис. 5. Сигнальные созвездия на выходах линейного и нелинейного фильтров после 600 отсчетов

## Заключение

По результатам проведенного имитационного моделирования можно сделать вывод о том, что использование нелинейного алгоритма адаптации позволяет не только уменьшить объем вычислений, но и увеличить скорость сходимости коэффициентов передачи фильтра к оптимальным значениям в 2–3 раза по сравнению с линейным алгоритмом. Таким образом, разработанный нелинейный алгоритм адаптивной настройки эквалайзера позволяет существенно упростить процедуру компенсации МСИ и МКП без ухудшения качества приема сигналов.

## Библиографический список

1. **Low-Complexity Time-Domain ICI Equalization for OFDM Communications Over Rapidly Varying Channels/** Tomasz Hrycak // Signals, Systems and Computers, 2006. ACSSC apos; 06. Fortieth Asilomar Conference onVolume, Issue, Oct. 29 2006-Nov. 1 2006 Page(s): 1767–1771.
2. **Зяблов, В. В.** Высокоскоростная передача сообщений в реальных каналах / В. В. Зяблов, Д. Л. Коробков, С. Л. Портной. – М. : Радио и связь, 1991.
3. **МСЭ-Т G.992.3.** Приемопередатчики асимметричной цифровой абонентской линии 2 (ADSL2).
4. **Zero-forcing frequency domain equalization for DMT systems with insufficient guard interval/** Trautmann Stefen // Acoustics, Speech, and Signal Processing – 2003. Proceedings. (ICASSP apos;03). 2003 IEEE International Conference onVolume 4, Issue, 6-10 April 2003 Page(s): IV – 221-4 vol. 4.
5. **Курицын, С. А.** Адаптивные методы обработки сигналов в цифровых и аналоговых системах передачи: учебное пособие / С. А. Курицын. – СПб. : СПбГУТ, 2004.

## Аннотация

*Статья посвящена нелинейному алгоритму адаптивной подстройки вектора весовых коэффициентов для эквалайзера с усилением нуля. Предложенное в статье решение позволяет устранить межсимвольные и межканальные искажения в сигналах OFDM. Результаты имитационного моделирования показали, что скорость сходимости разработанного алгоритма возрастает минимум в 2 раза по сравнению с линейным алгоритмом подстройки весовых коэффициентов.*

**A. Ulyanov, I. Grishin**

*Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications*

## ALGORITHM OF NONLINEAR ADAPTIVE FILTRATION OF OFDM SIGNALS

### Annotation

*The article deals with a new nonlinear adaptive filtering algorithm for Zero Forcing Equalizer. The proposed solution defines the optimum ZFE coefficients, that complete remove intersymbol and intercarrier interference for OFDM. The results of imitation modeling show that the rate of convergence of the nonlinear algorithm is 2 times faster than the rate of linear algorithm.*

**Keywords:** Adaptive nonlinear filtration, Zero Forcing Equalizer, OFDM, Intersymbol interference (ISI), QAM.

**Ульянов Андрей Викторович** – ассистент кафедры «Сети связи и передача данных» Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»

**Гришин Илья Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сети связи и передача данных» Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»

## **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ПОИСКА ФРАГМЕНТОВ РЕЧИ ДИКТОРОВ**

*верификация диктора, обобщенная классификация звуков, система «Диалект», программный комплекс.*

### **Введение**

Основой криминалистического исследования речи является установление комплекса речевых навыков говорящего как сложной социальной, психологической и биологической системы. При этом надо отметить, что выбор конкретных признаков или речевых параметров при производстве экспертизы во многом определяется имеющимся в распоряжении эксперта инструментарием (системой методов и технических средств), позволяющих визуализировать речевой сигнал, проводить необходимые измерения и вычисления, сравнивать и принимать решение об их совпадении или различии.

В настоящее время эксперты имеют ряд инструментальных средств, используемых для решения задачи идентификации говорящего по фонограммам русской речи. Это системы аппаратно-программных комплексов с широким набором инструментальных возможностей для исследования и сравнения акустической природы большинства известных речевых параметров («SIS» Центр Речевых Технологий, «CLS» Kay Elemetrics Corp. и ряд других), а также автоматизированные системы, предназначенные для проведения идентификационного фоноскопического исследования (например, система «Диалект») [1, 2].

Все имеющиеся на вооружении экспертов-фоноскопистов аппаратно-программные комплексы функционально нацелены на выполнение отдельных этапов типового технологического процесса. Однако не существует комплекса, позволяющего выполнять все этапы производства экспертизы. Сложившаяся ситуация приводит к тому, что эксперту-фоноскописту на разных этапах работы приходится пользоваться несколькими программами. Так, довольно распространенной является ситуация, когда при установлении дословного содержания исследуемой фонограммы эксперт прослушивает ее с помощью программы CoolEdit, а текст набирает в программе текстового редактора Microsoft Word.

Другой важной проблемой по организации производства экспертизы является оптимизация работы эксперта.

В настоящее время оптимизация может быть проведена по следующим направлениям работ:

- разработка программного интерфейса, позволяющего эксперту с наименьшими временными затратами выполнять типовые действия;
- реализация возможности в автоматизированном режиме при выполнении нового этапа экспертизы использовать результаты уже выполненных этапов;
- автоматизация некоторых видов работ эксперта (например, этапа создания дословного описания фонограммы или, например, проведения микроанализа фонограмм).

В сложившейся ситуации становится очевидной задача создания аппаратно-программного комплекса, включающего в себя возможность проведения всех основных этапов фоноскопической экспертизы, связывающего все результаты анализа в единое целое, автоматизирующего технологический процесс проведения экспертизы с целью увеличения производительности работы эксперта.

### **Предлагаемая структура универсального комплекса для автоматизации проведения фоноскопической экспертизы**

Как было отмечено выше, фоноскопическая экспертиза проводится комиссией экспертов по трем направлениям работ: исследование речи методами акустического анализа, исследование речи методами лингвистического анализа и техническое исследование фонограмм с целью определения наличия или отсутствия признаков монтажа.

Анализ типового технологического процесса производства экспертизы показал целесообразность выделения в нем следующих основных этапов работ:

1 этап. Ввод в компьютер фонограммы, представленной в аналоговом или в цифровом виде, и сохранение её в нужном формате: в цифровом виде, при выбранных частоте дискретизации, разрядности АЦП и т. д.

2 этап. Составление дословного содержания фонограммы.

3 этап. Лингвистический анализ фонограммы.

4 этап. Акустический интегральный анализ фонограммы.

5 этап. Акустический микро анализ фонограммы.

6 этап. Исследование фонограммы с целью поиска следов монтажа.

7 этап. Другие (дополнительные) исследования фонограммы.

Исходя из возможности разделения типового технологического процесса производства экспертизы на указанные этапы, программное обеспечение разрабатываемого комплекса предлагается построить по модульному



принципу так, чтобы каждый модуль функционально был предназначен для выполнения определенного этапа экспертизы. При этом все модули будут функционировать в рамках одного комплекса, результаты выполнения отдельных этапов экспертизы будут фиксироваться в едином формате с возможностью использования их на любом последующем этапе выполнения экспертизы (т. е. при работе в любом следующем модуле ПО).

Предлагаемая модульная организация ПО комплекса облегчит разделение работы по производству экспертизы между разными экспертами, а также позволит в будущем развивать комплекс в соответствии с новыми возникающими направлениями производства экспертизы.

Кроме того, предлагается в комплексе заложить возможность в автоматизированном режиме фиксировать ход процесса производства экспертизы в файле (назовем его «журналом производства экспертизы») с целью оценки работы эксперта, проверки качества проведения экспертизы, а также использования журнала для обучения экспертов.

### **Краткое описание модулей ПО**

Для выполнения 1 этапа экспертизы. Модуль 1.

Предназначен для ввода в компьютер фонограммы, представленной в аналоговом или в цифровом виде, и сохранения её в нужном формате. Фонограмма вводится в компьютер в выбранном формате, т. е. на нужной частоте дискретизации, разрядности АЦП и выбранном типе сжатия. Данный модуль может не использоваться при производстве экспертизы, если представленная к экспертизе фонограмма изначально записана в требуемом формате.

Для выполнения 2 этапа экспертизы. Модуль 2.

Предназначен для составления дословного содержания фонограммы, сегментации и атрибуции по дикторам, создания «дикторских» звуковых файлов. Распознавание возможно по разработанным новым методам анализа дикторонезависимых признаков речевого сигнала [3]. Составленное дословное содержание фонограммы сохраняется в файле.

Модуль 3.

Предназначен для возможности дополнения дословного содержания фонограммы фонетической транскрипцией (согласно международному фонетическому алфавиту) и/или для постановки связанных с текстом временных меток. Фонетическая транскрипция и временные метки могут быть использованы при выполнении следующих этапов экспертизы (в частности, в комплексе должны быть предусмотрены механизмы автоматизированного использования данной информации).

Для выполнения 3 этапа экспертизы. Модуль 4.

Предназначен для выполнения некоторых видов лингвистического анализа фонограмм. В данном модуле могут быть реализованы возможности проведения таких видов анализа, как, например, анализ интонационных контуров (согласно классификации Е. А. Брызгуновой) [4], анализ дословного содержания фонограммы по его текстовому отображению, статистический анализ длительности пауз.

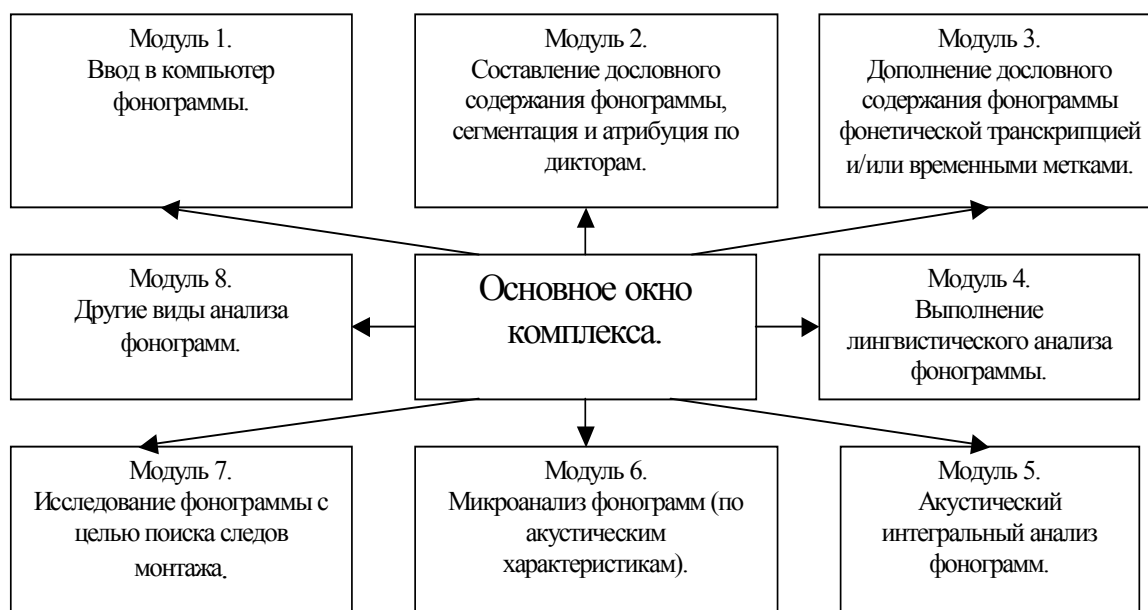


Рис. Структурная схема программного комплекса

Для выполнения 4 этапа экспертизы. Модуль 5.

Предназначен для проведения акустического интегрального анализа фонограмм. Может включать в себя анализ некоторых интегральных характеристик речевых сегментов фонограмм, например, статистический анализ значений основного тона на исследуемом речевом сегменте (ИРС), анализ интегральной длительности вокализованных участков речи для ИРС, оценка среднего спектра ИРС.

Для выполнения 5 этапа экспертизы. Модуль 6.

Предназначен для проведения микроанализа фонограмм (согласно методике «Диалект»). В данном модуле должны быть реализованы возможности проведения тех видов анализа речевого сигнала, которые обычно выполняет эксперт при микроанализе фонограмм. А именно: вычисление спектрограмм, кепстрограмм, мгновенных спектров. Также в данном модуле должны быть реализованы возможности проведения автоматизиро-

ванного поиска идентичных речевых фрагментов, используемых при проведении микроанализа по методике «Диалект».

Для выполнения 6 этапа экспертизы. Модуль 7.

Предназначен для анализа фонограммы с целью поиска следов монтажа. В данном модуле должна быть реализована возможность проведения тех видов анализа сигнала, которые наиболее часто выполняются при поиске следов монтажа. Например, вычисление и визуализация спектрограммы, имеющей разрешение по частоте порядка 1 герца, или вычисление и отображение мгновенных (или средних) спектров, вычисленных для двух временных окон, расположенных слева и справа от указанной временной метки.

Для выполнения 7 этапа экспертизы. Модуль 8.

В данном модуле должны быть реализованы возможности проведения разработанных на основе объективных методов анализа дикторозависимых признаков речевого сигнала [5], статистического анализа и оценки междикторской и внутредикторской вариативности речевых сигналов.

Предлагаемые новые методы и приемы установления словесного содержания разговоров, дифференциации и атрибуции реплик участников разговоров, транскрибирования текстов.

## **Заключение**

Для создания дословного содержания фонограммы предлагается создать интерфейс, позволяющий проводить оперативную сегментацию фонограммы (например, с помощью выделения части сигнала на осциллограмме), дифференциацию и атрибуцию реплик участников разговора (с помощью интерфейса типа «всплывающего меню», вызванного для выбранного сегмента), транскрибирования текстов (с возможностью просушивания нужного сегмента сигнала в различных режимах).

Для статистического анализа и оценки междикторской и внутредикторской вариативности речевых звуков предлагается разработать методы, дающие сравнительную оценку для выбранных речевых сегментов реализациям фонем, отвечающих различным типам артикуляции. Предлагается предусмотреть в комплексе для гласных фонем возможность визуального отображения расположения реализаций на плоскости первой – второй формант для выделенного фрагмента фонограммы. Количественное сравнение двух таких отображений может дать оценку междикторской и внутредикторской вариативности.

## Библиографический список

1. **Попов, Н. Ф.** Идентификация лиц по фонограммам русской речи на автоматизированной системе «Диалект». Пособие для экспертов / Н. Ф. Попов, А. Н. Линьков, Н. Б. Кураченкова, Н. В. Бойчаров; под ред. А. В. Фесенко. – Москва : Войсковая часть 34435, 1996.
2. **Тимофеев, И. Н.** Применение автоматизированной системы «Диалект» на базе компьютерной речевой лаборатории CLS (США) при решении задач идентификации дикторов: метод. рекомендации / И. Н. Тимофеев. – М. : ЭКЦ МВД России, 2000.
3. **Бородко, А. В.** Дикторонезависимые признаки речевого сигнала / А. В. Бородко, Р. И. Виноградов // Труды учебных заведений связи. СПбГУТ. – СПб., 2008. – № 178.
4. **Брызгунова, Е. А.** Интонация / Е. А. Брызгунова // Русская грамматика. Том 1. – М. : Наука, 1982.
5. **Бородко, А. В.** Идентификация пользователей по голосу с применением гибридного механизма / А. В. Бородко, Р. И. Виноградов. – СПб. : Техника связи, 2012. – № 1.

## Аннотация

*Для создания системы верификации диктора в статье была предложена структура программного комплекса, которая использует как рекомендуемые для осуществления экспертиз, так и авторские методы, осуществляющие обобщенную классификацию фонограмм и их привязку к диктору. Представленная в статье система идентификации диктора основана на выделении речи из фонограмм и последующем сравнении биометрических признаков (содержащихся в голосе индивидуальных, идентификационно значимых признаков личности). Уделяется внимание устоявшейся структуре систем распознавания.*

**A. Borodko**

*Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications*

## PROGRAM DEVELOPMENT FOR SPEAKER DETECTION AND TRACKING IN CONVERSATIONAL SPEECH

## Annotation

*This paper introduces an approach of development speaker detection software complex, with particular focus on the recent additions and updates to the suite of algorithms and software tools in speaker recognition and detection. In addition, show how different components of the detection and tracking algorithms contribute to the overall process of speaker recognition.*

**Keywords:** speaker verification, speaker detection, generalized sound classification system, software package.

**Бородко Александр Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сети связи и передача данных» Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»

# ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ СПбГУТ

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

### ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСЯМ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ, ПОДАВАЕМЫМ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ

#### ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ

1.1 Редакция принимает материалы (рукописи научных статей на русском или английском языках и сопроводительные документы), в которых приводятся результаты научной деятельности автора(ов).

1.2 Прием материалов осуществляется лично от авторов (наб. р. Мойки 61, каб. 269), **через сайт журнала [www.itt.sut.ru](http://www.itt.sut.ru)**.

1.3 В журнале не публикуются ранее опубликованные результаты научной деятельности автора(ов).

1.4 Подаваемые для публикации рукописи должны быть законченными работами, однако могут быть продолжающимися (разбитые на части и имеющие выводы по частям).

1.5 Результаты исследований должны соответствовать одной из научной отрасли: физико-математической (01.02.00, 01.04.00); технической (05.12.00, 05.13.00, 05.27.00), экономической (08.00.05 - экономика и управление в сфере ИТ и телекоммуникаций).

1.6 Материалы представляются в электронном виде (архив *tar/zip*) в следующем комплекте:

Файл 1 – рукопись научной статьи в формате MS Word (.doc). Если в рукописи присутствуют рисунки, необходимо приложить их в исходных форматах.

Файл 2 – скан первой страницы рукописи, подписанной автором(ами) - не представляется при личной подаче.

Файл 3 – информация об авторах, включая персональные данные и согласие на их обработку (фамилия, имя отчество полностью, дата рождения, место работы, ученая степень и звание, должность, паспортные сведения (серия, номер, дата выдачи, кем выдан), контактный e-мэйл, телефон) в формате MS Word (.doc).

Файл 4 – информация об авторах (без персональных данных) на английском языке в формате MS Word (.doc).

Файл 5 – экспертное заключение о возможности опубликования рукописи в открытом доступе, заверенное по месту обучения или работы в сканированном виде. Авторам следует предусмотреть наличие письменного согласия на публикацию от лиц или организаций, по заказу которых производились те или иные исследования, прямые или косвенные результаты которых планируются к публикации в журнале. Отказ в представлении такого согласия может послужить отказом в публикации рукописи.

Файл 6 (для студентов-исследователей, магистров, аспирантов и соискателей ученых степеней) – рецензия научного руководителя, подпись научного руководителя заверяется по месту его работы в сканированном виде.

Рецензия должна содержать:

- актуальность рассматриваемых результатов;
  - научную новизну предполагаемых решений;
  - критический обзор статьи (включая замечания и предложения по их устранению);
  - определение возможности публикации статьи в журнале.
- подпись и дату рецензирования, заверение подписи.

1.7 После получения материалов в полном объеме (п. 1.6) автору отправляется для заключения лицензионный договор о передаче неисключительных прав на использование произведения (может быть в виде оферты) и квитанция на оплату организационного взноса.

Редакция оставляет за собой право отбора рукописей для журнала и затребовать дополнительные документы.

1.8 Рукописи и носители информации авторам не возвращаются, гонорар не выплачивается.

1.9 Все рукописи проходят внешнюю экспертную оценку – рецензирование. При отрицательном заключении рукопись отклоняется для публикации.

1.10 При наличии положительной рецензии с рекомендацией рукописи к публикации или рекомендацией доработать рукопись (устранить замечания) и оплаченного организационного взноса, рукопись передается на предпечатную подготовку. При передаче на предпечатную подготовку рукописи, устанавливается срок ее выхода из печати. При отрицательной повторной рецензии рукопись отклоняется для публикации.

1.11 В процессе предпечатной подготовки рукопись вычитывается редактором/корректором. В это время редактор/корректор будет обращаться к автору(ам) для исключения неточностей, ошибок, опечаток и пр. по указанным автором(ами) e-мэйлу/телефону.

1.12 После второй корректуры рукопись ставится в выпуск, подписывается в печать. Внесение авторских исправлений после подписания рукописи/выпуска в печать невозможно.

#### ТРЕБОВАНИЯ К ФАЙЛУ РУКОПИСИ

2.1 Объем текста научной статьи – не менее 8 и не более 12-ти машинописных страниц (с рисунками, таблицами, библиографией). Формат страницы – А4, при этом каждое поле должно быть 25 мм, за исключением левого – 30 мм. Абзацный отступ 10 мм.

2.2 На первой странице рукописи до текста указываются УДК, фамилии, инициалы авторов, название статьи, ключевые слова.

2.3 Структура рукописи следующая:

УДК (размер шрифта 14, расположение текста по левому краю); для определения УДК используйте on-line классификатор [www.udc.org](http://www.udc.org);

фамилия, инициалы автора (авторов) (с расстановкой по алфавиту) с указанием места обучения или работы (размер шрифта 14, расположение текста по левому краю);

название рукописи (размер шрифта 14, заглавные буквы, расположение текста по левому краю);

ключевые слова (размер шрифта 12, расположение текста по ширине);

текст рукописи (размер шрифта 14, расположение текста по ширине):

введение;

пункты и подпункты;

заключение (выводы);

библиографический список (размер шрифта 14, расположение текста по ширине);

аннотация (размер шрифта 14, расположение текста по ширине) приводится на отдельной странице после библиографического списка.

На английском языке (на русском, если язык рукописи английский) представляются: фамилия и имя автора, место работы или учебы, название статьи, аннотация (абстракт), ключевые слова, библиографический список, сведения об авторе(ах). При написании аннотации рекомендуем использовать статью «Сысоев, П. В. Правила написания аннотации / П. В. Сысоев // Иностранные языки в школе / гл. ред. Н. П. Каменецкая. – 2009. – N4. – С.81-83».

2.4 Текст рукописи должен быть тщательно вычитан и подписан всеми авторами на первой странице, правка текста и исправление рисунков, корректировка аннотации выполняются редактором журнала совместно с автором(ами).

2.5 Верстку производить с межстрочным интервалом «1» по приведенным требованиям, стили и макросы не применять.

2.6 Буквы в тексте и формулах латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов – прямым шрифтом. Математические символы  $\lim$ ,  $\lg$ ,  $\ln$ ,  $\arg$ ,  $\sin$ ,  $\min$  и т. д. набираются прямым шрифтом.

2.7 Не следует применять сходные по начертанию буквы латинского, греческого и русского алфавитов, использовать собственные макросы и рисунки для букв.

2.8 Следует различать букву О и ноль 0; дефис «-», знак минуса и тире «—».

2.9 Формулы должны быть набраны только в редакторе MS Equation, а отдельные символы и буквы формул в тексте статьи должны быть набраны в редакторе MS Word (не в Equation!). Длинные формулы следует разбивать на независимые фрагменты (каждая строка – отдельный объект). Нумеровать нужно только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

2.10 Нельзя использовать рисунки и таблицы для размещения формул.

2.11 Рисунки и фотографии располагаются в тексте. Все надписи на рисунках и фотографиях должны быть выполнены таким же начертанием и размером шрифта как и основной текст.

2.12 Ширина таблиц (шрифт 12 pt) не должна превышать ширину страницы.

2.13 Все таблицы, графики, схемы и рисунки должны быть подписаны и обязательно оформлены с переводом в формат MS Word.

2.14 На рисунках буквы латинского алфавита в сканированном виде также набираются курсивом, а буквы греческого и русского алфавитов – прямым шрифтом.

2.15 Перечень источников приводится общим списком в конце статьи. Составляется в соответствии с последовательностью ссылок в тексте. Ссылки на источники в тексте приводятся в квадратных скобках.

2.16 Примеры оформления библиографических описаний различных изданий приведены в ГОСТ Р 7.0.5 2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Важная информация. Неисключительные права на все материалы, опубликованные в журнале принадлежат СПбГУТ. Все материалы, авторские права на которые принадлежат СПбГУТ, могут быть воспроизведены при наличии письменного разрешения от СПбГУТ. Ссылка на первоисточник обязательна. Настоящие требования могут быть изменены без оповещения. Актуальные требования будут расположены на сайте журнала — <http://www.itt.sut.ru>.

#### Минимальные системные требования для просмотра издания:

Тип компьютера, процессор, сопроцессор, частота: Pentium IV и выше / аналогичное; оперативная память (RAM): 256 Мб и выше; необходимо на винчестере: не менее 64 Мб; ОС MacOS, Windows (XP, Vista, 7) / аналогичное; видеосистема: встроенная; дополнительное ПО: Adobe Reader версия от 7.X или аналогичное. Защита от незаконного распространения: реализуется встроенными средствами Adobe Acrobat.