

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

научное рецензируемое издание
электронный научный журнал
выпуск 4(8), 2014

TELECOM IT

electronic scientific journal

vol 8, N: 4(2014)

ISSN 2307-1303



ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

электронный научный журнал

научное рецензируемое издание

TELECOM IT

electronic scientific journal

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

Электронное представительство журнала
www.itt.sut.ru, e-mail: itt@spbgut.ru

Размещение журнала в РИНЦ (elibrary.ru) осуществляется по договору от 20 февраля 2013 года № 59-02/2013

Рукописи проходят редакционно-издательскую подготовку
Электронное издание. Цена свободная

Международная редакционная коллегия

Баскин Л. М., д-р ф.-м. наук, профессор, СПбГУТ, Россия
Кучерявый А. Е., д-р техн. наук, профессор, СПбГУТ, Россия
Кучерявый Е. А., канд. техн. наук, PhD, senior member IEEE, профессор департамента электроники и коммуникаций, Технологический университет Тампере, Финляндия
Буйневич М. В., д-р техн. наук, профессор, СПбГУТ, Россия
Макаров В. В., д-р экон. наук, профессор, СПбГУТ, Россия
Машков Г. М., д-р техн. наук, профессор, СПбГУТ, Россия
Сеилов Ш. Ж., д-р экон. наук, президент Казахской академии инфокоммуникаций, Казахстан

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 журнала
Аникевич Е. А., литературный редактор, канд. техн. наук
Аникевич Е. М., корректура, верстка

Неисключительные права на все материалы, опубликованные в настоящем журнале принадлежат СПбГУТ. Воспроизведение, копирование, распространение возможно при наличии письменного разрешения от СПбГУТ. По вопросу приобретения неисключительных прав и использования журнала обращайтесь по тел. (812) 326-31-63, доб. 1388 или itt@spbgut.ru. Ссылка на первоисточник обязательна.

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

Settler and publisher 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

Electronic representative of the Journal
www.itt.sut.ru, e-mail: itt@spbgut.ru

The Journal is included in Russian Science Citation Index (RINTS or Science index)

The electronic scientific journal has review institute
Free price

Members of International Edition

Baskin L., Dr. Of Science, (Physical and Math), professor SUT, Russia
Koucheryavy Y., PhD, Senior Member IEEE, Professor of Department of Electronics and Communications Engineering Tampere U of Tech
Koucheryavy A., Dr. Of Science, (Eng-ing), professor SUT, Russia
Buynovich M., Dr. Of Science, (Eng-ing), professor SUT, Russia
Makarov V., Dr. Of Science, (Economics), professor SUT, Russia
Mashkov G., Dr. Of Science, (Eng-ing), professor SUT, Russia
Seilov Sh., Dr. Of Science, (Economics), president of Academy of infocommunications, Kazakhstan

Editorial Office

S. Bachevsky, editor-in-chief, Dr. Of Science, (Eng-ing), professor
S. Dotsenko, deputy editor-in-chief, Dr. Of Science, (Eng-ing), professor
A. Vladyko, CEO & Science Editor, Cand. Of Science, (Eng-ing)
L. Minakov, COO & CIO
E. A. Anikevich, literary editing, Cand. Of Science, (Eng-ing)
E. M. Anikevich, proofreading, page proofs

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

В оформлении обложки была использована иллюстрация, расположенная по адресу https://lh6.googleusercontent.com/-GU8wkjQs_v4/VG52SiHpJTI/AAAAAAAAACs/sdU7jZg9Gml/w1758-h1138/1374406063_41d3388ebe605a3a04ed.jpg

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМЫ, СЕТИ И УСТРОЙСТВА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

- 4 Аль-Кадами Н. А.**
Оценка и сравнительный анализ алгоритмов маршрутизации для гомогенных и гетерогенных беспроводных сенсорных сетей
- 23 Галкин А. М.**
Законодательные аспекты построения сетей связи в части пропуска голосового трафика
- 29 Киричек Р. В., Парамонов А. И., Прокопьев А. В., Кучерявый А. Е.**
Эволюция исследований в области беспроводных сенсорных сетей
- 42 Небаев И.А.**
Анализ метода повышения скорости передачи данных на основе перфорированных сверточных кодов в квазистатичном беспроводном канале с замираниями
- 51 Мутханна А. С., Кучерявый А. Е.**
D2D – коммуникации в сетях мобильной связи пятого поколения 5G
- 64 Сучков Е. С.**
Аспекты эволюции архитектуры базовой сети от GSM/UMTS к EPC. Варианты реализации голосовых сервисов в сетях с пакетной коммутацией каналов
- 78 Хакимов Р. И.**
Использование вероятностных оценок в проблеме поиска причин дефектных звонков в сети сотовой связи 3G (WCDMA)

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- 88 Владимиров С. С.**
Реализация четырехпараметрической модели канала Гилберта-Эллиотта в среде OCTAVE/MATLAB
- 97 Когновицкий О. С.**
Матричный метод декодирования эквидистантного циклического кода над полем $GF(p^k)$ по k произвольным линейно-независимым элементам
- 107 Макаров Л. М.**
Модель текстового контент анализатора

ЭЛЕКТРОНИКА

- 118 Калинин Е. В.**
Особенности выбора режима работы электронно-компонентной базы СВЧ, в процессе проведения испытаний на радиационную стойкость

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- 126 Штеренберг С. И., Виткова Л. А., Просихин В. П.**
Методика применения концепции адаптивной саморазвивающейся системы
- 134 Волостных В. А., Штеренберг С. И., Гвоздев Ю. В.**
Проблемы обеспечения безопасности персональных данных в высших учебных заведениях

СИСТЕМЫ, СЕТИ И УСТРОЙСТВА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.391

Н. А. Аль-Кадами

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

N. A. Al-Kadami

Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University
of Telecommunications

ОЦЕНКА И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ МАРШРУТИЗАЦИИ ДЛЯ ГОМОГЕННЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

THE COMPARE OF THE ROUTING ALGORITHMS
FOR THE HOMOGENEOUS AND HETEROGENEOUS
WIRELESS SENSOR NETWORKS

В статье проводится оценка и сравнительный анализ алгоритмов маршрутизации и самоорганизации для беспроводных сенсорных сетей со стационарными узлами на плоскости. Сравнение алгоритмов осуществляется по результатам моделирования на MATLAB. В качестве показателей для сравнения используются длительность стабильного периода функционирования сенсорной сети, остаточная энергия, длительности периодов времени до гибели первого и последнего сенсорных узлов. Анализируются алгоритм прямой передачи DT и алгоритмы кластеризации LEACH, SEP, TEEN, DEEC. Сравнение алгоритмов производится для гомогенной, двухуровневой и многоуровневой гетерогенных сенсорных сетей. По результатам оценки и сравнительного анализа наиболее эффективным во всех случаях признан алгоритм TEEN.

In self-organizing networks, the sensor node resources are limited in terms of processing capability, memory, battery power capacity and storage space, so they called with the resource constrained nature networks and this impels various challenges in its design and its performance. Among all those challenges, Limited battery capacity and is one of the most important criteria for routing protocol in wireless sensor networks (WSNs). Thus, the routing protocols for wireless sensor networks (WSNs) must be energy efficient in order to maximize the network lifetime. In this article we simulated clustering routing protocols LEACH, SEP, TEEN, DEEC and evaluated their performance by comparing with direct transmission routing protocol (DT) for homogeneous, two-level and multilevel heterogeneous Wireless Sensor Networks in term of network life-time, residual energy and stability period using MATLAB simulation platform.

беспроводные сенсорные сети, самоорганизующиеся сети, алгоритмы выбора головного узла, многоуровневые беспроводные сенсорные сети.

homogeneous and heterogeneous Wireless Sensor Networks, self-organizing networks, cluster head selection algorithms, multi-layer wireless sensor networks.

Введение

В настоящее время развитие сетей связи осуществляется на основе концепции Интернета Вещей [1–3]. Технологической базой для реализации концепции Интернета Вещей являются беспроводные сенсорные сети [4, 5]. Беспроводные сенсорные сети (БСС) представляют собой самоорганизующиеся сети и состоят из множества распределенных в пространстве беспроводных сенсорных узлов, предназначенных для мониторинга характеристик окружающей среды или объектов, расположенных в ней [6].

Ресурсы сенсорных узлов в беспроводных сенсорных сетях ограничены с точки зрения возможности обработки информации, пропускной способности, объема памяти, вычислительных возможностей, что существенно отличает беспроводные сенсорные сети от других сетей [7]. Структура беспроводной сенсорной сети приведена на рисунке 1.

Сенсорные узлы БСС довольно часто могут функционировать в условиях, когда отсутствует возможность гарантированного электропитания или даже замены батареи сенсорного узла. Поэтому важнейшей характеристикой БСС является остаточная энергия [8, 9]. Не случайно, в настоящее время энергетические вторжения в БСС рассматриваются как наиболее эффективные с точки зрения снижения длительности жизненного цикла сети [10–12]. Сенсорные сети могут быть разделены на два основных типа: гомогенные (однородные) и гетерогенные (неоднородные) сенсорные сети [13]. В однородных беспроводных сенсорных сетях все сенсорные узлы одинаковы с точки зрения энергии батареи и аппаратной сложности. Гетерогенные же сенсорные сети могут содержать два, три или больше типов узлов, соответственно с различными энергетическими и функциональными возможностями.

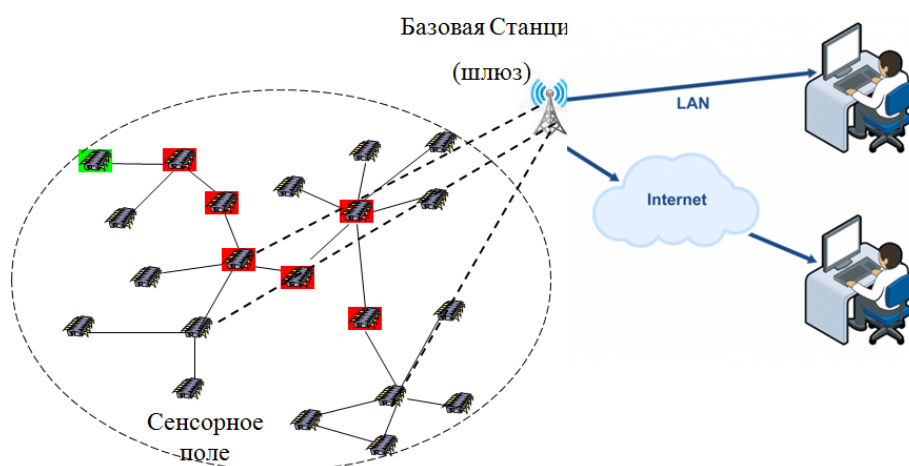


Рис. 1. Структура БСС

Алгоритмы маршрутизации и самоорганизации в БСС делятся на следующие группы:

1. Неиерархические для гомогенных сенсорных сетей на плоскости.
2. Иерархические для гомогенных и гетерогенных сенсорных сетей.
3. Основанные на местоположении (location based): Информация о местонахождении узла может быть использована для маршрутизации.

В последнее время в исследовательских работах появилась еще одна группа алгоритмов маршрутизации и оптимизации для БСС – специализированные алгоритмы для n-мерного пространства [14–16], но в данной работе эти алгоритмы не рассматриваются. Также не рассматриваются специализированные алгоритмы для мобильных сенсорных сетей [17–19], т. е. предполагается, что сенсорные узлы располагаются в фиксированной точке пространства.

Примером неиерархического алгоритма может быть алгоритм прямой передачи DT (Direct-Transmission), когда каждый сенсорный узел передает информацию непосредственно к шлюзу или базовой станции независимо от расстояния [20].

В иерархических алгоритмах маршрутизации узлы самоорганизуются в кластеры и головной узел выбирается для каждого кластера. Головные узлы осуществляют сбор данных с узлов – членов кластера, производят их обработку и передачу информации на шлюз или базовую станцию. Такое агрегирование данных в головных узлах значительно уменьшает энергопотребление в сети и увеличивает длительность жизненного цикла. Пример кластерной БСС показан на [рисунке 2](#).

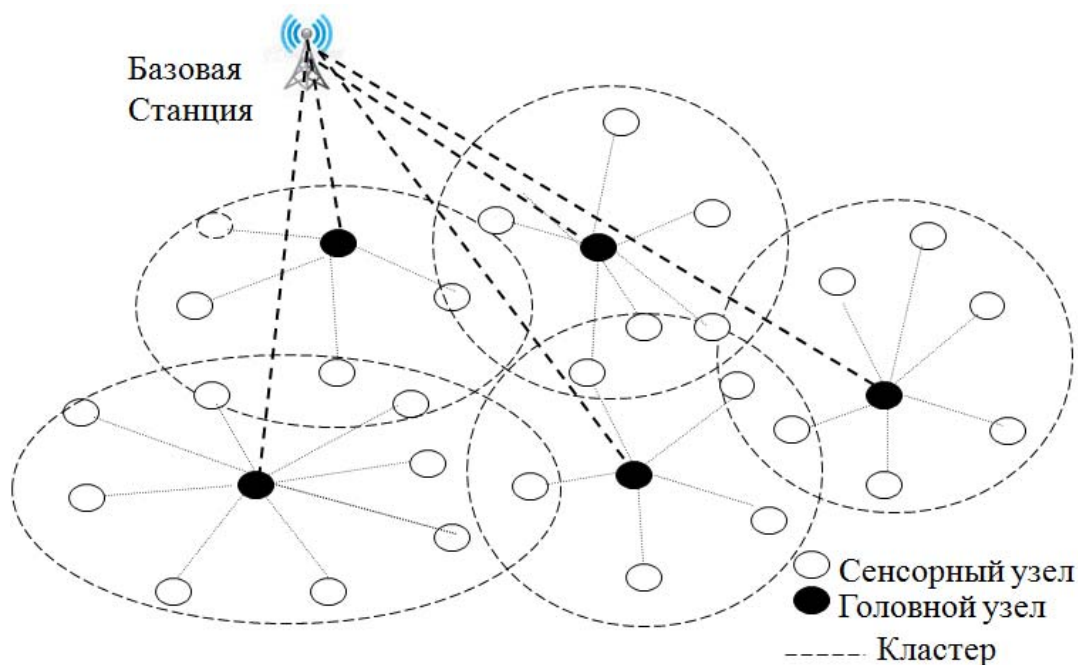


Рис. 2. Кластерная БСС

В статье проводится сравнительный анализ широко используемых при построении БСС алгоритмов маршрутизации и самоорганизации: уже упоминавшийся DT, LEACH (Low Energy Adaptive Cluster Hierarchy), SEP (Stable Election Protocol), DEEC (Distributed Energy Efficient Clustering) и TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient Protocol).

Случайный выбор головных узлов приводит к созданию кластеров различных размеров. В иерархических алгоритмах маршрутизации и самоорганизации каждый из членов кластера имеет возможность стать головным узлом, головной узел задаёт расписание для членов кластера и т. д.

1. LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

Иерархический протокол адаптивной кластеризации с низким потреблением энергии LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [21] является одним из первых иерархических протоколов и предполагает обеспечение баланса расхода энергии, Жизненный цикл сети состоит из этапа формирования кластера и этапа передачи собранной информации шлюзу, на [рисунке 3](#) показаны этапы жизненного цикла сети [6].

1.1 Формирования кластера (Set-up phase)

В фазе формирования кластера каждый сенсорный узел генерирует случайное число от 0 до 1. Каждый сенсорный узел имеет порог $T(n)$, который соответствует предварительно определённому числу головных сенсорных узлов в сети. Если интегрированное случайное число меньше, чем $T(n)$, то сенсорный узел может стать головным в текущем раунде жизни БСС, в противном случае этот узел остаётся только членом кластера. Вычисление $T(n)$ является ключевой задачей при реализации алгоритма LEACH.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P * (r \bmod \frac{1}{P})} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

В (1) P – предопределенный процент головных узлов среди всех сенсорных узлов. Оптимальное значение P оценивается в 5 % от общего числа сенсорных узлов.

Переменная r соответствует текущему интервалу функционирования сенсорной сети, G обозначает число сенсорных узлов, которые не были выбраны головными за последние $1/p$ интервалов. Кроме того, при выборе головного узла другие сенсорные узлы выбирают к какому кластеру они хотят присоединиться на основе мощности получаемого сигнала (RSS– Received Signal Strength) от головного узла.

Когда все узлы организовались в кластеры, головной узел создает расписание передачи информации на основе метода TDMA, что гарантирует отсутствие коллизий при передаче сообщений.

1.2 Передача данных (Steady-state phase)

Головной узел широкополосным способом рассылает расписание передачи и запрашивает своих членов кластера о передаче данных. Узлы передают данные в отведенные для этого интервалы TDMA. После получения сообщений от всех узлов головной узел формирует свои сообщения и передает эти сообщения на шлюз или базовую станцию (рис. 3).

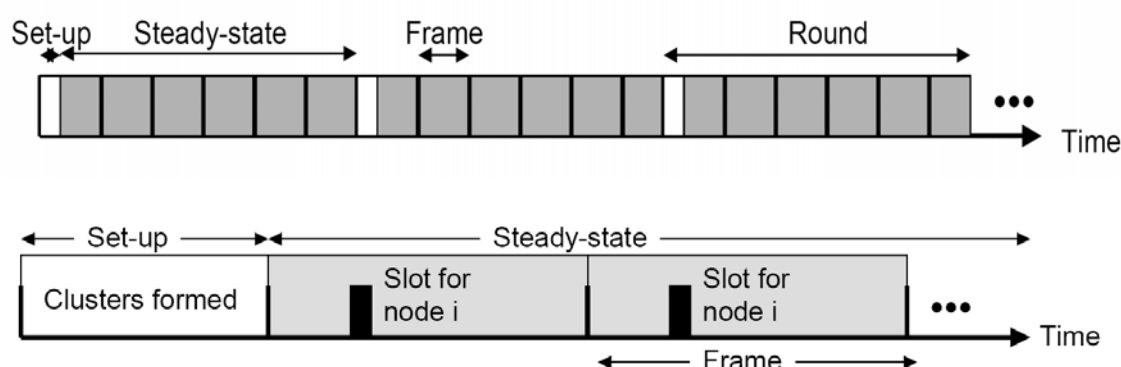


Рис. 3. Этапы функционирования протокола LEACH

Для распределения энергетической нагрузки по сети головные узлы периодически переизбираются, и каждый из членов кластера имеет возможность стать головным узлом.

2. TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient Protocols)

TEEN [22] алгоритм базируется на методе кластеризации LEACH. Каждый узел в кластере периодически становится головным узлом. Сеть с использованием алгоритма TEEN также имеет иерархическую структуру на основе кластерной организации.

Головной узел посылает своим узлам «жесткий» (hard) и «мягкий» (soft) порог:

- Жесткий порог (*Hard Threshold*): Узел посылает информацию головному узлу, только если значение энергии находится в интересующих пределах.
- Мягкий порог (*Soft Threshold*): Узел посылает информацию головному узлу только тогда, когда значение энергии изменилось как минимум на значение порога.

3. SEP (Stable Election Protocol)

Алгоритм SEP [23] разработан для выбора головного узла в БСС исходя из предположения, что в сети возможно наличие двух типов узлов с точки зрения их энергии: обычные и продвинутые узлы. Последнее сразу же определяет, что в данном случае сеть является гетерогенной. Энергия продвинутых узлов больше, чем энергия обычных. При этом для обычных узлов начальная энергия равна E_0 , в то время как для продвинутых $E_0(1 + a)$.

Предположим, что мы имеем n узлов в сети, а процент продвинутых узлов равен m . Тогда:

$$n(1 - m)E_0 + nmE_0(1 + a) = nE_0(1 + am). \quad (2)$$

4. DEEC (Distributed Energy Efficient Clustering)

В [24] авторы предложили новый распределенный энергосберегающий алгоритм кластеризации для неоднородных беспроводных многоуровневых сенсорных сетей, который назвали DEEC.

DEEC оценивает вероятность выбора головного узла в многоуровневых гетерогенных БСС в соответствии со следующей формулой:

$$p_i = p_{opt} \left[1 - \frac{\bar{E}(r) - E_i(r)}{\bar{E}(r)} \right] = p_{opt} \frac{E_i(r)}{\bar{E}(r)}. \quad (3)$$

При этом в алгоритме DEEC средняя энергия сети $E(r)$ для произвольного раунда r рассчитывается как:

$$\bar{E}(r) = \frac{1}{N} E_{total} \left(1 - \frac{r}{R} \right). \quad (4)$$

R обозначает общее количество раундов жизни сети и оценивается следующим образом:

$$R = \frac{E_{total}}{E_{round}}, \quad (5)$$

где E_{total} является суммарно энергией в сети, а E_{round} – это расход энергии в течение раунда.

5. Сравнительный анализ алгоритмов DT, LEACH, SEP, DEEC, TEEN

При сравнительном анализе алгоритмов маршрутизации и самоорганизации для гомогенных и гетерогенных БСС использовались следующие показатели:

- **Жизненный цикл.** Жизненный цикл БСС может быть описан с помощью трех показателей:
 - длительность интервала времени от начала функционирования БСС до момента гибели первого сенсорного узла,
 - длительность интервала времени до момента времени, когда в живых остается заданный процент сенсорных узлов,
 - длительность интервала времени до гибели последнего сенсорного узла.
- **Стабильность.** Длительность интервала времени от начала функционирования БСС до момента гибели первого сенсорного узла.
- **Нестабильность.** Длительность интервала времени от момента гибели первого сенсорного узла до момента времени гибели последнего.
- **Число живых узлов и число погибших узлов.**

Сравнительный анализ алгоритмов маршрутизации и самоорганизации маршрутизации DT, LEACH, SEP, DEEC и TEEN проводился с использованием MATLAB и типовых параметров сенсорных сетей, при которых, как правило, проводится моделирование (таблица 1 и 2). В таблице 2 приведены значения констант для алгоритма TEEN. Радиомодель соответствует модели Кся-Бертони [25].

ТАБЛИЦА 1. Параметры моделирования

Обозначение	Значение	Размерность
N	100	Шт
P	5	%
Размеры поля (X, Y)	(100, 100)	М
Расположение базовой станций (x, y)	(100, 150)	М
E_s	0,5	Дж
E_{elec}	70	нДж
Постоянное усиление ϵ_{fs}	10	пДж/бит/м ²
Мультисетевая постоянная ϵ_{mp}	0,0013	пДж/бит/м ⁴
Размер пакета	4096	Бит

Обозначение	Значение	Размерность
Стоимость сбора данных одного бита E_{DA}	5	нДж
Потери на участках (экспоненциальные)	87	М

ТАБЛИЦА 2. Начальные значения при моделировании для алгоритма TEEN

Обозначение	Значение
Жесткий порог (<i>Hard Threshold</i>)	100
Мягкий порог (<i>Soft Threshold</i>)	2

При сравнительном анализе использовалось несколько сценариев построения БСС.

5.1 Первый сценарий

В первом сценарии сенсорные узлы случайно распределены на плоскости размером 100 м*100 м. Число узлов в сети составляет 100 и базовая станция находится на границе сенсорного поля с координатами (150,50) м (рис. 4).

В этом сценарии сравним алгоритм прямой передачи (DT) и алгоритмы иерархической маршрутизации LEACH и TEEN для гомогенных (однородных) сенсорных сетей. На рисунках 5 и 6 приведены характеристики для алгоритма прямой передачи в начале жизненного цикла и после 180 раундов.

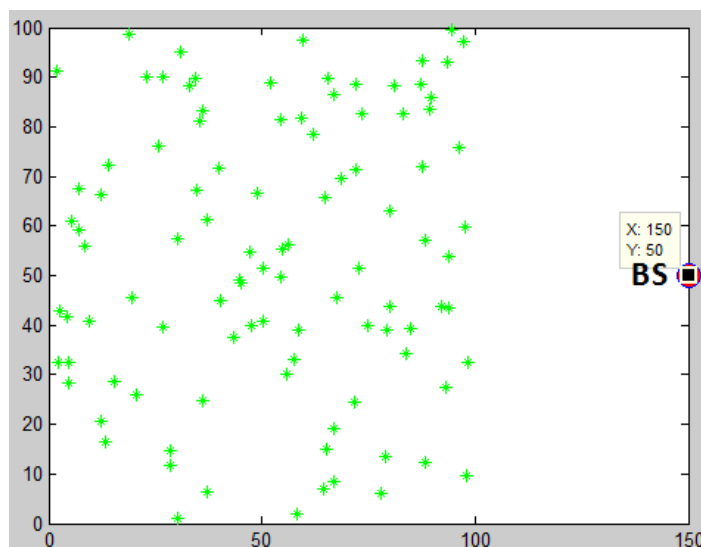


Рис. 4. Случайное расположение узлов

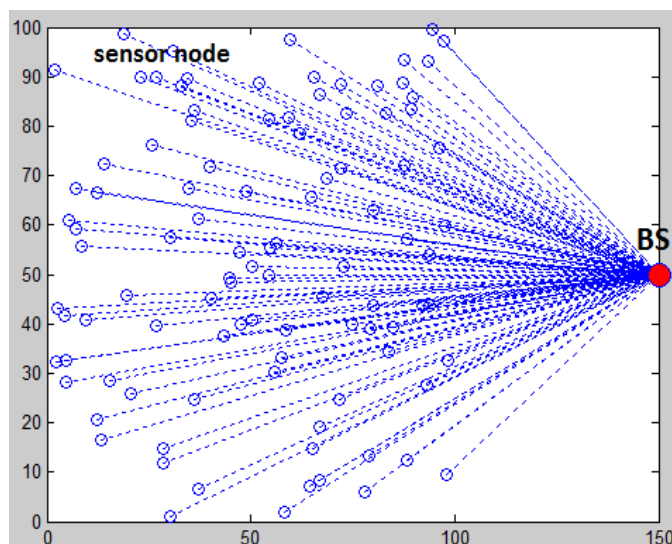


Рис. 5. Прямая передача. Начальное состояние

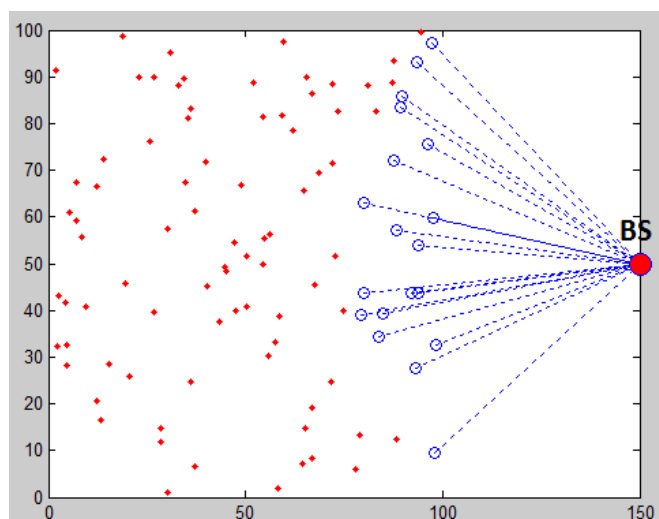


Рис. 6. Состояние после 180 раундов

При использовании алгоритма прямой передачи DT сенсорный узел передает данные непосредственно на базовую станцию независимо от расстояния. Как видим, при этом узлы, которые находятся достаточно далеко от базовой станции, гибнут первыми. Поэтому, эффективное применение DT целесообразно для сенсорных полей небольшого размера.

На [рисунке 7](#) показана агрегация сенсорных узлов в кластеры при использовании алгоритмов маршрутизации LEACH и TEEN, а [рисунком 8](#) иллюстрирует передачу информации от головных узлов на базовую станцию.

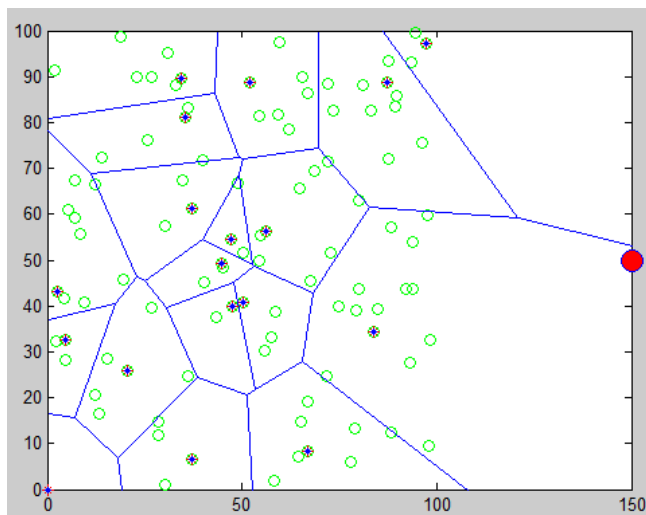


Рис. 7. Кластеризация БСС

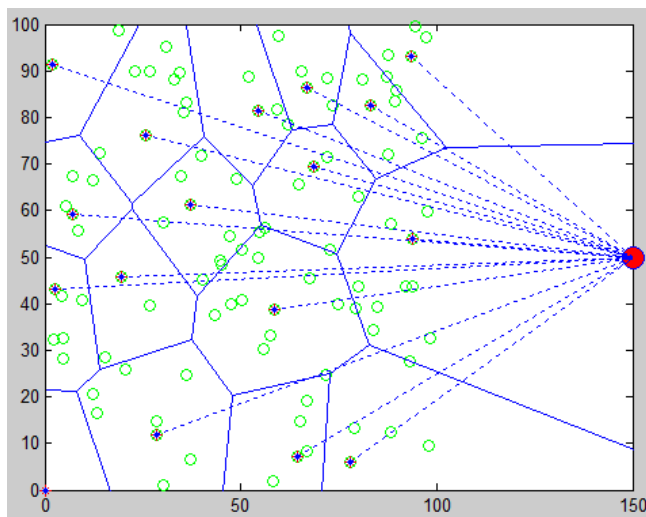


Рис. 8. Случайное расположение узлов

По результатам моделирования установлено, что алгоритм DT имеет меньшие период стабильности сети и жизненный цикл. Первый узел для алгоритма DT погиб уже в 154 раунде, тогда как для алгоритма LEACH это произошло в 621 раунде, а для алгоритма TEEN в 1130 раунде.

На [рисунке 9](#) показана длительность периода стабильности для всех указанных выше алгоритмов, а на [рисунке 10](#) – зависимость остаточной энергии сети от числа раундов.

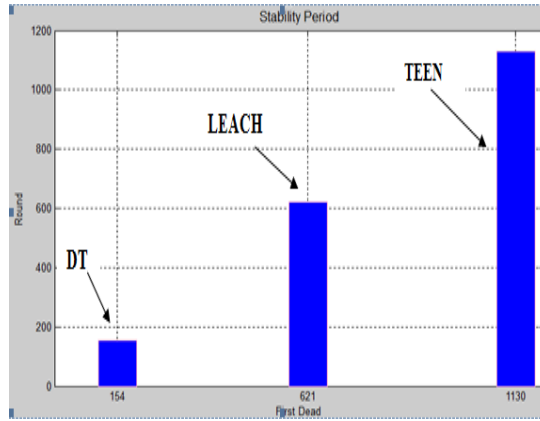


Рис. 9. Длительность периода стабильности

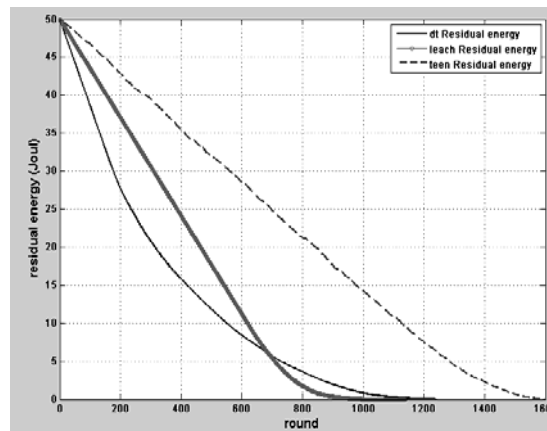


Рис. 10. Остаточная энергия

Таким образом, алгоритмы кластеризации существенно эффективнее алгоритма прямой передачи. Для алгоритма TEEN длительность периода стабильности в 8 раз, а для алгоритма LEACH в 5 раз больше, чем для алгоритма прямой передачи DT. На [рисунках 11 и 12](#) приведены зависимости числа живущих и погибших узлов соответственно.

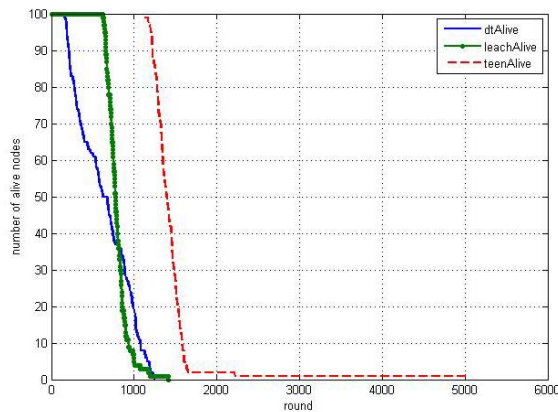


Рис. 11. Число живущих узлов

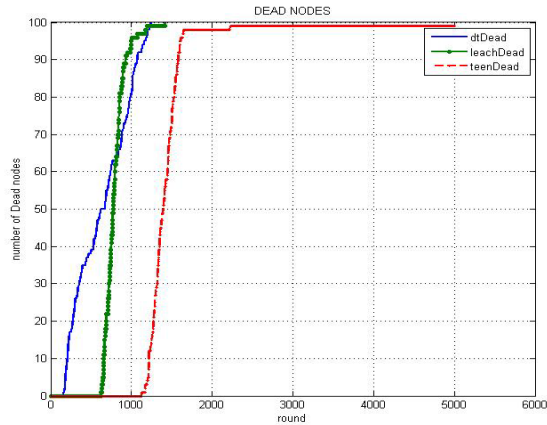


Рис. 12. Число погибших узлов

5.2 Второй сценарий

В этом сценарии рассмотрим гетерогенную сенсорную сеть, в которой есть два типа узлов – обычные и продвинутые. Предлагается новая модель, отличающаяся от известных тем, что начальная энергия для продвинутых узлов в два раза больше, чем для обычных. При этом их число составляет 10 % от общего числа узлов на сенсорном поле. Сравним эффективность применения алгоритмов DT, LEACH, TEEN и SEP для модели гетерогенной сети. На [рисунке 13](#) показано распределение обычных узлов (кружки, Normal node) и продвинутых узлов (+, Advanced node) случайным образом на сенсорном поле.

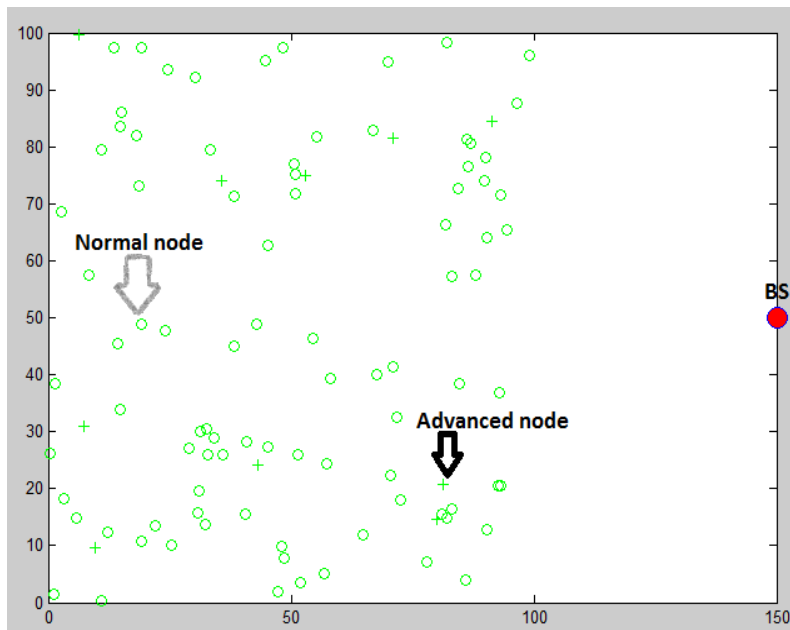


Рис. 13. Случайное размещение узлов в гетерогенной сети

Результаты моделирования приведены на рисунках 14–17. Анализ результатов показывает, что период стабильности для алгоритма SEP, который изначально учитывает наличие в сети гетерогенности, существенно больше по сравнению с алгоритмами LEACH и DT. Вместе с тем, последний узел при использовании алгоритма LEACH погибает позднее, чем для алгоритма SEP. Алгоритм TEEN, хотя и не учитывает энергетическое неравенство узлов, дает лучшие результаты по всем показателям, чем алгоритмы SEP, LEACH и DT.

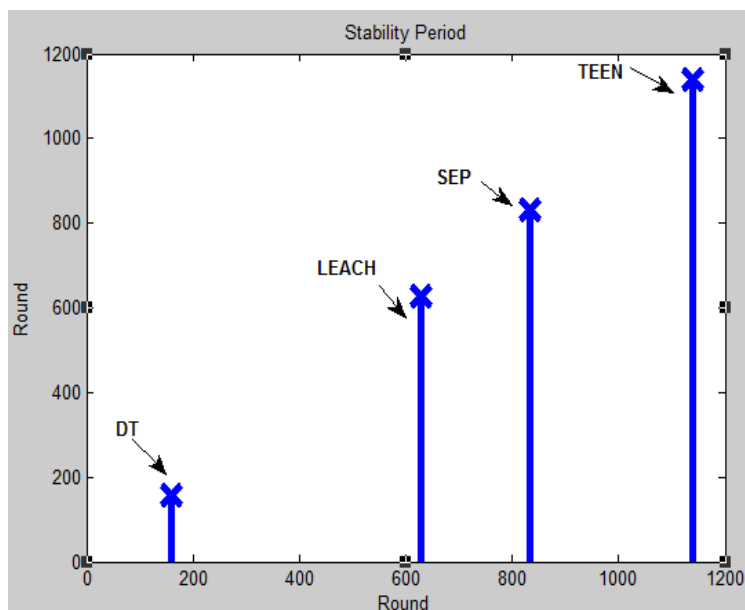


Рис. 14. Длительность периода стабильности

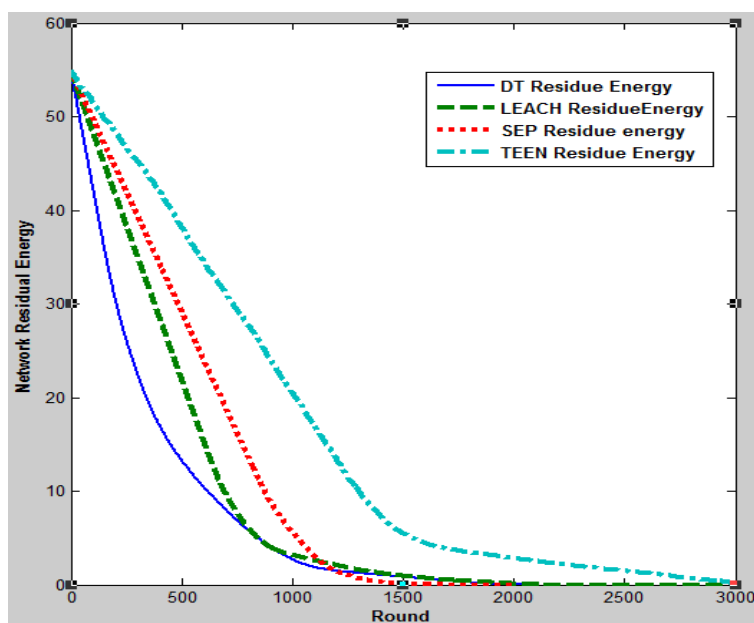


Рис. 15. Остаточная энергия

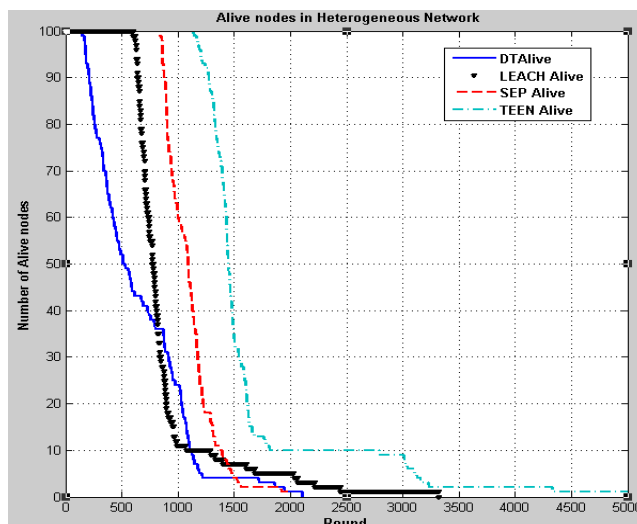


Рис. 16. Число живущих узлов

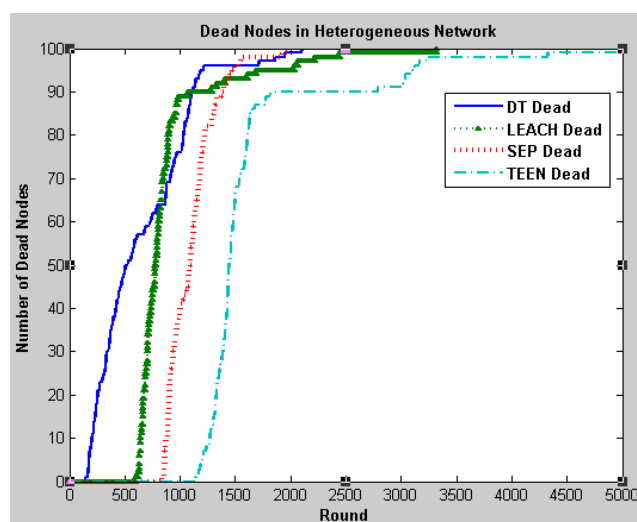


Рис. 17. Число погибших узлов

5.3 Третий сценарий

В этом сценарии рассмотрим многоуровневые по возможным энергетическим характеристикам сенсорных узлов гетерогенные сети. При этом гетерогенная сенсорная сеть содержит сенсорные узлы трех уровней: обычные, продвинутые и суперузлы. Каждый узел имеет свою начальную энергию, значение начальной энергии изменяется в пределах от 0,1 до 1 дж.

Результаты моделирования приведены на [рисунках 18 и 19](#). Анализ результатов моделирования показывает, что и по длительности периода стабильности, и по остаточной энергии алгоритм DEEC, изначально специализированный для многоуровневых гетерогенных сетей, существенно эффективнее, чем алгоритмы LEACH и DT. Вместе с тем, алгоритм TEEN и для случая многоуровневых гетерогенных сенсорных сетей лучше, чем

специализированный для этих целей алгоритм DEEC, и по длительности периода стабильности, и по остаточной энергии.

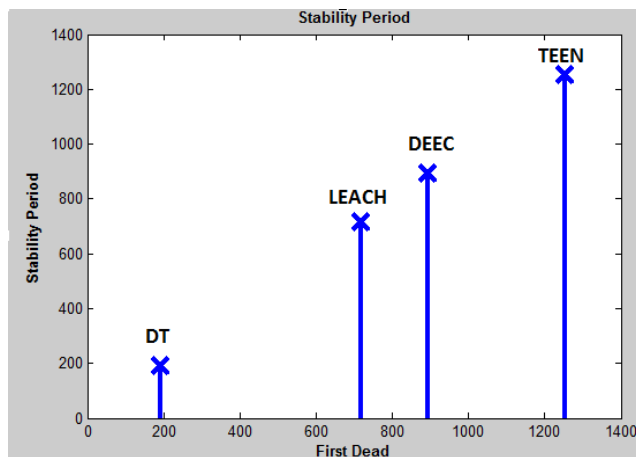


Рис. 18. Длительность периода стабильности

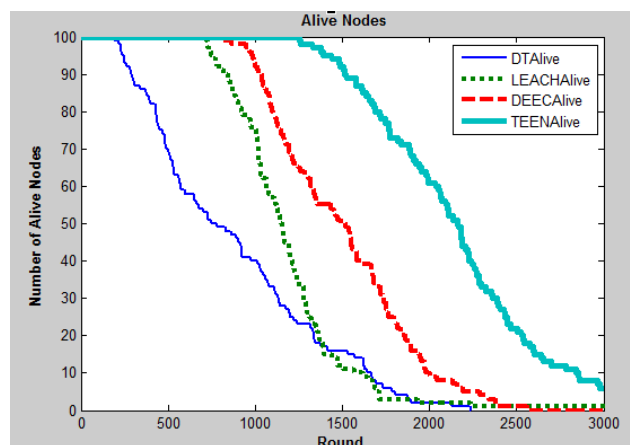


Рис. 19. Остаточная энергия

Результаты моделирования для всех сценариев обобщены в [таблице 3](#) и на [рисунке 20](#). Анализ результатов моделирования показывает, что независимо от вида сети – гомогенная, двухуровневая гетерогенная или многоуровневая гетерогенная – алгоритм TEEN обеспечивает наибольшее значение длительности периода стабильности. Отсутствие кластеризации при использовании алгоритма прямой передачи приводит к тому, что длительность жизненного цикла БСС может уменьшиться почти в 8 раз по сравнению с применением алгоритмов кластеризации.

ТАБЛИЦА 3. Длительность периода стабильности

Сценарий	Протоколы маршрутизации				
	DT	LEACH	TEEN	SEP	DEEC
Первый Сценарий	153	620	1129	-----	822

Сценарий	Протоколы маршрутизации				
	DT	LEACH	TEEN	SEP	DEEC
(одноуровневые БСС)					
Второй Сценарий (двухуровневые БСС)	158	628	1139	833	856
Третий Сценарий (многоуровневые БСС)	192	719	1253	-----	895

период стабильности во всех исследованных случаях

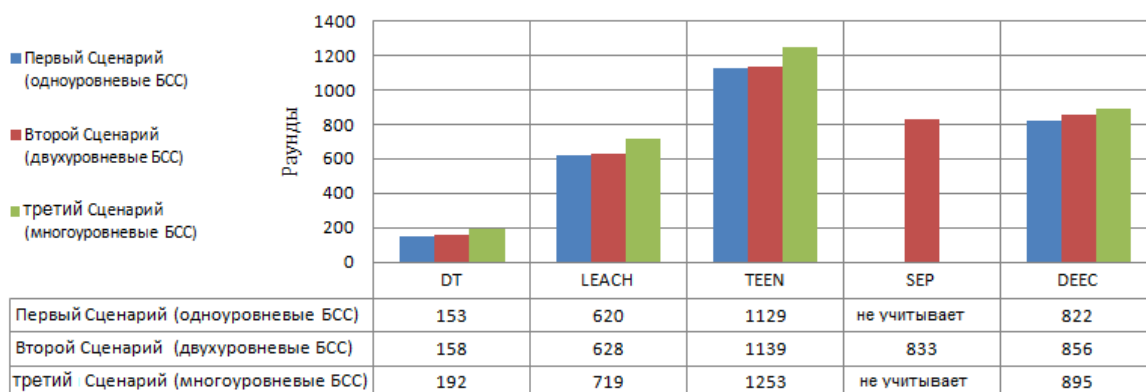


Рис. 20. Длительность периода стабильности во всех исследованных случаях

Выводы

В статье рассмотрены основные алгоритмы маршрутизации и самоорганизации для гомогенных и гетерогенных беспроводных сенсорных сетей со стационарными сенсорными узлами, размещенными на плоскости. По результатам моделирования проведен сравнительный анализ эффективности применения алгоритмов DT, LEACH, SEP, TEEN и DEEC для различных сенсорных сетей (гомогенные, гетерогенные двухуровневые, гетерогенные многоуровневые). По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Сравнивая одноуровневые и иерархические алгоритмы маршрутизации, можно отметить, что иерархические алгоритмы представляют больше возможностей по продвижению различных приложений БСС.
2. Иерархические алгоритмы маршрутизации увеличивают срок службы сети и стабильность, что повышает надежность функционирования БСС.
3. Алгоритмы SEP и DEEC превосходят по эффективности алгоритмы DT и LEACH в условиях применения гетерогенных БСС.
4. Алгоритм TEEN превосходит по эффективности все алгоритмы в исследуемых случаях, и рекомендуется к использованию как в гомогенных, так и в гетерогенных БСС.

Библиографический список

1. **Кучерявый А. Е.** Интернет Вещей / А. Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2013. – № 1.
2. **Гольдштейн Б. С.** Сети связи пост-NGN / Б. С. Гольдштейн, А. Е. Кучерявый. – СПб. : БХВ, 2013.
3. **Росляков А. В.** и др. Интернет Вещей. – Самара: ПГУТИ, 2014.
4. **Кучерявый А. Е.** Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчёта / А. Е. Кучерявый, А. И. Парамонов, Е. А. Кучерявый. – ФГУП ЦНИИС, 2008.
5. **Кучерявый А. Е.** От е-России к и-России: тенденции развития электросвязи / А. Е. Кучерявый, Е. А. Кучерявый // Электросвязь. – 2005. – № 5.
6. **Кучерявый А. Е.** Самоорганизующиеся сети / А. Е. Кучерявый, А. В. Прокопьев, Е. А. Кучерявый. – СПб. : Любавич, 2011.
7. **Akyildiz I. F.**, Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. Wireless Sensor Network: a Survey. *Comput. Netw.* 2002, 38, 392–422
8. **Koucheryavy A.**, Salim. A. Cluster head selection for homogeneous Wireless Sensor Networks. *Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology*, 2009. ICACT 2009. Phoenix Park, Korea.
9. **Koucheryavy A.**, A. Salim. Cluster-based Perimeter-coverage Technique for Heterogeneous Wireless Sensor Networks. *Proceedings, ICUMT 2009 International Conference IEEE on Ultra Modern Telecommunications*, Saint-Petersburg, Russian. 2009.
10. **Богданов И. А.** Характеристики жизненного цикла мобильной сенсорной сети при различных потоках ложных событий / И. А. Богданов, А. И. Парамонов, А. Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2013. – № 1.
11. **Bogdanov I.**, Koucheryavy A., Paramonov A. The mobile Sensor Network Life-Time under Different Spurious Flows Intrusion. *LNCS, Springer. 13 th NEW2AN, LNCS 8121*, August, 2013.
12. **Bhattassali T.**, Chaki R., Sanyal S. Sleep Deprivation Attack Detection in Wireless Sensor Networks. *International Journal of Computer Applications*, v.40, №15, February 2012.
13. **Mhatre Vivek**, Rosenberg Catherine Homogeneous vs Heterogeneous Clustered Sensor Networks: A Comparative Study School of Electrical and Computer Eng., Purdue University, West Lafayette, IN 47907–1285
14. **Attarzadeh N.**, Mehrani M. A New Thre Dimensinal Clustering Method for Wireless Sensor Networks. *Global Journal of Computer Science and Technology*. V. 11, issue 6, version 1.0, April 2011.
15. **Абакумов П. А.** Алгоритм выбора головного узла клпстера сенсорной сети в трехмерном пространстве / П. А. Абакумов // Электросвязь. – 2014. – № 4.
16. **Abakumov P.**, Koucheryavy A. The Cluster Head Selection Algorithm in the 3D USN. *Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology*, 2014. ICACT 2014. Phoenix Park, Korea.
17. **Koucheryavy A.**, Salim A. Prediction-based Clustering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks. *Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology*, 2010. ICACT 2010. Phoenix Park, Korea.
18. **Салим А.** Разработка алгоритмов выбора головного узла кластерных беспроводных сенсорных сетях. Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. – СПб. : СПбГУТ, 2010.
19. **Kim D.-S.**, Chung Y.-J. Self-Organization Routing Protocol Supporting Mobile Nodes for Wireless Sensor Networks. *IMSCCS'06. Proceedings. Zhejiang University, China*, June 20–24, 2006.

20. **Directed Diffusion**: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, Deborah Estrin, ACM New York, NY, USA ©2000.

21. **Heinzelman W. B.** Application-specific protocol architectures for wireless networks / Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2000.

22. **Manjeshwar A.** and Agrawal D. P., TEEN: A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Network 1st international Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, 2001, p.189.

23. **Smaragdakis G.**, Matta I., Bestavros A. SEP: A Stable Election Protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks, in: Second International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications (SANPA 2004), 2004.

24. **Qing Li**, Zhu Qingxin, Wang Mingwen Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks / Computer Communications 29 (2006) 2230–2237.

25. **Xia H.**, Bertoni H. L. and Maciel L. R. Radio propagation characteristics for line-of-sight micro cellular and personal communications Antenna and Propagation, vol. 41, no. 10, PP. 1439–1447, October 1993.

References

1. **Kucherjavyj A. E.** Internet Veshhej / A. E. Kucherjavyj // Jelektrosvjaz'. – 2013. – № 1.

2. **Gol'dshtejn B. S.** Seti svjazi post-NGN / B. S. Gol'dshtejn, A. E. Kucherjavyj. – SPb. : BHV, 2013.

3. **Rosljakov A. V.** i dr. Internet Veshhej. – Samara: PGUTI, 2014.

4. **Kucherjavyj A. E.** Seti svjazi obshhego pol'zovanija. Tendencii razvitija i metody raschjota / A. E. Kucherjavyj, A. I. Paramonov, E. A. Kucherjavyj. – FGUP CNIIS, 2008.

5. **Kucherjavyj A. E.** Ot e-Rossii k u-Rossii: tendencii razvitija jelektrosvjazi / A. E. Kucherjavyj, E. A. Kucherjavyj // Jelektrosvjaz'. – 2005. – № 5.

6. **Kucherjavyj A. E.** Samoorganizujushhiesja seti / A. E. Kucherjavyj, A. V. Prokop'ev, E. A. Kucherjavyj. – SPb. : Ljubavich, 2011.

7. **Akyildiz I. F.**, Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. Wireless Sensor Network: a Survey. Comput. Netw. 2002, 38, 392–422

8. **Koucheryavy A.**, Salim. A. Cluster head selection for homogeneous Wireless Sensor Networks. Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2009. ICACT 2009. Phoenix Park, Korea.

9. **Koucheryavy A.**, A. Salim. Cluster-based Perimeter-coverage Technique for Heterogeneous Wireless Sensor Networks. Proceedings, ICUMT 2009 International Conference IEEE on Ultra Modern Telecommunications, Saint-Petersburg, Russian. 2009.

10. **Bogdanov I. A.** Harakteristiki zhiznennogo cikla mobil'noj sensornoj seti pri razlichnyh potokah lozhnyh sobytij / I. A. Bogdanov, A. I. Paramonov, A. E. Kucherjavyj // Jelektrosvjaz'. – 2013. – № 1.

11. **Bogdanov I.**, Koucheryavy A., Paramonov A. The mobile Sensor Network Life-Time under Different Spurious Flows Intrusion. LNCS, Springer. 13 th NEW2AN, LNCS 8121, August, 2013.

12. **Bhattassali T.**, Chaki R., Sanyal S. Sleep Deprivation Attack Detection in Wireless Sensor Networks. International Journal of Computer Applications, v.40, №15, February 2012.

13. **Mhatre Vivek**, Rosenberg Catherine Homogeneous vs Heterogeneous Clustered Sensor Networks: A Comparative Study School of Electrical and Computer Eng., Purdue University, West Lafayette, IN 47907–1285

14. **Attarzadeh N.**, Mehrani M. A New Three Dimensional Clustering Method for Wireless Sensor Networks. Global Journal of Computer Science and Technology. V. 11, issue 6, version 1.0, April 2011.

15. **Abakumov P. A.** Algoritm vybora golovnogogo uzla klpstera sensornoj seti v trehmernom prostranstve / P. A. Abakumov // *Jelektrosvjaz'*. – 2014. – № 4.
16. **Abakumov P.**, Koucheryavy A. The Cluster Head Selection Algorithm in the 3D USN. Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2014. ICACT 2014. Phoenix Park, Korea.
17. **Koucheryavy A.**, Salim A. Prediction-based Clustering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks. Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2010. ICACT 2010. Phoenix Park, Korea.
18. **Salim A.** Razrabotka algoritmov vybora golovnogogo uzla klasternyh bespro-vodnyh sensornyh setjah. Avtoreferat diss. ... kand. tehn. nauk. – SPb. : SPbGUT, 2010.
19. **Kim D.-S.**, Chung Y.-J. Self-Organization Routing Protocol Supporting Mobile Nodes for Wireless Sensor Networks. IMSCCS'06. Proceedings. Zhejiang University, China, June 20–24, 2006.
20. **Directed Diffusion:** A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, Deborah Estrin, ACM New York, NY, USA ©2000.
21. **Heinzelman W. B.** Application-specific protocol architectures for wireless networks / Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
22. **Manjeshwar A.** and Agrawal D. P., TEEN: A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Network 1st international Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, 2001, p.189.
23. **Smaragdakis G.**, Matta I., Bestavros A. SEP: A Stable Election Protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks, in: Second International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications (SANPA 2004), 2004.
24. **Qing Li**, Zhu Qingxin, Wang Mingwen Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks / *Computer Communications* 29 (2006) 2230–2237.
25. **Xia H.**, Bertoni H. L. and Maciel L. R. Radio propagation characteristics for line-of-sight micro cellular and personal communications *Antenna and Propagation*, vol. 41, no. 10, PP. 1439–1447, October 1993.

Аль-Кадами Н. А. – 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», seti_sviazi@bk.ru

УДК 621.395

А. М. Галкин

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

A. M. Galkin

Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University
of Telecommunications

ЗАКОНОДАТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ В ЧАСТИ ПРОПУСКА ГОЛОСОВОГО ТРАФИКА

LEGISLATIVE ASPECTS OF PUBLIC TELECOMMUNICATION NET-
WORKS TOPOLOGY CONCERNING TO VOICE
TRAFFIC TRANSMISSION

В статье приводится описание изменений российского законодательства, касающегося проектирования сетей связи общего пользования: правила применения оборудования, требования к построению телефонных сетей связи в разрезе того, что все сети уже строятся с применением технологии коммутации пакетов.

The article describes the changes in Russian legislation concerning to designing of public networks: rules of certification for telecommunication equipment, requirements for telephone networks topology, in the context of the fact that all the networks are already being built with the use of packet switching technology.

телефонные сети связи, сети широкополосного доступа, сеть связи общего пользования, требования построения сетей связи, законодательство в области связи.

PSTN, wide broadband access networks, public telecommunication networks, requirements for networks topology, telecommunication networks legislation

Введение

Современные сети широкополосного доступа с законодательной точки зрения представляют собой объединение нескольких сетей, так как в нормативно-правовом регулировании отсутствует понятие мультисервисных сетей связи. И для оказания полного спектра услуг связи необходимо выполнение требований различных типов сетей и услуг связи, наиболее зарегулированными в нашем законодательстве из которых, очевидно, являются телефонные сети связи общего пользования. В нашей статье рассмотрим законодательные аспекты строительства сетей местной телефонной связи как части мультисервисных сетей доступа.

В феврале прошлого года вступил в силу приказ Минкомсвязи от 06.12.12 № 284 [1] (далее Приказ), вносящий изменения в отраслевые приказы по вопросам применения оборудования и построения телефонной сети связи общего пользования.

Ниже разберемся, какие перемены принес Приказ на практике, а какие так и остались на бумаге, в разрезе проблем сетей доступа.

Правила применения оборудования.

Приказом внесены изменения в 14 шт. правил применения оборудования узлов связи. Стало возможным совместное использование оборудования в составе нескольких узлов связи (в том числе разных операторов связи), а также использование части оборудования в составе территориально распределенного узла связи. Здесь впервые в требованиях к построению сетей связи появилось понятие территориально-распределенных узлов связи, что, само по себе, является большим шагом цели, поставленной в Законе «О связи» [2] – содействие внедрению перспективных технологий и стандартов (статья 1 Закона «О связи»).

Для реализации возможности совместного использования необходимо, чтобы оборудование было сертифицировано в соответствии с измененными правилами и имело соответствующие технические условия, подтверждающие возможность такого функционала. На данный момент такого сертифицированного оборудования нет.

В целом, сертификация оборудования и правила применения, на которые оно сертифицируется, является чуть ли не решающим вопросом при законодательно правильном построении сетей телефонной связи. Зачастую одно слово в правилах применения может перечеркнуть все технические возможности оборудования. Но к этому вопросу мы еще вернемся.

Надежность электроснабжения

Приказом отменены общеизвестные «Требования к построению телефонной сети связи общего пользования в части обеспечения надежности электроснабжения средств связи, выполняющих функции систем коммутации, точек присоединения и базовых станций сетей подвижной связи», утвержденные приказом Мининформсвязи от 13.03.07 № 32 [3]. Теперь для всех средств связи, подпадающих под данные требования, необходимо обеспечить резервные автономные источники питания, обеспечивающие при нарушении внешнего электроснабжения функционирование не менее 4 часов, вне зависимости от сетевой иерархии. Напомним, что раньше, в зависимости от типа узла (средств связи), устанавливались различные требования по количеству вводов в здание, наличию АДЭС, наличию аккумуляторных батарей с различным временем разряда.

С точки зрения сетей доступа – это важные изменения. При строительстве местных телефонных сетей связи, например, на основе подсистемы передачи мультимедийных сообщений (IMS) шлюз доступа размещают обычно в помещениях или уличных шкафах. А если шлюз доступа (медиа-шлюз или какое-либо другое территориально удаленное оборудование) в

соответствии с сертификатом соответствия в области связи является частью узла местной телефонной связи, а не сертифицирован отдельно, например, как оборудование абонентского цифрового концентратора, то формально требования к шлюзу те же, что и для основного оборудования узла связи, в том числе и в части обеспечения надежности электроснабжения. В некоторых случаях обеспечение данных требований было либо затруднительным, либо, в принципе, невозможным.

Построение сетей телефонной связи

Но самым глобальной частью Приказа является изменение к «Требованиям (далее – Требования) к построению телефонной сети связи общего пользования» (известный приказ Мининформсвязи от 08.08.05 № 97 [4]), а если быть более точным эти Требования теперь имеют абсолютно новый текст.

В целом новые требования направлены на возможность построения сетей с территориально распределенной архитектурой и снятия ряда ограничений в части размещения средств связи, линий связи и точек присоединения на всех уровнях иерархии сетей телефонной связи.

Для сетей местной телефонной связи главным нововведением стала возможность, прописанная в п. 36 Требований, организовывать абонентские линии с помощью собственного оборудования коммутации и маршрутизации пакетов информации, либо с помощью одной или нескольких сетей передачи данных, в том числе сторонних операторов. Но только в пределах одного муниципального образования (городского/сельского поселения, муниципального района, городского округа), а для Москвы и Санкт-Петербурга – в пределах территории данных городов. В последующем планируется введение изменений, касающихся республики Крым и города Севастополя. Также стало разрешено использовать оборудование коммутации и маршрутизации пакетов информации и сети передачи данных на межстанционных линиях связи.

Несмотря на попытки сделать законодательство «технологически нейтральным». Раньше такая схема не предусматривалась (по крайней мере, в явном виде). Но очевидно, что связывать два узла связи, использовать технологию коммутации пакетов (софтсвитчи, IMS-платформы) по системам передачи, использующим технологию коммутации каналов (например, PDH), не просто нецелесообразно с точки зрения использования оборудования, но и «вредно» для задержки как одного из показателей качества обслуживания речевого трафика.

Но для реализации описанной выше возможности оказалось недостаточным всего лишь внести изменения в Требования. Здесь опять свое слово говорят правила применения, в которых указываются требования к параметрам интерфейсов. Практически во всех документах такими интерфейсами являются стыки TDM (E1, STM1). Стыки же семейства Ethernet

определены только для доступа! к сетям передачи данных, что не предусматривает пропуск голосового трафика в соответствии с приказом Мининформсвязи от 08.08.05 «Об утверждении требований к порядку пропуска трафика в телефонной сети связи общего пользования» [5] (далее Требования по пропуску). Но существует и ряд исключений, например в правилах применения оконечно-транзитных узлов связи сетей подвижной радиотелефонной связи стандарта UMTS (приказ Мининформсвязи от 27.08.07 № 101 [6]) таким образом построены требования к интерфейсам, что на межстанционных линиях связи возможно использование коммутации пакетов. Получается, что два узла 3G можно стыковать при помощи Ethernet для пропуска речи, а например узел 3G и узел местной телефонной связи – нельзя. Отчасти данная проблема относится и к абонентским стыкам.

Здесь стоит отметить еще одну возможность, которую предусматривают Требования (п. 4), но которая не может осуществиться без правильной сертификации – построение комбинированного узла, реализующего возможности всех уровней иерархии сетей телефонной связи (международного, междугородного, зонавых (фиксированного и подвижного) и местного).

Вторым важным нововведением стала возможность размещения территориально-распределенных узлов связи в пределах территории нескольких муниципальных образований, но в границах одного субъекта РФ (п 31 Требования). Здесь Требования противоречат Требованиям по пропуску. Для пропуска внутризонавого трафика трафик необходимо «поднимать» на зонавый уровень, т.е. пропуск трафика должен выглядеть следующим образом – Местный узел связи 1 – Транзитный зонавый узел связи – Местный узел связи 2. Таким образом, Требования по пропуску делают невозможным построение местного узла связи на территории нескольких муниципальных образований. Единственный выход – такой узел можно сделать комбинированным (местный узел связи + транзитный зонавый узел связи), но даже в этом случае соответствовать Требованиям по пропуску будет только маршрут сигнального трафика с учетом того, что в каждом муниципальном образовании оборудованию, входящему в состав территориально-распределенного узла связи, будет присвоен свой код пункта сигнализации.

Таким образом, многие «кардинальные перемены», введенные Приказом, на практике оказываются сложно осуществимыми. И изменение Требования – это всего лишь первый маленький шаг к реализации «содействия внедрению перспективных технологий» в части сетей телефонной связи.

Заключение

В качестве заключения необходимо отметить, не все так безнадежно и работа над дальнейшим изменением законодательства в этом направлении все-таки ведется. Так, например, на сайте regulation.gov.ru есть уведомление о проекте приказа, утверждающего новые требования по пропуску трафика в телефонной сети связи общего пользования. И надеемся, что в скором времени уже полностью прозрачно (с точки зрения требований отраслевого законодательства) можно будет реализовывать проекты на мультисервисные сети широкополосного доступа.

Библиографический список

1. **Приказ** Минкомсвязи от 06.12.12 № 284 "О внесении изменений в приказы Министерства информационных технологий и связи Российской Федерации и Министерства связи и массовых коммуникаций Российской Федерации по вопросам применения оборудования и построения телефонной сети связи общего пользования" (Зарегистрирован в Минюсте России 18.01.2013 № 26585).

2. **Федеральный закон** от 07.07.2003 № 126-ФЗ (ред. от 21.07.2014) "О связи" (с изм. и доп., вступ. в силу с 21.10.2014).

3. **Приказ** Мининформсвязи от 13.03.2007 № 32 (ред. от 11.10.2007) "Об утверждении требований к построению телефонной сети связи общего пользования в части обеспечения надежности электроснабжения средств связи, выполняющих функции систем коммутации, точек присоединения и базовых станций сетей подвижной связи" (Зарегистрировано в Минюсте РФ 12.04.2007 № 9286).

4. **Приказ** Мининформсвязи от 08.08.2005 № 97 (ред. от 06.12.2012) "Об утверждении требований к построению телефонной сети связи общего пользования" (Зарегистрировано в Минюсте России 18.08.2005 № 6916).

5. **Приказ** Мининформсвязи от 08.08.2005 № 98 (ред. от 01.11.2013) "Об утверждении Требований к порядку пропуска трафика в телефонной сети связи общего пользования" (Зарегистрировано в Минюсте России 18.08.2005 № 6917).

6. **Приказ** Мининформсвязи от 28.2007 № 101 (ред. от 23.04.2013) "Об утверждении Правил применения оборудования коммутации систем подвижной радиотелефонной связи. Часть V. Правила применения оконечно-транзитных узлов связи сетей подвижной радиотелефонной связи стандарта UMTS" (Зарегистрировано в Минюсте России 29.08.2007 № 10066).

References

1. **Prikaz** Minkomsvjazi ot 06.12.12 № 284 "O vnesenii izmenenij v prikazy Ministerstva informacionnyh tehnologij i svjazi Rossijskoj Federacii i Ministerstva svjazi i massovyh kommunikacij Rossijskoj Federacii po voprosam primeneniya oborudovanija i postroeniya telefonnoj seti svjazi obshhego pol'zovanija" (Zaregistrirovan v Minjuste Rossii 18.01.2013 № 26585).

2. **Federal'nyj zakon** ot 07.07.2003 № 126-FZ (red. ot 21.07.2014) "O svjazi" (s izm. i dop., vstup. v silu s 21.10.2014).

3. **Prikaz** Mininformsvjazi ot 13.03.2007 № 32 (red. ot 11.10.2007) "Ob utverzhdenii trebovanij k postroeniju telefonnoj seti svjazi obshhego pol'zovanija v chasti obespechenija nadezhnosti jelektrosnabzhenija sredstv svjazi, vypolnjajushhih funkcii sistem kommutacii, toчек prisoedinenija i bazovyh stancij setej podvizhnoj svjazi" (Zaregistrirovan v Minjuste RF 12.04.2007 № 9286).

4. **Приказ** Мининформсвязи от 08.08.2005 № 97 (ред. от 06.12.2012) "Об утверждении требований к построению телефонной сети связи общего пользования" (Зарегистрировано в Минюсте России 18.08.2005 № 6916).

5. **Приказ** Мининформсвязи от 08.08.2005 № 98 (ред. от 01.11.2013) "Об утверждении Требований к порядку пропуска трафика в телефонной сети связи общего пользования" (Зарегистрировано в Минюсте России 18.08.2005 № 6917).

6. **Приказ** Мининформсвязи от 28.2007 № 101 (ред. от 23.04.2013) "Об утверждении Правил применения оборудования коммутации систем подвижной радиотелефонной связи. Часть V. Правила применения оконечно-транзитных узлов связи сетей подвижной радиотелефонной связи стандарта UMTS" (Зарегистрировано в Минюсте России 29.08.2007 № 10066).

Галкин Анатолий Михайлович – 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», galkinam@inbox.ru

УДК 621.391

Р. В. Киричек

R. V. Kirichek

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

Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University
of Telecommunications

А. И. Парамонов

A. I. Paramonov

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

Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University
of Telecommunications

А. В. Прокопьев

A. V. Prokoriev

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

Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University
of Telecommunications

А. Е. Кучерявый

A. E. Koucheryavy

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

Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University
of Telecommunications

ЭВОЛЮЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

THE INVESTIGATION EVOLUTION
IN THE WIRELESS SENSOR NETWORKS AREA

К десятилетию начала исследований беспроводных сенсорных сетей как составляющей сетей связи общего пользования анализируются достижения Санкт-Петербургской научной школы в области Интернета Вещей и самоорганизующихся сетей. Рассматривается текущее состояние дел в задачах по выбору головного узла кластера, моделей трафика и сетевой безопасности. Ставятся новые задачи на ближайшую и среднесрочную перспективу как в упомянутых направлениях, так и в области летающих сенсорных сетей.

The achievements and current problems in the investigation area of wireless sensor networks are analyzed for last decade (the 2005 is the first year then the investigations were started in Russia for wireless sensor networks as a part of the public network). The cluster head selection algorithms, wireless sensor network traffic models, network security based were considered. The new investigation tasks are formulated for these directions and for flying ubiquitous sensor networks too.

беспроводные сенсорные сети, самоорганизующиеся сети, алгоритмы выбора головного узла, модели трафика, потоки ложных событий, летающие сенсорные сети.

wireless sensor networks, self-organizing networks, cluster head selection algorithms, traffic models, spurious event flows, flying ubiquitous sensor networks.

Введение

Прошло почти 10 лет с момента первой публикации в журнале “Электросвязь” [1] по беспроводным сенсорным сетям как новой составляющей сетей связи общего пользования [2], позволяющей сделать новый шаг в развитии общества на пути его преобразования на основе всепроникающих сетей [3–5]. За это время Санкт-Петербургская научная школа, к которой принадлежат авторы, достигла больших успехов в исследованиях беспроводных сенсорных сетей в области разработки алгоритмов выбора головного узла, моделей трафика для таких сетей, моделей и методов защиты беспроводной сенсорной сети от потоков ложных событий. На основе результатов этих исследований в начале второго десятилетия 21 века в СПбГУТ были организованы работы в области Интернета Вещей [6, 7], которые в 2012 году были материализованы в лабораторию Интернета Вещей [8]. В настоящее время на кафедре сетей связи и передачи данных начаты работы в области новых приложений Интернета Вещей [9, 10], которые отражают развитие беспроводных сенсорных сетей на новом этапе их эволюции – в летающей форме и в условиях наномира. В статье приводится обзор основных достижений научной школы за период исследований с 2005 года, и обсуждаются новые задачи в заявленной предметной области.

1. Алгоритмы выбора головного узла в беспроводных сенсорных сетях

Беспроводные сенсорные сети представляют собой самоорганизующиеся сети [11, 12], состоящие из множества миниатюрных сенсорных узлов, обеспечивающих мониторинг явлений, процессов, характеристик окружающей среды и т. п. Плоскость, на которой располагается беспроводная сенсорная сеть, достаточно часто называют сенсорным полем. Число сенсорных узлов только на одном таком поле может быть столь велико (в соответствии со спецификациями протокола ZigBee более 64 тысяч), что существующие методы организации инфраструктурных сетей не подходят для реализации беспроводной сенсорной сети. Самоорганизация позволяет использовать сенсорные узлы только тогда, когда это необходимо, т. е. либо при обнаружении этими узлами какого-либо события, либо при реконфигурации сети. Остальное время сенсорные узлы находятся в спящем состоянии, что дает возможность сохранять их энергетические возможности, которые являются ограниченными, а зачастую и невозполняемыми. Задача экономии энергии в беспроводных сенсорных сетях является одной из на-

иважнейших, поскольку меньший расход энергии на передачу и прием информации позволяет продлить функционирование сенсорной сети, или как принято в исследованиях по сенсорным сетям – увеличить длительность жизненного цикла беспроводной сенсорной сети. Очень большое число сенсорных узлов на одном сенсорном поле подсказывает исследователям, что для увеличения жизненного цикла сенсорной сети целесообразно использовать ее кластерную организацию. Кластеризация беспроводной сенсорной сети на основе базового алгоритма LEACH [13] позволила увеличить длительность жизненного цикла сенсорной сети в 7 раз по сравнению с некластеризованным пуассоновским сенсорным полем.

Как уже отмечалось выше, беспроводные сенсорные сети называют еще и всепроникающими [14, 15]. Поэтому, число их приложений реально очень велико и до сих пор не найдено оптимального алгоритма кластеризации для всех возможных приложений и, соответственно, моделей сенсорных сетей. Разработка новых алгоритмов кластеризации проводится во многих научных центрах мира, в том числе и в СПбГУТ. Алгоритмы выбора головного узла кластера, разработанные в СПбГУТ, нашли достаточно широкое международное признание [16–20] и на некоторых из них остановимся подробнее.

В [16, 21] для беспроводных сенсорных сетей с централизованным управлением было предложено использовать диаграммы Вороного для создания кластера, что позволило добиться большей длительности жизненного цикла сети по сравнению с базовым алгоритмом LEACH. Однако централизованный выбор головного узла не всегда возможен, а использовать для определения кластера диаграммы Вороного в децентрализованной схеме не представляется возможным вследствие необходимости проведения достаточно больших вычислений для ограниченных возможностей сенсорных узлов. Диаграммы Вороного были эффективно использованы и в последующих работах кафедры по алгоритмам выбора головного узла, когда при применении методов нечеткой логики с помощью диаграмм Вороного определялось оптимальное значение параметра центральности расположения сенсорного узла по отношению к иным сенсорным узлам предполагаемого кластера [17, 22], что позволило достичь лучших показателей по длительности жизненного цикла среди всех известных на сегодня алгоритмов выбора головного узла на основе нечеткой логики.

В [18] предложен алгоритм, обеспечивающий наилучшее покрытие на протяжении длительного периода времени для гетерогенных сенсорных сетей. Гетерогенность сенсорной сети предполагает, что не все сенсорные узлы обладают одинаковой начальной энергией, одинаковым радиусом действия и т. п. Метрика наилучшего покрытия напрямую связана с определением жизненного цикла беспроводной сенсорной сети. Действительно, сенсорные сети используются, как правило, для мониторинга на вполне определенном пространстве. И, если в первоначальный период исследова-

ний в области сенсорных сетей считалось, что жизненный цикл беспроводной сенсорной сети продолжается до гибели последнего сенсорного узла при исчерпании им энергетического ресурса, то принципиально правильным является и иной подход, а именно: жизненный цикл сенсорной сети заканчивается при невозможности дальнейшего выполнения этой сетью своих функций, например, при уменьшении доли покрытия контролируемого пространства до k %. Разработанный в СПбГУТ алгоритм [18] существенно превосходил известные к тому времени алгоритмы, в том числе и LEACH, по обеспечению требуемой доли покрытия в течение длительного периода времени.

Беспроводные сенсорные сети могут состоять и из мобильных сенсорных узлов, что существенно осложняет проблему выбора головного узла и стабильности кластера в процессе функционирования сети. В соответствии с типовыми моделями скорость перемещения сенсорного узла не превосходит 2 м/с, но и при такой скорости возможно выбытие сенсорного узла из зоны действия головного узла кластера до окончания сбора и передачи данных этому головному узлу.

Принципиальный шаг вперед в разработке алгоритмов выбора головного узла был совершен при создании в СПбГУТ алгоритма DCA [19], первом алгоритме для мобильных сенсорных сетей с предсказанием. Этот алгоритм послужил основой для последующей в мире разработки целого ряда алгоритмов с предсказанием для беспроводных сенсорных сетей с мобильными узлами [24–26]. Алгоритм DCA существенно превосходил известный к тому времени алгоритм LEACH-M [27], представлявший собой модификацию базового алгоритма LEACH, как по длительности жизненного цикла беспроводной сенсорной сети, так и по показателю k -покрытия. При этом применение простого точечного предиктора позволило получить наилучшие результаты. Только в конце 2014 года свойства DCA удалось улучшить в новом алгоритме MACA (Mobility Adaptive Clustering Algorithm), разработанном опять же в СПбГУТ, и успешно сочетающим прогностические свойства алгоритма DCA при выборе головного узла с выбором членов кластера на основе значения пригодности присоединения к головному узлу из алгоритма MBC (Mobility-based Clustering) [28].

Все более широкое применение беспроводных сенсорных сетей в различных областях хозяйственной деятельности человека в начале второго десятилетия 21 века сделало актуальной задачу о создании алгоритмов выбора головного узла для трехмерного пространства. Возможное использование в трехмерном пространстве алгоритма LEACH и иных алгоритмов, разработанных для сенсорных полей на плоскости, не учитывало высоты объекта, в котором располагается беспроводная сенсорная сеть, например, в случае мониторинга складских помещений. Алгоритм MCA (Maximum Coverage Algorithm) [20, 23], разработанный в СПбГУТ, показал пока наибольшую эффективность среди алгоритмов выбора головного узла для

беспроводной сенсорной сети со стационарными узлами в трехмерном пространстве [29, 30].

Среди задач по выбору головного узла кластера в ближайшее время и в среднесрочной перспективе – разработка алгоритмов выбора головного узла для летающих сенсорных сетей в различных условиях их применения, разработка алгоритмов выбора головного узла для трехмерных беспроводных сенсорных сетей с мобильными узлами, разработка алгоритмов выбора головных узлов в беспроводных сенсорных сетях, находящихся в гетерогенных зонах иных сетей связи.

2. Модели трафика для беспроводных сенсорных сетей

Хороший обзор работ по исследованию трафика в беспроводных сенсорных сетях приведен в [31]. Вклад в мировую науку ученых СПбГУТ и в этой области знаний весьма высок. Масштабные работы по изучению характеристик потоков трафика в беспроводных сенсорных сетях позволили не только установить их самоподобный характер для многих приложений, таких как телеметрия, медицинские сети, сети слежения за целью, передача изображений по сенсорным сетям, но и определить степень самоподобия (значение параметра Херста) для каждого из них [32–34]. Кроме того, было найдено такое замечательное свойство потоков трафика в беспроводных сенсорных сетях, как изменение значения параметра Херста при перегрузке [35]. Последнее коррелируется с другими работами по трафику на кафедре сетей связи и передачи данных, в ходе которых была установлена взаимосвязь значения параметра Херста и субъективных оценок качества восприятия видео [36]. Кроме того, в процессе изучения трафика в сенсорных сетях слежения за целью была установлена зависимость параметра Херста и скорости передачи данных в интервале ON при использовании для генерации трафика метода ON/OFF [37]. Это дает возможность существенно упростить процесс генерации трафика с заданным параметром Херста и долговременной зависимостью.

Выявление в [38, 39] антиперсистентных свойств трафика в сетях M2M (Machine-to-Machine) в условиях генерации потоков трафика взаимозависимыми устройствами не только явилось важным научным результатом само по себе, но и требует по сути дела создания новой теории для работы с сетями, в которых такие потоки создаются.

Широкое внедрение беспроводных сенсорных сетей, сетей M2M приводит в условиях появления гетерогенных зон обслуживания к возможному влиянию генерируемого этими сетями трафика на качество обслуживания и качество восприятия традиционных услуг телекоммуникаций (речь, видео, данные). Только служебный трафик, создаваемый между смартфоном и базовой станцией LTE, в несколько раз превышает речевой трафик абонента за сутки [40]. Поэтому, одной из основных задач в ближайшей и среднесрочной перспективе для кафедры сетей связи и передачи данных

будет разработка методов сглаживания такого трафика. Базовой работой в этом направлении является [41], где предложен метод сглаживания трафика M2M на основе оптимального расписания для его обслуживания.

Естественно, что как уже отмечалось выше, важнейшей задачей в этом направлении исследований является создание теории и практических рекомендаций по обслуживанию трафика в сетях с антиперсистентными потоками. Кроме того, учитывая широкое распространение сенсорных сетей, в том числе и летающих сенсорных сетей, в ближайшей и среднесрочной перспективе на кафедре сетей связи и передачи данных будут развернуты работы по передаче речи и видео поверх протоколов, используемых в сенсорных сетях. Для практической реализации и проведения экспериментов в этом направлении исследований в лаборатории Интернета Вещей [8] создан испытательный стенд.

3. Модели и методы защиты беспроводных сенсорных сетей от потоков ложных событий, клонирования и преднамеренных электромагнитных воздействий

Особенности беспроводных сенсорных сетей приводят и к особенностям вторжений в эти сети. Действительно, слабость энергетической системы и прямая зависимость от ее характеристик длительности жизненного цикла беспроводной сенсорной сети делают привлекательными вторжения в сенсорные сети, которые могут уменьшить жизненный цикл сети за счет отъема энергии событиями, которые сенсорная сеть не должна подвергать мониторингу, но не может на них не реагировать. Модель потоков ложных событий разработана в СПбГУТ [42] и ее исследования показали как существенную зависимость длительности жизненного цикла сенсорной сети от характера потока, так и возможность ее увеличения путем придания мобильности сенсорным узлам со скоростью 2 м/с [42, 43]. Еще одним методом защиты беспроводных сенсорных сетей от потоков ложных событий, кроме придания узлам мобильности, является перераспределение плотности сенсорных узлов на сенсорном поле [44]. Эти существенные результаты, полученные в последние два года на кафедре сетей связи и передачи данных, предполагается развивать и обобщать на трехмерные и летающие сенсорные сети в близлежащей и долгосрочной перспективе.

Вследствие миниатюризации сенсорных узлов и их предельно низкой стоимости еще одним видом вторжений в сенсорные сети является клонирование сети и ее элементов, когда в силу самоорганизации легальный сенсорный узел взаимодействует с клонированным сенсорным узлом точно так же, как и с другим легальным. Работы в данном направлении планируются развернуть на кафедре уже в 2015 году.

Это же относится и к работам в области исследования влияния преднамеренных электромагнитных воздействий, создаваемых генераторами сверхкоротких электромагнитных импульсов, на беспроводные сенсорные

сети, где кафедра сетей связи и передачи данных имеет существенный научный задел [45, 46].

Вывод

Анализ исследований в области беспроводных сенсорных сетей новой составляющей сетей связи общего пользования показывает, что с 2005 года Санкт-Петербургской научной школой накоплен достаточный багаж знаний и результатов, который позволяет перейти на новый уровень исследований на базе лаборатории Интернета Вещей. Выполненные к настоящему времени исследования имеют хорошую оценку и в Российской Федерации, и за рубежом. Намеченные на ближайшую и среднесрочную перспективу исследования на кафедре сетей связи и передачи данных должны еще больше способствовать процессу интеграции Санкт-Петербургской научной школы по Интернету Вещей и самоорганизующимся сетям в мировой научно-исследовательский прогресс.

Библиографический список

1. **Кучерявый А. Е.** От е-России к и-России: тенденции развития электросвязи / А. Е. Кучерявый, Е. А. Кучерявый // Электросвязь. – 2005. – № 5.
2. **Кучерявый А. Е.** Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчёта / А. Е. Кучерявый, А. И. Парамонов, Е. А. Кучерявый // ФГУП ЦНИИС, 2008.
3. **Kim В.-Т.** Broadband convergence Network (BcN) for Ubiquitous Korea Vision. The 7th International Conference on Advanced Communication Technology ICACT'2005. Phoenix Park, Korea, February 21–23, 2005, Proceedings.
4. **Аджемов А. С.** От е-России к и-России: направления развития телекоммуникаций / А. С. Аджемов, А. Е. Кучерявый // Инновационная экономика России. – апрель 2006.
5. **Кучерявый А. Е.** На пути к и-России и и-сетям / А. Е. Кучерявый, Е. А. Кучерявый // Международный телекоммуникационный симпозиум «Мультисервисные услуги в высокоскоростных системах мобильной связи»: сборник трудов. – СПб., СПб ГУТ, 27–30 июня, 2006.
6. **Кучерявый А. Е.** Интернет Вещей / А. Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2013. – № 1.
7. **Гольдштейн Б. С.** Сети связи пост-NGN / Б. С. Гольдштейн, А. Е. Кучерявый. – СПб. : БХВ–С.-Петербург, 2013.
8. **Koucheryavy A., Kirichek R.** Internet of Things Laboratory Test Bed. International Conference on Wireless Communication, Networking and Application: proceedings. – China, December, 2014.
9. **Кучерявый А. Е.** Летающие сенсорные сети / А. Е. Кучерявый, А. Г. Владыко, Р. В. Киричек, А. И. Парамонов, А. В. Прокопьев, И. А. Богданов, А. А. Дорт-Гольц // Электросвязь. – 2014. – № 9.
10. **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. Networks. (Elsevier), Volume 5, Issue 3 (2014).
11. **Кучерявый А. Е.** Самоорганизующиеся сети / А. Е. Кучерявый, А. В. Прокопьев, Е. А. Кучерявый. – СПб. : Любавич, 2011.

12. **Кучерявый А. Е.** Самоорганизующиеся сети и новые услуги / А. Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2009. – № 1.
13. **Heinzelman W.**, Chandrakasan A., Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. Proceedings 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Wailea Maui, Hawaii, USA, Jan. 2000.
14. **Recommendation Y. 2221.** Requirements for Support of Ubiquitous Sensor Network (USN) Applications and Services in the NGN Environment. 2010.
15. **Recommendation Y.2062.** Framework of Object-to-Object Communication using Ubiquitous Networking in NGN. ITU-T, February 2012. Geneva.
16. **Koucheryavy A.**, Salim A. Cluster head selection for homogeneous Wireless Sensor Networks. Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2009. ICACT 2009. Phoenix Park, Korea.
17. **Al-Naggar Y.**, Koucheryavy A. Fuzzy Logic and Voronoi Diagram Using for Cluster Head Selection in Ubiquitous Sensor Networks. Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. 14th International conference, NEW2AN 2014 and 7th Conference, ruSMART 2014. St. Petersburg, Russia, August 27–29. LNCS 8638, 27-29, Springer, 2014.
18. **Koucheryavy A.**, Salim A. Cluster-based Perimeter-coverage Technique for Heterogeneous Wireless Sensor Networks. Proceedings, ICUMT 2009 International Conference IEEE on Ultra Modern Telecommunications, Saint-Petersburg, Russian. 2009.
19. **Koucheryavy A.**, Salim A. Prediction-based Clustering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks. Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2010. ICACT 2010. Phoenix Park, Korea.
20. **Abakumov P.**, Koucheryavy A. The Cluster Head Selection Algorithm in the 3D USN. Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2014. ICACT 2014. Phoenix Park, Korea.
21. **Кучерявый А. Е.** Выбор головного узла кластера в однородной беспроводной сенсорной сети / А. Е. Кучерявый, А. Салим // Электросвязь. – 2009. – № 8.
22. **Аль-Наггар Я. М.** Алгоритм выбора головного узла кластера для всепроникающих сенсорных сетей / Я. М. Аль-Наггар // Электросвязь. – 2014. – № 9.
23. **Абакумов П. А.** Алгоритм выбора головного узла кластера сенсорной сети в трехмерном пространстве / П. А. Абакумов // Электросвязь. – 2014. – № 4.
24. **Benmansour T.**, Moussaoui S. GMAC: Group Mobility Adaptive Clustering Scheme for Mobile Wireless Sensor Networks. International Symposium on Programming and Systems (ISPS). Proceedings, Algiers, Algeria, 25–27 April, 2011.
25. **Borsani L.**, Guglielmi S., Redondi A., Cesana M. Tree-Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. 8th International Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services, WONS'2011, Bardonecchia, Italy, January 2011.
26. **Kim H.** An Efficient Clustering Scheme for Data Aggregation Considering Mobility in Mobile Wireless Sensor Networks. International Journal of Control and Automation, 2013, v. 6, № 1.
27. **Kim D. S.**, Chung Y. J. 'Self-organization routing protocol supporting mobile nodes for wireless sensor network'. Proc. First Int. MultiSymp. on Computer and Computational Sciences, Hangzhou, China, June 2006.
28. **Deng S.**, Li J., Shen L. " Mobility-based clustering protocol for wireless sensor networks with mobile nodes" 1 National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, 2 Department of Physics and Telecommunications Engineering, Hunan City University, Yiyang, Hunan 413000, 10.1049/iet-wss.2010.0084, 2011.

29. **Hooggar M.**, Mehrani M., Attarzadeh N., Azimifar M. An Energy Efficient Three Dimensional Coverage Method for Wireless Sensor Networks. *Journal of Academic and Applied Studies*. V. 3 (3), March 2013.

30. **Attarzadeh N.**, Mehrani M. A New Three Dimensional Clustering Method for Wireless Sensor Networks. *Global Journal of Computer Science and Technology*. V.11, issue 6, version 1.0, April 2011.

31. **Koucheryavy A.** State of Art and Research Challenges for USN Traffic Flow Models. *Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2014. ICACT 2014. Phoenix Park, Korea.*

32. **Koucheryavy A.**, Prokopiev A. Ubiquitous Sensor Networks Traffic Models for Telemetry Applications. *Smart Spaces and Next Generation Wired/Wireless Networking. 11th International Conference, NEW2AN 2011, and 4th Conference on Smart Spaces, ruSMART 2011. St. Petersburg, Russia, August 2011, Proceedings. LNCS 6869. Springer, 2011.*

33. **Vybornova A.**, Koucheryavy A. "Ubiquitous Sensor Networks Traffic Models for Medical and Tracking Applications" in *The 12th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking NEW2AN 2012. Aug. 2012 Saint-Petersburg. Springer LNCS 7469.*

34. **Koucheryavy A.**, Muthanna A., Prokopiev A. Ubiquitous Sensor Networks Traffic Models for Image Applications. *Internet of Things and its Enablers (INTHITEN). Conference, State University of Telecommunication, St. Petersburg, Russia, June 3–4, 2013. Proceedings.*

35. **Koucheryavy A.**, Muthanna A., Prokopiev A. The Mixed Telemetry/Image USN in the Overload Conditions. *Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2014. ICACT 2014. Phoenix Park, Korea.*

36. **Makolkina M.**, Paramonov A., Prokopiev A., Koucheryavy A. The Quality of Experience Subjective Estimations and Hurst Parameters Values Interdependence. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. 14th International conference, NEW2AN 2014 and 7th Conference, ruSMART 2014. St. Petersburg, Russia, August 27–29. LNCS 8638, 27–29, Springer, 2014.*

37. **Vybornova A.**, Koucheryavy A. Traffic Analysis in Target Tracking Ubiquitous Sensor Networks. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. 14th International conference, NEW2AN 2014 and 7th Conference, ruSMART 2014. St. Petersburg, Russia, August 27–29. LNCS 8638, 27–29, Springer, 2014.*

38. **Парамонов А. И.** Модели потоков трафика для сетей M2M / А. И. Парамонов // *Электросвязь*. – 2014. – № 4.

39. **Paramonov A.**, Koucheryavy A. M2M Traffic Models and Flow Types in Case of Mass Event Detection. *LNCS 8638, 27–29, August, 2014.*

40. **Chornaya D.**, Paramonov A., Koucheryavy A. Investigation of Machine-to-Machine Traffic Generated By Mobile Terminals. *6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), IEEE, 2014, St. Petersburg, October 2014.*

41. **Парамонов А. И.** Управление трафиком машина-машина на основе расписания / А. И. Парамонов // *Системы управления и информационные технологии*. – 2014. – Т. 56, № 2.

42. **Bogdanov I.**, Koucheryavy A., Paramonov A. The mobile Sensor Network Lifetime under Different Spurious Flows Intrusion. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. 14th International conference, NEW2AN 2013 and 6th Conference, ruSMART 2013. St. Petersburg, Russia, August 27–29. LNCS 8121, Springer.*

43. **Богданов И. А.** Характеристики жизненного цикла мобильной сенсорной сети при различных потоках ложных событий / И. А. Богданов, А. И. Парамонов, А. Е. Кучерявый // *Электросвязь*. – 2013. – № 1.

44. **Богданов И. А.** Структурный метод защиты беспроводных сенсорной сети от потоков ложных событий / И. А. Богданов // *Электросвязь*. – 2014. – № 11.

45. **Киричек Р. В.** Электромагнитное нападение как новый вид угрозы информационной безопасности / Р. В. Киричек, С. В. Данилин // II Международная научно-практическая конференция «Актуальные достижения европейской науки»: сборник докладов. – София. – 2011.

46. **Kirichek R.** Methodological approach to making an electromagnetic chart of an IT object / F. Baidin, M. Zhukovsky, R. Kirichek, V. Chvanov // 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility: proceedings. – Long Beach, USA, 2011.

References

1. **Kucherjavvyj A. E.** Ot e-Rossii k u-Rossii: tendencii razvitija jelektrosvjazi / A. E. Kucherjavvyj, E. A. Kucherjavvyj // *Jelektrosvjaz'*. – 2005. – № 5.

2. **Kucherjavvyj A. E.** Seti svjazi obshhego pol'zovanija. Tendencii razvitija i metody raschjota / A. E. Kucherjavvyj, A. I. Paramonov, E. A. Kucherjavvyj // FGUP CNIIS, 2008.

3. **Kim B.-T.** Broadband convergence Network (BcN) for Ubiquitous Korea Vision. The 7th International Conference on Advanced Communication Technology ICACT'2005. Phoenix Park, Korea, February 21–23, 2005, Proceedings.

4. **Adzhemov A. S.** Ot e-Rossii k u-Rossii: napravlenija razvitija telekommunikacij / A. S. Adzhemov, A. E. Kucherjavvyj // *Innovacionnaja jekonomika Rossii*. – april' 2006.

5. **Kucherjavvyj A. E.** Na puti k u-Rossii i u-setjam / A. E. Kucherjavvyj, E. A. Kucherjavvyj // *Mezhdunarodnyj telekommunikacionnyj simpozium «Mul'tiservisnye uslugi v vysokoskorostnyh sistemah mobil'noj svjazi»: sbornik trudov*. – SPb., SPb GUT, 27–30 ijunja, 2006.

6. **Kucherjavvyj A. E.** Internet Veshhej / A. E. Kucherjavvyj // *Jelektrosvjaz'*. – 2013. – № 1.

7. **Gol'dshtejn B. S.** Seti svjazi post-NGN / B. S. Gol'dshtejn, A. E. Kucherjavvyj. – SPb. : BHV–S.-Peterburg, 2013.

8. **Koucheryavy A., Kirichek R.** Internet of Things Laboratory Test Bed. International Conference on Wireless Communication, Network-ing and Application: proceedings. – China, December, 2014.

9. **Kucherjavvyj A. E.** Letajushhie sensornye seti / A. E. Kucherjavvyj, A. G. Vladyko, R. V. Kirichek, A. I. Paramonov, A. V. Prokop'ev, I. A. Bogdanov, A. A. Dort-Gol'c // *Jelektrosvjaz'*. – 2014. – № 9.

10. **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. Networks*. (Elsevier), Volume 5, Issue 3 (2014).

11. **Kucherjavvyj A. E.** Samoorganizujushhiesja seti / A. E. Kucherjavvyj, A. V. Prokop'ev, E. A. Kucherjavvyj. – SPb. : Ljubavich, 2011.

12. **Kucherjavvyj A. E.** Samoorganizujushhiesja seti i novye uslugi / A. E. Kucherjavvyj // *Jelektrosvjaz'*. – 2009. – № 1.

13. **Heinzelman W., Chandrakasan A., Balakrishnan H.** Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *Proceedings 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, Wailea Maui, Hawaii, USA, Jan. 2000.

14. **Recommendation Y. 2221.** Requirements for Support of Ubiquitous Sensor Network (USN) Applications and Services in the NGN Environment. 2010.

15. **Recommendation Y.2062.** Framework of Object-to-Object Communication using Ubiquitous Networking in NGN. ITU-T, February 2012. Geneva.

16. **Koucheryavy A., Salim A.** Cluster head selection for homogeneous Wireless Sensor Networks. *Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2009. ICACT 2009. Phoenix Park, Korea.*

17. **Al-Naggar Y.**, Koucheryavy A. Fuzzy Logic and Voronoi Diagram Using for Cluster Head Selection in Ubiquitous Sensor Networks. Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. 14th International conference, NEW2AN 2014 and 7th Conference, ruSMART 2014. St. Petersburg, Russia, August 27–29. LNCS 8638, 27-29, Springer, 2014.

18. **Koucheryavy A.**, Salim A. Cluster-based Perimeter-coverage Technique for Heterogeneous Wireless Sensor Networks. Proceedings, ICUMT 2009 International Conference IEEE on Ultra Modern Telecommunications, Saint-Petersburg, Russian. 2009.

19. **Koucheryavy A.**, Salim A. Prediction-based Clustering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks. Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2010. ICACT 2010. Phoenix Park, Korea.

20. **Abakumov P.**, Koucheryavy A. The Cluster Head Selection Algorithm in the 3D USN. Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2014. ICACT 2014. Phoenix Park, Korea.

21. **Kucherjavyj A. E.** Vybor golovnogoz uzla klastera v odnorodnoj besprovodnoj sensornoj seti / A. E. Kucherjavyj, A. Salim // Jelektrosvjaz'. – 2009. – № 8.

22. **Al'-Naggar Ja. M.** Algoritm vybora golovnogoz uzla klastera dlja vsepronikajushhih sensornyh setej / Ja. M. Al'-Naggar // Jelektrosvjaz'. – 2014. – № 9.

23. **Abakumov P. A.** Algoritm vybora golovnogoz uzla klastera sensornoj seti v trehmernom prostranstve / P. A. Abakumov // Jelektrosvjaz'. – 2014. – № 4.

24. **Benmansour T.**, Moussaoui S. GMAC: Group Mobility Adaptive Clustering Scheme for Mobile Wireless Sensor Networks. International Symposium on Programming and Systems (ISPS). Proceedings, Algiers, Algeria, 25–27 April, 2011.

25. **Borsani L.**, Guglielmi S., Redondi A., Cesana M. Tree-Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. 8th International Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services, WONS'2011, Bardonecchia, Italy, January 2011.

26. **Kim H.** An Efficient Clustering Scheme for Data Aggregation Considering Mobility in Mobile Wireless Sensor Networks. International Journal of Control and Automation, 2013, v. 6, № 1.

27. **Kim D. S.**, Chung Y. J. 'Self-organization routing protocol supporting mobile nodes for wireless sensor network'. Proc. First Int. MultiSymp. on Computer and Computational Sciences, Hangzhou, China, June 2006.

28. **Deng S.**, Li J., Shen L. " Mobility-based clustering protocol for wireless sensor networks with mobile nodes" 1 National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, 2 Department of Physics and Telecommunications Engineering, Hunan City University, Yiyang, Hunan 413000, 10.1049/iet-wss.2010.0084, 2011.

29. **Hooggar M.**, Mehrani M., Attarzadeh N., Azimifar M. An Energy Efficient Three Dimensional Coverage Method for Wireless Sensor Networks. Journal of Academic and Applied Studies. V. 3 (3), March 2013.

30. **Attarzadeh N.**, Mehrani M. A New Three Dimensional Clustering Method for Wireless Sensor Networks. Global Journal of Computer Science and Technology. V.11, issue 6, version 1.0, April 2011.

31. **Koucheryavy A.** State of Art and Research Challenges for USN Traffic Flow Models. Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2014. ICACT 2014. Phoenix Park, Korea.

32. **Koucheryavy A.**, Prokopiev A. Ubiquitous Sensor Networks Traffic Models for Telemetry Applications. Smart Spaces and Next Generation Wired/Wireless Networking. 11th International Conference, NEW2AN 2011, and 4th Conference on Smart Spaces, ruSMART 2011. St. Petersburg, Russia, August 2011, Proceedings. LNCS 6869. Springer, 2011.

33. **Vybornova A.**, Koucheryavy A. "Ubiquitous Sensor Networks Traffic Models for Medical and Tracking Applications" in The 12th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking NEW2AN 2012. Aug. 2012 Saint-Petersburg. Springer LNCS 7469.

34. **Koucheryavy A.**, Muthanna A., Prokopiev A. Ubiquitous Sensor Networks Traffic Models for Image Applications. Internet of Things and its Enablers (INTHITEN). Conference, State University of Telecommunication, St. Petersburg, Russia, June 3–4, 2013. Proceedings.
35. **Koucheryavy A.**, Muthanna A., Prokopiev A. The Mixed Telemetry/Image USN in the Overload Conditions. Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2014. ICACT 2014. Phoenix Park, Korea.
36. **Makolkina M.**, Paramonov A., Prokopiev A., Koucheryavy A. The Quality of Experience Subjective Estimations and Hurst Parameters Values Interdependence. Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. 14th International conference, NEW2AN 2014 and 7th Conference, ruSMART 2014. St. Petersburg, Russia, August 27-29. LNCS 8638, 27-29, Springer, 2014.
37. **Vybornova A.**, Koucheryavy A. Traffic Analysis in Target Tracking Ubiquitous Sensor Networks. Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. 14th International conference, NEW2AN 2014 and 7th Conference, ruSMART 2014. St. Petersburg, Russia, August 27–29. LNCS 8638, 27–29, Springer, 2014.
38. **Paramonov A. I.** Modeli potokov trafika dlja setej M2M / A. I. Paramonov // Jel'ektrosvjaz'. – 2014. – № 4.
39. **Paramonov A.**, Koucheryavy A. M2M Traffic Models and Flow Types in Case of Mass Event Detection. LNCS 8638, 27–29, August, 2014.
40. **Chornaya D.**, Paramonov A., Koucheryavy A. Investigation of Machine-to-Machine Traffic Generated By Mobile Terminals. 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), IEEE, 2014, St. Petersburg, October 2014.
41. **Paramonov A. I.** Upravlenie trafikom mashina-mashina na osnove raspisanija / A. I. Paramonov // Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii. – 2014. – T. 56, № 2.
42. **Bogdanov I.**, Koucheryavy A., Paramonov A. The mobile Sen-sor Network Life-Time under Different Spurious Flows Intrusion. Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. 14th International conference, NEW2AN 2013 and 6th Conference, ruSMART 2013. St. Petersburg, Russia, August 27–29. LNCS 8121, Springer.
43. **Bogdanov I. A.** Harakteristiki zhiznennogo cikla mobil'noj sensornoj seti pri razlichnyh potokah lozhnyh sobytij / I. A. Bogdanov, A. I. Paramonov, A. E. Kucherjavjy // Jel'ektrosvjaz'. – 2013. – № 1.
44. **Bogdanov I. A.** Strukturnyj metod zashhity besprovodnyh sensornoj seti ot potokov lozhnyh sobytij / I. A. Bogdanov // Jelektrosvjaz'. – 2014. – № 11.
45. **Kirichek R. V.** Jelektromagnitnoe napadenie kak novyj vid ugrozy informacionnoj bezopasnosti / R. V. Kirichek, S. V. Danilin // II Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija «Aktual'nye dostizhenija evropejskoj nauki»: sbornik dokladov. – Sofija. – 2011.
46. **Kirichek R.** Methodological approach to making an electromagnetic chart of an IT object / F. Baidin, M. Zhukovsky, R. Kirichek, V. Chvanov // 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility: proceedings. – Long Beach, USA, 2011.

Киричек Руслан Валентинович – 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», kirichek@sut.ru

Парамонов Александр Иванович – 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», alex-in-spb@yandex.ru

Прокопьев Андрей 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», seti_sviazi@bk.ru

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», akouch@mail.ru

УДК 621.391, 004.942

И. А. Небаев

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

I. A. Nebaev

Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University
of Telecommunications

АНАЛИЗ МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАНЫХ НА ОСНОВЕ ПЕРФОРИРОВАННЫХ СВЕРТОЧНЫХ КОДОВ В КВАЗИСТАТИЧНОМ БЕСПРОВОДНОМ КАНАЛЕ С ЗАМИРАНИЯМИ

**ANALYSIS METHOD OF INCREASING DATA TRANSMISSION SPEED
BASED ON PUNCTURED CONVOLUTIONAL CODES FOR WIRELESS
QUASISTATIC FADING CHANNEL**

В статье представлен анализ метода повышения скорости передачи данных на основе перфорированных сверточных кодов для беспроводного квазистатического канала с замираниями. Результаты исследования полученные с помощью компьютерного имитационного моделирования системы передачи, позволили построить графики помехоустойчивости системы беспроводной передачи данных и оценить влияние алгоритма перфорирования проверочных символов на скорость и достоверность передачи информации.

In this article presents an analysis of error-correction with punctured convolution codes for a wireless quasi-static channel with fading and white noise, which simulated in a computer model. A series of tests allowed to research effects of code puncturing on data rate speed and reliability transmitting information in the wireless channel. Coding scheme and transmission system model, considered in this article, demonstrated the good possibility to increase the data rate without substantially changing the design of the modem and codec. All simulation results are obtained on the basis of high order QAM modem. In conclusion, are demonstrated the results of modeling and BER curves, showing the noise immunity of the information transmission system with considering channel.

системы передачи данных, обработка информации, помехоустойчивое кодирование, сверточный код, каналы с замираниями.

transmissions system, data processing, error-correcting codes, convolutional codes, fading channels.

Введение

В период быстрого развития инфокоммуникационных приложений обеспечение высокой скорости передачи информации и достоверности ее обработки является одной из первостепенных задач отрасли связи. Увеличение объемов информационного обмена требует повышения не только скорость передачи данных, но и ставит задачи обеспечения нового уровня

помехоустойчивости передаваемой информации. В широкополосных, оптических и других технологиях проводной связи данная задача успешно решается. Однако повышение скорости передачи данных и одновременное сохранение заданного уровня достоверности передаваемых данных в беспроводных каналах связи остается наукоемкой и комплексной задачей, требующей усовершенствования, как аппаратуры связи, так и алгоритмов обработки данных.

Для повышения скорости передачи данных в беспроводной связи используются различные алгоритмы и технологии обработки информации: MIMO, DSSS, CSSS, ШПС, OFDM, QAM высокого порядка модуляции и т. д. С другой стороны, все наиболее востребованные на сегодняшний день системы беспроводной передачи данных (Wi-Fi, Bluetooth, UWB, DVB, WCDMA, GSM и т. д.) построены с использованием методов помехоустойчивого кодирования, призванных обеспечить помехоустойчивую защиту информации. В области беспроводной радиосвязи широко распространены методы кодирования, основанные на применении сверточных кодов, каскадных кодов, турбокодов, кодов с малой плотность проверок на четность. Как показывают результаты исследований, комбинирование различных методов высокоскоростной модуляции и кодирования позволяет существенно повысить скорость передачи данных и одновременно обеспечить заданный уровень достоверности передаваемой информации [1].

1. Скорость передачи информации и скорость кодирования

Рассмотрим общие черты реализации помехоустойчивого кодирования для указанных систем передачи информации. Типичная реализация помехоустойчивого кодера основывается на сверточном коде скорости $R = k/n$, где k – длина информационной последовательности на входе кодера (или число входов кодера), а n – длина кодовой последовательности на выходе кодера (или число выходов кодера). Широкое распространение на практике получили кодеки со скоростями $R = 1/2$, $1/3$ и $2/3$. Очевидно, что длина передаваемого сообщения, с учетом проверочных символов, увеличивается в несколько раз, что может существенно снизить битовую скорость передачи данных. Для компенсации данного эффекта можно увеличивать параметр k . Однако существенное увеличение количества информационных входов лишено практического смысла, поскольку сложность декодирования сверточного кода с $k > 1$ увеличивается экспоненциально.

Альтернативный метод повышения скорости кодирования, а значит и результирующей скорости передачи данных, заключается в систематическом перфорировании проверочных символов с выхода кодера. Правило перфорирования определяется с помощью матрицы размерностью $n \times P_c$, где P_c – период удаления проверочных символов. Следует подчеркнуть важное достоинство данного метода, заключающееся в том, что в целом алгоритм декодирования при использовании перфорирования не изменяет-

ся, т. к. перфорированные проверочные символы не учитываются при вынесении решения по текущему переходу кодовой решетки.

Благодаря проведенным исследованиям, на данный момент известны различные варианты матриц перфорации, позволяющие увеличить кодую скорость за счет некоторого снижения избыточности проверочных символов [1]. Например, для сверточного кода $[171,133]_8$ со скоростью $R = 1/2$ и схемой кодера представленной на рисунке 1, увеличение скорости кодирования до $R_p = 2/3$, без изменения структурных параметров, может быть достигнуто за счет применения матрицы (1):

$$P_{1/2 \rightarrow 2/3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

При виде кодовой последовательности $[x_0^0, x_i^1, x_{i+1}^0, x_{i+2}^1, x_{i+3}^0, x_{i+4}^1, x_{i+5}^0, \dots, x_{n-1}^0, x_n^1]$, перфорированная последовательность примет вид $[x_0^0, x_i^1, x_{i+2}^1, x_{i+3}^0, x_{i+4}^1, \dots, x_n^1]$. Наложение матрицы (2) увеличит кодую скорость до $R_p = 3/4$, но существенно сократит количество проверочных символов: $[x_0^0, x_i^1, x_{i+2}^1, x_{i+3}^0, x_{i+5}^0, \dots, x_{n-1}^1]$.

$$P_{1/2 \rightarrow 3/4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

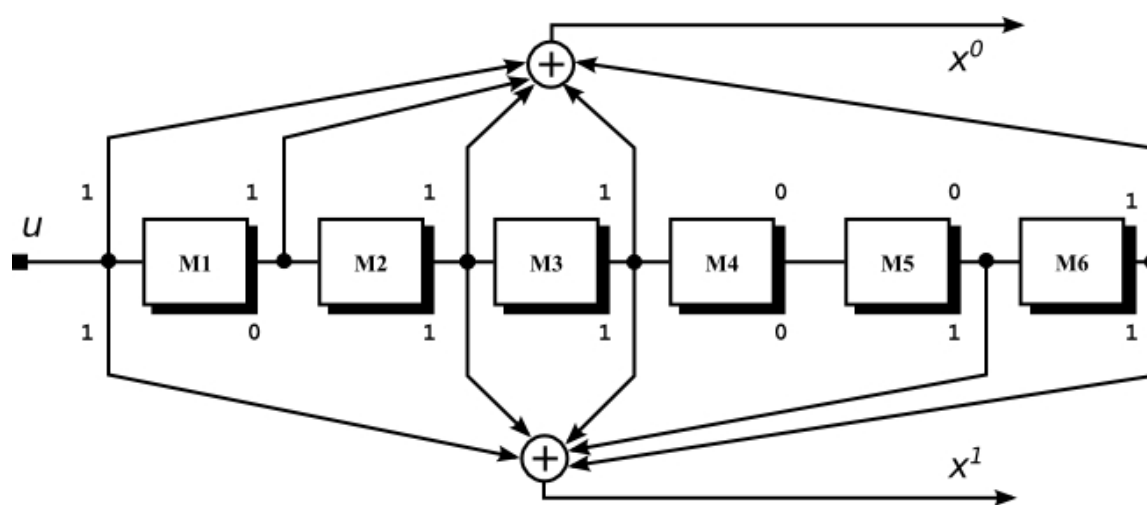


Рис. 1. Кодер сверточного кода $[171,133]_8$, $M=6$

Следует отметить, что скорости кодирования $R = 2/3$ можно добиться, реализовав и более сложный сверточный кодер, например, $[23,35,0; 0,5,13]_8$, схема которого представлена на рисунке 2. Однако такой подход потребует существенной структурной модификации, что породит не только технические трудности при внедрении системы передачи, но и экономические затраты на увеличенную элементную базу.

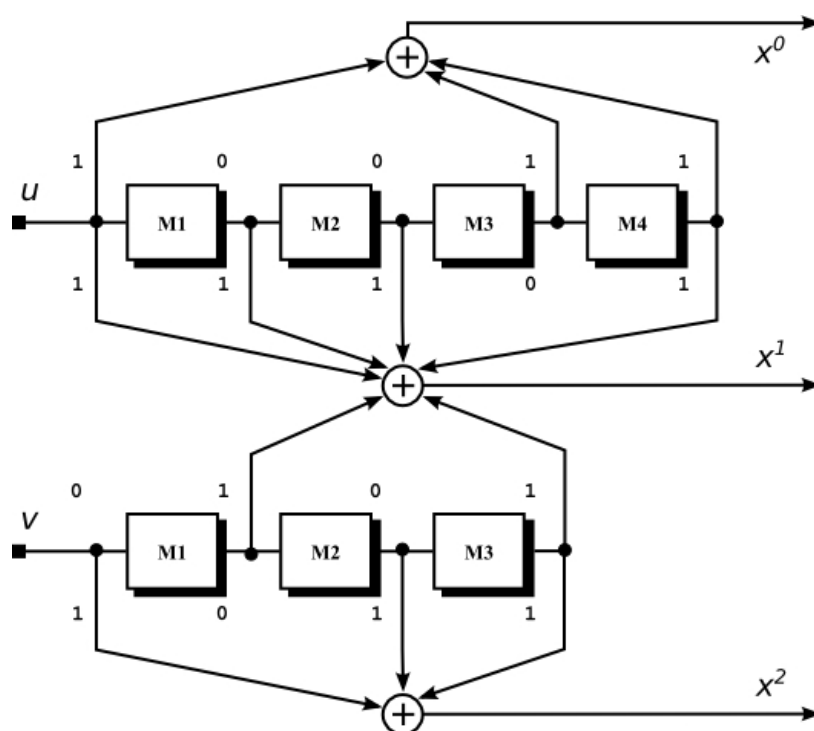


Рис. 2. Кодер сверточного кода $[23,35,0; 0,5,13]_8, M=[4; 3]$

2. Моделирование канала беспроводной связи

Известно, что беспроводные каналы в основном реализуются в условиях замираний [2], поэтому в качестве модели канала воспользуемся моделью квазистатического канала с замираниями и белым шумом (АБГШ), предназначенной для моделирования, например, таких систем беспроводной передачи как Wi-Fi WLAN [3].

Квазистатический канал представляет собой упрощенную модель беспроводного канала. Для квазистатического канала характерна медленная скорость (до 1 м/с) передвижения приемника (портативный компьютер, радиотелефон и т.д.) относительно передатчика (точка доступа, базовая станция и т.д.). Модель канала характеризуется длительным временем когерентности канала (τ), зависящим от величины доплеровского смещение частоты (f_d):

$$\tau = \frac{1}{100f_d}, \quad (3)$$

Очевидно, что доплеровская частота зависит от скорости движения приемопередатчика (v , м/с) и частоты несущего колебания (F_c , Гц):

$$f_d = \frac{vF_c}{c}, \quad (4)$$

где c – скорость распространения света ($3 \cdot 10^8$, м/с). При известной скорости передачи информации R_b можно определить количество информации

(C_b , бит), которое будет передано за время, в течение которого радиоканал стационарен:

$$C_b = \frac{R_b}{100f_d}. \quad (5)$$

Преобразуя выражение (5) получим:

$$C = \frac{R_b c}{100vF_c}. \quad (6)$$

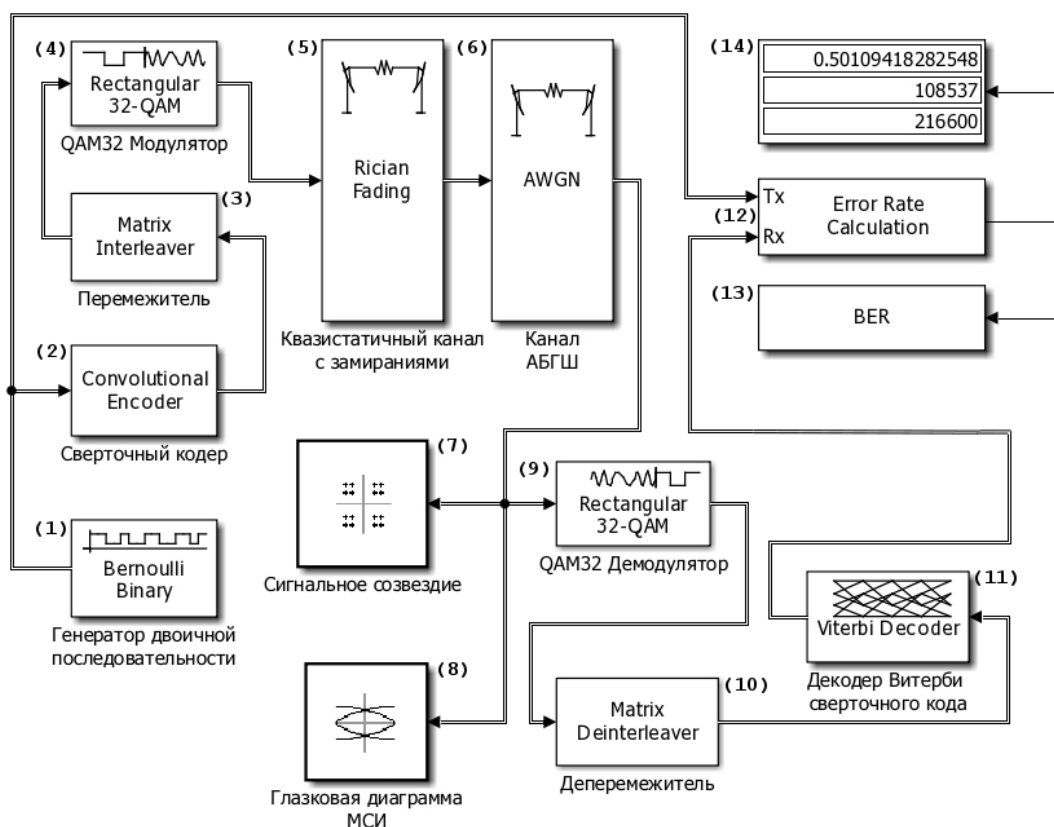


Схема модели в среде Simulink

Рис. 3.

Используя программную реализацию такого канала, и алгоритмы помехоустойчивого кодирования, получены результаты имитационного моделирования по исследованию помехоустойчивости канала передачи данных с использованием перфорированных сверточных кодов в квазистатическом канале с замираниями. На рисунке 3 представлена общая схема имитационной модели для среды Simulink пакета Matlab). Как отмечено на рисунке, модель включает в себя из блоки сверточного кодирования/декодирования (2, 11); блоки перемежения (3, 10); блоки квадратурно-амплитудной модуляции/демодуляции (QAM с размером созвездия $M = 32$) (4, 9); блоки имитации беспроводного канала с замираниями (5) и АБГШ (6), а также блок цифровой осциллографии (7, 8). Блок (12) выполняет

сравнение исходной информационной последовательности и результата декодирования сверточного декодера, с отображением информации о количестве ошибок (13, 14). Реализация блока модуляции QAM, в рассматриваемой модели, обусловлено широкой востребованностью на практике, поскольку данный вид модуляции обеспечивает увеличение скорости передачи данных по сравнению с ЧМ и ФМ методами модуляции. Очевидно, что в реализованной модели может быть использована QAM-модуляция более высокого порядка (разрядности): $M = [64, \dots, 1024]$.

3. Помехоустойчивость данных и скорость передачи

На рисунке 4 представлены графики рассеяния сигнального созвездия QAM32, полученные при различных соотношениях E_b/N_0 . На рисунке 4а представлен комплексный вид сигнального созвездия модулятора QAM32, использующий отображение двоичного сверточного кода в код Грея. На рисунке 4б демонстрируется рассеяние точек созвездия на демодуляторе при соотношении $E_b/N_0 = 0$. Как следует из вида рассеяния, воздействие помех на квадратурный сигнал достаточно велико – рассеяние сигнала при низком соотношении сигнал/шум имеет вид плотного скопления, что увеличивает вероятность ошибочного принятия решения по демодулируемому символу и способствует дальнейшему распространению ошибки при декодировании комбинации сверточного кода. Согласно результатам моделирования, при данном виде графика рассеяния QAM32, вероятность ошибки декодирования ($P_e(b)$) сверточного кода составляет 0,5–0,1. С увеличением соотношения E_b/N_0 (рис. 4с), учитывая амплитудное и фазовое искажение сигнальных точек, принятый сигнал QAM32 обладает выраженной степенью подобия исходной геометрии сигнального созвездия. Это приводит к значительному снижению количества ошибок при вынесении демодулятором решения относительно принятого сигнального символа. Декодирование с помощью имитационной модели показывает, что вероятность битовой ошибки при данном виде рассеяния опускается ниже 0,0001.

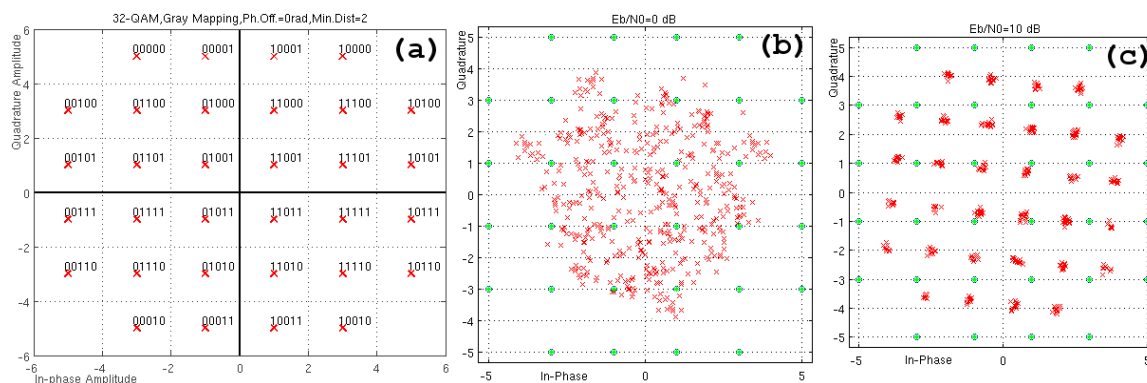


Рис. 4. Рассеяние точек сигнального созвездия: а) – исходный сигнал QAM32, б) – принятый сигнал при $E_b/N_0 = 0$ дБ, с) — принятый сигнал при $E_b/N_0 = 10$ дБ

Для анализа помехоустойчивости системы передачи данных в рассматриваемом канале, с помощью разработанной имитационной модели были проведены серии экспериментов по передаче информации с использованием различных схем сверточного кодирования рассмотренных ранее. На [рисунке 5](#) представлены графики помехоустойчивости, полученные в результате исследования влияния перфорирующей матрицы и скорости кодирования сверточного кодера на помехоустойчивость передаваемой информации. Кривая помехоустойчивости для некодированного сигнала QAM32, в рассматриваемом типе канала, демонстрирует вероятность битовой ошибки, постепенно приближающуюся к значению $P_e(b) = 10^{-2}$ на интервале $E_b/N_0 = [0 : 16]$ дБ. Применение рассмотренного ранее ([рис. 1](#)) сверточного кодера $[171,133]_8$ со скоростью кодирования $R = 1/2$ существенно повышает надежность системы передачи информации. Так при соотношении $E_b/N_0 = 11$ дБ вероятность битовой ошибки (ошибки декодирования) составляет не более 10^{-4} . С увеличением энергетической характеристики сигнала и снижением мощности помехи вероятность ошибки опускается ниже значения $P_e(b) = 10^{-5}$. Сверточный кодер, представленный на [рисунке 2](#), с более высокой скоростью кодирования $R=2/3$ (т. е. обладающий меньшим количеством проверочной информации) так же демонстрирует снижение вероятности ошибки декодирования с ростом E_b/N_0 . Данный код достигает $P_e(b) = 10^{-4}$ при 13 дБ, что на 2 дБ больше чем требуется для кодера $[171,133]_8$.

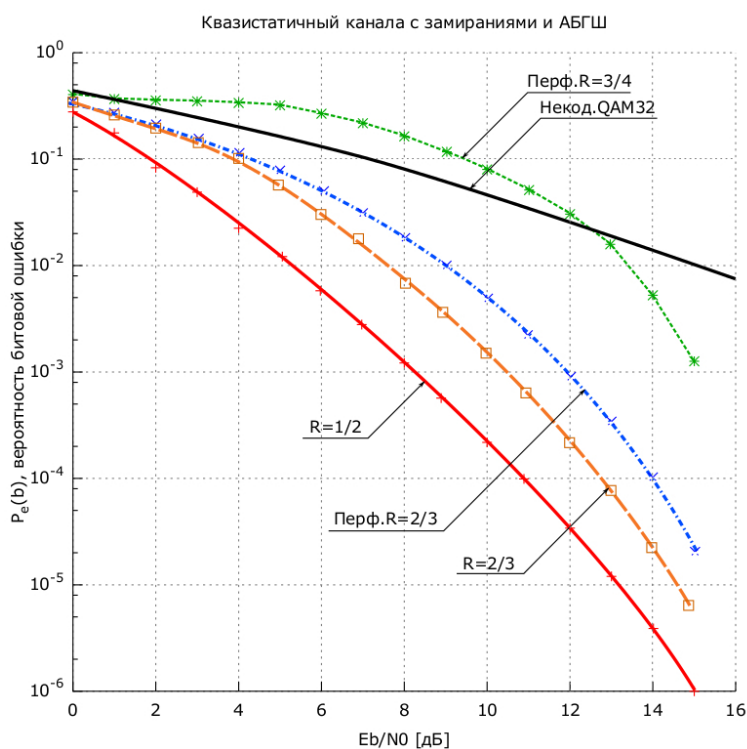


Рис. 5. Графики помехоустойчивости

Графики помехоустойчивости, построенные для сверточного кодера $[171,133]_8$ с перфорированием матрицами (1) ($R_p = 2/3$) и (2) ($R_p = 3/4$) показывают различные результаты. Как и ожидалось, увеличение скорости кодирования с помощью перфорирования части проверочных символов снизило уровень достоверности передаваемой информации. Однако, кодер $[171,133]_8$ при $R_p = 2/3$ демонстрирует вероятность битовой ошибки $P_e(b) = 10^{-3}$ при $E_b/N_0 = 12$ дБ, а при $E_b/N_0 = 14$ дБ вероятность ошибки декодирования опускается до уровня 10^{-4} , что позволяет сравнивать результаты декодирования перфорированного кода $[171,133]_8$ и кодера $[23,35,0; 0,5,13]_8$ со скоростью $R = 2/3$ (неперфорированный код). Несмотря на более высокий уровень E_b/N_0 , перфорированный код обладает практически сравнимыми результатами декодирования, которые получены без существенного изменения структуры кодека.

Вид графиков помехоустойчивости для сравниваемых кодеров позволяет сделать вывод, что применение перфорирования для сверточного кода $[171,133]_8$ с целью повышения скорости кодирования до $R_p = 2/3$, обладает практической целесообразностью. С другой стороны, вид графика помехоустойчивости для перфорированного сверточного кода $[171,133]_8$ с $R_p = 3/4$, подчеркивает, что применение перфорирования более высокого порядка (например, использование матрицы (2)) может иметь практический смысл только при значительном увеличении соотношения С/Ш, поскольку сравниваемая вероятность ошибки декодирования $P_e(b) = 10^{-3}$ достигается только при приближении к $E_b/N_0 = 15$ дБ.

Заключение

Моделирование продемонстрировало, что применение помехоустойчивых сверточных кодов с различной скоростью кодирования обеспечивает достаточно высокий уровень достоверности системы. Результаты показывают, что с ростом E_b/N_0 достоверность системы с перфорированным кодом приближается к достоверности системы с кодеком более сложной конструкции. Это приводит к выводу о целесообразности применения перфорирования в условиях беспроводного квазистатического канала. В перспективе, представленные схемы сверточных кодеков и рассмотренные алгоритмы перфорации могут быть использованы для построения системы передачи информации с адаптивной обратной связью (Adaptive ARQ) [4]. С другой стороны, отдельного исследования требует вопрос эффективности передачи информации с реализацией алгоритмов «мягкого декодирования» в рассмотренных условиях [5]. С ростом требований к скорости передачи информации в ближайшем будущем, ожидается широкое распространение гибридных систем с мягким декодированием на практике.

Библиографический список

1. **Варгаузин В. А.** Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи / В. А. Варгаузин, И. А. Цикин. – СПб. : БХВ-Петербург, 2013. – 352 с.
2. **Галкин В. А.** Цифровая мобильная радиосвязь : учебное пособие для вузов / В. А. Галкин. – М.: Горячая линия—Телеком, 2007. – 432 с.
3. Рошан П. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11 / П. Рошан, Дж. Лиэри. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2004. – 304 с.
4. **Небаев И. А.** Компьютерное моделирование системы кодирования параллельным сверточным турбокодом для повышения уровня достоверности передачи данных в непрерывном канале / И. А. Небаев // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2013. – № 8. – С. 41–45.
5. **Небаев И. А.** Имитационное моделирование системы обработки и передачи информации на основе ФМ-2 и сверточных кодов для беспроводных каналов с замираниями / И. А. Небаев, М. А. Масс // III Международная научно-техническая и научно-методическая: сб. научных статей / под ред. С. М. Доценко. – СПб. : Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2014. – С. 308–313.

References

1. **Vargauzin V. A.** Metody povysheniya jenergeticheskoj i spektral'noj jeffektivnosti cifrovoj radiosvjazi / V. A. Vargauzin, I. A. Cikin. – SPb. : BHV-Peterburg, 2013. – 352 s.
2. **Galkin V. A.** Cifrovaja mobil'naja radiosvjaz' : uchebnoe posobie dlja vuzov / V. A. Galkin. – M.: Gorjachaja linija—Telekom, 2007. – 432 s.
3. **Roshan P.** Osnovy postroeniya besprovodnyh lokal'nyh setej standarta 802.11 / P. Roshan, Dzh. Lijeri. – M. : Izdatel'skij dom «Vil'jams», 2004. – 304 s.
4. **Nebaev I. A.** Komp'juternoe modelirovanie sistemy kodirovanija parallel'nym svertochnym turbokodom dlja povysheniya urovnja dostovernosti peredachi dannyh v nepreryvnom kanale / I. A. Nebaev // Vestnik komp'juternyh i informacionnyh tehnologij. – 2013. – № 8. – S. 41–45.
5. **Nebaev I. A.** Imitacionnoe modelirovanie sistemy obrabotki i peredachi informacii na osnove FM-2 i svertochnyh kodov dlja besprovodnyh kanalov s zamiraniyami / I. A. Nebaev, M.A.Mass // III Mezhdunarodnaja nauchnotehnicheskaja i nauchno-metodicheskaja: sb. nauchnyh statej / pod red. S. M. Docenko. – SPb. : Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet telekommunikacij im. prof. M. A. Bonch-Bruevicha, 2014. – S. 308–313.

Небаев Игорь Алексеевич – кандидат технических наук, 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», inebaev@spbgut.ru

УДК 621.391

А. С. Мутханна

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

A. S. Muthanna

Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University
of Telecommunications

А. Е. Кучерявый

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

A. Y. Koucheryavy

Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University
of Telecommunications

D2D – КОММУНИКАЦИИ В СЕТЯХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ 5G

D2D – COMMUNICATION IN THE 5G MOBILE NETWORKS

Сверхплотная гетерогенная сетевая архитектура Het-Nets является основой для эволюции сети мобильной связи пятого поколения 5G, вопросы взаимодействия разнообразных устройств между собой в гетерогенной зоне без участия базовой станции являются одними из ключевых. В статье рассматриваются D2D-коммуникация как перспективная технология для обеспечения низкого энергопотребления, высокой скорости передачи данных и меньших задержек между конечными пользователями.

The heterogeneous networks are the basis for 5G mobile networks evolution. The one of the major challenges is the interaction between the devices in Het-Nets without the base station. The direct device-to-device communication – D2D technology is analyzed in the paper. The D2D – communication technology can provide low power, high data rate and low latency services between end-users.

мобильные сети пятого поколения, взаимодействие устройство-устройство, гетерогенные сети.

Mobile Networks 5G, D2D – Communication, Heterogeneous Network.

Введение

Развитие сетей и систем телекоммуникаций в направлении реализации концепции Интернета Вещей [1, 2] приводит к принципиально иным количественным оценкам клиентской базы сетей связи [3]. Для эффективного функционирования триллионных сетей используются методы самоорганизации [4, 5]. Самоорганизующиеся беспроводные сенсорные сети [6, 7], автомобильные сети [8], медицинские сети [9] функционируют на тех же территориях, что и сети мобильной связи. Это приводит к появлению так называемых гетерогенных зон базовых станций систем длительной эволюции [10]. При этом изначально при создании LTE задача поиска новых форм взаимодействия между различными составляющими гетерогенной

зоны не ставилась. Сети мобильной связи 3G и 4G предназначались, в первую очередь, для повышения эффективности таких показателей, как пиковая скорость передачи данных и спектральное уплотнение каналов [15]. При разработке же сети мобильной связи пятого поколения 5G, в основе которой лежит сверхплотная гетерогенная сетевая архитектура Het-Nets [13], вопросы взаимодействия разнообразных устройств между собой в гетерогенной зоне без участия базовой станции являются одними из основных. Гетерогенные сети Het-Nets отличаются наличием множества частотных диапазонов, применением различных технологий радиодоступа и использованием базовых станций с различной величиной зон покрытия. Иными словами, сеть класса Het-Nets может включать в себя группу разнообразных ячеек, поддерживающих достаточно большой спектр технологий. При этом в сетях класса Het-Nets могут присутствовать макроячейки в лицензируемых диапазонах (например, LTE), средние ячейки в нелицензируемых диапазонах (например, Wi-Fi), малые ячейки высокочастотного спектра (например, mm-wave).

В фокусе внимания концепции 5G со сверхплотными сетями Het-Nets стоит не столько технологический аспект, сколько интеграция современных технологий, сближающих общество. Технологии продолжают свое развитие в направлении к более высокой производительности и все большему числу возможностей. Прозрачная интеграция существующих и новых технологий способствует повышению качества обслуживания и появлению целого ряда новых услуг. Стандарт 5G как набор органически интегрированных технологий радиодоступа обуславливает низкий уровень стоимости развертывания, эксплуатации и обслуживания сети, что позволяет операторам предоставлять популярные услуги по привлекательной для пользователя цене, сохраняя выгоду их предоставления.

В рамках стандарта 5G делаются первые шаги к тому, чтобы клиентские устройства стали неотъемлемой частью этого стандарта. В ситуациях, когда пользователи находятся близко друг от друга, в том числе, когда информация достаточно специфична для конкретного места её использования (например, в случае различных служб ближнего действия, когда пользователь взаимодействует и обменивается информацией с непосредственным окружением), целесообразно осуществлять обмен данными по протоколу «устройство-устройство» (D2D), нежели посредством инфраструктуры сети. Под управлением сетевого протокола собственно D2D - протокол обеспечивает локальным службам надежность класса оператора связи, поскольку сама сеть может управлять D2D- трафиком. Более того, D2D – протокол позволяет использовать локальную сеть даже в случае повреждения сетевой инфраструктуры.

В статье дается анализ возможностей интеграции технологии D2D в сетевые коммуникационные технологии стандарта 5G.

1. Версии консорциума 3GPP

Консорциум 3GPP, разрабатывающий технические спецификации в области сетевых технологий в мобильных системах, приступил к исследованию проблемы длительной эволюции в конце 2004 года. К настоящему времени практически завершены работы по разработке стандартов, которые входят в 12 версию [12]. Одновременно рабочая группа 3GPP RAN занималась совершенствованием сетей следующего поколения [19]. К настоящему времени утверждены основные стандарты, принадлежащие 13 версии. Системы длительной эволюции стали стратегическим направлением развития сетей мобильной связи, обеспечивающим повышение скорости передачи данных при спектральном уплотнении каналов. Эволюционные версии консорциума 3GPP приведены на рисунке 1.

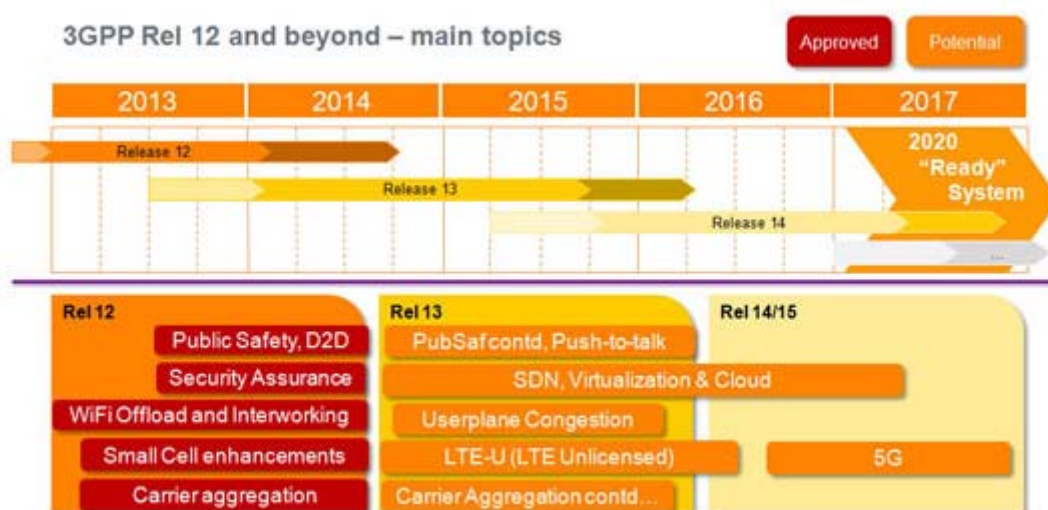


Рис. 1. Версии 3GPP

Технологии LTE и D2D позволяют также улучшить состояние дел с остро стоящими проблемами информационной безопасности [18]. С учетом вышеизложенного уже в версии 12 систем длительной эволюции было введено понятие локализованных услуг для близко находящихся пользователей (Proximity Services) [12] с использованием стандарта D2D. В версии 13 систем длительной эволюции рассматривается уже два сценария для таких локализованных услуг:

- прямая передача данных, когда два устройства обмениваются данными без участия какого-либо сетевого элемента;
- локальный обмен данными, когда пользовательское оборудование D2D обменивается данными с локальными сетями с использованием ретрансляции через управляющий узел без участия элементов базовых сетей.

Очевидно, что во втором случае проблемы информационной безопасности могут быть успешно решены на уровне локальной сети. Первый сценарий, естественно, требует дальнейшего исследования в указанной

предметной области. Из работ в данной области следует отметить проект Европейской комиссии EU FP7 METIS, в котором предусматривается и управление помехами [17].

2. D2D – коммуникации

Как уже отмечалось, D2D- коммуникации позволяют устройствам связываться друг с другом напрямую без маршрутизации данных через сетевую инфраструктуру (рис. 2). Возможные сценарии применения D2D-коммуникаций включают, среди прочего, локализованные услуги, когда D2D- устройства, обнаруживая близость, взаимодействуют между собой. К числу таких услуг относятся: социальные приложения, реализация которых обусловлена близостью вызванного пользователя, реклама, местный обмен информацией; смарт-связь («умная» связь в условиях конкретной, измеримой, достижимой и значимой цели). Другие приложения включают в себя поддержку информационной безопасности, когда D2D-устройства обеспечивают подключение к локальной сети, в том числе и в случае повреждения инфраструктуры гетерогенной зоны 5G.

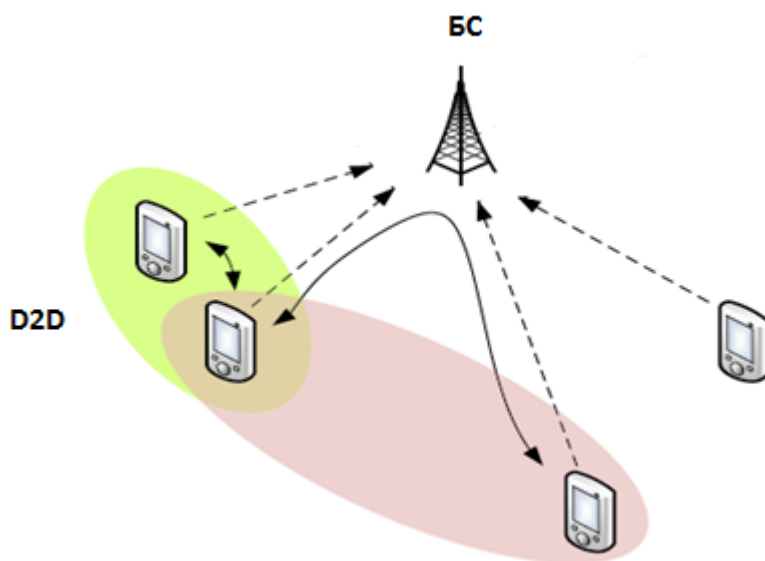


Рис. 2. D2D- коммуникации

D2D-коммуникации должны дать возможность пользователям почувствовать преимущества сверхплотной сетевой архитектуры с точки зрения уменьшения длительности задержек, увеличения скорости передачи данных и сокращения потребления энергии. D2D-коммуникации позволят решать также новые задачи в области проектирования и безопасности, управления мобильностью и помехами. Кроме того, успех этой технологии в значительной степени зависит от сценариев, в которых пользователи

в непосредственной близости друг от друга общаются, а также от приложений, которые будут разработаны в ближайшие годы.

2.1. D2D-коммуникации в лицензированном диапазоне частот

Лицензированный спектр частот продолжает оставаться дефицитным и дорогим, и операторы предпринимают попытки добиться дополнительных полос для мобильной связи, если их недостаточно для удовлетворения ожидаемого спроса. Сети 5G позволяют найти новые способы увеличения пропускной способности сети в существующих условиях её развертывания. Одним из перспективных методов использования сети D2D, о чем свидетельствует большое количество литературы по этой теме, является внедрение сетевого помощника - сети содействия (network assistant). Сеть содействия представляет собой программу для общения и эффективного взаимодействия в локальной сети, не требующей работы выделенного сервера. Сеть содействия осуществляет синхронизацию коммуникационных устройств (например, Aura-net) и управляет каждым соединением D2D. В последних публикациях [20], [21] предложены методы ослабления помех путем использования информации о состоянии канала, информации о местоположении пользователя и т. д.

Исследования, посвященные D2D-коммуникациям [20], [22], отличаются количеством общающихся узлов – количеством базовых станций, сотовых пользователей и D2D-устройств. В недавней статье, посвященной D2D-коммуникациям в лицензированных группах частот [23], мобильная сеть использовалась только для синхронизации. Учитывая внимание, которое в настоящее время уделяется сетям LTE (и к предстоящему кризису их потенциала), многие показатели улучшения этой технологии уже рассмотрены и оценены для лицензионной зоны D2D –коммуникаций: дизайн схем D2D-Aware (MIMO), сетевое кодирование, последовательное подавление помех, беспроводное распределение видео через D2D и т. д. В ответ на исследования D2D консорциум 3GPP начал работы по технико-экономическому обоснованию проекта LTE-Direct – синхронной системы, работающей в лицензированных спектрах под контролем оператора [24].

2.2. D2D-коммуникации в нелицензированном спектре частот

Оператор не может претендовать на исключительное использование любого нелицензионного спектра, ибо это связано с промышленными, научными и медицинскими частотными диапазонами. В нелицензированном спектре частот работают, например, такие известные технологии как Bluetooth и WiFi. Их популярность растет в беспроводных персональных и локальных вычислительных сетях (WPANs / WLAN).

В обычных беспроводных сетях точки доступа, как правило, не имеют никаких средств управления ресурсами. Специальные пользовательские

подключения предпочитают нелицензионные группы каналов в распределенном режиме. Технологию Wi-Fi часто критикуют за неудовлетворительное качество обслуживания QoS. Однако эта технология, как правило, обеспечивает пользователям высокую скорость передачи данных и эффективность работы в сравнении с конкурирующими беспроводными технологиями. В принципе, специальные соединения могут обеспечить устойчивые результаты работы и без помощи точек доступа. Недавно была разработана технология подключения пользовательских устройств Wi-Fi-Direct (WFD) [11], позволяющая общаться этим устройствам без помощи инфраструктуры путем присвоения одному устройству статуса " Владелец группы", а другим – статуса "Клиенты". Каждый «Владелец группы» WFD обеспечивает синхронизацию для всех «Клиентов» WFD, связанных с ним, что позволяет устройствам эффективно обнаруживать друг друга и общаться между собой.

Поскольку многие пользовательские устройства уже поддерживают WFD (и ожидается, что их доля на рынке будет только увеличиваться), становится важным свести к минимуму величину накладных расходов сигнализации. Таким образом, будущие системы D2D смогут извлечь выгоду из той или иной формы управления и поддержки со стороны инфраструктуры. Для аутентификации и безопасности устройств D2D ретранслируется необходимая информация о безопасности сотовой инфраструктуры.

3. Типы D2D- коммуникаций. Основные технические проблемы

Двухуровневая сеть 5G включает уровень макроячейки и уровень устройств (device-tier). Макроячейка – базовая станция BS-to-device, как и в обычной сотовой системе. Предположим, что устройства поддерживают D2D-коммуникации. Если устройства подключаются к сотовой сети через базовую станцию (БС), то эти устройства называются работающими на уровне макроячейки. Если устройства подключаются непосредственно к другим устройствам или работают при содействии других устройств, то эти устройства, как говорят, работают на уровне устройств. В густонаселенных районах устройства будут иметь возможность взаимодействовать друг с другом, создавая ad hoc или mesh сети.

В свою очередь, оператор может иметь различные уровни управления. Может, например, осуществляться полный или частичный контроль над распределением ресурсов между источником и ретранслятором. С другой стороны, оператор вообще может не иметь никаких функций контроля.

Ниже рассматриваются четыре основных типа устройств уровня коммуникаций [25].

Первый тип устройств уровня коммуникаций – устройства DR-OC (Device relaying with operator controlled link establishment). Такие устройства располагаются на окраине инфраструктуры или в зоне со слабым покрытием.

Устройства взаимодействуют с базовой станцией через ретрансляцию информации при помощи других устройств. Возможно достижение высокого качества обслуживания QoS. Общение оператора с устройством ретрансляции характеризуется установлением полного или частичного контроля над установлением соединения (рис. 3).

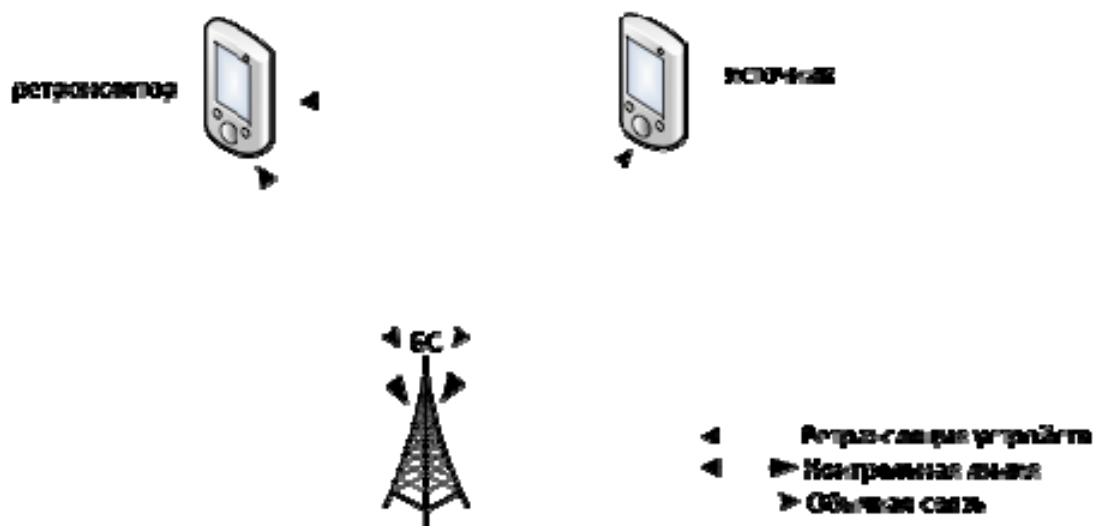


Рис. 3. Взаимодействие устройств с базовой станцией через ретрансляцию информации при помощи других устройств

Второй тип устройств уровня коммуникаций – устройства DC-OC (Direct D2D communication with operator controlled link establishment). Имеет место прямое взаимодействие D2D-устройств, при котором обмен информацией между источником и получателем может осуществляться без участия базовой станции, но их взаимодействие координируется оператором (рис. 4).

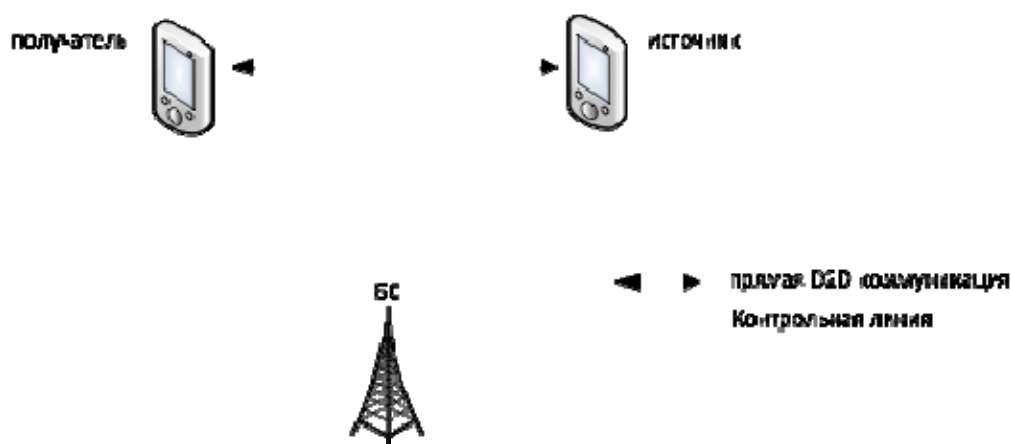


Рис. 4. Прямое взаимодействие D2D-устройств

Третий тип устройств уровня коммуникаций – устройства DR-DC. Устройства источника и получателя несут ответственность за координацию взаимодействия с использованием ретрансляторов, при этом оператор не участвует в процессе установления соединения (рис. 5).

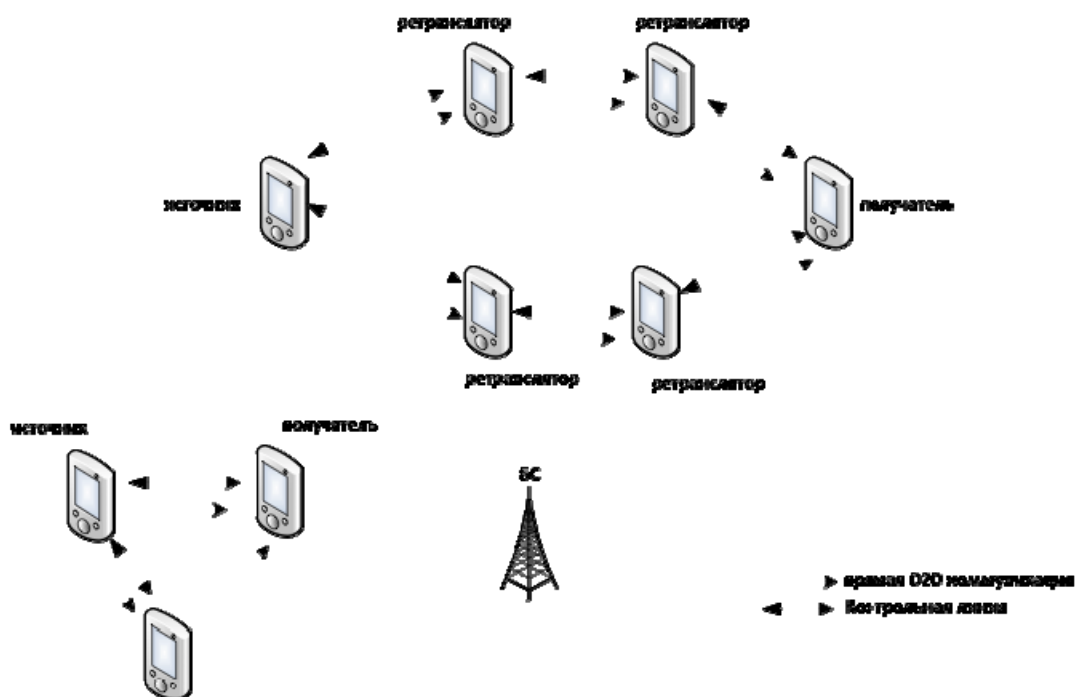


Рис. 5. Взаимодействие источника и потребителя через устройства ретрансляции

Четвертый тип устройств уровня коммуникаций – устройства DC-DC. В этом случае устройства источника и потребителя имеют прямую связь друг с другом без какого-либо контроля со стороны оператора. Это означает, что устройства источника и назначения должны использовать ресурс таким образом, чтобы обеспечить ограниченный уровень помех для других устройств одного и того же уровня и уровня макроячейки (рис. 6).

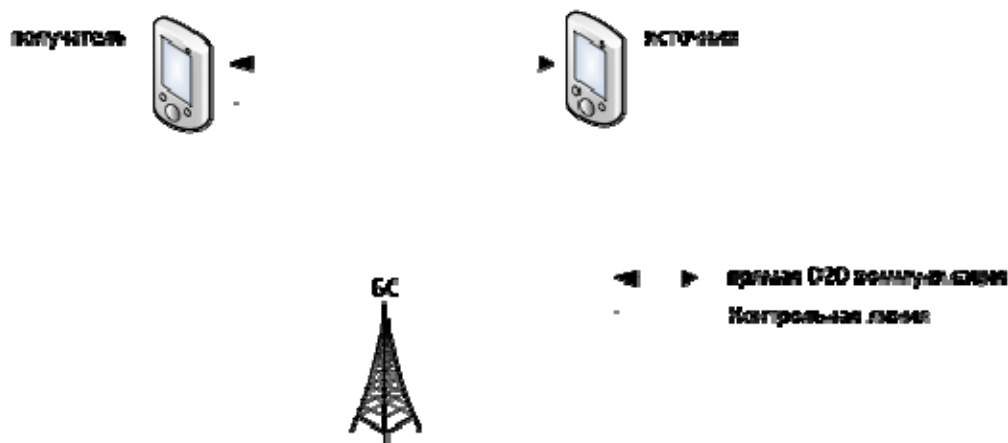


Рис. 6. Прямое взаимодействие D2D-устройств по типу DC-DC

Чтобы улучшить двухуровневую сеть мобильной связи пятого поколения 5G по сравнению с классической архитектурой сотовой системы, необходимо преодолеть ряд проблем, связанных с вопросами безопасности и управлением помехами.

Поскольку данные пользователя перенаправляется через устройства других пользователей, безопасность должна поддерживаться для обеспечения секретности. Одним из возможных решений проблемы безопасности является закрытый доступ для устройств, которые могут работать на уровне этих устройств. В закрытом доступе каждое устройство должно иметь список «доверенных» устройств, а также устройств, не включенных в этот список, но которые могут использовать уровень макроячейки для соединения с этим устройством. Например, пользователи должны удовлетворять определенному уровню конфиденциальности: они либо знают друг друга, либо прошли проверку подлинности, либо имеют доверенных лиц и т. п. В открытом доступе каждое устройство может выступать в качестве ретранслятора для других устройств без каких-либо ограничений. В этом случае проблема безопасности является сложной открытой задачей исследования. При этом проблемы безопасности в D2D-коммуникациях включают в себя идентификацию потенциальных нападений, угроз и уязвимости системы. Предыдущие работы по вопросам безопасности M2M-коммуникаций [26] могут быть использованы для решения вопросов безопасности в открытом доступе D2D.

Другой значительной проблемой в двухуровневой системе управления являются помехи. В DR-OC и DC-OC распределение ресурсов и установление соединения выполняются БС. Таким образом, БС может облегчить проблему управления помехами при помощи централизованных методов. С другой стороны, в DR-DC и DC-DC нет централизованного объекта для наблюдения за распределением ресурсов между устройствами. Работа устройств в той же лицензированной полосе обязательно будет влиять на пользователей макроячейки.

Для обеспечения минимального влияния на производительность существующей макроячейки двухуровневая сеть должна иметь стратегию управления помехами и соответствующими схемами распределения ресурсов. Кроме помех между макроячейкой и уровнем устройства, существуют также помехи между пользователями на уровне устройств. В DR-OC, как показано на [рисунке 3](#), где БС является одной из взаимодействующих сторон, некоторые из вышеупомянутых проблем можно решить путем управления БС с использованием существующих методов [6]. Базовая станция БС может аутентифицировать устройства ретрансляции и использовать соответствующее шифрование для обеспечения достаточного уровня конфиденциальности для информации устройств. БС также может управлять распределением спектра между устройствами ретрансляции, чтобы защитить их от вмешательства со стороны других устройств.

В DC-OC, как показано на рисунке 4, устройства взаимодействуют непосредственно друг с другом и с оператором. В частности, оператор имеет дело с аутентификацией доступа и управлением распределения ресурсов. В этом случае оператор имеет полный контроль над D2D-коммуникациями. Сеть может либо динамически назначать ресурсы для каждого соединения D2D таким же образом, как обычная сотовая сеть, либо назначать выделенный пул ресурсов для всех соединений D2D.

В DR-DC и DC-DC нет базовой станции или сервера для управления устройствами. Как показано на рисунках 5 и 6, многочисленные устройства могут взаимодействовать друг с другом в условиях, когда одно или несколько устройств могут играть роль ретранслятора для других устройств. Этот тип сетей является более сложным для анализа на сегодняшний день, чем предыдущие, так как отсутствует централизованный контроль ретрансляции. Для решения проблем настройки соединения, управления помехами и распределения ресурсов должны использоваться распределенные методы, что является актуальной исследовательской задачей для D2D-коммуникаций.

Заключение

В статье рассматривается сеть мобильной связи пятого поколения 5G, включая D2D-коммуникации. Приводится классификация устройств D2D. Проанализированы проблемы создания сетей связи 5G и сформулированы открытые научно-исследовательские вопросы.

Библиографический список

1. Кучерявый А. Е. Интернет Вещей / А. Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2013. – № 1.
2. Гольдштейн Б. С. Сети связи пост-NGN / Б. С. Гольдштейн, А. Е. Кучерявый. – СПб. : БХВ, 2013.
3. Кучерявый А. Е. Триллионные сети / А. Е. Кучерявый // Телекоммуникации. – 2013. – № 71.
4. Кучерявый А. Е. Самоорганизующиеся сети / А. Е. Кучерявый, А. В. Прокопьев, Е. А. Кучерявый. – СПб. : Любавич, 2011.
5. Кучерявый А. Е. Самоорганизующиеся сети и новые услуги / А. Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2009. – № 1.
6. Кучерявый А. Е. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчёта / А. Е. Кучерявый, А. И. Парамонов, Е. А. Кучерявый // ФГУП ЦНИИС, 2008.
7. Кучерявый А. Е. От e-России к u-России: тенденции развития электросвязи / А. Е. Кучерявый, Е. А. Кучерявый // Электросвязь. – 2005. – № 5.
8. Koucheryavy Y., Jakubiak J. Research Challenges in Vehicular Ad hoc Networks. Proceedings, IEEE CCNC 2008, January 10–12, 2008. Las Vegas, USA.
9. Кучерявый А. Е. Сети связи с малыми задержками / А. Е. Кучерявый, А. И. Парамонов, Я. М. Аль-Наггар // Электросвязь. – 2013. – № 12.

10. **Футахи А.** LTE и беспроводные сенсорные сети / А. Футахи, А. Е. Кучерявый, Е. А. Кучерявый // Мобильные телекоммуникации, ноябрь 2012.
11. **Koucheryavy Y.**, Pyattaev A., Johnsson K., and Andreev S. “3GPP LTE Traffic Offloading onto WiFi Direct,” in Proc. of the IEEE WCNC – Workshop on Mobile Internet: Traffic Modeling, Subscriber Perception Analysis and Traffic-aware Network Design, 2013.
12. **Astely D.** et al., “LTE Release 12 and Beyond,” IEEE Commun. Mag., vol. 51, no. 7, 2013, PP. 154–60.
13. **Koucheryavy Y.**, Andreev S., Pyattaev A., Johnsson K. and Galinina O., “Cellular traffic offloading onto network-assisted device-to-device connections,” IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 4, PP. 20–31, 2014.
14. **Cisco Visual** Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013–2018, February 2014.
15. **3GPP LTE** Release 10 & beyond (LTE-Advanced).
16. **Lei L.** et al., “Operator Controlled Device-to-Device Communications in LTE-Advanced Networks,” IEEE Wireless Commun., vol. 19, no. 3, June 2012, PP. 96–104.
17. **METIS**, Deliverable D1.1. Scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system, May, 2013. Available at <https://www.metis2020.com/documents/deliverables>
18. **Doppler K.**, Rinne M., Wijting C., Ribeiro C. B., Hugl K., "Device-to- Device Communication as an Underlay to LTE-Advanced Networks," IEEE Communications Magazine, vol. 47, no. 12, PP. 42–49.
19. **Hoymann C.** et al., “Relaying Operation in 3GPP LTE: Challenges and Solutions,” IEEE Commun. Mag., vol. 50, no. 2, Feb. 2012, PP. 156–62.
20. **Yu C.-H.**, Doppler K., Ribeiro C., and Tirkkonen O. “Resource sharing optimization for device-to-device communication underlaying cellular networks,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 10, PP. 2752–2763, August 2011.
21. **Kaufman B.**, Lilleberg J. and Aazhang B. “Spectrum sharing scheme between cellular users and ad-hoc device-to-device users,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 12, PP. 1038–1049, March 2013.
22. **Xu S.**, Wang H., Chen T., Peng T., and Kwak K., “Device-to-device communication underlaying cellular networks: Connection establishment and interference avoidance,” KSII Transactions on Internet and Information Systems, vol. 6, PP. 203–228, January 2012.
23. **Vigato A.**, Vangelista L., Measson C. and Wu X. “Joint discovery in synchronous wireless networks,” IEEE Transactions on Communications, vol. 59, pp. 2296–2305, August 2011.
24. **Qualcomm Technologies**, LTE Direct: The Case for Device-to-Device Proximate Discovery, February 2013.
25. **Mohsen Nader Tehrani**, Murat Uysal, and Halim Yanikomeroglu, “Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks: Challenges, Solutions, and Future Directions” IEEE Communications Magazine, May 2014
26. **Cha I.** et al., “Trust in M2M Communication,” IEEE Vehic. Tech. Mag., vol. 4, no. 3, Sept. 2009, PP. 69–75.

References

1. **Kucherjavyj A. E.** Internet Veshhej / A. E. Kucherjavyj // Jelektrosvjaz'. – 2013. – № 1.
2. **Gol'dshtejn B. S.** Seti svjazi post-NGN / B. S. Gol'dshtejn, A. E. Kucherjavyj. – SPb. : BHV, 2013.
3. **Kucherjavyj A. E.** Trillionnye seti / A. E. Kucherjavyj // Telekommunikacii. – 2013. – № 71.

4. **Kucherjavyj A. E.** Samoorganizujushhiesja seti / A. E. Kucherjavyj, A. V. Prokop'ev, E. A. Kucherjavyj. – SPb. : Ljubavich, 2011.
5. **Kucherjavyj A. E.** Samoorganizujushhiesja seti i novye uslugi / A. E. Kucherjavyj // *Jelektrosvjaz'*. – 2009. – № 1.
6. **Kucherjavyj A. E.** Seti svjazi obshhego pol'zovanija. Tendencii razvitija i metody raschjota / A. E. Kucherjavyj, A. I. Paramonov, E. A. Kucherjavyj // FGUP CNIIS, 2008.
7. **Kucherjavyj A. E.** Ot e-Rossii k u-Rossii: tendencii razvitija jelektrosvjazi / A. E. Kucherjavyj, E. A. Kucherjavyj // *Jelektrosvjaz'*. – 2005. – № 5.
8. **Koucheryavy Y., Jakubiak J.** Research Challenges in Vehicular Ad hoc Networks. Proceedings, IEEE CCNC 2008, January 10–12, 2008. Las Vegas, USA.
9. **Kucherjavyj A. E.** Seti svjazi s malymi zaderzhkami / A. E. Kucherjavyj, A. I. Paramonov, Ja. M. Al'-Naggar // *Jelektrosvjaz'*. – 2013. – № 12.
10. **Futahi A.** LTE i besprovodnye sensornye seti / A. Futahi, A. E. Kucherjavyj, E. A. Kucherjavyj // *Mobil'nye telekommunikacii, nojabr'* 2012.
11. **Koucheryavy Y., Pyattaev A., Johnsson K., and Andreev S.** “3GPP LTE Traffic Offloading onto WiFi Direct,” in Proc. of the IEEE WCNC – Workshop on Mobile Internet: Traffic Modeling, Subscriber Perception Analysis and Traffic-aware Network Design, 2013.
12. **Astely D.** et al., “LTE Release 12 and Beyond,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 7, 2013, PP. 154–60.
13. **Koucheryavy Y., Andreev S., Pyattaev A., Johnsson K. and Galinina O.**, “Cellular traffic offloading onto network-assisted device-to-device connections,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 4, PP. 20–31, 2014.
14. **Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013–2018**, February 2014.
15. **3GPP LTE Release 10 & beyond (LTE-Advanced).**
16. **Lei L.** et al., “Operator Controlled Device-to-Device Communications in LTE-Advanced Networks,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 19, no. 3, June 2012, PP. 96–104.
17. **METIS**, Deliverable D1.1. Scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system, May, 2013. Available at <https://www.metis2020.com/documents/deliverables>
18. **Doppler K., Rinne M., Wijting C., Ribeiro C. B., Hugel K.**, “Device-to- Device Communication as an Underlay to LTE-Advanced Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 12, PP. 42–49.
19. **Hoymann C.** et al., “Relaying Operation in 3GPP LTE: Challenges and Solutions,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 2, Feb. 2012, PP. 156–62.
20. **Yu C.-H., Doppler K., Ribeiro C., and Tirkkonen O.** “Resource sharing optimization for device-to-device communication underlaying cellular networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, PP. 2752–2763, August 2011.
21. **Kaufman B., Lilleberg J. and Aazhang B.** “Spectrum sharing scheme between cellular users and ad-hoc device-to-device users,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, PP. 1038–1049, March 2013.
22. **Xu S., Wang H., Chen T., Peng T., and Kwak K.**, “Device-to-device communication underlaying cellular networks: Connection establishment and interference avoidance,” *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, vol. 6, PP. 203–228, January 2012.
23. **Vigato A., Vangelista L., Measson C. and Wu X.** “Joint discovery in synchronous wireless networks,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 59, pp. 2296–2305, August 2011.
24. **Qualcomm Technologies**, LTE Direct: The Case for Device-to-Device Proximate Discovery, February 2013.
25. **Mohsen Nader Tehrani, Murat Uysal, and Halim Yanikomeroglu**, “Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks: Challenges, Solutions, and Future Directions” *IEEE Communications Magazine*, May 2014
26. **Cha I.** et al., “Trust in M2M Communication,” *IEEE Vehic. Tech. Mag.*, vol. 4, no. 3, Sept. 2009, PP. 69–75.

Мутханна Аммар – 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», ammarexpress@gmail.com

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», akouch@mail.ru

УДК 621.39

Е. С. Сучков

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

E. S. Suchkov

Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University
of Telecommunications

АСПЕКТЫ ЭВОЛЮЦИИ АРХИТЕКТУРЫ БАЗОВОЙ СЕТИ ОТ GSM/UMTS К EPC. ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ГОЛОСОВЫХ СЕРВИСОВ В СЕТЯХ С ПАКЕТНОЙ КОММУТАЦИЕЙ КАНАЛОВ

SOME EVOLUTION ASPECTS OF BASE NETWORK ARCHITECTURE,
FROM GSM/UMTS TO EPC. WAYS OF VOICE SERVICES REALIZATION
IN PACKET CELLULAR NETWORKS.

Уже развернуты сети сотовой связи четвертого поколения, но вопросы передачи речи в них еще окончательно не решены. В данной статье рассмотрена эволюция базовой сети сотовой связи от системы GSM к системе LTE как последовательный переход от технологий коммутируемых соединений к пакетным. Также рассмотрены способы реализации голосовых услуг в сетях с пакетной коммутацией каналов, их характеристики и перспективы.

Many 4G cellular networks deployed already, but voice transmission questions still open. Evolution of base networks from GSM to LTE is reviewed in this article, and it reviewed like logical way from circuit switched to packet switched networks. Ways of voice services realization also reviewed, its characteristics and perspectives.

сотовая связь, GSM, WCDMA, LTE, голосовые услуги, IMS, EPC.

cellular networks, GSM, WCDMA, LTE, voice service, IMS, EPC.

1. История развития базовой сети мобильной связи GSM/UMTS/LTE

После запуска первых цифровых сетей сотовой связи стандартов GSM и DAMPS (системы сотовой связи второго поколения), обеспечивавших абонентов голосовыми сервисами, прошло совсем немного времени, когда стало ясно, что одних голосовых услуг для современной системы связи совершенно недостаточно. Так стали появляться сервисы СМС, передачи данных по коммутируемым каналам, а затем и услуги пакетной передачи данных. Увеличение объема передаваемой информации от текстов к фотографиям и картинкам предъявляло непрерывно возрастающие требования к скорости передачи данных. Такой рост побудил МКЭ (Международный Комитет Электросвязи) создать в 1998 году партнерство 3GPP, перед которым была поставлена задача разработки спецификаций системы мобильной связи третьего поколения. Система была названа UMTS (Universal

Mobile Telecommunications System) и обеспечивала на тот момент десятикратный прирост скорости передачи данных, увеличение эффективности использования радиоресурса, видеовызовы и другие новые возможности.

Система UMTS, разрабатываемая как преемница GSM, должна была обеспечить плавный переход к новой технологии. Это означало не только удобные для абонентов возможности двухсистемных аппаратов, межсистемный хэндовер голосовых вызовов и передачу пакетных соединений между сетями, совместимость системы аутентификации, но и выгоды для операторов связи: использование существующей инфраструктуры базовой сети GSM и постепенная установка новых элементов сети – MGW и архитектуры IMS.

Первый релиз спецификаций 3GPP UMTS (Release 1999) описывал новую радиосеть UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) и минимальные изменения в базовой сети GSM. Они заключались в создании новых интерфейсов с сетью доступа и обновлении ПО для обеспечения новых возможностей (MMS, выделенный пакетный канал, видеовызовы и т. д.).

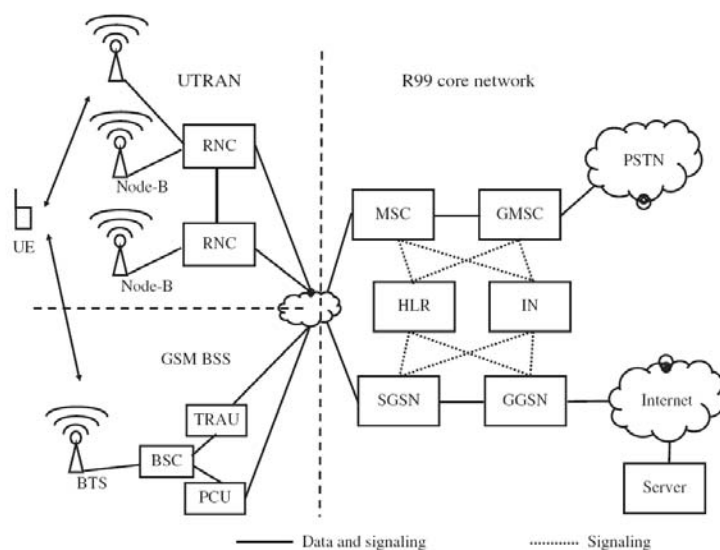


Рис. 1. Структура совмещенной базовой сети GSM/UMTS [14]

Схема такой базовой сети приведена на [рисунке 1](#), где обозначены:

MSC – Mobile Switching Center

GMSC – Gateway Mobile Switching Center

HLR – Home Location Registry

IN – Intelligent Network

PSTN – Public Switched Telephone Network

SGSN – Serving GPRS Support Node

GGSN – GPRS Gateway Service Node

В следующей редакции – Release 4 – был сделан первый шаг к построению пакетной базовой и транспортной сети. Коммутатор MSC был разделен на 2 части: MSC Server, выполняющий функции контроля вызова и управления мобильностью, и (Circuit-Switched) Media Gateway (CS-MGW) – медиашлюз. Для базовой сети это означало, что сложные в вычислительном отношении функции контроля и управления отделялись от функций коммутации, что позволяло уменьшить стоимость оборудования. В транспортной сети между медиашлюзами можно использовать пакетные протоколы передачи данных – ATM или IP, что экономит транспортные ресурсы. Медиашлюз выполняет следующие функции:

1. Связывает транспортные потоки между UTRAN/BSC и другими элементами базовой сети;
2. В нем могут заканчиваться соединения CS и медиапотоки из пакетной сети; соответственно, медиашлюз отвечает за преобразование информации между этими представлениями, управление соединениями и обработку данных (эхоподавление, кодирование, управление конференц-связью и т. д.);
3. Работа с соединениями и обработкой данных подразумевает обработку некоторых функций мобильности, связанных со сменой узла радиосети во время соединения; разделение контроля вызова, контроля соединения и контроля потоков между узлами сети делает необходимым наличие интерфейса для их взаимодействия. Таким интерфейсом был выбран H.248/IETF Megaco.

Главная задача MGW – возможность конвергенции транспортных сетей, предназначенных для голоса и трафика путем преобразования голосовых коммутируемых соединений в пакеты и обратно. Соответствующая структура приведена на [рисунке 2](#).

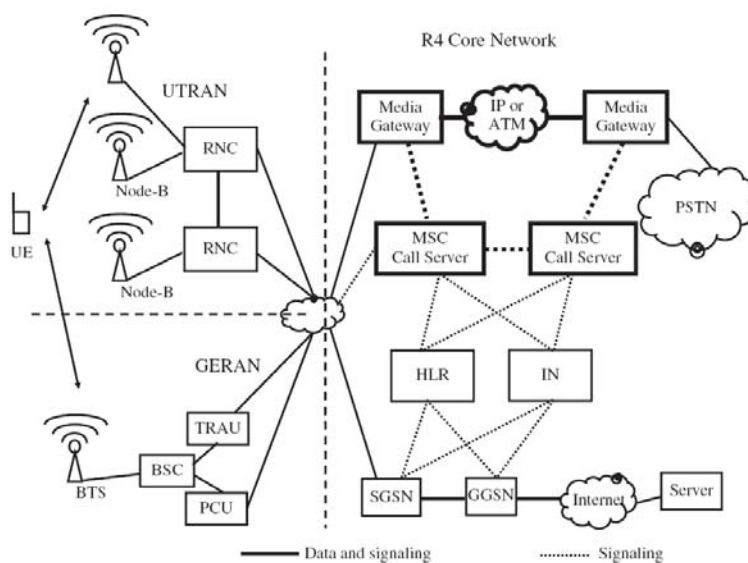


Рис. 2. Структура сети GSM/UMTS с медиашлюзами [14]

В Release 5 появляется новая структура в базовой сети – IP Multimedia System (IMS). Цель новой структуры – эффективная поддержка приложений, передающих мультимедийные данные – звук, видео и прочие, в том числе потоковые сервисы. То есть IMS – это этап плавного перевода сервисов реального времени из коммутируемого домена в пакетный. Новая структура обеспечивает возможность в пределах одной сессии различать потоки данных от разных приложений, управлять качеством каждого такого потока в отдельности и отделить управление ресурсами, предоставляемыми сервисам, от управления транспортным каналом, а также тарифицировать услуги. В частности, вводятся различные классы данных для обеспечения работы различных сервисов реального времени.

Для реализации этих функций созданы новые элементы архитектуры, обрабатывающие сигнальные сообщения и трафик мультимедийных приложений. В качестве протокола контроля сессий был выбран протокол SIP, разработанный IETF (Internet Engineering Task Force), за его гибкость и легкость организации взаимодействия 3GPP сетей и фиксированных сетей IP.

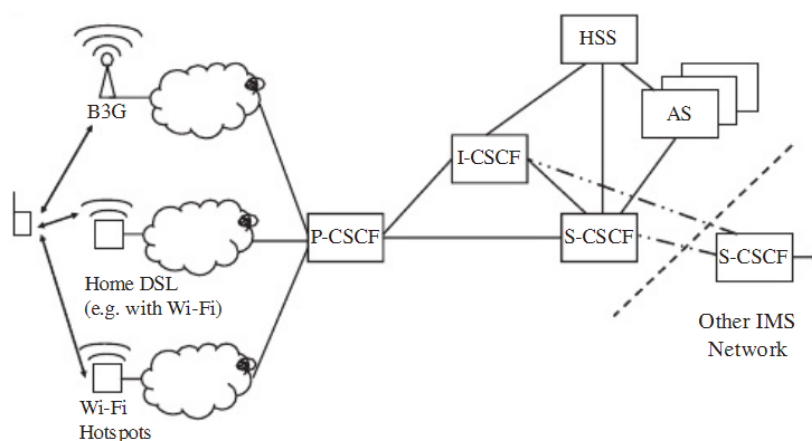


Рис. 3. Структура IMS [15]

Упрощенная структура IMS сети показана на рисунке 3.

Ключевые узлы сети IMS:

- Proxy-Call State Control Function (P-CSCF): это «точка входа». Узел расположен в той же сети, что и GGSN. Его основная задача – выбрать корректный I-CSCF домашней сети пользователя. Дополнительно осуществляет несколько функций анализа, например, трансляцию номеров, контроль QoS и т. д.;
- Interrogating-CSCF (I-CSCF): это «главный вход» домашней сети – он выбирает (с помощью HSS) необходимый S-CSCF;
- Serving-CSCF (S-CSCF): узел осуществляет контроль соединения: обслуживает запросы SIP, производит соответствующие действия (например, запрашивает установление соединения), пересылает

запросы другим S-CSCF или во внешние IP сети если это необходимо. Узел S-CSCF может быть выделен для обслуживания конкретных сервисов;

- Application Server (AS): сервер, непосредственно осуществляющий обработку данных, т. е. предоставляющий услуги.

На данном рисунке не показаны узлы, выполняющие функции взаимодействия с другими сетями (PSTN, GSM, GSM+GPRS, UMTS и т. д.), например, BGCF, IM-MGW и др.

Для обмена сигнальными и пользовательскими данными IMS использует несущие сетей GSM/UMTS. При этом и сигнальные каналы, и каналы передачи данных IMS рассматриваются доменом PS как пользовательские данные, минимизируя таким образом влияние IMS на остальную сеть.

TS 26.235 содержит список кодеков, применяемых по умолчанию при передаче данных сервисов реального времени, что не исключает использование других кодеков конкретными приложениями или отдельными операторами.

Нужно отметить, что IMS позволило операторам разрабатывать собственные приложения, в том числе реального времени. Приложения могут быть разработаны и сторонними компаниями, что дает теоретическую возможность для большого рывка в развитии различных видов услуг. Но в силу причин, которые будут упомянуты ниже, такого развития не произошло. В частности, голосовые сервисы не переводятся в пакетный домен, т. к. механизмы контроля и обеспечения качества канала данных не отлажены, а для обеспечения работы услуги каждому оператору нужно собственное ПО, затратное в разработке.

В Release 6 – введена новая возможность – RAB Support enhancement: Voice over IMS, которая специфицирует передачу речи через пакетную сеть. В качестве протокола контроля вызова используется тот же модифицированный SIP, а для передачи речи – Real Time Protocol. RLC несколько адаптирован для оптимизации передачи речевых данных, в спецификации добавлены примеры конфигураций RAB для речи, и появился флаг в процедуре назначения радиоканала, выделяющий радиоканал с сигнализацией SIP для оптимизации его обработки. Доработана сигнализация IMS, взаимодействие IMS с CS доменом и тарификация IMS.

Release 7 расширяет возможности платформы IMS – её функциональность, возможности взаимодействия с другими элементами базовой сети 3GPP и не-3GPP базовой системы. Вместе с тем, в Release 7 ведется работа по исследованию возможностей и стимулов к переходу к сетям All-IP. В частности, выделяются следующие причины, стимулирующие разработку новой All-IP структуры:

- Быстрый рост пакетного трафика;
- Стремление к снижению затрат на построение и эксплуатацию сети;

- Тенденция к расширению использования IP сервисов;
- Конвергенция телекоммуникационных и компьютерных технологий на базе IP;
- Быстрая адаптация и разворачивание существующих и новых мобильных систем с помощью IP сетей;
- Способность создавать гибкие и более функциональные IP сервисы увеличит доходы операторов;
- Возможность использования существующей инфраструктуры для постепенной эволюции к сетям All-IP.

В рекомендациях 22.978 приведены результаты исследований, целью которых была разработка пути перехода от существующих сетей к сетям All-IP. Были опубликованы, в частности, выводы о необходимости реализации полного взаимодействия новой структуры с существующими CS и PS сетями, т. к. переход к IP структуре должен быть постепенным и не обременительным для операторов в финансовом отношении.

Соответственно, в этом релизе появляется задача разработки мобильной связи следующего поколения и разрабатываются требования к новой системе и аспекты её архитектуры (исследование «Study on Evolved UTRA and UTRAN: UID_20023»).

Не смотря на усилия 3GPP, ко времени выхода Release 8 передача сервисов реального времени через каналы с пакетной передачей данных так и не получила распространения. Главной причиной тому была высокая стоимость оборудования для системы IMS и высокая сложность разработки ПО для сервисов. Так же надо отметить, что появление спецификаций на отдельные узлы и новую структуру базовой сети не означает переход всех действующих операторов к новой системе. Наоборот, из-за больших вложений в новое аппаратное и программное обеспечение этот процесс далеко не закончен в существующих сетях, а где-то и не начат. Это, однако, не мешает пользователям сотовых сетей пользоваться услугами новых версий спецификаций.

В Release 8 представлена система связи LTE, в том числе специфицирована базовая часть – EPC (Evolved Packet Core) и её взаимодействие с существующими сетями – GSM/WCDMA, CDMA2000/EVDO, и даже не-3GPP сетями (WiMAX, и далее Wi-Fi). Главное отличие базовой части новой системы сотовой связи – реализация принципа All-IP, т.е. полный отказ от коммутируемых соединений. Что, в свою очередь позволило предельно упростить структуру сети (рис. 4).

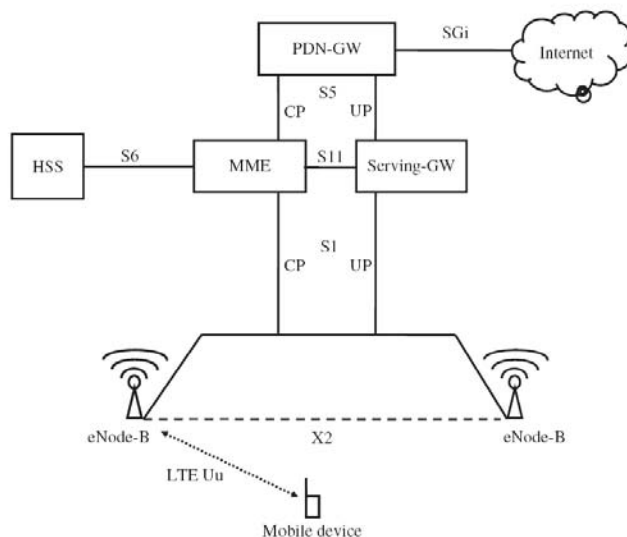


Рис. 4. Структура сети EPS [15]

Здесь HSS – Home Subscriber Server, MME - Mobility Management Entity, SGW (Serving Gateway), PGW (PDN Gateway).

Голосовые вызовы в EPS могут быть реализованы через структуру IMS или с помощью функциональности CSFB – т. е. с использованием коммутируемой инфраструктуры сетей GSM/ UMTS.

В следующих версиях спецификаций упор сделан на развитие сервисов – определение местоположения, широковещательные медиасервисы, поддержка аварийных звонков и т. д., а также начиная с версии 10 специфицирован стандарт LTE-Advanced, который увеличивает скорости передачи данных в радиоинтерфейсе, но не оказывает влияния на структуру базовой сети.

Большое внимание уделяется развитию SRVCC (Single Radio Voice Call Continuity) – возможности хэндовера голосового канала из сети LTE в сети GSM/UMTS, то есть передача голосовых данных по пакетному каналу переключается на коммутируемые каналы. Проработка этих алгоритмов связана со сложностями, вызванными, во-первых, большим количеством систем связи, которые нужно сопрягать (из LTE в GSM/UMTS/CDMA2000 и обратно), и во-вторых, необходимостью осуществления хэндовера сессий с передачей данных наряду с голосовой сессией. Можно сказать, что к настоящему моменту эта работа практически закончена в отношении большинства стандартов сотовых сетей, что подтверждает запуск коммерческих реализаций SRVCC.

Также начинают прорабатываться алгоритмы контроля перегрузок в базовой сети и алгоритмы предотвращения связанных с этим аварийных ситуаций.

2. Возможные реализации голосовых сервисов в архитектуре EPC

Итак, в угоду тенденции к использованию решений All-IP и стремлению к упрощению структуры базовой сети в сети сотовой связи нового поколения LTE и сеть доступа, и базовая сеть построены на основе пакетных соединений без применения коммутируемых соединений.

Такое решение в первую очередь поднимает проблему реализации сервисов, которые в прежних поколениях сетей были коммутируемыми – голосовой вызов и видеозвонов. При этом необходимо не только реализовать эти сервисы в новой структуре, но и обеспечить непрерывность сервиса, т. е. незаметный для пользователя переход из сети LTE в сеть GSM/WCDMA, в том числе во время разговора. Значит, должна быть реализована возможность преобразования IP-вызова в коммутируемое соединение и обратно «на лету».

В последние годы широко обсуждались 3 реализации голосовых вызовов в системе LTE-EPC, в той или иной степени удовлетворяющие этому требованию. Это VoLGA (использование CS инфраструктуры 2G/3G с помощью шлюза VANC), IMS OneVoice Profile (то есть построение структуры IMS для предоставления речевых услуг в пакетном режиме) и CSFB (принудительный перевод мобильного терминала в сеть 2G/3G для осуществления голосового вызова). Рассмотрим каждый из них.

2.1. CSFB (Circuit-Switched fall-back to GSM/WCDMA)

Это решение базируется на той идее, что операторы не смогут быстро построить дорогостоящие сети IMS для реализации голосовых услуг в LTE. Для предоставления таких услуг на начальной стадии используются существующие GSM/WCDMA сети. При регистрации в сети LTE мобильный телефон осуществляет двойную регистрацию: и в сети LTE, и в коммутируемых сетях GSM/WCDMA, а при установлении голосового соединения телефон принудительно переводится в сети GSM/WCDMA, где и предоставляется голосовой сервис. Это решение описано в спецификации 3GPP TS 23.272.

Это решение имеет ряд недостатков:

- переход из сети LTE в сеть другого стандарта занимает несколько секунд, это существенно удлиняет время установления соединения;
- при переходе в сеть GSM невозможно поддерживать активной уже установленное пакетное соединение (вариант голос+данные);
- поддержка активным пакетного соединения при переходе в сеть WCDMA требует дополнительного времени;
- по окончании разговора телефон должен перейти обратно в сеть LTE, что занимает дополнительное время и прерывает некоторое время передачу данных;

- зона покрытия сети LTE должна полностью быть полностью покрыта сетями GSM/WCDMA.

Однако удобства перевешивают недостатки. Действительно, большая часть существующих сетей LTE использует этот вариант реализации голосовых услуг. На 10 июня 2014 года, по данным GSA (the Global mobile Suppliers Association), из 300 развернутых по всему миру сетей LTE только на восьми реализованы голосовые сервисы в пакетной сети, еще 62 оператора рассматривают такую возможность [17]. Остальные операторы либо не предоставляют голосовые сервисы, либо используют CSFB.

Для того, чтобы уменьшить время установления соединения при процедуре CSFB, партнерство 3GPP в версии 13 спецификаций рассматривает модификацию eCSFB (Enhanced CS Fallback).

2.2. VoLGA (Voice over LTE via Generic Access)

Принцип действия этой реализации показан на [рисунке 5](#).

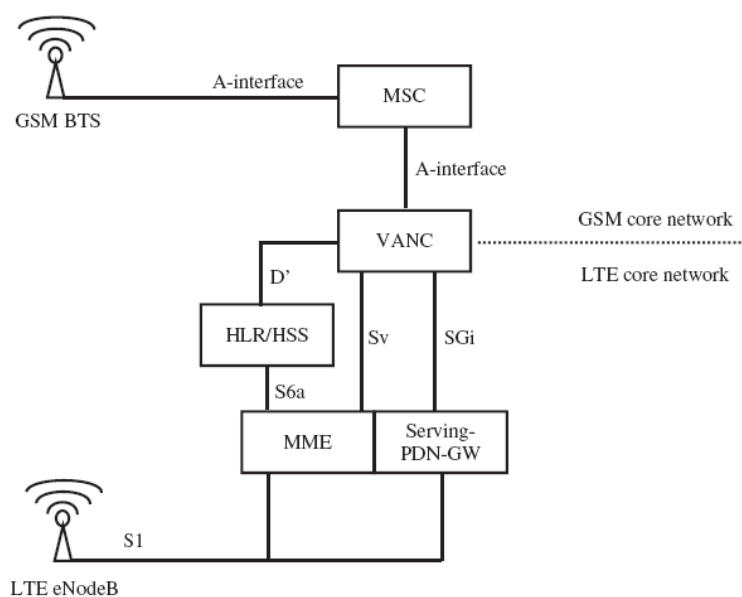


Рис. 5. Схема реализации VoLGA [14]

Принцип работы VoLGA заключается в использовании коммутируемой базовой сети GSM/WCDMA, при этом мобильный терминал остается в сети LTE. Это реализуется добавлением в сеть всего одного нового элемента – VANC (Voice over Long-Term Evolution via Generic Access Network Controller). Этот контроллер играет 2 роли. Со стороны сети LTE для мобильного устройства это пакетный сервис, предоставляющий голосовые услуги и обрабатывающий все соответствующие сигнальные сообщения и данные. Со стороны сети GSM/WCDMA контроллер выступает как BSC/RNC – контроллеры радиосети – т. е. для базовой сети GSM/WCDMA VANC эмулирует нахождение пользовательского телефона в сети с комму-

тируемыми каналами. В зависимости от реализации транспортной сети GSM/WCDMA VANC преобразует IP пакеты с голосом сети LTE в коммутируемые соединения, ATM или IP пакеты со стороны GSM/WCDMA.

В случае, если абонент покидает зону покрытия LTE и принимается решение о его хэндовере в сеть GSM/WCDMA, будет осуществлен соответствующий сигнальный обмен между MME и VANC, в то время как для GSM/WCDMA это будет внутрисистемный хэндовер.

Ключевое преимущество этого метода перед CSFB заключается в скорости установления соединения и его сравнительной простоте, а так же отсутствии изменений в сети оператора. Пользователь остается в сети LTE и может продолжать пользоваться пакетными сервисами.

Недостатки VoLGA заключаются в отсутствии описания процедуры хэндовера в сети GSM/UMTS (соответствующие спецификации для VANC так и не были закончены) и необходимости внесения изменений в ПО мобильных телефонов (VANC должен быть прописан как точка доступа для голосовых услуг).

Концепция VoLGA продвигалась организацией VoLGA Forum и компанией Kinect Wireless (Kineto). Данная идея не получила развития и поддержки операторов и на данный момент не развивается. Нет ни одной коммерческой реализации данной концепции.

2.3. IMS и One Voice Profile

Данная реализация базируется на идее полного перехода от коммутируемых соединений к пакетным, т. е. является единственным решением из трех представленных, реализующих принцип All-IP.

Как уже было сказано, IMS – это All-IP структура, соединяющаяся с базовой сетью и предоставляющая пакетные услуги, в том числе голосовой вызов. Для этого IMS соединяется с регистром абонентов, в котором хранятся сведения о предоставляемых абоненту услугах и их характеристиках, а также сигнальными элементами сети и элементами, обеспечивающими передачу данных.

С момента опубликования 3GPP Release 5 проведена огромная работа по проработке самой структуры IMS, её взаимодействию с пакетной и коммутируемой сетью, сетями ТфОП и прочими сетями доступа, например, Wi-Fi. Возможности IMS позволяют реализовать, помимо голосового вызова, множество сервисов, от видеозвонка до передачи ТВ программ, сервисов доставки сообщений, медиаконтента, конференц-связи и т. д. Этот вариант предоставления услуг самый гибкий и обладает наибольшими возможностями по сравнению с CSFB и VoLGA.

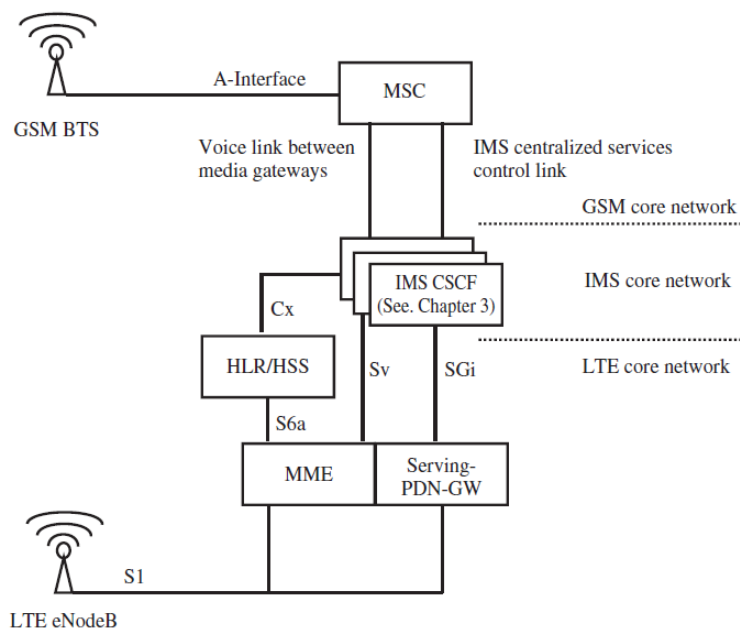


Рис. 6. Схема предоставления голосовых услуг с помощью платформы IMS [14]

One Voice Profile – это группа спецификаций, описывающая требования к структурным элементам сети для обеспечения передачи голоса с заданным качеством: к мобильным устройствам, к сетям радиодоступа, к базовой системе и IMS, транспортной системе сети, кодекам и протоколам.

Операторы ТфОП уже применяют сети IMS. И, как уже упоминалось выше, уже как минимум восемь сетей LTE используют IMS структуру для предоставления голосовых сервисов на коммерческой основе. Эта цифра невелика по сравнению с общим количеством сетей (порядка трехсот). Это связано со следующими сложностями:

- сеть IMS обладает большими возможностями и гибкостью, но и очень сложна в реализации и эксплуатации;
- построение IMS требует больших финансовых вложений;
- мобильные устройства должны иметь соответствующие протоколы и возможности (например, поддерживать протокол SIP);
- сложность реализации хэндовера из пакетной радиосети в сеть с коммутируемым доступом;
- провайдеры дополнительных услуг, которые должны были бы создавать приложения для IMS, не заинтересованы в обслуживании большого количества операторов с разными реализациями базовой сети.

Тем не менее, очевидно, что будущее голосовых услуг именно за этим вариантом.

3. Перспективы исследований в части голосовых услуг в архитектуре EPC

Учитывая, что доля голосовых вызовов в валовой прибыли операторов составляет более 70 %, интерес к реализации этой услуги не вызывает никаких сомнений. Неудобства, возникающие для абонента при использовании CSFB будут стимулировать операторов развивать услуги на базе IMS. По данным GSA, на 10 июня 2014 года 8 операторов из 300 по всему миру запустили в коммерческую эксплуатацию предоставление голосовых услуг через сети LTE/EPC и IMS. Для инженеров-исследователей это дает возможность работы в следующих направлениях:

1. Построение математических моделей ВВХ обработки голосовых вызовов в узлах MME и SGW
2. Разработка алгоритмов перераспределения голосовой и сигнальной нагрузки между узлами сети EPC
3. Исследование показателей качества предоставления голосовых услуг в сетях EPC

Библиографический список

1. **3GPP**, Overview of 3GPP Release 7 V0.9.16 (2012-01). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (дата обращения: 17.08.2014).
2. **3GPP**, Overview of 3GPP Release 8 V0.3.2 (2014-06). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (дата обращения: 17.08.2014).
3. **3GPP**, Overview of 3GPP Release 9 V0.3.3 (2014-06). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (дата обращения: 17.08.2014).
4. **Overview** of 3GPP Release 10 V0.2.1 (2014-06). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (дата обращения: 17.08.2014).
5. **Overview** of 3GPP Release 11 V0.1.9 (2014-06). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (дата обращения: 17.08.2014).
6. **Overview** of 3GPP Release 12 V0.1.3 (2014-06). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (дата обращения: 17.08.2014).
7. **Overview** of 3GPP Release 13 V0.0.6 (2014-06). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (дата обращения: 17.08.2014).
8. **Overview** of 3GPP Release 1999 V0.1.1 (2010-02). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (дата обращения: 17.08.2014).
9. **Overview** of 3GPP Release 4 V1.1.2 (2010-02). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (дата обращения: 17.08.2014).

10. **Overview** of 3GPP Release 5 V0.1.1 (2010-02). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (дата обращения: 17.08.2014).

11. **Overview** of 3GPP Release 6 V0.1.1 (2010-02). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (дата обращения: 17.08.2014).

12. **3GPP**, Circuit Switched (CS) Fallback in Evolved Packet System (EPS); Stage 2, TS 23.272. URL: <http://www.3gpp.org> (дата обращения: 11.08.2014).

13. **3GPP**, Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification, TS 36.331. URL: <http://www.3gpp.org> (дата обращения: 10.08.2014).

14. **Sauter M.**, From GSM to LTE: an introduction to mobile networks and mobile broadband. – John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

15. **Тихвинский В. О.** Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура / В. О. Тихвинский, С. В. Терентьев, А. Б. Юрчук. – М. : Эко-Трендс, 2010.

16. **Sesia S.**, Baker M., Toufik I., LTE—the UMTS long term evolution : from theory to practice. - John Wiley & Sons Ltd., 2009.

17. **GSA Evolution** to LTE report: 10 June 2014. URL: http://www.gsacom.com/cgi/redirect.pl?url=http://www.gsacom.com/downloads/pdf/GSA_Evolution_to_LTE_report_100614.php4 (дата обращения: 10.08.2014).

References

1. **3GPP**, Overview of 3GPP Release 7 V0.9.16 (2012-01). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (query date: 17.08.2014).

2. **3GPP**, Overview of 3GPP Release 8 V0.3.2 (2014-06). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (query date: 17.08.2014).

3. **3GPP**, Overview of 3GPP Release 9 V0.3.3 (2014-06). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (query date: 17.08.2014).

4. **Overview** of 3GPP Release 10 V0.2.1 (2014-06). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (query date: 17.08.2014).

5. **Overview** of 3GPP Release 11 V0.1.9 (2014-06). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (query date: 17.08.2014).

6. **Overview** of 3GPP Release 12 V0.1.3 (2014-06). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (query date: 17.08.2014).

7. **Overview** of 3GPP Release 13 V0.0.6 (2014-06). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (query date: 17.08.2014).

8. **Overview** of 3GPP Release 1999 V0.1.1 (2010-02). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (query date: 17.08.2014).

9. **Overview** of 3GPP Release 4 V1.1.2 (2010-02). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (query date: 17.08.2014).

10. **Overview** of 3GPP Release 5 V0.1.1 (2010-02). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (query date: 17.08.2014).

11. **Overview** of 3GPP Release 6 V0.1.1 (2010-02). URL: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases (query date: 17.08.2014).

12. **3GPP**, Circuit Switched (CS) Fallback in Evolved Packet System (EPS); Stage 2, TS 23.272. URL: <http://www.3gpp.org> (query date: 11.08.2014).

13. **3GPP**, Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification, TS 36.331. URL: <http://www.3gpp.org> (query date: 10.08.2014).

14. **Sauter M.**, From GSM to LTE: an introduction to mobile networks and mobile broadband. – John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

15. **Tikhvinskii V. O.** LTE cellular networks: technologies and architecture / V. O. Tikhvinskii, S. V. Terent'ev, A. B. Yurchuk. – Moscow: Eco-Trends, 2010.

16. **Sesia S.**, Baker M., Toufik I., LTE—the UMTS long term evolution : from theory to practice. – John Wiley & Sons Ltd., 2009.

17. **GSA Evolution** to LTE report: 10 June 2014. URL: http://www.gsacom.com/cgi/redirect?url=http://www.gsacom.com/downloads/pdf/GSA_Evolution_to_LTE_report_100614.php4 (дата обращения: 10.08.2014).

Сучков Евгений 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», evgeni_ss@mail.ru

УДК 519.710.39, 519.872.7

Р. И. ХакимовХуджандский государственный университет
им. академика Б. Гафурова

R. I. Hakimov

Khujand State University named after academician B. Gafurov

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ОЦЕНОК
В ПРОБЛЕМЕ ПОИСКА ПРИЧИН ДЕФЕКТНЫХ ЗВОНКОВ
В СЕТИ СОТОВОЙ СВЯЗИ 3G (WCDMA)**USING OF PROBABILISTIC ESTIMATIONS IN THE PROBLEM
OF SEARCHING THE CAUSES OF DEFECTIVE CALLS IN 3G (WCDMA)
CELLULAR NETWORK

Статья посвящена проблеме поиска причин дефектных звонков абонентов сети сотовой связи третьего поколения (3G, WCDMA). Исследуется возможность использования вероятностных оценок событий – причин дефектных звонков на примере функционирования базовых приемопередающих станций компании Huawei®. Приводятся примеры вычислений вероятностных оценок и автоматизации на языке запросов SQL для СУБД MS SQL Server вычислений суммарных количеств событий – причин дефектных звонков.

The problem of defining the causes of defective call in 3G (WCDMA) cellular network is analyzed in this paper. The possibility of using probabilistic estimations of events causing the defective calls is considered is the case of base transceiver stations of Huawei® company. Examples of calculation of probabilistic estimations and computerization of calculation the sum totals of events causing the defective calls in SQL for DBMS MS SQL Server are provided.

вероятность, оценка, звонок, дефект, причина, 3G, WCDMA

probability, estimation, call, defect, cause, 3G, WCDMA.

Введение

Популярность технологий сотовой связи второго (2G, GSM) и третьего поколений (3G, WCDMA), обусловленная возможностью предоставления качественных услуг мобильной телефонии, мобильного доступа в Интернет, видеоконференций и других, породила рынок с высоким уровнем конкуренции. Вопрос поддержания и улучшения качества работы сети сотовой связи важен, в связи с его непосредственным отношением к удовлетворенности абонента (клиента) работой оператора (поставщика услуг).

Звонок считается дефектным, если произошел провал звонка до первого гудка или обрыв звонка до отбоя. Проблемы, возникающие при передаче радиосигналов, описываются в [1, с. 124]. В случае подключения к сети сотовой связи для обмена пакетными данными возможен нежелательный разрыв соединения до или вовремя передачи данных, что также счита-

ется дефектом. Например, при передаче мультимедийной информации или подключении к Интернету, серверу электронной почты, частной виртуальной сети и т. д. В данной работе будут рассмотрены только звонки канальной коммутации (CS, Circuit Switching) в сети сотовой связи третьего поколения (3G) [8].

Для определения причин провалов звонков в сети сотовой связи третьего поколения, работающей на технологии WCDMA, нами был использован метод «5 почему» («Пять почему») [9]. Это простой, универсальный и эффективный метод поиска причин возникших дефектов, браков или несоответствий, который позволяет быстро построить причинно-следственные связи. Метод разработан в 40-х годах основателем компании Toyota – Сакиши Тойода (Sakichi Toyoda). Широкое распространение метод получил в 70-х годах после публикации и распространения информации о производственной системе Toyota. Согласно этому методу, для того чтобы найти причину несоответствия необходимо последовательно задавать один и тот же вопрос – «Почему?», и искать ответ на этот вопрос. Не смотря на то, что метод называется «5 почему», конечно же, для поиска причин каждого конкретного типа дефекта может задаваться как меньшее, так и большее количество вопросов.

Следующая диаграмма, частично отображающая причинно-следственные связи провалов звонков (call failure) в 3G (WCDMA), была построена в результате использования вышеупомянутого метода:



Рис. 1. Диаграмма (упрощенная) причинно-следственных связей провалов звонков в 3G (WCDMA)

Диаграмма на [рисунке 1](#) не претендует на полноту анализа причинно-следственных связей возникновения дефектных звонков в 3G (WCDMA). Однако на её основе можно построить вероятностную модель для оценки вероятностей причин наблюдаемых дефектных звонков.

Следует отметить, что для построения более полной картины причинно-следственных связей возникновения дефектных звонков необходимо изучить техническую документацию от конкретного производителя оборудования радиоподсистемы (RAN) и процедуру установки носителя радиодоступа (RAB Setup flow), например в [7].

Постановка задачи

Рассматривается вопрос об оценке вероятности причин дефектов в телефонных звонках абонентов сотовой связи при функционировании базовых приемопередающих станций (далее БС) [1, с. 112] в определенный конечный промежуток времени.

Предполагается, что известны числа $n_j, m_j, j = 1, \dots, k$,

где k – общее количество БС в сети оператора;

n_j – общее количество звонков поступивших в j -ю станцию;

m_j – количество дефектных звонков среди поступивших в j -ю станцию.

Предполагается, что $n_j > 0, j = 1, \dots, k$.

Введем следующие обозначения:

$n = n_1 + \dots + n_k$ – общее количество звонков,

$m = m_1 + \dots + m_k$ – общее количество дефектных звонков,

$\frac{m}{n}$ – итоговая доля дефектных звонков,

$\frac{m_j}{n_j}$ – доля дефектных звонков при обслуживании j -й станцией.

Рассмотрим следующие случайные события:

A – наугад выбираемый звонок из поступивших окажется дефектным;

B_j – наугад выбираемый звонок из поступивших обслуживался j -й станцией, $j=1, \dots, k$.

Каждый звонок (входящий или исходящий) в каждый момент времени обслуживается одной станцией. Следовательно, события $B_j, j = 1, \dots, k$ образуют полную систему несовместных событий.

Все причины дефектов разделены на взаимоисключающие типы - события C_1, C_2, \dots, C_l , где l – общее количество типов. Таким образом, дефектный звонок случается тогда и только тогда, когда происходит одно из событий $C_i, i = 1, \dots, l$. Следовательно, события $C_i, i = 1, \dots, l$ образуют полную систему несовместных событий.

Пусть c_{ij} – количество дефектов на j -й БС по причине $C_i, i = 1, \dots, l$, то есть количество дефектов в случае события $C_i \cap B_j$. Тогда для количества дефектных звонков m_j на j -й БС имеет место

$$m_j = c_{1j} + \dots + c_{lj}, \quad \forall j=1, \dots, k.$$

Отсюда для общего количества дефектных звонков имеет место

$$m = m_1 + \dots + m_k = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^k c_{i,j}.$$

Из выше изложенного следует, что взаимосвязь между итоговой долей дефектных звонков и причинами дефектов $C_i, i=1, \dots, l$ может быть выражена формулой

$$\frac{m}{n} = \frac{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^k c_{i,j}}{n}.$$

Вероятностные оценки

Вычисления вероятностей будем производить в соответствии с классическим определением вероятности [2, с. 18].

A. Имея в виду, что:

1) вероятность того, что звонок будет обслужен j -й станцией (доля звонков, обслуживаемых j -ой станцией), равна $P(B_j) = \frac{n_j}{n}$;

2) вероятность того, что обслуженный j -ой станцией звонок будет дефектным (доля дефектных звонков при обслуживании j -ой станцией), равна $P(A|B_j) = \frac{m_j}{n_j}$.

Согласно формуле Байеса [2, с. 51] условная вероятность $P(B_j|A)$ вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} P(B_j|A) &= \frac{P(B_j) \cdot P(A|B_j)}{P(B_1) \cdot P(A|B_1) + \dots + P(B_k) \cdot P(A|B_k)} = \\ &= \frac{\frac{n_j}{n} \cdot \frac{m_j}{n_j}}{\frac{n_1}{n} \cdot \frac{m_1}{n_1} + \dots + \frac{n_k}{n} \cdot \frac{m_k}{n_k}} = \frac{\frac{m_j}{n}}{\frac{m_1}{n} + \dots + \frac{m_k}{n}} = \frac{\frac{m_j}{n}}{\frac{m}{n}} = \frac{m_j}{m}. \end{aligned}$$

Получаем следующую формулу для вычисления условной вероятности $P(B_j|A)$ обслуживания дефектного звонка j -й станцией:

$$P(B_j|A) = \frac{m_j}{m}.$$

B. Вероятность того, что дефектный звонок, случившийся на j -й станции, произошел из-за события C_i на этой станции, равна $\frac{c_{i,j}}{m_j}$. Так как $m_j =$

общее количество дефектных звонков на j -ой станции, а c_{ij} - количество дефектных звонков на этой станции по причине C_i .

С. Вероятность того, что во время обслуживания звонка j -ой станцией случится событие (авария) C_i , равна $\frac{c_{i,j}}{n_j}$.

Д. Вероятность того, что случайно выбранный звонок будет дефектным по причине события C_i на j -ой станции, равна $\frac{c_{i,j}}{n}$.

Е. Вычислим условную вероятность $P(C_i | A)$ – вероятность того, что случайно выбранный звонок имеет причину дефекта C_i при условии, что этот звонок оказался дефектным:

$$P(C_i | A) = \frac{P(C_i \cap A)}{P(A)}.$$

Здесь $P(C_i \cap A) = P(C_i) = \frac{\sum_{j=1}^k c_{i,j}}{n} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k c_{i,j}$, так как события C_i и A – зависимы и их пересечение равно C_i ;

$P(A) = \frac{m}{n}$ – вероятность того, что случайно выбранный звонок окажется дефектным.

Таким образом,

$$P(C_i | A) = \frac{\frac{\sum_{j=1}^k c_{i,j}}{n}}{\frac{m}{n}} = \frac{\sum_{j=1}^k c_{i,j}}{n} \cdot \frac{n}{m},$$

$$P(C_i | A) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^k c_{i,j}.$$

Пример практического применения

В ходе данного исследования были проанализированы причины провалов звонков в сети 3G (WCDMA), обслуживаемой оборудованием компании Huawei ([7], [6]), в одной из компаний, предоставляющих услуги сотовой связи. Ниже таблицы 1 и 2, отображающие статистику за 1 сутки в части зоны покрытия данной сети. Эти данные были получены в начале данного исследования.

ТАБЛИЦА 1. Данные по общему количеству попыток звонков, успешных соединений и провалов звонков

Общее кол-во попыток	Успешных соединений	Провалов
2540751	2520691	20060

ТАБЛИЦА 2. Данные по типам событий, являющимся причинами провалов звонков за рассматриваемый период

№	Тип события – причины дефекта (C _i)	Кол-во	Кол-во событий – причин дефектов на общее кол-во попыток звонков, $\frac{1}{n} \sum_{j=1}^k c_{i,j}$, ДРМО	Кол-во событий – причин дефектов на общее кол-во провалов звонков, $\frac{1}{m} \sum_{j=1}^k c_{i,j}$, %
1.	VS.RAB.FailEstabCS.TNL	14	6	0,07
2.	VS.RAB.FailEstabCS.Code.Cong	39	15	0,19
3.	VS.RAB.FailEstabCS.DLCE.Cong	0	0	0,00
4.	VS.RAB.FailEstabCS.DLIUBB.Cong	15 646	6 158	78,00
5.	VS.RAB.FailEstabCS.DLPwr.Cong	17	7	0,08
6.	VS.RAB.FailEstabCS.IubFail	23	9	0,11
7.	VS.RAB.FailEstabCS.PhyChFail	0	0	0,00
8.	VS.RAB.FailEstabCS.RBCfgUnsup	0	0	0,00
9.	VS.RAB.FailEstabCS.RBIncCfg	54	21	0,27
10.	VS.RAB.FailEstabCS.ULCE.Cong	119	47	0,59
11.	VS.RAB.FailEstabCS.ULIUBB.Cong	10	4	0,05
12.	VS.RAB.FailEstabCS.ULPwr.Cong	36	14	0,18
13.	VS.RAB.FailEstabCS.UuNoReply	322	127	1,61

Из таблицы 2 видно, что причиной 78,00 % всех провалов звонков было событие типа «VS.RAB.FailEstabCS.DLIUBB.Cong». Ниже в таблице 3 приведена информация о первых 10 БС, имеющих наибольшие количества события типа «VS.RAB.FailEstabCS.DLIUBB.Cong» за рассматриваемый период.

ТАБЛИЦА 3. Данные по количеству событий типа «VS.RAB.FailEstabCS.DLIUBB.Cong» на БС. Топ10

№ БС	Тип трансмиссии	Количество попыток звонков	Количество успешных звонков	Количество провалов звонков	Количество событий VS.RAB.FailEstabCS.DLIUBB.Cong
162	IP	15242	14938	304	289
171	IP	17775	17494	281	245
149	IP	19327	19054	273	244
262	TDM	6609	6358	251	242
34	IP	8837	8590	247	240

№ БС	Тип трансмиссии	Количество попыток звонков	Количество успешных звонков	Количество провалов звонков	Количество событий VS.RAB.FailEstabCS.DLIUBB.Cong
280	IP	7046	6791	255	239
135	IP	10858	10606	252	236
297	IP	24587	24303	284	236
151	IP	7650	7399	251	233
172	IP	7581	7325	256	229
				СУММА:	2433

Нужно заметить, что суммарное количество событий типа «VS.RAB.FailEstabCS.DLIUBB.Cong» в «худшей» десятке (2433) составляет 15,55 % от общего количества событий типа «VS.RAB.FailEstabCS.DLIUBB.Cong» (15646) за рассматриваемый период.

Некоторые возможные причины возникновения события «VS.RAB.FailEstabCS.DLIUBB.Cong» и варианты их устранения:

- перегруз интерфейса IuB (между RNC и NodeB). Расширение пропускной способности данного интерфейса, например, путем замены несущих с TDM (E1) на IP;

- «узким местом» (bottleneck) данной проблемы может являться элемент сети уровнем выше NodeB. Нужно проверить, наблюдается ли на RNC в часы наибольшей нагрузки перегруз плат. Если да, то расширить эти платы.

Вполне вероятно, что перегруз может наблюдаться на нескольких базовых станциях одновременно. Вопрос о повышении эффективности обслуживания звонков перераспределением нагрузок между станциями в некоторой степени обсуждается в [3].

В [4] и [5] исследуется алгоритм, который может быть использован для поддержки принятия решения по выбору БППС, улучшение работы которых даст наилучший эффект в уменьшении итоговой доли дефектных звонков в общем количестве звонков, произведенных в рассматриваемый промежуток времени.

Пример реализации алгоритма на языке SQL

Ниже пример запроса языка SQL для СУБД MS SQL Server 2008 для вычисления сумм количества событий – причин дефектов звонков (сгруппировано по типам на БС). В зависимости от имеющихся данных запрос можно переписать как для сот, так и для других типов элементов сети:

```

select
    b.BBTSN,
    q1.*,
    q2.[VS.RAB.AttEstabCS.Conv],
    q2.[VS.RAB.SuccEstabCS.Conv],
    q2.[VS.RAB.AttEstab.AMR],
    q2.[VS.RAB.SuccEstabCS.AMR]
from
(select
    c.BTS_ID,
    sum([VS.RAB.FailEstabCS.TNL]) "VS.RAB.FailEstabCS.TNL",
    sum([VS.RAB.FailEstabCS.Code.Cong]) "VS.RAB.FailEstabCS.Code.Cong",
    sum([VS.RAB.FailEstabCS.DLCE.Cong]) "VS.RAB.FailEstabCS.DLCE.Cong",
    sum([VS.RAB.FailEstabCS.DLIUBB.Cong])
"VS.RAB.FailEstabCS.DLIUBB.Cong",
    sum([VS.RAB.FailEstabCS.DLPwr.Cong]) "VS.RAB.FailEstabCS.DLPwr.Cong",
    sum([VS.RAB.FailEstabCS.IubFail]) "VS.RAB.FailEstabCS.IubFail",
    sum([VS.RAB.FailEstabCS.PhyChFail]) "VS.RAB.FailEstabCS.PhyChFail",
    sum([VS.RAB.FailEstabCS.RBCfgUnsup]) "VS.RAB.FailEstabCS.RBCfgUnsup",
    sum([VS.RAB.FailEstabCS.RBIncCfg]) "VS.RAB.FailEstabCS.RBIncCfg",
    sum([VS.RAB.FailEstabCS.ULCE.Cong]) "VS.RAB.FailEstabCS.ULCE.Cong",
    sum([VS.RAB.FailEstabCS.ULIUBB.Cong])
"VS.RAB.FailEstabCS.ULIUBB.Cong",
    sum([VS.RAB.FailEstabCS.ULPwr.Cong]) "VS.RAB.FailEstabCS.ULPwr.Cong",
    sum([VS.RAB.FailEstabCS.UuNoReply]) "VS.RAB.FailEstabCS.UuNoReply"
from Stat.RncHua.T_69 t1
inner join Info.CELL c
    on t1.CELL_ID = c.CELL_ID
WHERE t1.date_time >= dateadd(dd, datediff(dd,0, getDate())-30, 0)
    and t1.date_time < CONVERT(date, getDate())
GROUP BY c.BTS_ID) q1
inner join
(select
    c.BTS_ID,
    sum([VS.RAB.AttEstabCS.Conv]) "VS.RAB.AttEstabCS.Conv",
    sum([VS.RAB.SuccEstabCS.Conv]) "VS.RAB.SuccEstabCS.Conv",
    sum([VS.RAB.AttEstab.AMR]) "VS.RAB.AttEstab.AMR",
    sum([VS.RAB.SuccEstabCS.AMR]) "VS.RAB.SuccEstabCS.AMR"
from Stat.RncHua.T_68 t1
inner join Info.CELL c
    on t1.CELL_ID = c.CELL_ID
WHERE t1.date_time >= dateadd(dd, datediff(dd,0, getDate())-30, 0)
    and t1.date_time < CONVERT(date, getDate())
GROUP BY c.BTS_ID) q2
    on q1.BTS_ID = q2.BTS_ID
inner join Info.BTS b
    on q1.BTS_ID = b.BTS_ID

```

Здесь Stat.RncHua.T_68 и Stat.RncHua.T_68 – это таблицы, хранящие показания счетчиков событий с периодом (granularity) 60 минут, а таблицы

Info.CELL и Info.BTS – таблицы, хранящие справочную информацию о сетях и БС соответственно.

Выводы

Полученные в данной работе формулы вероятностных оценок могут быть использованы в работах по определению наиболее вероятных причин дефектов звонков абонентов сети сотовой связи. Следует отметить, что для построения более полной картины причинно-следственных связей возникновения дефектных звонков необходимо изучить техническую документацию от конкретного производителя оборудования радиоподсистемы (RAN).

Библиографический список

1. **Зингеренко Ю. А.** Основы построения телекоммуникационных систем и сетей : конспект лекций / Ю. А. Зингеренко. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2005. – 143 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://books.ifmo.ru/file/pdf/85.pdf> (дата обращения: 14.11.2014).
2. **Кремер Н. Ш.** Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов / Н. Ш. Кремер. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 573 с.
3. **Наимов А. Н.** Математические вопросы эффективного обслуживания телефонных звонков абонентов сотовой связи / А. Н. Наимов, Р. И. Хакимов // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2014) / Сборник трудов VII междунар. науч. конф. (Воронеж, 14–21 сентября 2014 г.). – Воронеж: Издательство "Научная книга", 2014. – С. 270–275.
4. **Хакимов Р. И.** Алгоритм поддержки принятия решения по повышению качества сети сотовой связи / Р. И. Хакимов // Наука и современность – 2014: сборник материалов XXXIII Международной научно-практической конференции (Новосибирск, 17 ноября 2014 г.). – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2014. – С. 141–151.
5. **Хакимов Р. И.** Числовая оценка эффективности и ранжирование БППС сотовой связи // Естественные и математические науки в современном мире / Р. И. Хакимов // Сб. ст. по материалам XXV междунар. науч.-практ. конф. № 12 (24). Новосибирск: Изд. «СибАК», 2014. – С. 54–65.
6. **3G Huawei RAN Resource Monitoring and management** [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.academia.edu/6572434/3G_Huawei_RAN_Resource_Monitoring_and_management (дата обращения: 19.12.2014).
7. **BSC6900 UMTS Product Documentation** // Library Version: 03. Date: 4/25/2012 - Copyright © Huawei Technologies Co., Ltd. 2012.
8. **Goodman David J.** "3G CELLULAR STANDARDS AND PATENTS". IEEE Wireless com. Polytechnic Institute of New York University. Retrieved 2012-06-24 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://eeweb.poly.edu/dgoodman/wirelesscom2005.pdf> (дата обращения: 22.12.2014).
9. **Pojasek Robert B.** Asking "Why?" five times // Environmental Quality Management; Autumn 2000; 10, 1; ABI/INFORM Trade & Industry. – pg. 79.

References

1. **Zingerenko Ju. A.** Osnovy postroenija telekommunikacionnyh sistem i setej : konspekt lekcij / Ju. A. Zingerenko. – SPb. : SPbGU ITMO, 2005. – 143 s. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://books.ifmo.ru/file/pdf/85.pdf> (data obrashhenija: 14.11.2014).
2. **Kremer N. Sh.** Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika: uchebnik dlja vuzov / N. Sh. Kremer. – 2-e izd., pererab. i dop. – M. : JuNITI-DANA, 2004. – 573 s.
3. **Naimov A. N.** Matematicheskie voprosy jeffektivnogo obsluzhivanija telefonnyh zvonkov abonentov sotovoj svjazi / A. N. Naimov, R. I. Hakimov // Sovremennye metody prikladnoj matematiki, teorii upravlenija i komp'juternyh tehnologij (PMTUKT-2014) / Sbornik trudov VII mezhdunar. nauch. konf. (Voronezh, 14–21 sentjab-rja 2014 g.). – Voronezh: Izdatel'stvo "Nauchnaja kniga", 2014. – S. 270–275.
4. **Hakimov R. I.** Algoritm podderzhki prinjatija reshenija po povysheniju kachestva seti sotovoj svjazi / R. I. Hakimov // Nauka i sovremennost' – 2014: sbornik materialov HXXIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Novosibirsk, 17 nojabrja 2014 g.). – Novosibirsk: Izdatel'stvo CRNS, 2014. – S. 141–151.
5. **Hakimov R. I.** Chislavaja ocenka jeffektivnosti i ranzhirovanie BPPS sotovoj svjazi // Estestvennye i matematicheskie nauki v sovremennom mire / R. I. Hakimov // Sb. st. po materialam XXV mezhdunar. nauch.-prakt. konf. № 12 (24). Novosibirsk: Izd. «SibAK», 2014. – S. 54–65.
6. **3G Huawei RAN Resource Monitoring and management** [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.academia.edu/6572434/3G_Huawei_RAN_Resource_Monitoring_and_management (дата обращения: 19.12.2014).
7. **BSC6900 UMTS Product Documentation** // Library Version: 03. Date: 4/25/2012 - Copyright © Huawei Technologies Co., Ltd. 2012.
8. **Goodman David J.** "3G CELLULAR STANDARDS AND PATENTS". IEEE Wireless com. Polytechnic Institute of New York University. Retrieved 2012-06-24 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://eeweb.poly.edu/dgoodman/wirelesscom2005.pdf> (дата обращения: 22.12.2014).
9. **Pojasek Robert B.** Asking "Why?" five times // Environmental Quality Management; Autumn 2000; 10, 1; ABI/INFORM Trade & Industry. – pg. 79.

Хакимов Рахматджон Иномович – преподаватель кафедры информатики и вычислительной математики Худжандского государственного университета им. академика Б. Гафурова, г. Худжанд, Республика Таджикистан, rahmatjon@gmail.com

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 004.942, 519.688

С. С. Владимиров

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

S. S. Vladimirov

Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University
of Telecommunications

РЕАЛИЗАЦИЯ ЧЕТЫРЕХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КАНАЛА ГИЛБЕРТА-ЭЛЛИОТТА В СРЕДЕ OCTAVE/MATLAB

THE IMPLEMENTATION OF FOUR-PARAMETER GILBERT-ELLIOTT
CHANNEL MODEL WITH OCTAVE/MATLAB

При разработке и исследовании цифровых систем связи для оценки характеристик и поведения систем, использующих помехоустойчивое кодирование, широко применяется имитационное моделирование. Для решения задачи моделирования применяются как различные языки программирования, так и системы компьютерной алгебры, среди которых огромную популярность получили пакет численных вычислений Matlab и его открытый аналог GNU Octave. Эти пакеты содержат большое количество встроенных функций, реализующих математические модели необходимых процессов: модуляции и демодуляции, кодирования и декодирования помехоустойчивых кодов; и позволяют создавать сложные математические модели систем передачи данных. Учитывая вышесказанное, для систем передачи научный интерес вызывает создание моделей многих известных цифровых каналов передачи данных, особенно каналов с группированием ошибок, реализованных на основе математических моделей потока ошибок, таких как модель Гилберта-Эллиотта, модель Поля, модель Фричмана-Свободы. Была разработана программная реализация четырехпараметрической модели цифрового канала с группированием ошибок Гилберта-Эллиотта на языке Octave, которая может быть также использована в системе компьютерной алгебры Matlab, поскольку синтаксис этих систем во многом одинаков. Для программной модели использована классическая прямая реализация на основе двух последовательных экспериментов, которые базируются на использовании стандартного генератора случайных чисел. Адекватность модели подтверждается проведенным имитационным моделированием по методу Монте-Карло, показавшим, что разработанная программная модель соответствует теоретической модели канала Гилберта-Эллиотта и может быть использована при проведении исследований и разработок. Разработанная программная модель была использована в проводимых на кафедре Сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций исследованиях по разработке новых алгоритмов декодирования помехоустойчивых кодов Рида-Соломона.

Computer simulation make wide use in development and analysis of digital communication systems to evaluate parameters and behavior of the parts using forward error correction. Both programming languages and numerical software programs make use in simulation. Numerical computing environment Matlab and its free open-source alternative GNU Octave gain

widespread acceptance. These software programs include vast amount of functions, which implement useful mathematical models such as modulation, demodulation and forward error correcting and allow to develop complex computer models of data transmission systems. Taking in consideration the above, development of different digital data transmission channel models, especially burst error channel models based on error flow models, such as Gilbert-Elliott model, Polya model, Fritchman-Svoboda model, generates academic interest. There has been developed the software implementation of the four-parameter Gilbert-Elliott digital burst error channel model with Octave programming language. The model could be used in numerical computing environment Matlab, cause the syntax of these systems is largely equal. Classic straight implementation, based on two consequent random number generator experiments has been used for the computer model. Simulation based on the Monte-Carlo method has been used to confirm sufficiency of the model. It showed that developed simulation model corresponds with theoretical model of Gilbert-Elliott channel and could be used in development and analysis. Developed computer model was used in analysis of new error decoding methods of Reed-Solomon codes which is carry out on the Communication Network and Data Transmission Subdepartment of the St.Petersburg State University of Telecommunications.

математическая модель, компьютерная модель, канал передачи данных, модель Гилберта-Эллиотта, Octave, Matlab.

Mathematical model, simulation model, data transmission channel, Gilbert-Elliott model, Octave, Matlab.

Введение

При разработке и исследовании цифровых систем связи для оценки характеристик и поведения систем, использующих помехоустойчивое кодирование, широко применяется имитационное моделирование. В проводимых на кафедре Сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций научных исследованиях для создания компьютерных моделей мы используем, помимо различных языков программирования, пакет численных вычислений Matlab и его открытый аналог GNU Octave [1, 2]. Эти программные пакеты имеют большое количество встроенных функций, реализующих математические модели необходимых нам процессов: модуляции и демодуляции, кодирования и декодирования помехоустойчивых кодов; и позволяют легко создавать сложные математические модели систем передачи данных. Тем не менее в этих системах до сих пор отсутствуют многие известные модели цифровых каналов передачи данных, особенно каналов с группированием ошибок, реализованных на основе математических моделей потока ошибок, таких как модель Гилберта-Эллиотта, модель Поля, модель Фричмана-Свободы.

Данная статья посвящена реализации одной из широко используемых в исследованиях моделей цифрового канала с группированием ошибок – четырехпараметрической модели канала Гилберта-Эллиотта. Эта модель канала часто применяется для описания источников ошибок в системах передачи данных, а также при анализе эффективности алгоритмов декодирования помехоустойчивых кодов [3]. Например, модель канала Гилберта-

Эллиотта была использована для анализа канала связи между спутником и расположенным на движущемся автомобиле спутниковым телефоном [4].

Второй раздел статьи рассматривает модель с группированием ошибок, предложенную Эдгаром Гилбертом и позднее обобщённую Э. О. Эллиоттом. Третий раздел посвящен алгоритму программной модели и ее реализации на языке Matlab/Octave. В четвертом разделе приводятся результаты оценки адекватности компьютерной модели.

Модель канала Гилберта-Эллиотта

Канал Гилберта-Эллиотта (Gilbert-Elliott Channel, GEC) относится к дискретным каналам с памятью, в которых состояние канала зависит от предыдущего состояния [3, 5]. Математическая модель потока ошибок для этого канала предложена в 1963 году Эллиоттом [6] и является общим случаем модели Гилберта, представленной в 1960 году [7].

Схема модели канала Гилберта-Эллиотта представлена на [рисунке 1](#).

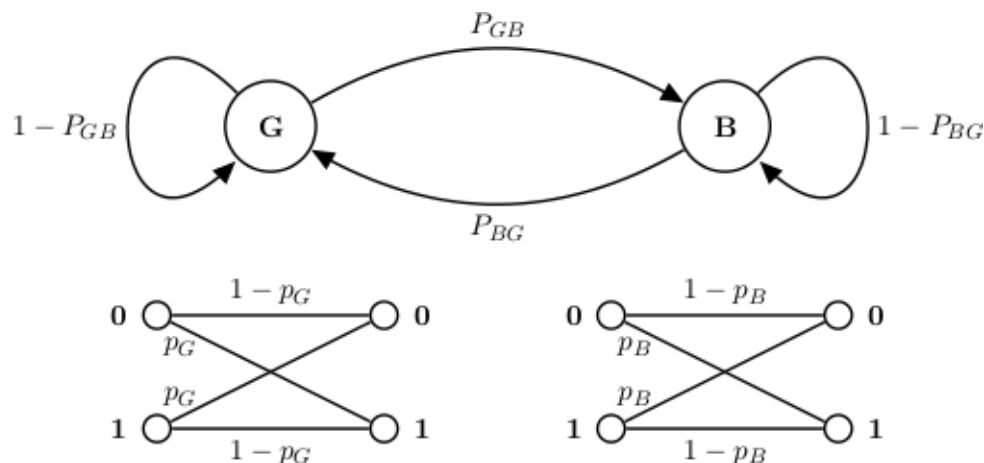


Рис. 1. Схема модели канала Гилберта-Эллиотта

Канал Гилберта-Эллиотта представляет из себя цепь Маркова первого порядка с двумя состояниями – «хорошим» и «плохим». Каждое из состояний канала представлено как двоично-симметричный канал (ДСК) без памяти с соответствующей вероятностью ошибки [5, 8]. В «хорошем» состоянии вероятность битовой ошибки в канале равна p_G , в «плохом» состоянии – p_B . Часто при использовании модели Гилберта-Эллиотта для двоичного канала полагают, что вероятность $p_B = 0,5$, т. е. «плохое» состояние рассматривается как полный обрыв связи [9]. В любой момент времени канал может перейти из одного состояния в другое. При этом вероятности перехода могут быть отличны друг от друга. Вероятность перехода из «хорошего» состояния в «плохое» обозначим как P_{GB} , а вероятность перехода из «плохого» состояния в «хорошее» обозначим как P_{BG} , что отображено

на рисунке 1. Соответствующая этим вероятностям матрица переходов \mathbf{A} показана в формуле (1) [5].

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 - P_{GB} & P_{GB} \\ P_{BG} & 1 - P_{BG} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Из рисунка 1 и формулы (1) следует, что финальные вероятности пребывания канала в состояниях \mathbf{G} и \mathbf{B} будут определяться выражениями (2) [3].

$$\pi_G = \frac{P_{BG}}{P_{GB} + P_{BG}}, \quad \pi_B = \frac{P_{GB}}{P_{GB} + P_{BG}}. \quad (2)$$

Из формул (2) следует, что средняя вероятность битовой ошибки в канале может быть вычислена по формуле (3).

$$p_e = p_G \pi_G + p_B \pi_B. \quad (3)$$

Вероятность того, что в блоке длиной n возникнет m ошибок, рассчитываем по формуле (4).

$$P(m, n) = \pi_G G(m, n) + \pi_B B(m, n), \quad (4)$$

где $G(m, n)$ – вероятность появления m ошибок в блоке длиной n , при условии, что канал во время передачи первого бита находился в состоянии \mathbf{G} ;

$B(m, n)$ – вероятность появления m ошибок в блоке длиной n , при условии, что канал во время передачи первого бита находился в состоянии \mathbf{B} .

Для расчета этих вероятностей Эллиоттом были введены рекуррентные соотношения (5), описывающие процесс возникновения ошибок в канале, учитывая, что канал с каждым поступившим новым разрядом может оставаться в прежнем состоянии или переходить в другое [6].

$$\begin{aligned} G(m, n) &= G(m, n-1) \cdot (1 - P_{GB}) \cdot (1 - p_G) + \\ &+ B(m, n-1) \cdot P_{BG} \cdot (1 - p_G) + \\ &+ G(m-1, n-1) \cdot (1 - P_{GB}) \cdot p_G + \\ &+ B(m-1, n-1) \cdot P_{BG} \cdot p_G, \\ B(m, n) &= G(m, n-1) \cdot P_{GB} \cdot (1 - p_B) + \\ &+ B(m, n-1) \cdot (1 - P_{BG}) \cdot (1 - p_B) + \\ &+ G(m-1, n-1) \cdot P_{GB} \cdot p_B + \\ &+ B(m-1, n-1) \cdot (1 - P_{BG}) \cdot p_B. \end{aligned} \quad (5)$$

где $G(m, n) = B(m, n) = 0$, при $m < 0$ или $m > n$.

В формулах (6) приведены очевидные начальные значения вероятностей (5) при $n = 1$ [6].

$$G(0, 1) = (1 - p_G), \quad G(1, 1) = p_G, \quad B(0, 1) = (1 - p_B), \quad B(1, 1) = p_B. \quad (6)$$

Программная реализация модели канала ГЕС

Написанная на языке Octave программная модель является классической прямой реализацией модели канала Гилберта-Эллиотта с использованием двух последовательных экспериментов [10]. Поскольку синтаксис систем компьютерной алгебры Octave и Matlab во многом одинаков, созданная модель может быть использована в системе Matlab.

Реализованная программная модель получает на вход массив передаваемых данных в двоичном виде, вероятности ошибки в каждом из состояний канала, переходные вероятности и состояние канала в начале передачи данных. В результате модель возвращает массив данных с наложенной ошибкой, а также состояние канала по окончании моделирования, что позволяет сгенерировать следующий массив ошибок, исходя из предыдущего состояния канала.

Проверка каждой из вероятностей выполнена с использованием генератора случайных чисел (ГСЧ) и сравнения полученного значения с соответствующей вероятностью. В качестве генераторов случайных чисел используется стандартная реализация генератора в системе Octave — функция `rand`.

Программный код модели представлен ниже.

```
% Gilbert-Elliott Channel Model
function [out-
Arr,lastState]=gec(dataArr,pBG,pGB,pG,pB,initState)
    State = initState;           % Get initial state
    [Height,Width]=size(dataArr); % Find size of data array
    outArr=zeros(Height,Width);  % Initialize output array
    for Cnt1=1:1:Height          % Start row searching cycle
        for Cnt2=1:1:Width       % Start inner searching cycle
            if State == 0        % Good state
                outArr(Cnt1,Cnt2) = xor(dataArr(Cnt1,Cnt2),rand(1)<=pG);
                State = rand(1)<=pGB;
            elseif State == 1    % Bad state
                outArr(Cnt1,Cnt2) = xor(dataArr(Cnt1,Cnt2),rand(1)<=pB);
                State = rand(1)>pBG;
            else
                printf('Error: Incorrect state\n');
                break;
            endif
        end
    end
    lastState = State;          % Return last state
end
```

На [рисунке 2](#) представлена блок-схема одного цикла алгоритма реализации модели канала Гилберта-Эллиотта.

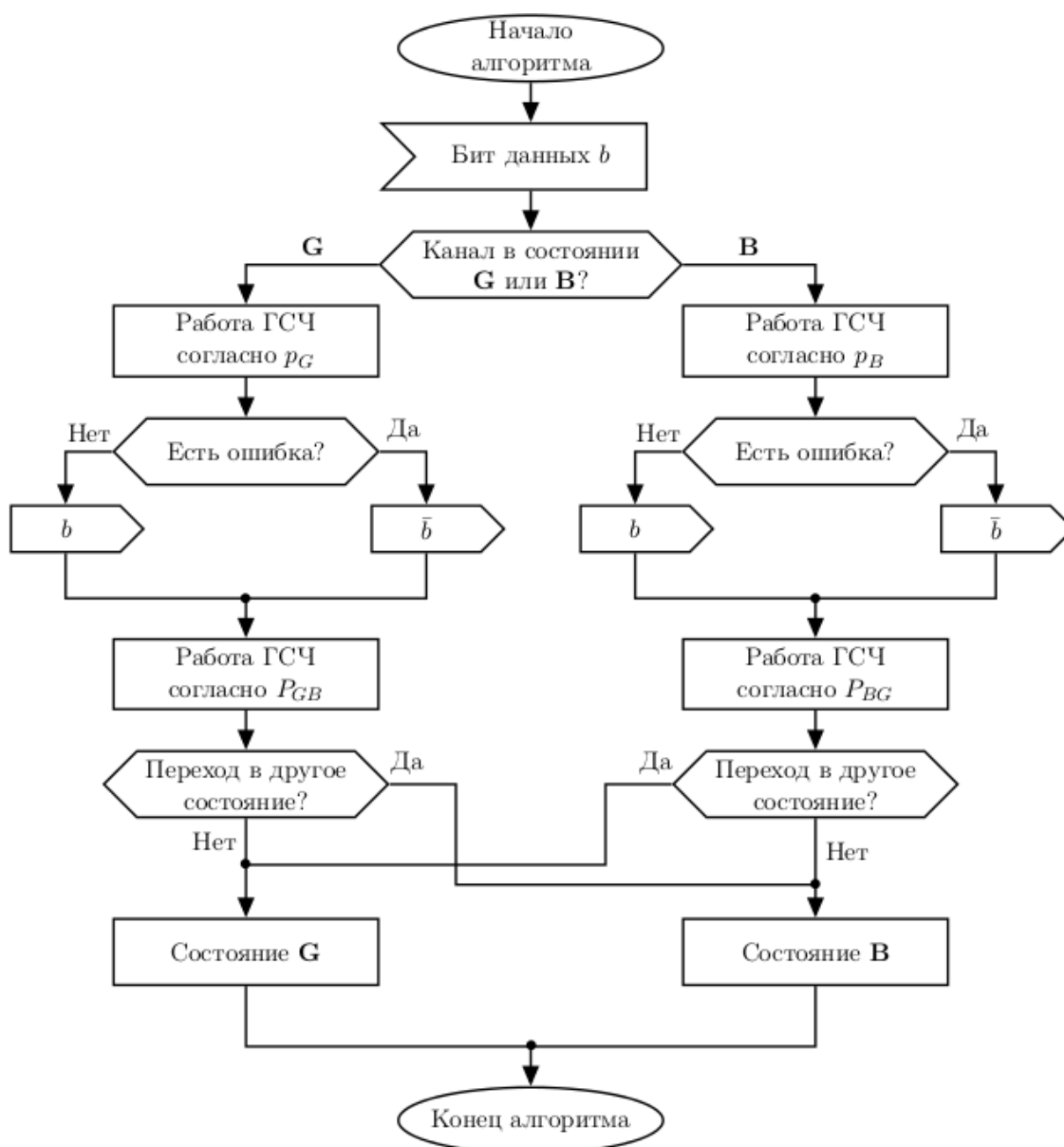


Рис. 2. Блок-схема алгоритма работы одного цикла программной модели канала Гилберта-Эллиотта

Анализ программной модели

Для анализа модели был использован метод Монте-Карло, основанный на наборе статистических данных, получаемых в результате проведения экспериментов. Адекватность программной модели доказывается путем сравнения полученной экспериментально средней вероятности битовой ошибки в канале со средней вероятностью битовой ошибки, вычисленной по формуле (3) при тех же исходных параметрах модели.

Для проверки выбираем два набора параметров. В качестве первого набора параметров взяты вероятности, использованные немецкими исследователями.

дователями для анализа радиоканала между спутником и установленным на движущемся автомобиле спутниковым телефоном [4]. Второй набор параметров имитирует канал с большими переходными вероятностями, то есть часто меняющий свое состояние. Параметры модели приведены в таблице.

ТАБЛИЦА. Параметры для проверки адекватности программной модели

№ набора	P_{BG}	P_{GB}	p_G	p_B
1	$1,05 \cdot 10^{-4}$	$3,95 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	0,317
2	0,01	0,05	10^{-3}	0,25

Для каждого из наборов параметров было проведено по десять экспериментов. При каждом эксперименте на вход модели канала подавался массив данных, состоящий из нулей, что позволило легко подсчитать среднюю вероятность ошибки. На рисунке 3 представлены графики полученных результатов в сравнении с значениями, подсчитанными по формуле.

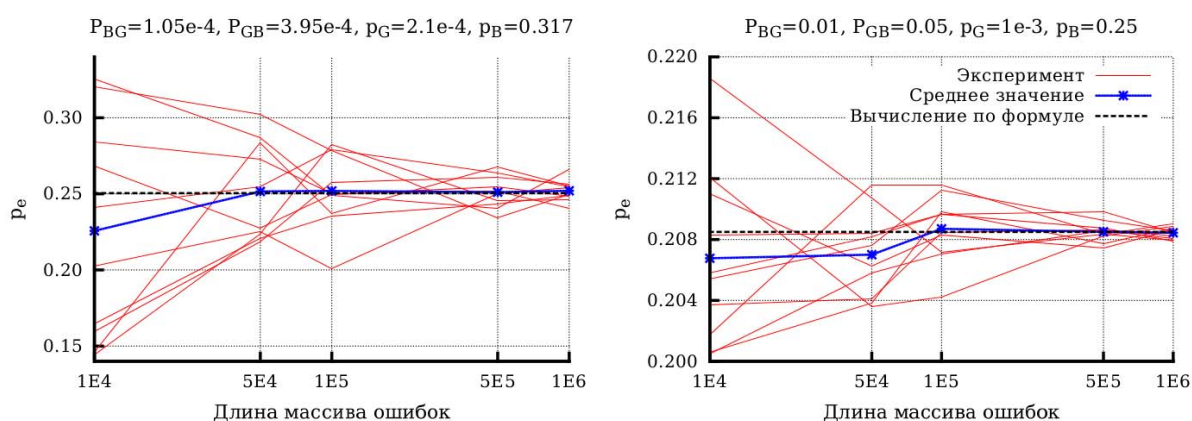


Рис. 3. Результаты оценки адекватности программной модели

По оси абсцисс отложен размер выборки, то есть размер массива данных, подаваемых на вход исследуемой модели канала, а по оси ординат – средняя битовая ошибка для данного массива. Тонкой красной линией отмечены результаты проведенных экспериментов. Синей линией отмечены средние значения по всем десяти экспериментам. Черным пунктиром показано значение средней битовой ошибки, посчитанное по формуле (3) для соответствующего набора параметров модели.

Можно видеть, что для обоих исследованных наборов при увеличении размера выборки экспериментальные графики сходятся к значению, рассчитанному по формуле, а среднее значение по всем экспериментам практически совпадает с ним. Таким образом, можно считать, что приведенная программная модель соответствует теоретической модели канала Гилбер-

та-Эллиотта и может быть использована при проведении исследований и разработок.

Библиографический список

1. **Кукунин Д. С.** Методика оценки качества канала в процессе передачи данных / Д. С. Кукунин, О. С. Когновицкий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Информатика. Телекоммуникации. Управление». – 2008. – Т. 5, № 65. – С. 86–92.
2. **Владимиров С. С.** Исследование алгоритма мажоритарного декодирования кода Рида-Соломона на основе двойственного базиса / С. С. Владимиров // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы». – 2012. – № 1 (15). – С. 60–66.
3. **Hasslinger G.**, Hohlfeld O. The Gilbert-Elliott Model for Packet Loss in Real Time Services on the Internet // Measuring, Modelling and Evaluation of Computer and Communication Systems (MMB), 2008 14th GI/ITG Conference. 2008. – P. 1–15.
4. **Beirouti P.** Automatic repeat request on fading channels. Montreal, Canada. 1992.
5. **Richardson T.**, Urbanke R. Modern Coding Theory. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
6. **Elliott E. O.** Estimates of error rates for codes on burst-noise channels // Bell System Technical Journal. 1963. – Vol. 42. – P. 1977–1997.
7. **Gilbert E. N.** Capacity of a burst-noise channel // Bell System Technical Journal. 1960. September. Vol. 39. – P. 1253–1265.
8. **Rezaeian M.** Computation of capacity for Gilbert-Elliott channels, using a statistical method // Communications Theory Workshop, 2005. Proceedings. 6th Australian. 2005. – P. 56–61.
9. **Васильев К. К.** Теория электрической связи: учебное пособие / К. К. Васильев, В. А. Глушков, А. В. Дормидонтов, А. Г. Нестеренко : под ред. К. К. Васильева. – Ульяновск: УлГТУ, 2008.
10. **A Gilbert-Elliott Bit Error Model and the Efficient Use in Packet Level Simulation** : Technical Report : TKN-99-002 / Technical University Berlin. Telecommunication Networks Group ; Executor: J.-P. Ebert, A. Willig. Berlin: 1999. March.

References

1. **Kukunin D. S.** Metodika ocenki kachestva kanala v processe peredachi dannyh / D. S. Kukunin, O. S. Kognovickij // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Serija «Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie». 2008. T. 5, № 65. S. 86–92.
2. **Vladimirov S. S.** Issledovanie algoritma mazhoritarnogo dekodirovanija koda Rida-Solomona na osnove dvojstvennogo bazisa / S. S. Vladimirov // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnolo-gicheskogo universiteta. Serija «Radiotehnicheckie i infokommunikacii- onnye sistemy». 2012. № 1 (15). S. 60–66.
3. **Hasslinger G.**, Hohlfeld O. The Gilbert-Elliott Model for Packet Loss in Real Time Services on the Internet // Measuring, Modelling and Evaluation of Computer and Communication Systems (MMB), 2008 14th GI/ITG Conference. 2008. P. 1–15.
4. **Beirouti P.** Automatic repeat request on fading channels. Montreal, Canada. 1992.
5. **Richardson T.**, Urbanke R. Modern Coding Theory. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
6. **Elliott E. O.** Estimates of error rates for codes on burst-noise channels // Bell System Technical Journal. 1963. Vol. 42. P. 1977–1997.
7. **Gilbert E. N.** Capacity of a burst-noise channel // Bell System Technical Journal. 1960. September. Vol. 39. P. 1253–1265.

8. **Rezaeian M.** Computation of capacity for Gilbert-Elliott channels, using a statistical method // Communications Theory Workshop, 2005. Pro-ceedings. 6th Australian. 2005. – P. 56–61.

9. **Vasil'ev K. K.** Teorija jelektricheskoj svjazi: uchebnoe posobie / K. K. Vasil'ev, V. A. Glushkov, A. V. Dormidontov, A. G. Nesterenko : pod red. K. K. Vasil'eva. – Ul'janovsk: UIG-TU, 2008.

10. **A Gilbert-Elliott Bit Error Model and the Efficient Use in Packet Level Simulation :** Technical Report : TKN-99-002 / Technical University Berlin. Telecommunication Networks Group ; Executor: J.-P. Ebert, A. Willig. Berlin: 1999. March.

Владимиров Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, 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», vladimirov.opds@gmail.com

УДК 621.391

О. С. КогновицкийСанкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

O. S. Kognovitckiy

Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University
of Telecommunications

**МАТРИЧНЫЙ МЕТОД ДЕКОДИРОВАНИЯ ЭКВИДИСТАНТНОГО
ЦИКЛИЧЕСКОГО КОДА НАД ПОЛЕМ $GF(p^k)$
ПО k ПРОИЗВОЛЬНЫМ ЛИНЕЙНО –
НЕЗАВИСИМЫМ ЭЛЕМЕНТАМ**

MATRIX DECODING METHOD OF AN EQUIDISTANT CYCLIC CODE
OVER THE $GF(p^k)$ FIELD BY k TO ARBITRARY LINEAR
AND INDEPENDENT ELEMENTS

В работе рассматривается матричный метод декодирования комбинаций эквидистантного циклического кода (М-последовательностей) в расширенном поле $GF(p^k)$ на основе обработки k линейно-независимых элементов простого поля. Приводятся примеры метода декодирования.

There is extended matrix decoding method of combinations of equidistant cyclic code (M-sequences) in extended $GF(p^k)$ field on a basis of processing of k linear and independent elements of a simple code in this work. Decoding methods are given.

метод декодирования, эквидистантный циклический код, рекуррентная последовательность.

decoding method, equidistant cyclic code, recurrent sequence.

Пусть задан эквидистантный циклический код, комбинации которого представляют собой рекуррентные последовательности $\{s\}$ максимальной длины над полем $GF(p^k)$. Эти комбинации в общем виде можно записать как:

$$\begin{aligned} \{s\} &= [s_0 s_1 s_2 s_3 \dots s_{p^k-2}] = [T(\varepsilon^m) T(\varepsilon^{m+1}) \dots T(\varepsilon^{m+p^k-2})] = \\ &= [T(c) T(c\varepsilon) \dots T(c\varepsilon^{p^k-2})], \end{aligned} \quad (1)$$

где $T(\varepsilon^i)$ – функция-след.

Задача декодирования эквидистантного циклического кода состоит в определении фазы последовательности $\{s\}$ относительно «закрепленной» (фиксированной) фазовой точки по произвольным k линейно-независимым её элементам.

Для решения поставленной задачи выберем k линейно-независимых элементов последовательности $\{s\}$, а именно $s_{i_1}, s_{i_2}, s_{i_3}, \dots, s_{i_k}$, из которых составим систему уравнений:

$$\begin{aligned} s_{i_1} &= T(\varepsilon^{m+i_1}) = T(c\varepsilon^{i_1}), \\ s_{i_2} &= T(\varepsilon^{m+i_2}) = T(c\varepsilon^{i_2}), \\ &\vdots \\ s_{i_k} &= T(\varepsilon^{m+i_k}) = T(c\varepsilon^{i_k}). \end{aligned} \quad (2)$$

Решим эту систему уравнений относительно элемента $c = \varepsilon^m$, определяющего начальную фазу последовательности $\{s\}$. Известными величинами в системе уравнений (2) являются значения индексов i_1, i_2, \dots, i_k относительно «закрепленной» точки и значения самих линейно-независимых элементов $s_{i_1}, s_{i_2}, \dots, s_{i_k} \in \text{GF}(p)$ последовательности $\{s\}$.

Выразим искомый элемент ε^m поля $\text{GF}(p^k)$ через левый степенной базис поля:

$$\varepsilon^m = a_0 + a_1 \varepsilon + a_2 \varepsilon^2 + \dots + a_{k-1} \varepsilon^{k-1},$$

где $a_i \in \text{GF}(p)$.

Очевидно, что элемент ε^m можно однозначно представить в векторной форме как $[a] = [a_0 \ a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{k-1}]$. Поэтому, решая систему (2) из k уравнений относительно ε^m , нам достаточно определить значения элементов a_i вектор-строки $[a]$. Для этого, например функцию-след $T(\varepsilon^{m+i_1})$, запишем как:

$$T(\varepsilon^{m+i_1}) = \sum_{j=0}^{k-1} (\varepsilon^{m+i_1})^{p^j}; \quad \text{GF}(p) \quad (3)$$

Произведем замену в (3) элементов поля $\text{GF}(p^k)$ их векторным представлением. Тогда элемент $\varepsilon^{m+i_1} = \varepsilon^m \varepsilon^{i_1}$ в векторной форме будет выражаться следующим образом:

$$[a] \cdot F^{i_1}, \quad (4)$$

где F – сопровождающая матрица, вид которой определяется характеристическим многочленом $P(x)$, соответствующим рекуррентному соотношению последовательности $\{s\}$.

Далее, возведение элемента ε^{m+i_1} в степени p^j в выражении (3) заменим умножением вектора $[a] \cdot F^{i_1}$ на матрицу E (единичная матрица) для $j = 0$, на матрицу X – для $j = 1$, на матрицу Y – для $j = 2$ и так далее, на матрицу Z –

для $j = k-1$. Тогда, вместо выражения (3), функции - след $T(\varepsilon^{m+i_1})$ будет соответствовать следующая векторная форма:

$$T(\varepsilon^{m+i_1}) \Leftrightarrow [a] \cdot F^{i_1} E + [a] \cdot F^{i_1} X + [a] \cdot F^{i_1} Y + \dots + [a] \cdot F^{i_1} Z = [a] \cdot F^{i_1} \theta,$$

где матрица θ равна поэлементной сумме по модулю p матриц E, X, Y, \dots, Z , т. е.

$$\theta = [E + X + Y + \dots + Z]. \quad (5)$$

Таким образом, вместо системы уравнений (2) запишем эквивалентную ей систему в матричном представлении:

$$\begin{aligned} s_{i_1} &\Leftrightarrow [a] \cdot F^{i_1} \theta = f_1(a_0 \ a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{k-1}) \\ s_{i_2} &\Leftrightarrow [a] \cdot F^{i_2} \theta = f_2(a_0 \ a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{k-1}) \\ &\vdots \\ s_{i_k} &\Leftrightarrow [a] \cdot F^{i_k} \theta = f_k(a_0 \ a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{k-1}) \end{aligned} \quad (6)$$

Учитывая, что $s_{i_1} = T(\varepsilon^{m+i_1})$ принадлежит простому полю $\text{GF}(p)$, то в результате перемножения $[a] \cdot F^{i_1} \theta$ будет получена вектор-строка, в которой младший разряд s_{i_1} будет элементом, выраженным через элементы a_0, a_1, \dots, a_{k-1} . Остальные же разряды полученного вектора будут нулевыми. Поэтому, если из матрицы θ оставить только младший вектор-столбец θ_0 , то строки уравнений (6) можно записать следующим образом:

$$s_j = [a] \cdot F^j \theta_0 = f_j(a_0 \ a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{k-1}); \text{GF}(p) \quad (7)$$

где j принимает значения i_1, i_2, \dots, i_k .

Полученную систему уравнений (7), если она линейно-независимая, окончательно решаем относительно элементов $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{k-1}$, что и дает векторное представление элемента ε^m , определяющего начальную фазу последовательности $\{s\}$.

Рассмотрим данный метод на конкретном примере.

Пример 1. Пусть комбинациями эквидистантного циклического кода будут рекуррентные последовательности $\{s\}$ максимальной длины над полем $\text{GF}(2^4)$ с характеристическим примитивным многочленом $P(x) = 1 + x + x^4$, имеющие вид:

$$\{s\} = (s_0 \ s_1 \ s_2 \ \dots \ s_{14}) = [T(\varepsilon^m), T(\varepsilon^{m+1}), \dots, T(\varepsilon^{m+14})].$$

Предположим, что приемное устройство зарегистрировало следующие четыре элемента последовательности:

$$s_0 = 1; s_2 = 0; s_3 = 1 \text{ и } s_5 = 0.$$

Тогда, в соответствии с (2), составим систему из k уравнений:

$$\left. \begin{aligned} s_0 &= T(\varepsilon^m) = 1 \\ s_2 &= T(\varepsilon^{m+2}) = 0 \\ s_3 &= T(\varepsilon^{m+3}) = 1 \\ s_5 &= T(\varepsilon^{m+5}) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Решим эту систему уравнений относительно искомого элемента $c = \varepsilon^m$, который может быть записан через левый степенной базис как

$$\varepsilon^m = a_0 + a_1 \varepsilon + a_2 \varepsilon^2 + a_3 \varepsilon^3,$$

где ε – первообразный элемент поля $GF(2^4)$ и корень заданного примитивного многочлена $P(x)$.

Решая систему уравнений (8), найдем значения элементов $a_j \in GF(2)$ вектора $[a] = [a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3]$. Запишем для этого первый из выделенных элементов s_0 через функцию-след $T(\varepsilon^m)$ следующим образом:

$$s_0 = T(\varepsilon^m) = \sum_{j=1}^{k=4} (\varepsilon^m)^{2^{j-1}} = \varepsilon^m + (\varepsilon^m)^2 + (\varepsilon^m)^4 + (\varepsilon^m)^8.$$

При этом матрицы возведения элемента ε^m в степени 2, 4 и 8 соответственно будут [1]:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Тогда, в соответствии с (5), матрица θ будет равна

$$\theta = E + X + Y + Z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

а вектор-столбец θ_0 имеет вид: $\theta_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$.

Сопровождающая матрица F для характеристического многочлена $P(x) = 1 + x + x^4$ имеет вид:

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

а матрицы F^2 и F^3 соответственно:

$$F^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad F^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Тогда, в соответствии с (7), получим:

$$\left. \begin{aligned} s_0 &= [a]E\theta_0 = a_3 \\ s_2 &= [a]F^2\theta_0 = [a_2, a_2 + a_3, a_0 + a_3, a_1]\theta_0 = a_1 \\ s_3 &= [a]F^3\theta_0 = [a_1, a_1 + a_2, a_2 + a_3, a_0 + a_3]\theta_0 = a_0 + a_3 \\ s_5 &= [a]F^5\theta_0 = [a][F + F^2]\theta_0 = [a_2 + a_3, a_0 + a_2, a_0 + a_1 + a_3, a_1 + a_2]\theta_0 = a_1 + a_2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Сравнивая системы уравнений (8) и (9), запишем итоговую систему из k уравнений:

$$a_3 = 1; \quad a_1 = 0; \quad a_0 + a_3 = 1; \quad a_1 + a_2 = 0, \quad (10)$$

которую необходимо решить относительно неизвестных коэффициентов a_j . Как известно, система (10) имеет решение, если она является линейно-независимой. Поэтому позиции линейно-независимых элементов в последовательности $\{s\}$ должны быть определены заранее либо перед решением системы (10) необходимо проверить ее на линейную независимость одним из способов, например, путем вычисления определителя D , составленного из коэффициентов при неизвестных системы (10). Легко проверить, что в нашем примере определитель D системы (10) не равен нулю. Следовательно, система имеет единственное решение. Решая систему (10), найдем, что $a_0 = 0$; $a_1 = 0$; $a_2 = 0$; $a_3 = 1$.

Таким образом, искомый элемент $c = \varepsilon^m \in GF(2^4)$, определяющий фазу последовательности $\{s\}$ в «закрепленной» точке, будет

$$\varepsilon^m = a_0 + a_1 \varepsilon + a_2 \varepsilon^2 + a_3 \varepsilon^3 = \varepsilon^3.$$

Определив начальный элемент $c = \varepsilon^m = \varepsilon^3$, мы теперь можем определить любой элемент последовательности $\{s\}$, в том числе и полностью восстановить всю последовательность $\{s\}$:

$$\begin{aligned} \{s\} &= (s_0 s_1 s_2 s_3 \dots s_{14}) = \{T(c) T(c\varepsilon) T(c\varepsilon^2) \dots T(c\varepsilon^{14})\} = \\ &= \{T(\varepsilon^3) T(\varepsilon^4) T(\varepsilon^5) \dots T(\varepsilon^{14}) T(1) T(\varepsilon) T(\varepsilon^2)\} = (1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 1 0 0 0). \end{aligned}$$

Пример 2. Рассмотрим теперь рекуррентную последовательность $\{s\}$ над полем $GF(3)$ с характеристическим многочленом $P(x) = x^3 - x - 2$.

Пусть при приеме выделены второй, пятый и десятый элементы последовательности $\{s\}$ от «закрепленной» точки, имеющие единичное значение, т. е. $s_2 = 1$; $s_5 = 1$; $s_{10} = 1$.

Найдем по этим k элементам начальную фазу последовательности $\{s\}$. Характеристическая матрица F будет иметь вид:

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

а матрицы F^j соответствующие индексу выделенных элементов s_j следовательно будут:

$$F^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \end{bmatrix}; \quad F^5 = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}; \quad F^{10} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрицы возведения в 3-ю и 9-ю степень ($p = 3$, $k = 3$) соответственно будут иметь вид:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

Тогда суммарная матрица θ будет равна:

$$\theta = E + X + Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

откуда вектор-столбец θ_0 будет равен:

$$\theta_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix}.$$

Для нахождения начального элемента $c = \varepsilon^m = a_0 + a_1 \varepsilon + a_2 \varepsilon^2$, $\text{GF}(3^3)$, модулярного генератора, формирующего последовательность $\{s\}$, составим, с учетом значений выделенных элементов s_j , следующую систему из k уравнений:

$$\left. \begin{aligned} s_2 = T(\varepsilon^{m+2}) \ominus [a_0 \ a_1 \ a_2] F^2 \theta_0 = 2a_0 + 2a_2 = 1 \\ s_5 = T(\varepsilon^{m+5}) \ominus [a_0 \ a_1 \ a_2] F^5 \theta_0 = a_2 + 2a_1 + 2a_2 = 1 \\ s_{10} = T(\varepsilon^{m+10}) \ominus [a_0 \ a_1 \ a_2] F^{10} \theta_0 = 2a_0 + 2a_1 + 2a_2 = 1 \end{aligned} \right\}$$

Убедившись, что данная система уравнений является линейно-независимой, решим ее относительно неизвестных a_0 , a_1 и a_2 и получим, что $a_0 = 0$; $a_1 = 0$; $a_2 = 2$. Таким образом, искомый элемент поля ε^m будет равен $\varepsilon^m = \varepsilon^{15}$. Следовательно, принятая последовательность $\{s\}$ является рекуррентной последовательностью вида:

$$\{s\} = (s_0 \ s_1 \ s_2 \ \dots \ s_{24} \ s_{25}) = [T(\varepsilon^{15})T(\varepsilon^{16})T(\varepsilon^{17})\dots T(\varepsilon^{13})T(\varepsilon^{14})] = (1 \ 0 \ 1 \ 2 \ \dots \ 0 \ 0).$$

Полная последовательность максимальной длины имеет период $N = p^k - 1 = 26$.

Как видно из (6), для составления системы из k уравнений с неизвестными a_0, a_1, \dots, a_{k-1} и её решения относительно указанных неизвестных необходимо в момент приема элемента s_i сформировать и запомнить матрицу F^i . Таким образом, при выделении k элементов $s_{i_1}, s_{i_2}, \dots, s_{i_k}$ принимаемой М-последовательности $\{s\}$ необходимо запоминать матрицы $F^{i_1}, F^{i_2}, \dots, F^{i_k}$, размером $k \times k$ каждая, для чего необходим объём памяти из k^3 ячеек. Сформировать матрицы F^i можно с помощью модулярного регистра, соответствующего характеристическому многочлену $P(x)$. Работа этого регистра должна быть синхронизирована по фазе с поступлением элементов М-последовательности.

Более быстрым может оказаться табличный метод, когда в устройстве памяти хранится весь набор матриц $F^i, i = 0, 1, \dots, p^k - 2$.

Вместе с тем, анализ выражений (7) показывает, что рассматриваемый метод решения на основе произвольных k линейно-независимых уравнений может быть реализован с меньшими затратами требуемой памяти. Действительно, если учесть свойства функции-след и матрицы $\theta = E + X + Y + \dots + Z$, то становится очевидным, что произведение матрицы F^j на вектор-столбец θ_0 в уравнении (7) представляет собой k -элементный участок $b_j, b_{j+1}, \dots, b_{j+k-1}$ канонической М-последовательности $\{b\}$, формируемой местным опорным генератором. При этом опорная М-последовательность $\{b\}$ формируется простым рекуррентным регистром, работающим синфазно с принимаемой последовательностью $\{s\}$, удовлетворяющей одному и тому же рекуррентному соотношению. Синфазность работы состоит в том, что при поступлении на вход элемента s_0 принимаемой М-последовательности в ячейках рекуррентного регистра будут находиться элементы $(b_0, b_1, \dots, b_{k-1}) = (T(1), T(\varepsilon), \dots, T(\varepsilon^{k-1}))$ опорной канонической М-последовательности.

Таким образом, для решения системы уравнений (2.68) относительно неизвестных a_0, a_1, \dots, a_{k-1} необходимо запомнить k участков из k элементов каждый, т. е. требуемый объём памяти для этих элементов составляет k^2 .

Очевидно, что система уравнений (9) может быть записана компактно в матричном виде:

$$[a] B = [a_0 a_1 \dots a_{k-1}] \begin{pmatrix} b_{i_1} & b_{i_2} & \dots & b_{i_k} \\ b_{i_1+1} & b_{i_2+1} & \dots & b_{i_k+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{i_1+k-1} & b_{i_2+k-1} & \dots & b_{i_k+k-1} \end{pmatrix} = [s_{i_1} s_{i_2} \dots s_{i_k}] \quad (11)$$

Найдя матрицу B^{-1} , обратную матрице B , определим искомые элементы a_0, a_1, \dots, a_{k-1} как:

$$[s_{i_1} s_{i_2} \dots s_{i_k}] B^{-1} = [a_0 a_1 \dots a_{k-1}]. \quad (12)$$

Рассмотрим решение уравнений (8) из примера 1.

Для выбранного характеристического многочлена $P(x) = 1 + x + x^4$ опорная каноническая М-последовательность $\{b\}$ будет иметь вид:

$$\{b\} = \{b_0 b_1 b_2 b_3 b_4 b_5 b_6 b_7 b_8 b_9 b_{10} b_{11} b_{12} b_{13} b_{14}\} = \{000100110101111\},$$

где $b_i = T(\epsilon^i)$.

Тогда для выделенных элементов принимаемой последовательности $\{s\}$

$s_0 = 1, s_2 = 0, s_3 = 1$ и $s_5 = 0$ система уравнений (11) примет следующий вид:

$$[a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3] \begin{pmatrix} b_0 & b_2 & b_3 & b_5 \\ b_1 & b_3 & b_4 & b_6 \\ b_2 & b_4 & b_5 & b_7 \\ b_3 & b_5 & b_6 & b_8 \end{pmatrix} = [a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3] \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = [s_0 \ s_2 \ s_3 \ s_5] = [1 \ 0 \ 1 \ 0].$$

Отсюда, учитывая, что обратная матрица B^{-1} равна

$$[B^{-1}] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

получим:

$$[s_0 \ s_2 \ s_3 \ s_5][B^{-1}] = [s_0 \ s_2 \ s_3 \ s_5] \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = [a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3].$$

В заключение можно отметить, что рассмотренный метод позволяет организовать мажоритарный алгоритм принятия решения о начальной фазе принятой последовательности $\{s\}$, что обеспечивает повышение достоверности при передаче комбинаций эквидистантного кода по каналам с ошибками. Очевидно, что еще большего эффекта можно достичь в канале со стираниями или в канале с "мягкими" решениями благодаря тому, что при обработке могут быть исключены те комбинации из k линейно-независимых элементов, среди которых будут ненадежные или стертые элементы.

Библиографический список

1. Когновицкий О. С. Двойственный базис и его применение в телекоммуникациях / О. С. Когновицкий. – СПб. : Линк, 2009. – 423 с.

References

1. **Kognovickij O. S.** Dvoystvennyj bazis i ego primenenie v telekommunikacijah / O. S. Kognovickij. – SPb. : Link, 2009. – 423 s.

Когновицкий Олег Станиславович – доктор технических наук, профессор 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», nichsut@gmail.com

УДК 004.89

Л. М. Макаров

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

L. M. Makarov

Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University
of Telecommunications

МОДЕЛЬ ТЕКСТОВОГО КОНТЕНТ АНАЛИЗАТОРА

MODEL TEXT CONTENT ANALYZER

Наличие большого количества различных по содержанию и стилю изложения текстовых документов, образующих многочисленные ресурсы в сети Интернет, актуализирует проблему формирования аналитических инструментов, создаваемых в рамках формальной модели. В работе рассмотрены основные принципы создания модели анализа информационных материалов, обеспечивающих адекватное сравнение больших групп текстовых документов.

The large number of different in content and style of the text documents, forming numerous resources on the Internet, a problem-actualized form of analytical tools created as part of the formal model. The paper discusses the basic principles of the model analysis of information materials to provide adequate comparison of large groups of text documents.

текстовый документ, компьютерный анализ, информационный ресурс.

text document, computer analysis, information resource.

Технология анализа

Совершенствование средств и методов создания информационных ресурсов, содержащих большое количество текстовых документов, создает предпосылки для разработки специальных средств работы с большими объемами информации.

В терминологическом отношении контент-анализ позиционирует содержательную составляющую текстового документа. Это метод качественного и количественного анализа содержания документов с целью выявления и измерения различных фактов и тенденций, отраженных в этих документах. Особенность метода контент-анализа состоит в том, что формирование суждений осуществляется с учетом контекста среды позиционирования текста. С учетом этого можно признать, что не все документы могут стать объектом контент-анализа. Необходимо, чтобы исследуемое содержание позволило задать однозначное правило для надежного фиксирования нужных характеристик (принцип формализации), а также, чтобы интересующие исследователя элементы содержания встречались с достаточной частотой (принцип статистической значимости). Чаще всего в качестве объектов исследования контент-анализа выступают сообщения печати, радио, телевидения, протоколы собраний, письма, приказы, распоряжения.

Основным направлением применения контент-анализа является выявление того, что существовало до размещения текста в среде и что тем или иным образом получило в нем отражение. В таком понимании текст рассматривается как индикатор определенных сторон изучаемой среды - окружающей действительности, автора или адресата. Углубленное рассмотрение этого представления требует дополнительного определения того, что существует только в тексте как таковом. Здесь важно наличие принципов выделения различных характеристик текста, таких как - язык, структура, жанр сообщения, ритм и тон речи, а также выявление того, что будет существовать после внесения текста в среду позиционирования, т.е. после его восприятия адресатом, когда будет сформирована оценка различных эффектов воздействия. С формальной точки зрения, в рамках высказанных воззрений на контент-анализ, рассматривается две составляющие модели: среда позиционирования изучаемого текста и, собственно, сам текст.

В первом приближении, при описании модели формирования суждений о тексте, исходят из того, что, текст погруженный (представленный) в собственной текстовой среде, практически не обладает значимыми показателями, посредством которых можно отличить первичное состояние среды от вторичного состояния среды. Действительно, исходный текст, извлеченный произвольным образом из некоторого информационного ресурса и рассматриваемый на фоне этого же самого текста, не позволяет установить статистических различий. В рамках такой упрощенной модели на позиционирование текста самого на себя формируется условие о необходимости создания среды позиционирования отобранных информационных материалов. При чем такая среда должна обладать более широким набором статистических показателей, чем изучаемый текст.

Развитие этих представлений позволяют постулировать необходимость выделения нескольких стадий анализа. После того, как сформулированы тема, задачи и гипотезы исследования, определяются категории анализа - наиболее общие, ключевые понятия, соответствующие исследовательским задачам. Такие понятия формируются в виде полевых структур, наделяемых статистическими показателями встречаемости терминов, словосочетаний, определений, которые создают сеть категорий. Система категорий играет роль направляющих стимулов и указывает, какие задачи требуется решить при анализе текста.

Полагаем, что категории контент-анализа являются исчерпывающими и охватывают все части содержания, определяемые задачами данного исследования, а также являются взаимоисключающими. Другими словами, одни и те же части изучаемого текста не должны принадлежать различным категориям. Помимо этого при реализации формальных процедур соотнесения фрагментов исследуемого текста набору категорий не должно возникать разногласий по поводу того, какие части содержания следует отно-

силь к той или иной категории. Все эти условия формируются в формате логических процедур и закладываются в модели анализа текста.

При выборе категорий для контент-анализа следует избегать крайностей: выбора слишком многочисленных и дробных категорий, почти повторяющих текст, и выбора слишком крупных категорий. В определенной степени высказанные замечания следует признать очевидными, поскольку в концептуальной формулировке их можно соотносить с требованиями адекватного дискретного воспроизведения «непрерывной текстовой конструкции», обличенной в набор словоформ. Действительно, в определенном смысле текстовая конструкция, позиционируемая набором словоформ может рассматриваться прототипом аналогового сигнала, где авторская мысль излагается последовательным и логически связанным набором строго подобранных тематически однородных словоформ. Сопоставление этого набора той или иной категории (понятий), в определенной степени «снижает точность позиционирования авторской мысли», что естественно снижает понятийную окраску исследуемого текста. Однако такой прием позволяет воспроизвести обобщенный портрет (образ) текстового документа. Сочетание желаемой точности воспроизведения портрета текстового документа, на фоне информационной среды – других текстовых документов, позволяет реализовать многочисленные методы контент-анализа.

В серии процедур контент-анализа особое значение уделяется процедуре выбора лингвистической единицы речи или содержания текстового документа, служащие в тексте индикатором интересующих исследователя явлений. В практике контент аналитических исследований наиболее часто в качестве лингвистической единицы выделяется слово, простое предложение, суждение, тематическая линия. Сложные виды контент-анализа обычно оперируют не одной, а несколькими единицами анализа. В этом случае следует принимать во внимание, что единицы анализа, взятые изолированно, могут быть не всегда правильно истолкованы, поэтому они рассматриваются на фоне более широких лингвистических или содержательных структур, указывающих на характер членения текста, в пределах которого идентифицируется присутствие или отсутствие единиц анализа – контекстуальных единиц. В этом контексте термин «формирование» следует понимать как составное понятие, в рамках которого осуществляется конструирование образа текста или высказывания с учетом выбранной полевой структуры окружения - платформы позиционирования.

После выбора лингвистической единицы следует установить единицу счета - количественную меру взаимосвязи элементов информационного массива. С этой целью часто используют такие единицы счета, как время или пространственные координаты позиционирования элементов информационного массива данных, позиционируемого либо речью, либо текстом.

Формирование аналитических процедур осуществляется на основе известных математических конструкций, реализуемых нейронными моделями. Традиционно в качестве нейронной модели рассматривается сеть, обладающая свойством формировать набор количественных показателей. В рамках модели постулируется возможность организации входного потока данных и позиционирование выходного потока, образ которого созданный по определенным правилам позволяет однозначно идентифицировать текстовые материалы или речевые высказывания.

Модель анализа

Традиционно используемый для описания нейронных сетей математическим языком является аппарат векторной и матричной алгебры. Основным структурным элементом в описании способов обработки информации нейронной сетью является вектор – упорядоченный набор чисел, называемый компонентами вектора.

В зависимости от особенностей рассматриваемой задачи компоненты вектора могут быть действительными, целыми или булевыми числами. Использование булевых чисел несколько расширяет область применения модели и позволяет проводить анализ бинарных транспарантов изображений или их фрагментов. Пример позиционирования исходных массивов данных представлен на [рисунок 1](#).

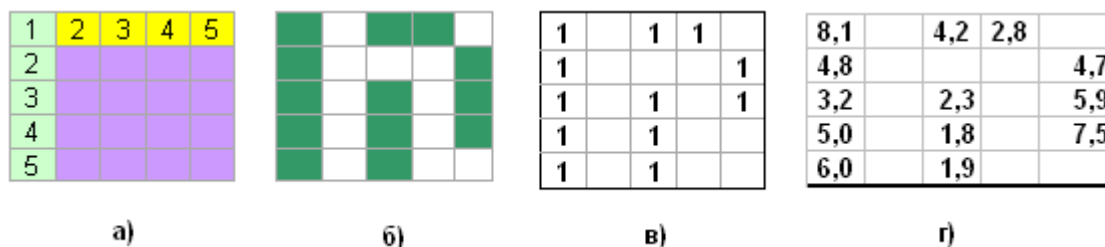


Рис. 1. Примеры позиционирования векторов:

- а) общая структура информационного массива 5x5; б) бинарный транспарант;
в) булевый вектор с 25 компонентами, нумеруемыми по строкам;
г) вектор из пространства действительных чисел $R^{5 \times 5}$

Рассматриваемый способ позиционирования информационного массива данных характеризует матричный формат, где каждый элемент массива занимает строго определенную позицию. Учитывая это можно позиционировать исходный вектор в виде двухмерного массива, например, 8,1; 0; 4,2; 2,8; 0. В такой записи каждый элемент информационного массива воспроизводится в строгой последовательности, которая соотносится со временем фиксации элемента массива.

Формируемые представления об изучаемом объекте, в качестве которого рассматривается текстовый материал, замещаются математическим

образом – вектором. Вектор позиционируется своими составляющими: номером строки и набором значений по строке. Такая запись позволяет говорить о некотором событии, которое рассматривается по выделенным элементам, как составляющим, в течение некоторого времени. Переходя к формальному описанию процесса позиционирования изучаемого объекта можно ввести математический образ в виде матрицы, обладающей набором элементов с двумя индексами. В таком случае индексы определяют компоненты матрицы A_{ij} , располагаемые по строкам и столбцам, причем первый индекс i определяет номер строки, а второй j – номер столбца. Тогда, изображение на рисунке 1 г) может трактоваться и как вектор с 25 компонентами, и как матрица с пятью строками и пятью столбцами.

Позиционирование исходного, подлежащего исследованию материала, в образе матрицы, позволяет реализовать серию процедур, по результатам которых можно воспроизвести ряд суждений.

Суммой двух матриц A и B одинаковой размерности ($n \times m$) является матрица C той же размерности с компонентами, равными сумме соответствующих компонент исходных матриц: $C_{ij} = A_{ij} + B_{ij}$. Матрицу можно умножить на скаляр, при этом в результате получается матрица той же размерности, каждая компонента которой умножена на этот скаляр. Произведением двух матриц A ($n \times l$) и B ($l \times m$) также является матрица C ($n \times m$), компоненты которой даются соотношением:

$$C_{i,j} = \sum_{k=1}^l A_{j,k} B_{k,j}$$

Заметим, что размерности перемножаемых матриц должны быть согласованными – число столбцов первой матрицы должно равняться числу строк второй.

В важном частном случае, когда вторая матрица является вектором (т. е. матрицей с одной из размерностей, равной единице ($m=1$)), представленное правило определяет способ умножения матрицы на вектор:

$$C_j = \sum_{k=1}^l A_{i,k} b_k$$

В результате умножения получается также вектор C , причем для квадратной матрицы A ($l \times l$) его размерность равна размерности вектора-сомножителя b . При произвольном выборе квадратной матрицы A можно построить произвольное линейное преобразование, такое, что $y = T(x)$ одного вектора (x) в другой (y) той же размерности $y = Ax$.

Более точно, для того, чтобы преобразование T одного вектора в другой являлось линейным, необходимо и достаточно, чтобы для двух векторов x^1 и x^2 и пары чисел α и β выполнялось равенство:

$$T(\alpha x^1 + \beta x^2) = \alpha T(x^1) + \beta T(x^2)$$

Тогда можно показать, что всякому линейному преобразованию векторов соответствует умножение исходного вектора на некоторую матрицу. Формальные рассуждения о этой процедуре свидетельствуют, что если в приведенной выше формуле для умножения матрицы A на вектор x компоненты этого вектора неизвестны, в то время, как A и результирующий вектор b известны, то о выражении $Ax = b$, где A позиционируется как квадратная матрица, можно говорить, как о системе линейных алгебраических уравнений относительно компонент вектора x . В таком случае система уравнений имеет единственное решение, если вектора, определяемые строками квадратной матрицы A , являются линейно независимыми. Формируемые выводы позволяют создавать серию алгоритмов анализа исходного информационного материала.

Несколько расширяя введенные представления о квадратных матрицах, следует отметить, что часто приходится проводить анализ по диагональным матрицам у которых все элементы вне главной диагонали равны нулю. Диагональную матрицу, все элементы главной диагонали которой равны единице, называют единичной матрицей I . Линейное преобразование, определяемое единичной матрицей, является тождественным: $Ix = x$ для всякого вектора x .

По умолчанию полагаем, что пространство квадратных матриц одинаковой размерности с введенными операциями сложения и поэлементного умножения на скаляр, является линейным пространством. Для него также можно ввести метрику и норму. Нулевым элементом служит матрица, все элементы которой равны нулю.

В общем случае, компоненты такого вектора задаются в виде $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и рассматриваются, как его координаты в n -мерном пространстве. В случае действительных компонент это пространство обозначается, как R^n и включает в себя набор всех возможных совокупностей из n действительных чисел.

Полагаем, что вектор x принадлежит пространству R^n , иначе говоря, вектор x позиционируется из R^n пространства. Расширяя эти представления укажем, что при необходимости можно вводить в рассмотрение набор векторов, таких как: $x^1 = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $x^2 = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, , $x^e = (x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Установив общий принцип позиционирования вектора x в пространстве R^n , обратимся к рассмотрению компонент. В первом приближении

для каждого текста можно указать количественные характеристики: количество элементов (знаков), словоформ, количество гласных букв, количество согласных букв, статистические показатели отдельных слов и словосочетаний. Такие параметры в определенном смысле могут рассматриваться как индивидуальные (уникальные) компоненты вектора x^i , количественно характеризующие избранный текст. Данные представления позволяют рассматривать вектор в виде упорядоченной совокупности компонент и одновременно с этим позиционировать вектор в качестве образа, отображающего выделенную совокупность признаков. Способы выбора совокупности признаков и формирование информационного вектора определяются конкретными приложениями.

Множество векторов с действительными компонентами является частным случаем более общего понятия, называемого линейным векторным пространством V , если для его элементов определены операции векторного умножения на скаляр, коммутативности, дистрибутивности, ассоциативности. Очевидно, примером линейного векторного пространства является пространство R^n с покомпонентными операциями сложения и умножения.

Для двух элементов (x, y) векторного пространства скалярное (внутреннее) произведение определяется в виде: $(x, y) = x_1y_1 + x_2y_2 + \dots + x_ny_n$. Скалярное произведение обладает свойствами симметричности, аддитивности и линейности по каждому сомножителю:

$$(x, y) = (y, x)$$


$$(\alpha x, y) = \alpha(x, y)$$

$$(x + y, z) = (x, z) + (y, z)$$

$$(x, x) \geq 0$$

Причем если $(x, x) = 0$, то $x = 0$.

Равенство нулю скалярного произведения двух векторов означает их взаимную ортогональность, согласно обычным геометрическим представлениям. Используя эти представления можно констатировать, что два различных образа (или вектора) могут быть в той или иной мере похожи друг на друга. Очевидно, что совпадение векторов (образов) означает полное совпадение всех без исключения компонент. Для математического описания степени сходства векторное пространство может быть снабжено скалярной метрикой – расстоянием $d(x, y)$ между всякими двумя векторами x и y . Позиционирование исходных информационных материалов в Евклидовом пространстве, где рассматривается декартова система координат, устанавливает метрику d_E :


$$d_E(x, y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2}$$

При рассмотрении образов, формируемых в формате бинарных транспарантов, рассматривается пространство Хемминга, характеризуемое расстоянием d_H между векторами. В случае булевых векторов размерности n рассматриваемое пространство представляет собой множество вершин n -мерного гиперкуба с Хемминговой метрикой. Расстояние между двумя вершинами определяется длиной кратчайшего соединяющего их пути, измеренной вдоль ребер. Размерность пространства Хемминга устанавливается по числу компонент вектора d_H .

Для векторов вводится понятие нормы $\|x\|$ – длины вектора x . Пространство, в котором определена норма векторов, называется нормированным. Норма вектора в пространстве позиционирования обладает следующими свойствами:

1. $\|x\| \geq 0$, причем $\|x\| = 0$ при $x=0$
2. $\|\alpha x\| = |\alpha| * \|x\|$
3. $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$

В анализе информационных материалов, в частности представленных в формате текста, часто используются нейросетевые технологии. Важным для нейросетевых приложений случаем является множество векторов, компоненты которых являются действительными числами, принадлежащими отрезку $[0,1]$. Такое представление о наборе векторов формируется посредством процедуры нормирования, что позволяет воспроизводить важные суждения об анализируемых информационных массивах.

Так, например, множество случайно подобранных для контент-анализа текстов и, соответственно, их векторов не образует линейного векторного пространства, так как их сумма может иметь компоненты вне рассматриваемого отрезка значений $[0,1]$. Развивая эти представления можно указать на возможность создания многочисленных информационных материалов, и, соответственно, их векторов, содержательная часть которых будет значительно отличаться. Такое оказывается возможным благодаря наличию свойства аддитивности пространства позиционирования исходных текстов.

Действительно, выбирая в качестве основы некоторый набор текстов, можно создать модельный ряд синтетических текстов, комбинируя исходные данные из первоначального набора текстов. Следуя этим представлениям можно указать на возможность выделения в исходном случайным образом отобранном информационном материале так называемых состав-

ных тематических линий, иначе говоря, подпространств. Множество $V' \in V$ называется подпространством линейного пространства V , если:

1. $\forall \bar{x}, \bar{y} \in V' \Rightarrow \bar{x} + \bar{y} \in V'$;
2. $\forall x \in V', \quad \forall \alpha \in R(C) \Rightarrow \alpha \bar{x} \in V'$

Наличие возможности выделения подпространства посредством формальной процедуры, открывает широкие возможности по выделению фрагментов в исходном информационном материале, что и соответствует основной задаче контент-анализа. В рамках этой задачи рассмотрим формализм процедуры выделения фрагментов.

Полагаем, что существует процедура формирования линейной комбинации векторов $x^1, x^2, \dots, x^i, \dots, x^r$, которая порождает вектор \bar{y} , для которого выполняется равенство:

$$\bar{y} = \alpha_1 x^1 + \alpha_2 x^2 + \dots + \alpha_i x^i + \dots + \alpha_r x^r = \sum_{i=1}^r \alpha_i x^i$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r \in R(C)$ - коэффициенты линейной комбинации. Если $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_r = 0$ то комбинация называется тривиальной. Если $\exists \alpha_i \neq 0$, то комбинация называется нетривиальной.

Для заданной совокупности признаков, определяющих пространство векторов, представляется возможным сформировать минимальный набор векторов, в разной степени обладающих этими признаками. В дополнении к этому, с целью расширения введенных понятий, следует указать на возможность расширения набора минимального количества векторов, по мере увеличения количества компонент векторов. При этом представляется возможным на основе созданного набора векторов, посредством линейной комбинации векторов, воспроизвести «производные вектора», такие, что образуют новые информационные материалы. Рассуждения по этой тематической линии формируют определенные представления о возможности создания новых информационных материалов, в определенной степени связанных с исходным – «стартовым» набором документов, но вместе с этим обладающих некоторыми новыми образами.

В естественных условиях формирование начального комплекта векторов, а затем запуск процесса синтеза новых векторов, можно соотнести процедуре трансляции, посредством которой одна часть компонент векторов исходного набора уменьшает свои абсолютные значения, а другая часть, наоборот, увеличивает. Можно сказать, что в процессе создания новых информационных материалов в пространстве признаков (компонент векторов) очерчивается трек, характеризующий модифицированный образ вновь создаваемого информационного материала.

Придерживаясь известных математических представлений, определим набор исходных векторов в качестве базиса пространства. Рассмотрим это важное понятие подробнее.

Вектора x^1, x^2, \dots, x^m считаются линейно независимыми. При условии:

1. если их произвольная линейная комбинация $\alpha_1 x^1 + \alpha_2 x^2 + \dots + \alpha_m x^m$ не обращается в ноль,
2. если только все константы $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ не равны одновременно нулю.

Формально, констатируем, что базис может состоять из любой комбинации из n линейно независимых векторов, где n – размерность пространства.

Выберем некоторую систему линейно независимых векторов x^1, x^2, \dots, x^m , где $m < n$. Все возможные линейные комбинации этих векторов сформируют линейное пространство размерности m , которое будет являться подпространством или линейной оболочкой L исходного n -мерного пространства. Выбранная базовая система из m векторов является, очевидно, базисом в подпространстве L .

Важным частным случаем линейной оболочки является подпространство размерности на единицу меньшей, чем размерность исходного пространства ($m=n-1$), называемое гиперплоскостью. В случае трехмерного пространства это обычная плоскость. Гиперплоскость делит пространство на две части. Очевидно, что совокупность гиперплоскостей разбивает исходное пространство на несколько множеств, каждое из которых содержит вектора с близким набором признаков, тем самым осуществляется классификация векторов.

Принимая во внимание, что различным областям распределения векторов можно поставить в соответствие различные темы, то на этой основе можно создать классификатор информационного ресурса – подборки текстовых материалов, который выявляет принадлежность текста к различным классификационным категориям, другими словами, – тематическим группам. В качестве примера классификатора для информационного ресурса можно использовать модель сети Кохонена-Гроссберга. Такой классификатор требует предварительной настройки («обучения») на примерах классификационных групп: классификатору предъявляется список тематических групп, каждая из которых представлена достаточным количеством текстов. В дальнейшем классификатор автоматически размещает предъявленные тексты в группах, содержащих сходные тексты. Посредством данной нейросетевой модели возможно достичь 95 % хороших результатов, по критериям точности и полноты.

Следуя введенным представлениям, рассмотрим два подпространства L_1 и L_2 . Для двух подпространств может быть введено понятие их взаимной ортогональности. Два подпространства L_1 и L_2 называются взаимно ортогональными, если всякий элемент одного подпространства ортогонален каждому элементу второго подпространства.

Произвольно выбранные линейно независимые вектора не обязательно являются взаимно ортогональными. Однако в ряде приложений удобно работать с ортогональными системами. Для этого исходные вектора требуется преобразовать – сделать ортогональными. Классический процесс преобразования проводится по процедуре Грама-Шмидта и состоит в следующем: по системе линейно независимых ненулевых векторов $x^1, x^2, \dots, x^i, \dots, x^m$ рекуррентно строится система ортогональных векторов $h^1, h^2, \dots, h^i, \dots, h^m$.

В качестве первого вектора h_1 выбирается исходный вектор x_1 . Каждый следующий вектор делается ортогональным всем предыдущим, для чего из него вычитаются его проекции на все предыдущие вектора. Это преобразование осуществляется по выражению:

$$h^i = x^i - \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{(x^i, h^j)}{\|h^j\|^2} \right) h^j$$

При этом, если какой-либо из получившихся векторов h^i оказывается равным нулю, он отбрасывается. Можно показать, что, по построению, полученная система векторов оказывается ортогональной, т. е. каждый вектор содержит только уникальные для него признаки.

Сопоставление информационных материалов, в частности позиционируемых в качестве текстов или графики, можно проводить и в сферической системе координат. Гиперсфера также не является линейным пространством, поскольку отсутствует нулевой элемент поверхности.

В такой модели позиционирования результатов сопоставления исходных материалов или процедуре выделения фрагментов можно выделить характерные особенности. В первую очередь необходимо указать, что при сопоставлении информационных материалов, образы которых представлены векторами равной длины, получаем сферическую поверхность. На поверхности сферы могут быть выделены области, соответствующие определенной группировке векторов. Контур таких областей можно соотносить с емкостью понятийного поля, формируемого набором информационных материалов, позиционируемых группой векторов. Соотнесение длины контура на поверхности сферы с емкостью понятийного поля позволяет устанавливать наличие вторичных признаков, характеризующих взаимную

обусловленность фрагментов исходного информационного материала, и тем самым способствует проведению углубленного контент-анализа.

Заключение

Обширная сеть современных телекоммуникаций позволяет оперативно извлекать множество информационных документов, большую часть которых составляют текстовые документы. Контент-анализ оперирует содержательными понятиями, которые при организации аналитических процедур требуется исполнять в автоматическом режиме.

В работе показана возможность организации инструментальной среды средствами классического матричного анализа, обеспечивающего формирование образа изучаемого объекта для решения разнообразных задач контент-анализа.

Макаров Леонид Михайлович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Конструирование и производство радиоэлектронных средств» Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», kprs.spbgut.ru

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 627.3.049.77:539.12.04

Е. В. Калинин

ОАО «Российский научно-исследовательский институт
«Электронстандарт»

E. V. Kalinin

Russian research institute «Electronstandart»

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА РЕЖИМА РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННО-КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ СВЧ, В ПРОЦЕССЕ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ

CHOOSING THE MODE OF MICROWAVE COMPONENTS WHILE
RADIATION TESTING SELECTING

В статье рассмотрено влияние ионизирующего излучения (ИИ) на характеристики электронно-компонентной базы СВЧ. Выделены диапазоны параметров СВЧ компонентов наиболее чувствительных к воздействию ИИ. Рассмотрены эффекты, возникающие при испытаниях СВЧ усилителей на радиационную стойкость. Проведён анализ отказов СВЧ компонентов с цифровым управлением, при испытаниях на одиночные эффекты. На основе результатов анализа показана важность выбора режима работы компонентов СВЧ при испытаниях на радиационную стойкость.

This paper considers effects of ionizing radiation on the characteristics of microwave components. The range of microwave components parameters most sensitive to the effects of ionizing radiation is selected. Radiation effects on microwave amplifiers are analyzed. Microwave components with digital control are tested on single event effects (SEE), analysis of failure mechanisms is performed. The importance of choosing the mode of microwave components while radiation testing is shown.

электронно-компонентная база СВЧ, ионизирующее излучение, экспериментальное исследование.

microwave components, ionizing radiation, experimental research.

Интенсивное развитие космической программы потребовало учёта воздействия ионизирующего излучения (ИИ) на электронно-компонентную базу (ЭКБ). Поэтому весьма важны предварительные испытания электронных компонент (ЭК) на радиационную стойкость. Одним из важнейших и распространённых классов полупроводниковой ЭКБ, используемой в аппаратуре космического и специального назначения, является большой класс СВЧ изделий. Характеристики СВЧ компонентов, их функ-

циональное назначение и чувствительные параметры имеют важную роль в выборе режима работы изделий в условиях эксплуатации, что соответственно отображается на процессе испытаний этих компонентов.

При базовой методике испытаний на радиационную стойкость ЭКБ СВЧ на изделия подаются тестовые сигналы и напряжения питания. Режим тестовых сигналов не изменяется на протяжении всего цикла испытаний, а детальный контроль характеристик СВЧ изделий осуществляется в перерывах между этапами облучений, когда и производится контрольный замер характеристик на измерительном комплексе. Контроль параметров при испытаниях сводится к измерению простейшего набора характеристик, общих для аналоговой ЭКБ [1].

На основе анализа различной аппаратуры, предназначенной для работы в условиях ИИ, и наиболее распространенных составляющих её СВЧ компонентов были выделены частотные параметры ЭКБ СВЧ самые чувствительные к воздействию ИИ (таблица 1 для активных компонентов с внешним источником питания и таблица 2 для компонентов пассивных без внешнего источника питания). Проведённый анализ рассмотренных СВЧ компонентов, как импортных производителей, так и отечественных показал, что максимальные и минимальные значения параметров большинства выделенных компонентов находятся в границах, указанных в таблицах 1 и 2. Особо стоит отметить, что выбор параметров предназначенных для контроля зависит от конкретных типов изделий и должен отображать их функциональное предназначение. Также в процессе облучения проводится контроль общих параметров напряжений питания и токов потребления в тех случаях, когда это представляется возможным.

ТАБЛИЦА 1. Характеристики СВЧ ЭКБ
с внешним источником питания наиболее чувствительные к ИИ

Параметр	Г		МШУ		УМ		Д	
	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.
Выходная мощность сигнала, дБм	-5	20	-5	15	10	60	-10	5
Коэффициент усиления, дБ	-	-	5	30	10	40	0	10

Здесь: Г – генераторы, МШУ – Малошумящие усилители, УМ – Усилители мощности, Д – Делители частоты.

ТАБЛИЦА 2. Характеристики СВЧ ЭКБ
без внешнего источника питания наиболее чувствительные к ИИ

Параметр	К		Ф		С		Ум.		Атт.	
	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.
Выходная мощность сигнала, дБм	-50	30	-50	30	-10	15	5	30	-30	30
Прямые потери, дБ	-5	0	-5	0	-20	0	-10	-25	-5	0

Здесь: К – Коммутаторы, Ф – Фазовращатели, С – Смесители, Ум – Умножители частоты.

Для примера показаны результаты испытаний определения радиационной стойкости двух типов интегральных СВЧ усилителей от различных производителей ([рисунки 1а и 1б](#) – усилитель MSA-0670 и [рисунки 2а и 2б](#) – усилитель SGA-2386). Нормы предельно допустимых значений параметров указаны на графиках горизонтальными линиями. При испытаниях на усилители подавались напряжение питания и входной сигнал $F_{in} = 0,5$ ГГц. Набор поглощённой дозы радиации проходил в два этапа до 7,2 крад и до 12 крад соответственно.

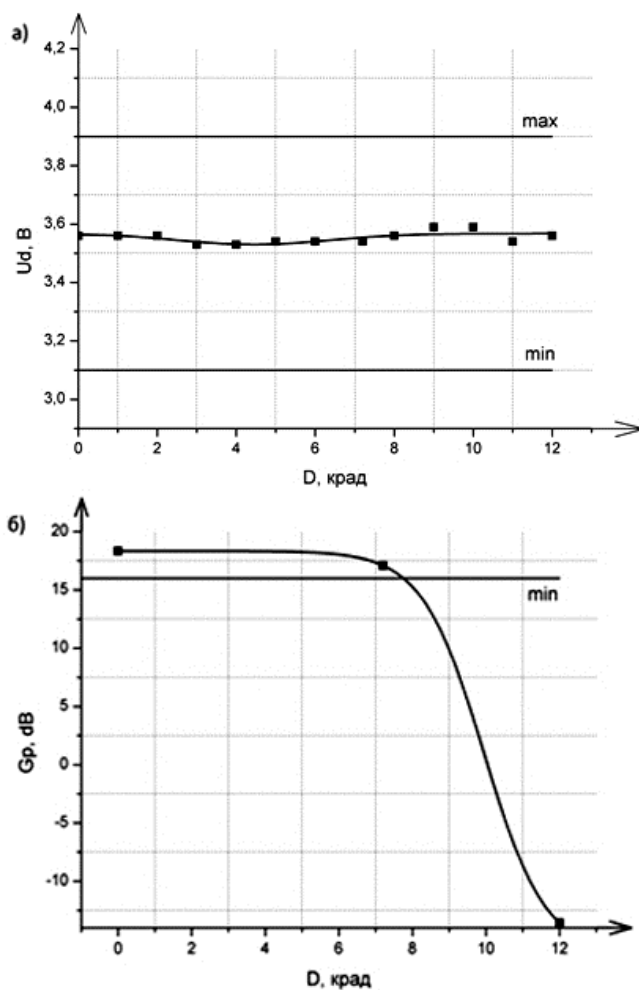


Рис. 1. Зависимость характеристик усилителя MSA-0670 при испытаниях на радиационную стойкость: а) Зависимость напряжения питания (U_d) от поглощённой дозы ИИ; б) Зависимость коэффициента усиления G_p от поглощённой дозы ИИ

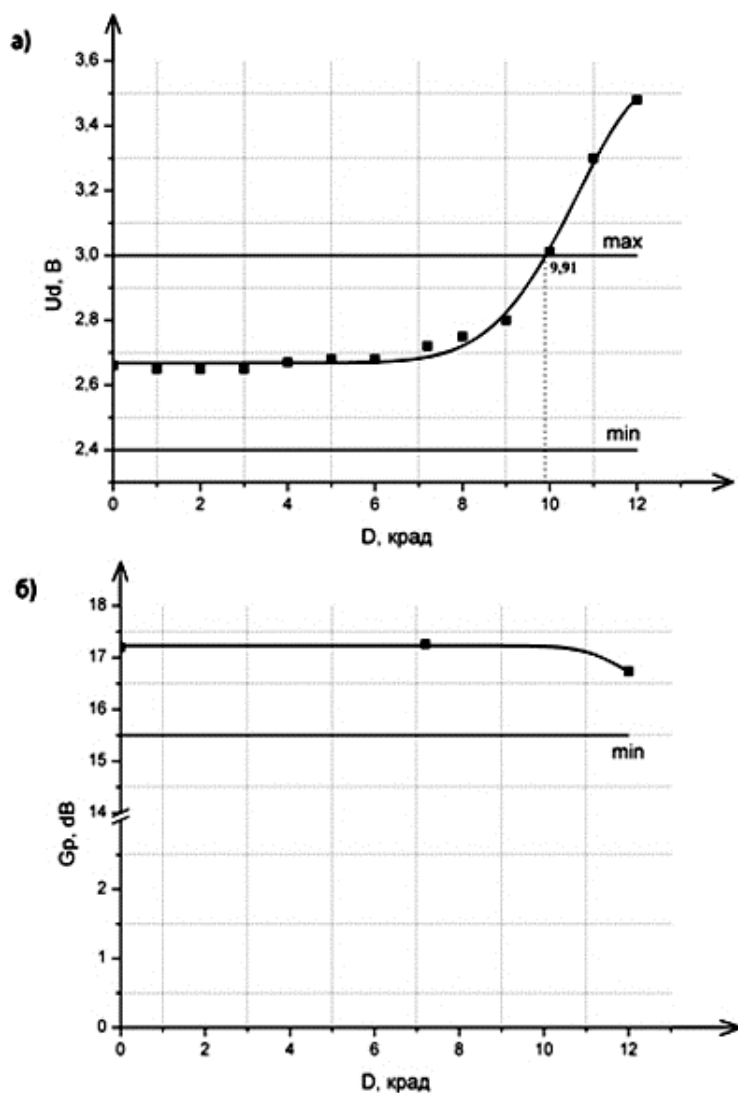


Рис. 2. Зависимость характеристик усилителя SGA-2386 при испытаниях на радиационную стойкость: а) Зависимость напряжения питания (U_d) от поглощённой дозы ИИ; б) Зависимость коэффициента усиления G_p от поглощённой дозы ИИ

В процессе облучения проводился контроль напряжения питания U_d усилителей и во временных интервалах между облучениями проводился замер коэффициента усиления G_p и других параметров. Как видно из [рисунков 1 и 2](#), в результате воздействия ИИ происходит отказ обоих усилителей, причём в одном случае ([рисунок 1](#)) напряжение питания U_d выходит за допустимые нормы, но коэффициент усиления G_p остаётся в пределах допустимых норм. В другом случае ([рисунки 2](#)) происходит обратная ситуация: коэффициент усиления падает ниже минимальных значений, а режим работы по напряжению питания остаётся в норме. Результаты подобных отказов наблюдаются и у других типов СВЧ ЭКБ, таким образом, для определения радиационной стойкости СВЧ компонентов важно выбирать режим работы близкий к их реальному функционированию и при испыта-

ниях контролировать параметры наиболее чувствительные к воздействию ИИ.

Другим важным критерием выбора режима работы современной ЭКБ СВЧ является её продолжающаяся интеграция аналоговой и цифровой ЭКБ. Которая приводит к тому, что СВЧ приборы стали включать в себя целые блоки, а зачастую и модули цифровой ЭКБ (память, микропроцессоры, логические схемы). Возникает необходимость при испытаниях ЭКБ СВЧ, помимо контроля параметров, указанных в [таблицах 1 и 2](#), также изменять режим работы исследуемого изделия с помощью его цифровых логических входов. Примерами такой ЭКБ СВЧ являются аттенюаторы с переменным программируемым коэффициентом ослабления, коммутаторы с переключением входов с помощью цифровых управляющих сигналов, фазовращатели с переменным программируемым коэффициентом изменения фазы, делители и умножители частоты с программируемыми коэффициентами и т. д., причём такие компоненты могут дополнительно входить в состав типичных усилителей, смесителей, генераторов, и прочих комплектующих. Для примера, в интегральном аттенюаторе [рисунок 3 \[2\]](#) и в интегральном коммутаторе [рисунок 4 \[3\]](#), представлены такие компоненты в виде типичной цифровой схемы управления.

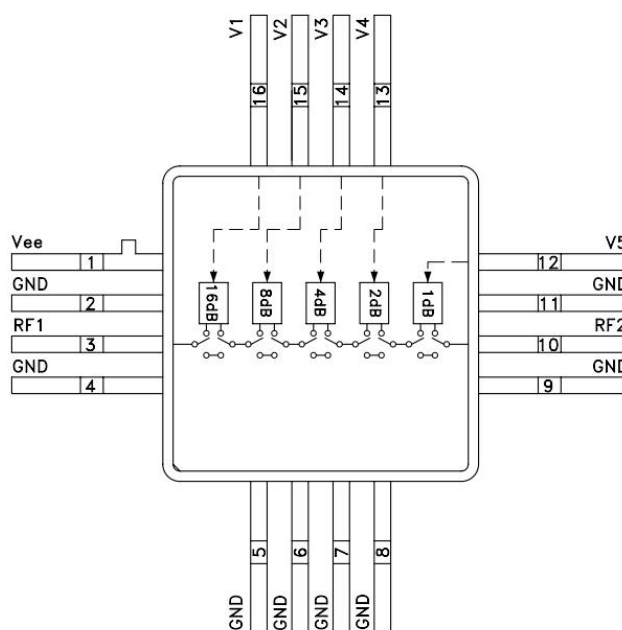


Рис. 3. Интегральный аттенюатор с цифровым управлением:
RF1 и RF2 – вход и выход аттенюатора, V1..V5 – управляющие сигналы,
Vee – питающее напряжение, GND – общая шина (земля)

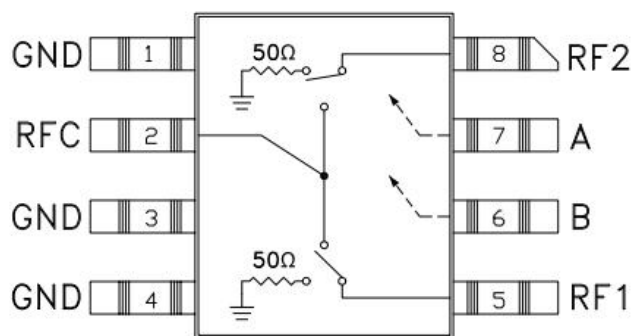


Рис. 4. Интегральный коммутатор с цифровым управлением:
 RFC – вход коммутатора, PF1 и PF2 – выход коммутатора,
 A и B – управляющие сигналы, V_{ee} – питающее напряжение,
 GND – общая шина (земля)

Очевидно, что функционирование данных изделий зависит не только от параметров входных и выходных сигналов, напряжений питания и токов потребления, но также существенное значение имеют управляющие шины и входы. Управляющим элементов к таким схемам чаще всего является ключ на полевом транзисторе (транзисторной сборке) или используется триггер, также часто встречаются встроенные регистры памяти и микропроцессоры. Естественно неправильное функционирование таких цифровых элементов или их отказ приводят к непредвиденному изменению режима работы ЭК СВЧ. В случае с аттенуатором таким эффектом будет кратковременное или постоянное переключение коэффициента ослабления, у коммутатора возникнет неправильная схема коммутации каналов, у делителей, умножителей это приведёт к изменению коэффициентов преобразования частоты и т. д. Таким образом, при испытаниях данных изделий на воздействие ИИ помимо контроля частотных характеристик важно контролировать режим работы цифровой части компонента, что позволит выявить отказ возникший в результате сбоя логических элементов цифровой части компонента. Для выявления такого отказа необходимо разрабатывать методическое обеспечение, соответствующую испытательную оснастку, и использовать специальное тестирующее оборудование. Выявить такой отказ достаточно сложно, так как он может быть кратковременным (одиночным), или может возникать в различные моменты времени в зависимости от поглощённой дозы и затем пропадать.

Таким образом, для достоверного определения радиационной стойкости компонента и точного определения момента отказа, важно выбрать соответствующий режим работы компонента близкий к режиму его реального функционирования, а также обеспечить необходимый контроль характеристик ЭК наиболее чувствительных к воздействию ИИ. Для компонентов, содержащих цифровые модули и блоки в своём составе, важно обеспечить контроль функционирования данных блоков, непосредственно кон-

тролируя цифровую часть компонента, если это представляется возможным или косвенным способом путём контроля функционирование СВЧ части и их сигналов.

Библиографический список

1. **Калинин Е. В.** Новая методика испытаний приборов СВЧ на радиационную стойкость / Е. Р. Милютин, Е. В. Калинин // Вестник связи. – 2013. – № 5. – С. 38–40.
2. **Документация производителя**, НМС335G16 [Электронный ресурс]. – С. 72. – Режим доступа: http://www.hittite.com/content/documents/data_sheet/-hmc335g16.pdf
3. **Документация производителя**, НМС234C8 [Электронный ресурс]. – С. 96. – Режим доступа: http://www.hittite.com/content/documents/data_sheet/-hmc234c8.pdf

References

1. **Kalinin E. V.** Novaja metodika ispytanij priborov SVCh na radiaci-onnuju stojkost' / E. R. Miljutin, E. V. Kalinin // Vestnik svjazi. – 2013. – № 5. – S. 38–40.
2. **Dokumentacija proizvoditelja**, НМС335G16 [Jelektronnyj resurs]. – С. 72. – Rezhim dostupa: http://www.hittite.com/content/documents/data_sheet/-hmc335g16.pdf
3. **Dokumentacija proizvoditelja**, НМС234C8 [Jelektronnyj resurs]. – С. 96. – Rezhim dostupa: http://www.hittite.com/content/documents/data_sheet/-hmc234c8.pdf

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 519.68

С. И. Штеренберг

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

S. I. Shterenberg

Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University
of Telecommunications

Л. А. Виткова

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

L. A. Vitkova

Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University
of Telecommunications

В. П. Просихин

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

V. P. Prosihin

Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University
of Telecommunications

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ АДАПТИВНОЙ САМОРАЗВИВАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ

METHOD OF APPLICATION IDEA
OF ADAPTIVE SELF-DEVELOPING SYSTEM

Рассматриваются проблемы защиты информации, содержащие проблему обеспечения безопасности систем информационных технологий, используемых в критических приложениях. Задача разработки технологии создания ИТ-систем с встроенными функциями информационной безопасности, моделей и методик построения адаптивной системы защиты информации, для которой характерно использование средств интеллектуального анализа данных, комплекса показателей защищенности системы ИТ, методики проведения анализа и интерактивных инструментальных средств для исследования и поддержки принятия решения о модификации адаптивной системы защиты информации. Выделяются системы нечеткой логики и нейронных сетей. Теория нечеткой логики связана с именем Л. Заде, который расширил возможности формальной математической логики для описания и обработки терминов естественного языка. Нейронная сеть позволяет применять достаточно простые алгоритмы обучения для автоматического внесения корректив в информационное поле нейронной сети.

The problems of the protection of information containing the problem of security of information technology systems used in critical applications - the task of developing the technology of IT systems with built-in information security, models and methods of construction of adaptive information security system, which is characterized by the use of data mining, a set of indicators of security IT systems analysis techniques and interactive tools for research and decision support modification of the adaptive system of information security. Distinguished system of fuzzy logic and neural networks. The theory of fuzzy logic associated with the name L. Zadeh, who

expanded the possibilities of formal mathematical logic for describing and processing natural language terms. Neural network allows the use of relatively simple learning algorithms to automatically make adjustments in the information field of the neural network.

экспертные системы, системы информационной безопасности, правила If-Then, нейронные сети.

expert systems, system of information security, If-Then rules, neural networks.

Проблема «Что такое компьютерный вирус?» Формальное определение этого понятия до сих пор не придумано, и есть серьезные сомнения, что оно вообще может быть дано. Многочисленные попытки дать «современное» определение вируса не привели к успеху. Чтобы почувствовать всю сложность проблемы, попробуйте, к примеру, дать определение понятия «редактор». Вы либо придумаете нечто очень общее, либо начнете перечислять все известные типы редакторов. И то и другое вряд ли можно считать приемлемым. Поэтому мы ограничимся рассмотрением некоторых свойств компьютерных вирусов, которые позволяют говорить о них как о некотором определенном классе программ.

Прежде всего, вирус – это программа. Такое простое утверждение само по себе способно развеять множество легенд о необыкновенных возможностях компьютерных вирусов. Вирус может перевернуть изображение на вашем мониторе, но не может перевернуть сам монитор. К легендам о вирусах-убийцах, «уничтожающих операторов посредством вывода на экран смертельной цветовой гаммы 25-м кадром» также не стоит относиться серьезно. К сожалению, некоторые авторитетные издания время от времени публикуют «самые свежие новости с компьютерных фронтов», которые при ближайшем рассмотрении оказываются следствием не вполне ясного понимания предмета.

Вирус – программа, обладающая способностью к самовоспроизведению. Такая способность является единственным средством, присущим всем типам вирусов. Но не только вирусы способны к самовоспроизведению. Любая операционная система и еще множество программ способны создавать собственные копии. Копии же вируса не только не обязаны полностью совпадать с оригиналом, но и могут вообще с ним не совпадать!

В зависимости от среды обитания вирусы можно разделить на сетевые, файловые, загрузочные и файлово-загрузочные. Сетевые вирусы распространяются по различным компьютерным сетям. Файловые вирусы внедряются главным образом в исполняемые модули, т. е. В файлы, имеющие расширения COM и EXE. Файловые вирусы могут внедряться и в другие типы файлов, но, как правило, записанные в таких файлах, они никогда не получают управление и, следовательно, теряют способность к размножению. Загрузочные вирусы внедряются в загрузочный сектор диска (Boot-сектор) или в сектор, содержащий программу загрузки системного

диска (Master Boot Record). Файлово-загрузочные вирусы заражают как файлы, так и загрузочные сектора дисков.

Именно технология вирусов использует самые сложные стеганографические алгоритмы. Именно при помощи сложного исполнимого кода вируса можно решить ряд задач связанных с обеспечением защиты информации.

Каждый хакер должен: сломать защиту, “вырастить” вирус и посадить его пользователям. Каждый антихакер должен: построить защиту, “убить” вирус и “посадить” хакера.

Актуальна проблема *эволюционного развития* систем информационной безопасности (СИБ). Наряду с традиционными средствами защиты корпоративных сетей, такими как: антивирусы, детекторы уязвимостей, межсетевые экраны и детекторы вторжений используются средства автоматизации защиты, включающие корреляторы событий, программы обновлений, средства аутентификации, авторизации и администрирования (authentication, authorization, administration – 3A) и системы управления рисками. Корреляторы событий предназначены для анализа системных журналов, операционных систем и приложений для выявления признаков нападения; программы обновления – автоматизации процедур установки исправлений для устранения выявленных уязвимостей (прежде всего, ошибок программного обеспечения) и поиска потенциальных уязвимостей ИТ-системы; средства 3A – управления идентификационной информацией и допуском пользователей к информационным ресурсам, а система управления рисками – моделирования и определения возможного ущерба от атаки на корпоративную сеть.

В основном публикации о применении интеллектуальных систем защиты информации посвящены системам обнаружения атак, в качестве интеллектуального инструмента в которых, как правило, используются системы нечеткой логики (НЛ) и основанные на правилах экспертные системы.

Схемы обнаружения атак разделяют на две категории:

1. Обнаружение злоупотреблений.
2. Обнаружение аномалий.

К первым относят атаки, которые используют известные уязвимости системы информационных технологий, а ко вторым – несвойственную пользователям системы информационных технологий деятельность. Для *обнаружения аномалий* выявляется деятельность, которая отличается от шаблонов, установленных для пользователей или групп пользователей. Обнаружение аномалий, как правило, связано с созданием базы знаний, которая содержит профили контролируемой деятельности, а *обнаружение злоупотреблений* — со сравнением деятельности пользователя с известными шаблонами поведения хакера и использует методы на основе правил, описывающих сценарии атак. Механизм обнаружения идентифицирует

потенциальные атаки в случае, если действия пользователя не совпадают с установленными правилами.

Известны применения интеллектуальных средств в информационных технологиях, основанных на принципе подобия реализуемых функций аналогичным защитным механизмам биологических систем. К популярным интеллектуальным средствам относят: основанные на правилах экспертных систем, системы вероятностных рассуждений, эволюционные методики и гибридные интеллектуальные системы.

Достоинство экспертных систем состоит в возможности описания опыта специалистов информационной безопасности в виде правил, т. е. в экспертных системах опыт специалистов представляется в доступной для анализа форме системы правил *If-Then* или дерева решений, а процесс логического вывода сходен с характером человеческих рассуждений.

Процесс описания последовательности рассуждений правилами *If-Then* реализован в цепочках прямых и обратных рассуждений. В первом случае, по аналогии с машинами, *управляемыми данными*, в основу положен принцип готовности данных: если для части *If* правила готовы все значения посылок, то правило активируется и формируется заключение, содержащееся в части *Then*. Достоинством подхода является потенциальная возможность распараллеливания поиска готовых правил по всей базе знаний экспертных систем, а недостатком – затраты вычислительных мощностей информационных технологий на обработку всех готовых правил без учета их необходимости для решения конкретной задачи.

Во втором случае, по аналогии с машинами, *управляемыми запросами*, вначале ограничивается зона поиска готовых к обработке правил *If-Then* путем распространения запросов, а затем, например, по принципу управления данными осуществляется обработка отобранного подмножества правил *If-Then*.

Основанная на системе правил экспертная система состоит из базы знаний – knowledge base, базы данных – database, механизма логического вывода – inference engine, средств объяснения результатов – explanation facilities и пользовательского интерфейса – user interface. Знания в экспертной системе организованы в виде иерархической системы правил вида:

Система логического вывода осуществляет подстановку значений из базы данных в поля посылок части *If* правил базы знаний и в случае заполнения полей всех посылок активируется готовые к обработке правила, формируя заключения в соответствии с частью *Then* правил. Результаты работы экспертной системы доступны пользователю через диалоговый интерфейс, который позволяет в случае необходимости ознакомиться также с ходом логических «рассуждений» системы, повлекших получение данного результата.

ЭС успешно применяют для обнаружения несанкционированных действий (несанкционированного доступа) в информационных технологиях.

Схемы обнаружения несанкционированного доступа разделяют на две категории: обнаружение злоупотреблений и обнаружение аномалий. К первым относят несанкционированного доступа, которые используют известные уязвимости компьютерной системы, а ко вторым – несвойственную пользователям информационных технологиях деятельность. Для обнаружения аномалий выявляется деятельность, которая отличается от шаблонов, установленных для пользователей или групп пользователей информационных технологий. Обнаружение аномалий, как правило, связано с созданием базы данных, которая содержит профили контролируемой деятельности, а обнаружение злоупотреблений – со сравнением деятельности пользователя с известными шаблонами поведения хакера и использует методы на основе правил, описывающих сценарии атак. Механизм обнаружения несанкционированного доступа идентифицирует потенциальные атаки в случае, если действия пользователя не совпадают с установленными правилами.

Большинство систем обнаружения злоупотреблений и аномалий основаны на модели, которая поддерживает набор профилей легальных пользователей, согласовывает записи подсистемы аудита с соответствующим профилем, обновляет профиль и сообщает об обнаруженных аномалиях. Поведение пользователя может быть представлено как модель на основе правил, в терминах прогнозируемых шаблонов или анализа изменения состояния, а для выявления факта атаки используют методы сопоставления с образцом.

Недостатком экспертных систем является трудоемкость формирования, и поддержания актуальной базы знаний в виде непротиворечивой системы правил логического вывода, основанной на личном опыте ряда экспертов. Кроме того, ориентированная на четкие достоверные данные иерархия правил экспертной системы не обладает гибкостью и элементами самоорганизации.

Более удобным для решения большинства задач защиты информации является интеллектуальный подход, допускающий использование в экспертных системах неполных и не вполне достоверных исходных данных, реализованный в системах недоверного управления и вероятностных рассуждений. Подобные системы позволяют оперировать с противоречивыми данными, полученными от разных экспертов, обрабатывать качественную информацию наряду с числовыми значениями. К наиболее известным подходам организации систем вероятностных рассуждений относят байесовские интеллектуальные технологии и факторы уверенности (certainty factors).

База знаний, представленная в виде системы правил *If-Then*, дополняется значениями условной вероятности наступления события H (гипотеза) при условии, что произошли события E , перечисленные в части If правила $If E \text{ is true Then } H \text{ is true too \{with probability } p\}$.

Вероятностные рассуждения по методу Байеса дают достоверные оценки ожидаемых событий, однако нуждаются в статистических сведениях в объеме, достаточном для расчетов значений условных вероятностей событий, фигурирующих в правилах базы знаний.

Как альтернативу рассуждениям по методу Байеса при отсутствии статистических данных, необходимых для расчетов значений условных вероятностей, успешно применяют факторы уверенности. Фактор уверенности $\{cf\}$ рассматривают как значение экспертной оценки, например в диапазоне $[-1, 1]$. Максимальное значение фактора уверенности, равное $+1$, соответствует истине, а минимальное, равное -1 , – ложному сообщению. Формируется шкала соответствия качественных понятий числовым значениям степени достоверности, согласно которой и производится оценка каждого из правил базы знаний.

If E is true Then H is true $\{cf\}$.

И рассуждения Байеса и метод факторов уверенности обладают общим недостатком, связанным с необходимостью привлечения специалистов высокой квалификации, способных достоверно определить качество значительного числа правил базы знаний экспертной системы, оперирующей с большим объемом разнородной и качественной информации.

Теория нечеткой логики связана с именем Л. Заде, который расширил возможности формальной математической логики для описания и обработки терминов естественного языка. Нечеткая логика оперирует качественными понятиями, описанными лингвистическими переменными, и позволяет применять аппарат математической логики для обработки высказываний, истинность которых представляется бесконечным множеством значений в диапазоне $[0, 1]$. Причем соответствие значений лингвистической переменной конкретному значению истинности задается нечетким множеством пар $\{x, \mu_x\}$, некоторой функции принадлежности. Известно большое число публикаций, связанных с использованием нечеткой логики и систем на ее основе для решения задач обеспечения информационной безопасности информационных технологий.

Вывод

Достоинство систем нечеткой логики заключается в том, что база знаний, например, уязвимостей компьютерной системы, сформированная из множества правил *If-Then*, сохраняя строгость процесса рассуждений (логического вывода), дает возможность описывать предметную область с применением качественных понятий и адаптировать базу знаний путем изменения в процессе обучения параметров функций принадлежности. Однако, подобное обучение является трудоемким процессом, автоматизировать который можно, представив базу знаний в виде топологии нейронной сети. Нейронная сеть позволяет применять достаточно простые алго-

ритмы обучения для автоматического внесения корректив в информационное поле нейронной сети.

Библиографический список

1. **Рябко Б. Я.** Идеальные стенографические системы / Б. Я. Рябко, А. Н. Фионов // Доклады ТУСУРа. – Июнь 2008. – Часть 1. – № 2 (18). – URL: <file:///C:/Users/shterenber.ZSS/Downloads/61-62.pdf>
2. **Слипенчук П. В.** Простое построение совершенных стегосистем на основе различных ошибок в помехоустойчивых кодах в модели трех каналов / П. В. Слипенчук // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 11. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/security/998.html>
3. **Красов А. В.,** Верещагин А. С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612237. Программа для внедрения цифровых водяных знаков в исполняемые и библиотечные файлы. Правообладатель: ФГОБУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича». Дата поступления 25 декабря 2012 г. Зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ 18 февраля 2013 г.
4. **Красов А. В.** Методы скрытого вложения информации в исполняемые файлы / А. В. Красов, А. С. Верещагин, В. С. Абагуров, М. В. Резник // СПб. : Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2012. – № 8. – С. 51–55.
5. **Красов А. В.** Аутентификация программного обеспечения при помощи вложения цифровых водяных знаков в исполняемый код / А. В. Красов, А. С. Верещагин, А. Ю. Цветков // Телекоммуникации. – Спецвыпуск 2013. – С. 27–30.

References

1. **Rjabko B. Ja.** Ideal'nye stenograficheskie sistemy / B. Ja. Rjabko, A. N. Fionov // Doklady TUSURa. – Ijun' 2008. – Chast' 1. – № 2 (18). – URL: <file:///C:/Users/shterenber.ZSS/Downloads/61-62.pdf>
2. **Slipenchuk P. V.** Prostoje postroenie sovershennyh stegosistem na osnove razlichnyh oshibok v pomehoustojchivyh kodah v modeli treh kanalov / P. V. Slipenchuk // Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii. – 2013. – Vyp. 11. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/security/998.html>
3. **Krasov A. V.,** Vereshhagin A. S. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2013612237. Programma dlja vnedrenija cifrovyh vodjanyh znakov v ispolnjaemye i bibliotechnye fajly. Pravoobladatel': FGOBU VPO «Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet telekommunikacij im. prof. M. A. Bonch-Bruevicha». Data postuplenija 25 dekabrja 2012 g. Zaregistrirovana v Reestre pro-gramm dlja JeVM 18 fevralja 2013 g.
4. **Krasov A. V.** Metody skrytogo vlozhenija informacii v ispolnjaemye fajly / A. V. Krasov, A. S. Vereshhagin, V. S. Abaturrov, M. V. Reznik // SPb. : Izvestija SPbGJeTU «LJeTI». – 2012. – № 8. – S. 51–55.
5. **Krasov A. V.** Autentifikacija programmnoo obespechenija pri pomoshhi vlozhenija cifrovyh vodjanyh znakov v ispolnjaemyj kod / A V. Krasov, A. S. Vereshhagin, A. Ju. Cvetkov // Telekommunikacii. – Specvypusk 2013. – S. 27–30.

Виткова Лидия Андреевна – студентка группы МБИ-22м Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», lidia@iskin.spb.ru

Штеренберг Станислав Игоревич – аспирант кафедры «Защищенные системы связи» Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», shterenberg.stanislaw@yandex.ru

Просихин Владимир Павлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Защищенные системы связи» Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»

УДК 519.68

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

V. A. Volostnych Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

С. И. Штеренберг Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

S. I. Shterenberg Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

Ю. В. Гвоздев Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Yu. V. Gvozdev Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЯХ

PROBLEMS OF SECURITY OF PERSONAL DATA
IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

Рассматриваются проблемы защиты информации, содержащей персональные данные работников и студентов высших учебных заведений. Проводится анализ требований к защите персональных данных граждан и основных направлений защиты персональных данных работников и студентов в высших учебных заведениях.

Может быть рекомендована как тема исследований, для магистров и аспирантов, обучающихся по теме, близкой к обеспечению информационной безопасности.

The problem investigated is the protection of personal data of higher schools employees and student. The requirements for citizens' personal data protection and the main directions of higher schools employees and student's personal data protection are analyzed.

It can be recommended as a topic of a research for graduate and post graduate students specializing on information security or related subjects.

персональные данные, обработка персональных данных, защита информации, высшие учебные заведения.

personal data, personal data processing, data protection, higher education institutions.

Проблема защиты персональных данных (ПД) всегда была актуальна. Защита личности и персональных данных личности определена статьями 23 и 24 Конституции Российской Федерации. В статье 23 говорится, что «...каждый имеет право на неприкосновенность частной жизни, личную и

семейную тайну...», а в статье 24 говорится, что «...сбор, хранение, использование и распространение информации о частной жизни лица без его согласия не допускается». Особую актуальность проблема обработки персональных данных приобрела с принятием в 2006 году Федерального закона «О персональных данных» [1]. Этот закон определил основные положения по обработке персональных данных и обеспечению их безопасности. Было очевидно, что трудностей на пути его реализации больше чем достаточно. Для определения процедур обработки персональных данных и обеспечения их безопасности был разработан и принят ряд нормативных документов. К ним относились Постановление Правительства Российской Федерации от 17.11.2007 № 781 «Об утверждении Положения об обеспечении безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных», Постановление Правительства от 15.09.2008 № 687 «Об утверждении Положения об особенностях обработки персональных данных, осуществляемой без использования средств автоматизации» [3]. Кроме того, четыре руководящих документа Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК) и два методических документа Федеральной службы безопасности (ФСБ). В 2008 году был опубликован совместный приказ ФСТЭК, ФСБ и Мининформсвязи № 55/86/20 «Об утверждении порядка проведения классификации информационных систем персональных данных, приказ ФСТЭК от 05.02.2010 № 58 «Об утверждении Положения о методах и способах защиты информации в информационных системах персональных данных» и др.

Однако практика их применения выявила ряд существенных недостатков в этих документах. В учреждениях и организациях накапливался опыт обработки персональных данных и законодательство «О персональных данных» претерпело ряд существенных изменений. Следует отметить, что сам закон «О персональных данных» редактировался 13 раз. Каждая последующая редакция влекла за собой переработку локальных актов операторов, обрабатывающих персональные данные. Данные о динамике изменений законодательства приведены в таблице.

ТАБЛИЦА. Данные о динамике изменений законодательства
«О персональных данных»

Законодательство	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Федеральные законы	2			2	4	2		3	2
Постановления Правительства		1	1				2		
Нормативные документы регуляторов *		6	1	1	1	1	2	1	

*Примечание. Регуляторами законодательства о персональных данных являются Роскомнадзор, ФСТЭК и ФСБ России.

Таким образом, очевидна первая проблема – динамично изменяющееся законодательство «О персональных данных» и необходимость его постоянного отслеживания и внесения соответствующих изменений в систему защиты. К настоящему времени, более половины перечисленных выше документов, утратило силу. Вместо них действуют утвержденные Постановлением Правительства от 01.11.2012 № 1119 [4] «Требования к защите персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных» и утвержденные приказом ФСТЭК от 18.02.2013 № 21 [5] «Рекомендации о составе и содержании организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных». Кроме того, введен в действие целый ряд ведомственных нормативных документов, перечислить которые в данной статье не представляется возможным.

Можно надеяться, что в дальнейшем изменений в законодательство будет вноситься все меньше и меньше, и требования к обработке персональных данных будут изменяться не столь существенно. Тем не менее, в каждой крупной организации должно быть назначено лицо, которое бы отслеживало изменения в Законодательстве и доводило эти изменения до исполнителей.

Следует пояснить некоторые термины из рассматриваемого законодательства. Что такое персональные данные и их обработка? В статье 3 [1] говорится, что **персональные данные** – любая информация, относящаяся к прямо или косвенно определенному или определяемому физическому лицу (субъекту персональных данных), а **обработка персональных данных** – любое действие или совокупность действий, совершаемых с использованием средства автоматизации или без использования таких средств с персональными данными, включая сбор, запись, систематизацию, накопление, хранение, уточнение, извлечение, использование, передачу, обезличивание, блокирование, удаление, уничтожение персональных данных. Эти термины являются ключевыми при создании системы обработки ПД и принятии мер по обеспечению их безопасности.

Особую остроту проблема организации обработки персональных данных приобретает для должностных лиц высших учебных заведений (вузов). Дело в том, что в вузе обрабатываются персональные данные разных категорий граждан. К одной категории можно отнести граждан – работников вуза (и лиц связанных с вузом договорными обязательствами), осуществляющих свою деятельность в соответствии с трудовым законодательством. Другая категория – граждане – учащиеся вуза, с которыми вуз связан Законодательством «Об образовании». Кроме того, в вузе обрабатываются персональные данные абитуриентов, родственников учащихся, посетителей вуза, с которыми учебное заведение не связано договорными отношениями. Численность субъектов персональных данных в вузе может составлять несколько тысяч.

Кто же обрабатывает персональные данные? Это, безусловно, работники кадровых органов, члены приемной комиссии, работники бухгалтерии, службы пропускного режима, а также руководители вуза, факультетов и кафедр. Анализ показывает, что число лиц, обрабатывающих ПД в типовом вузе может составлять несколько сотен работников...

Очевидно, что для обработки персональных данных, приведенных выше субъектов персональных данных, используются классические способы обработки информации на бумажных носителях и современные технологии, основанные на применении средств вычислительной техники. Таким образом, информационная система обработки персональных данных (ИСПДн) вуза является сложной системой, состоящей из широкого ряда разнородных подсистем. Следовательно, для обеспечения безопасности персональных данных необходим широкий набор методов и средств защиты информации. Под **защитой информации** будем понимать [2] принятие правовых, организационных и технических мер, направленных на обеспечение защиты информации от неправомерного доступа, уничтожения, модифицирования, блокирования, копирования, предоставления, распространения, а также от иных неправомерных действий. Законодательством [3] установлено, что методы и средства обеспечения безопасности персональных данных определяются на основе анализа угроз безопасности ПД. Под актуальными угрозами безопасности ПД понимается [4] совокупность условий и факторов, создающих актуальную опасность несанкционированного, в том числе случайного доступа к персональным данным при их обработке в информационной системе, результатом которого могут стать уничтожение, изменение, блокирование, копирование, предоставление, распространение персональных данных, а также иные неправомерные действия.

Угрозы безопасности ПД можно разделить на две основные категории. К первой категории относятся угрозы, связанные с «человеческим фактором», в свою очередь они подразделяются на действия умышленные и без умысла (по халатности). Ко второй категории относятся угрозы, связанные с применением для обработки ПД средств автоматизации.

Анализ угроз показал, что для высшего учебного заведения могут быть актуальны угрозы второго или третьего типа, которые определяют требования к защищенности ИСПДн. Установлено четыре уровня защищенности ИСПДн. Анализ требований [5] показал, что даже для реализации третьего уровня защищенности необходимо обеспечить режим безопасности помещений, в которых размещена ИСПДн, препятствующий несанкционированному проникновению других лиц, обеспечить сохранность носителей ПД, обеспечить лиц, обрабатывающих ПД нормативными документами по обработке ПД, использовать средства защиты, необходимые для нейтрализации актуальных угроз. Таким образом, следующей проблемой обеспечения безопасности ПД является необходимость тщательного

обследования всех ИСПДн вуза, определения актуальных угроз и обеспечения требуемой защищенности каждой ИСПДн.

В состав мер по обеспечению безопасности ПД могут входить: идентификация и аутентификация субъектов доступа и объектов доступа; управление доступом субъектов к ПД; защита машинных носителей ПД; регистрация событий безопасности; антивирусная защита; защита технических средств; защита информационной системы.

Для обеспечения третьего уровня защищенности необходимо применять сертифицированное средство защиты информации по классу не ниже, чем 1Г. Очевидно, что выбор средств защиты ИСПДн также, является сложной технической задачей.

Как показал анализ ИСПДн вуза, наибольшие сложности возникают при реализации перечисленных мер защиты ПД в информационной системе кадрового органа и бухгалтерии. Вызвано это тем, что зачастую применяется специализированное программное обеспечение 1С «бухгалтерия и кадры», не все версии которой сертифицированы ФСТЭК России. Также трудности в обеспечении защищенности ПД этой системы усугубляются необходимостью передачи данных из этой системы в системы других организаций (налоговую службу, пенсионный фонд и т. д.). Авторы пришли к выводу о необходимости применения межсетевых экранов четвертого класса защищенности для локализации угроз безопасности ИСПДн при подключении её к сети общего пользования типа интернет. Характерной для вузов особенностью обработки ПД является необходимость развертывания временной локально-вычислительной сети приемной комиссией с возможностью ее подключения к структурам Министерства образования.

В соответствии с законодательством об образовании в каждом вузе должен функционировать сайт. Очевидно, что этот сайт будет содержать персональные данные работников и учащихся вуза. Следовательно, должны быть разработаны и реализованы меры по их защите.

Нерешенной проблемой является процедура удаления или обезличивания ПД выпускников и не принятых в вуз абитуриентов. Задача уничтожения ПД на бумажных носителях решается путем сжигания. Процедура удаления ПД из автоматизированных систем в настоящее время регламентирована недостаточно и требует технического решения и правовой оценки [6].

Таким образом, налицо еще целый ряд проблем, связанных с реализацией технических и программных методов и средств защиты.

Одной из важных научно-практических задач при создании системы защиты, является оценка ее эффективности. Существует несколько подходов к оценке эффективности систем защиты информации. Один из них определяется выражением (1):

$$\mathcal{E} = Y_{\text{защ}} \geq Y_{\text{защ треб}} \quad (1)$$

где \mathcal{E} – эффективность системы защиты;

$Y_{\text{защ}}$ – уровень защищенности объекта;

$Y_{\text{защ треб}}$ – требуемый уровень защищенности объекта.

Но данный подход не отражает затраты на создание системы защиты, поэтому более приемлемым может быть подход, определяемый выражением (2):

$$\mathcal{E} = \frac{Y_{\text{защ}} \geq Y_{\text{защ треб}}}{S}, \quad (2)$$

где S – суммарные затраты на создание системы защиты.

Затраты на создание системы защиты могут включать следующее. Стоимость технических и программных средств защиты информации (лицензий), стоимость их установки и настройки. Затраты на разработку документов, бланков документов, в том числе стоимость бумаги и трудозатраты на их разработку. Обучение персонала как на специализированных курсах, так и на рабочих местах.

В ряде случаев вместо S целесообразно оперировать приведенным значением затрат \bar{S} , которое рассчитывается в соответствии с выражением (3):

$$\bar{S} = \frac{S}{t_{\text{экспл}}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{экспл}}$ – среднее время эксплуатации системы защиты.

Тогда эффективность системы защиты ИСПДн можно оценить в соответствии с выражением (4):

$$\mathcal{E} = \frac{Y_{\text{защ ИСПДн}} \geq Y_{\text{защ ИСПДн треб}}}{\bar{S}}, \quad (4)$$

Другая группа подходов заключается в оценке рисков и отображается выражением (5):

$$\mathcal{E} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (P_{ij} Y_{ij})}{\bar{S}}, \quad (5)$$

где P_{ij} – вероятность реализации j -й угрозы, i -му субъекту персональных данных;

Y_{ij} – величина ущерба, вызванная реализацией j -й угрозы i -му субъекту персональных данных;

n – количество субъектов персональных данных;

m – количество угроз персональным данным.

Этот подход сложный, недостаточно изучен, требует научной разработки в отношении ИСПДн организации.

Таким образом, из рассмотренных проблем можно сделать вывод что, обеспечение безопасности персональных данных в вузе это сложная организационная научно-техническая задача, которая может быть выбрана как направление в рамках диссертационных исследований аспирантской или магистерской подготовки. При сужении спектра исследований данное направление может быть разработано в рамках подготовки дипломных работ для бакалавров.

Очевидно, что эта тематика исследований – актуальна, а приобретение опыта в решении таких задач выпускниками Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича имеет прикладное значение.

Библиографический список

1. **Федеральный закон** от 27.07.2006 № 152-ФЗ «О персональных данных».
2. **Федеральный закон** от 27.07.2006 № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации».
3. **Постановление Правительства РФ** от 15.09.2008 № 687 «Об утверждении Положения об особенностях обработки персональных данных, осуществляемая без использования средств автоматизации».
4. **Постановление Правительства РФ** от 01.11.2012 № 1119 «Об утверждении требований к защите персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных».
5. **Приказ ФСТЭК** от 18.02.2013 № 21 «Об утверждении состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных».
6. **Приказ Роскомнадзора** от 5.09.2013 № 996 «Об утверждении требований и методов по обезличиванию персональных данных».
7. **Трудовой кодекс** Российской Федерации.

References

1. **Federal'nyj zakon** ot 27.07.2006 № 152-FZ «O personal'nyh dan-nyh».
2. **Federal'nyj zakon** ot 27.07.2006 № 149-FZ «Ob informacii, in-formacionnyh tehnologijah i o zashhite informacii».
3. **Postanovlenie Pravitel'stva RF** ot 15.09.2008 № 687 «Ob utverzhdanii Polozhenija ob osobennostjah obrabotki personal'nyh dannyh, osushhestvljaemaja bez ispol'zovanija sredstv avtomatizacii».
4. **Postanovlenie Pravitel'stva RF** ot 01.11.2012 № 1119 «Ob utverzhdanii trebovanij k zashhite personal'nyh dannyh pri ih obrabotke v informacionnyh sistemah personal'nyh dannyh».

5. **Prikaz FSTJeK** от 18.02.2013 № 21 «Ob utverzhdenii sostava i so-derzhanija organizacionnyh i tehniceskikh mer po obespecheniju bez-opasnosti personal'nyh dannyh pri ih obrabotke v informacion-nyh sistemah personal'nyh dannyh».
6. **Prikaz Roskommadzora** от 5.09.2013 № 996 «Ob utverzhdenii trebovanij i metodov po obezlicivaniju personal'nyh dannyh».
7. **Trudovoj kodeks** Rossijskoj Federacii.

Гвоздев Юрий Васильевич – старший преподаватель кафедры «Защищенные системы связи» Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», bar@sut.ru

Штеренберг Станислав Игоревич – аспирант кафедры «Защищенные системы связи» Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», shterenberg.stanislaw@yandex.ru