

НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СЕТЕЙ СВЯЗИ НА 2021–2024 ГОДЫ

**А. Е.Кучерявый, Р.В.Киричек, М.А.Маколкина, А.И.Парамонов,
Р.А.Дунайцев, , Р.Я.Пирмагомедов, А.С.Бородин, А.Г.Владыко,
А.С.А.Мутханна, А.И.Выборнова, С.С.Владимиров, И.В.Гришин.**

СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Адрес для переписки:

Аннотация. Рассмотрены основные направления научных исследований в области сетей связи на 2021– 2024 годы, а также видимые на сегодняшний день задачи, требующие решения для успешного внедрения новых сетевых технологий. Постановка задач основана на опыте исследований, проведенных авторами в последнее десятилетие.

Ключевые слова: сверхплотные сети, сети связи с ультра малыми задержками, граничные вычисления, искусственный интеллект, микросервисы, именованные данные, сети 6G, сети 2030, наносети, голографические копии, аватары, беспилотные средства, мульти контроллерные сети, выгрузка трафика

Информация о статье УДК 004.7:621.39

Язык статьи – русский. Поступила в редакцию 10.07.20, принята к печати .
.20.

Ссылка для цитирования: А. Е. Кучерявый, Р.В.Киричек, М.А.Маколкина, А.И.Парамонов, Р.А.Дунайцев, Р.Я.Пирмагомедов, А.С.Бородин, А.Г.Владыко, А.С.А.Мутханна, А.И.Выборнова, С.С.Владимиров, И.В.Гришин. Новые перспективы научных исследований в области сетей связи на 2017–2020 годы // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Том . № 3. С.

NOVEL PROSPECTS OF SCIENTIFIC RESEARCH IN THE FIELD OF TELECOMMUNICATIONS NETWORKS FOR THE 2021–2024 YEARS

A.Koucheryavy, R.Kirichek, M.Makolkina, A.Paramonov, R.Dunaytsev, R.Pirmagomedov, A.Borodin, A.Vladyko, A.Muthanna, A.Vybornova, S.Vladimirov, I.Grishin

SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation * Corresponding author:

Введение. Предлагаемая вниманию читателей статья основана на опыте научных исследований в области сетей связи во втором десятилетии 21 века, проведенных авторами на кафедре сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А.Бонч-Бруевича (СПбГУТ). Исследования были спланированы на основе статьи “Перспективы научных исследований в области сетей связи на 2017–2020 годы”, опубликованной в журнале “Информационные технологии и телекоммуникации” в №3 за 2016 год [1]. Мы и дальше решили планировать научную работу на кафедре в соответствии с исследовательскими периодами Сектора стандартизации телекоммуникаций Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т).

Основная цель статьи – определение перспективных научных исследований на 2021–2024 гг., что должно помочь аспирантам и магистрам в области сетей связи правильно выбрать тематику исследований, с пользой проведя время обучения в аспирантуре и магистратуре соответственно. В авторском коллективе 4 доктора технических наук, 2 кандидата наук, имеющие зарубежные степени PhD и 6 кандидатов технических наук, успешно работающих над докторскими диссертациями.

Анализ научных достижений кафедры за период 2017-2020 гг.

К началу нового исследовательского периода МСЭ-Т на рубеже второго и третьего десятилетия 21 века коллектив кафедры подходит со следующими достижениями:

- Разработана многоуровневая система облачных вычислений для услуг Тактильного Интернета [2,3], обеспечивающая значение круговой задержки в 1мс [4,5], что позволяет создавать сети с ультра малыми задержками [6,7,8] и является основой для дальнейшего развития систем граничных вычислений в сетях 2030 [9,10,11].
- Предложен переход от эволюционирующего пакетного ядра сети EPC (Evolved Packet Core), использовавшегося для построения сетей связи четвертого и пятого поколений, к ядру сети на базе технологии программно-конфигурируемых сетей SDN (Software-Defined Network) с централизованным контроллером (для сетей относительно небольшой емкости) и в мультиконтроллерном виде, что позволило не только уменьшить задержки в сети в целом, но и улучшить характеристики надежности и уменьшить потери пакетов при использовании мультиконтроллера, и может служить основой для создания в сетях 2030 мультиконтроллерных структур ядра сети [12,13].
- Для мультиконтроллерного ядра разработана методика оптимизации размещения контроллеров на сети и распределения коммутаторов SDN по контроллерам, отличающаяся тем, что для оптимизации используется алгоритм хаотического роя сальп, и доказано, что предложенный алгоритм обеспечивает наименьшую длительность вычислений по сравнению с известными алгоритмами: игровым ненулевой суммы и роевыми стаи серых волков и роя частиц [14,15,16,17].
- Разработана архитектура сети для Интернета Вещей [18,19,20] с использованием технологий туманных вычислений и блокчейна, обеспечивающая увеличение надежности сети, что является существенным шагом вперед в направлении достижения значения коэффициента готовности 0,999999 для сетей 2030 [21].
- Предложены решения по обеспечению новых требований по надежности в ячеистых сетях миллиметрового диапазона волн на основе искусственного

интеллекта, что также должно способствовать достижению в сетях 2030 значения коэффициента готовности величиной в 0,999999[22].

- Разработаны энергетически эффективный протокол и алгоритм выгрузки трафика с гарантированной задержкой для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), что должно способствовать разработке эффективных решений по беспилотным техническим средствам в сетях 2030 [23,24].

- Разработана методология представления трафика пользователя дополненной реальности, отличающаяся тем, что для представления трафика используются три взаимоувязанных модели: модель пространства обслуживания, модель области восприятия пользователя, представляющая собой часть пространства обслуживания, которую может воспринимать пользователь в конкретный момент времени, и модель поведения мобильного пользователя, характеризующая изменения его положения и области восприятия [25,26,27].

- Разработана модель поведения мобильного пользователя услуги дополненной реальности, перемещающегося в окружении устройств Интернета Вещей, отличающаяся от известных тем, что пользователь представлен как система массового обслуживания M/G/1, а входящий поток формируется при этом из K доступных пользователю услуг, включающих видео, текст, графику, речь, музыку, тактильные ощущения и т.п., что обеспечивает возможность расчета таких систем с использованием аппарата теории массового обслуживания [28,29,30,31].

- Разработан шлюз на основе БПЛА для беспроводных наносетей, распределенных на большой территории, что может быть использовано в качестве задела для сбора информации как с носимых и имплантируемых устройств, так и с устройств химического экспресс анализа, широкое применение которых планируется в сетях 2030 [32].

- Изучены характеристики процессов обслуживания трафика в сверхплотных сетях и разработаны новые подходы к маршрутизации в сетях связи и метод использования дополнительных маршрутизаторов в таких сетях [26,27].

- Изучены характеристики трафика в молекулярных наносетях и определены оценки нового вида трафика от устройств спектроскопического и химического экспресс анализа [28,29].

- Исследованы сетевые структуры систем V2X (Vehicle-to-Everything), позволяющие на базе сетей 5G и последующих поколений организовать взаимодействие между объектами дорожной инфраструктуры, беспилотными и высокоавтоматизированными транспортными средствами (ВАС), пешеходами и другими сетями. Для производительной работы в условиях плотного трафика транспортных средств в системе V2X использованы технология мобильных граничных вычислений MEC (Mobile Edge Computing) и алгоритм выгрузки трафика, позволяющий управлять нагрузкой данных на граничные и облачные серверы [39,40,41].

Отдельную научную и практическую ценность представляют результаты в области построения сетей связи в условиях внедрения услуг с ультра малыми задержками. Речь идет о децентрализации сетей связи и предпосылках к децентрализации экономики страны. Полученные в работах [33,34] результаты формируют новое представление об эффективном построении цифровой экономики и уже находят использование в трудах экономистов и философов [35,36,37].

Сверхнадежные сети с ультра малыми задержками.

Одним из ключевых направлений исследований на предстоящий период 2021-2024 годов являются исследования в области сверх высоконадежных сетей с ультра малыми задержками. Следуя работе одного из авторов [6], можно сказать, что в этом направлении исследований одними из основных задач будут являться задачи по созданию архитектурных решений по построению таких сетей, которые могут обеспечить значение коэффициента готовности величиной в 0,999999. Естественно, что с учетом планируемой доли трафика, которая будет замыкаться на сети доступа, а то и еще ниже –

на уровне взаимодействия D2D [9], следует тщательно изучить возможность выполнения требований по коэффициенту готовности для различных приложений будущих сетей.

Тактильный интернет.

Тактильный Интернет как родоначальник направления по созданию сетей связи с ультра малыми задержками по-прежнему будет привлекать пристальное внимание ученых кафедры. Передача по сетям связи тактильных ощущений является предметом теоретических и прикладных исследований уже около пяти лет [4, 5], однако в данной области еще остается множество перспективных направлений и открытых вопросов. Помимо прочего, приложения Тактильного Интернета (ТИ) являются одним из драйверов развития упомянутых ранее технологий создания сверхнадежных сетей с ультрамалыми задержками [6], так как в соответствии с имеющимся в настоящий момент научным консенсусом круговая задержка передачи тактильной информации не должна превышать 1 мс [4].

Кроме технологий обеспечения сверхмалых задержек при передаче данных по сетям связи, ТИ также интересен с точки зрения кодирования и декодирования тактильной информации. Тактильные и кинестетические рецепторы человека способны воспринимать несколько разных видов воздействия, каждый из которых отличается своими характеристиками и потенциально требует собственного подхода к кодированию для передачи по сетям связи [43].

В настоящий момент существует несколько подходов к созданию тактильного кодека: на основе аудиокодеков (так как в основе работы многих тактильных рецепторов лежит восприятие вибрации, аналогичной звуковым волнам), параметрический подход (по аналогии с вокодерами при передаче звука), а также гибридный подход, совмещающий в себе перечисленные [44]. Помимо этого, интересно также решение задачи синхронизации тактильных

данных со звуковой и видеоинформацией, так как данные типы информации имеют различные требования к параметрам передачи по сети связи.

Тактильное кодирование потребует применения мультиуровневых методов представления тактильных данных как сложносоставной задачи тактильного кодирования [43,45,46], включающей в себя собственно представление тактильных данных, их сжатие, а также алгоритмы обработки, в совокупности обеспечивающие суммарную задержку, не превышающую 1мс [4,5].

Разработка и исследование сигнально-кодовых [47] и пакетно-кодовых [48] конструкций тактильного кодирования необходимы для решения задач дистанционного управления [45,46] и найдут применение в дополненной и виртуальной реальности [25,27,30], Интернете Навыков [49] и при внедрении систем аватаров [9,38]. Перспективным направлением в задаче тактильного кодирования является также использование систем с предсказанием, которые позволяют компенсировать физический порог задержки, связанный с дальностью распространения сигналов [45].

Сетевое кодирование

Концепция сетевого кодирования как методики комбинированной передачи данных с целью сокращения числа передаваемых пакетов в сетях с многоадресной рассылкой [50,51] является одним из перспективных направлений исследований в рамках сетей с ультрамалыми задержками. Основным результатом от внедрения методов сетевого кодирования на сетях связи с ультрамалыми задержками видится сокращение объема передаваемого трафика, которое приведет к сокращению задержки передачи [50,52,53].

Среди наиболее перспективных применений сетевого кодирования следует отметить многоадресную передачу потокового трафика, в том числе одновременную передачу данных от нескольких источников,

многопользовательское взаимодействие с микросервисами и построение сетей сбора данных с D2D взаимодействием [53,54,55,56].

Для внедрения сетевого кодирования требуется разработать и исследовать совокупную систему специализированного стека протоколов передачи данных на основе совмещения пакетно-кодowych конструкций протоколов верхнего уровня, сигнально-кодowych конструкций нижнего уровня [52,53,57] и системы адресации и маршрутизации уровня сети [58,59].

Аватары.

Следуя работе одного из авторов статьи [9] можно утверждать, что одним из самых перспективных приложений является широкое использование и распространение аватаров для воспроизведения и осуществления действий человека, который ими управляет (телеприсутствие). В этом случае может потребоваться обеспечить задержку в сетях даже менее 1 мс.

Первоначально планировалось, что аватары найдут широкое применение в сетях 2030. Однако пандемия коронавируса скорректировала эти планы. Действительно, новые приложения для внедрения на период до 2030 года могли бы оказать существенное влияние на обеспечение лучшей эпидемиологической обстановки, например, при широком внедрении хотя бы в сфере медицинских услуг голографических копий врачей и пациентов, а также использование аватаров для оказания медицинской помощи [38].

Отметим, широкое распространение аватаров приведет к необходимости создания и исследования новых типов взаимодействий: Human-to-Avatar (H2A), Avatar-to-Human (A2H) и Avatar-to-Avatar (A2A).

Голографические копии.

Приложения дополненной реальности (ДР) позволяют пользователям быстро и наглядно получать информацию об окружающих их объектах, неважно данные это о маршрутах следования общественного транспорта или о цветах,

растущих на соседней клумбе [25, 26, 31]. Дальнейшее развитие ДР видится через создание голографических копий различных объектов. Это ставит новые задачи перед исследователями и разработчиками всего мира, не только в плане трехмерного отображения информации, но и формирования требований к сетям связи. В последнее время появляются технологии, позволяющие улучшить качество и расширить возможности голографических изображений, например, технология *Computer-generated holograms* (CGHs) [60,61]. Так, с помощью CGHs голограммы генерируются компьютером, что позволяет повысить качество и точность изображения, также можно их дублировать и, наконец, голографическая копия может быть создана как для объекта, существующего в реальном мире, так и для виртуального. Сегодня голографические изображения активно применяются для контроля и управления автомобильным и воздушным трафиком [62]. В частности, голографическая визуализация ландшафта при заходе на посадку позволяет пилотам видеть все возвышенности и особенности рельефа. Однако, и сеть связи должна будет обеспечивать терабитные скорости для передачи нескольких изображений голограммы уже на сети доступа. Принято считать, что для отображения голографического изображения размером 10x10 см потребуется локальная скорость передачи 30 Гбит/с при скорости видеопотока 30 кадров в секунду [63].

Повсеместное внедрение голографических копий будет зависеть от того, как сети связи смогут поддерживать высококачественную интерактивную передачу видеоголограмм в реальном времени. Для решения данной задачи требуется обеспечить высокую пропускную способность, корректировку информации в соответствии с задержкой для конкретного приложения, реализовать дифференциальную надежность, которая будет определять какие данные можно отбросить, а какие нет, найти компромисс между требованиями к вычислительным ресурсам, степени сжатия информации и качеством восприятия.

Большинство данных задач решается в рамках концепции сетей 2030, которая предполагает более тесную интеграцию между телекоммуникациями, информационными технологиями и человеческой жизнью, и определяет ключевые сценарии будущего сетей связи.

ManyNets и DTN.

В соответствии с [10] одной из отличительных особенностей 6G должна стать тесная интеграция наземной беспроводной и спутниковой связи. Традиционно в наземных сетях связи общего пользования используются протоколы семейства TCP/IP. Однако каналы спутниковой связи имеют ряд отличительных особенностей в виде высокой пропускной способности в сочетании со значительной задержкой, связанной с распространением сигнала (т.н. Long Fat Networks, LFNs), и большей вероятностью появления ошибочных битов, что делает использование протоколов, разработанных для наземных компьютерных сетей, недостаточно эффективным. Таким образом, возникает потребность в оптимизации стека TCP/IP, а также в разработке новых протоколов, что может быть решено в рамках технологии сетевого взаимодействия, устойчивого к большим задержкам и разрывам связи (Delay-Tolerant Networking, DTN). Для обеспечения эффективного взаимодействия разнородных сетевых технологий (ManyNets) и минимизации сетевой задержки в сетях 6G необходимо будет решить ряд задач по совместимости таких протоколов.

Сети именованных данных.

Традиционная интернет архитектура (IP), унаследованная от сетей телефонной связи, основана на идентификации устройств. Однако на сегодняшнем этапе развития интернет технологий услуги в большей степени ориентированы на поиск и доставку данных, при этом не важно, где они находятся. Данное обстоятельство требует переосмысления стека сетевых протоколов, используемых в сети Интернет. В ряде международных

организаций по стандартизации, ведется работа по исследованию и разработке новой интернет архитектуры, которая бы отвечала новым вызовам, стоящим перед сетями связи в горизонте 2030.

В этой связи особенную популярность приобрела концепция именованных данных (NDN, от англ. Named Data Networking), которая отводит главную роль не идентификации узлов сети, а идентификации непосредственно контента [64]. Если для IP необходимым является факт организации сеанса связи с устройством, на котором находятся данные, то в концепции NDN объектом маршрутизации являются непосредственно данные, обладающие уникальным именем, не связанным с устройством, на котором находится информация.

Это архитектурное изменение позволяет сетям NDN преодолеть значительное количество фундаментальных ограничений присущих IP сетям, в частности, как было показано в недавней работе сотрудников кафедры в значительной степени могут быть усовершенствованы характеристики работы беспроводных ячеистых сетей [65].

Интеллектуальные граничные вычисления

Интеллектуальные граничные вычисления представляют собой новое направление исследований в сетях связи пятого и последующих поколений. Граничные вычисления являются технологией, которая может обеспечить необходимое качество предоставления услуг в сверхплотных сетях и сетях связи с ультра малыми задержками. Естественно, что эта технология, как, впрочем, и все другие новые технологии сталкивается при реализации с целым рядом проблем. Часть из этих проблем можно объединить в класс задач по мониторингу и предиктивному управлению инфраструктурой. Решение данных сложных наукоемких задач возможно с использованием технологий искусственного интеллекта, таких как машинное обучение и глубокое обучение [66,67,68]. Для предиктивного управления

инфраструктурой с целью обеспечения необходимого уровня качества предоставления нового типа услуг необходимы новые алгоритмы не столько автоматизации, сколько интеллектуализации систем. Таким образом, роль систем искусственного интеллекта в сетях связи является в условиях внедрения сетей 5G и последующих поколений одной из основополагающих. На кафедре уже имеются решения по совместному использованию систем граничных облачных вычислений (MEC), сетей SDN/NFV и алгоритмов AI [69,70,71].

Vehicle-to-Network.

Интеллектуальные транспортные системы поддерживают несколько интерфейсов связи между устройствами сетевой инфраструктуры: взаимодействие между транспортными средствами V2V (Vehicle-to-Vehicle); взаимодействие между транспортными средствами и сетевой инфраструктурой V2I (Vehicle-to-Infrastructure); взаимодействие между транспортными средствами и облачными системами V2C (Vehicle-to-Cloud); взаимодействие между транспортными средствами и пешеходами V2P (Vehicle-to-Pedestrian). Такой набор взаимодействий позволяет давать сложный, но быстрый ответ на изменения состояния сети и местоположения всех ее узлов и позволяет выделить для перспективных исследований отдельный класс взаимодействий – V2N (Vehicle-to-Network), позволяющий осуществлять как широковещательную, так и одноадресную связь между транспортными средствами и системой управления V2X, а также сервером приложений V2X AS (Application Server).

Следуя работе авторов [41], где предложена модель Vehicular Edge Network для сетей V2X/5G, функционирующая на основе технологий MEC и SDN (Software-Defined Networking), можно утверждать, что в направлении V2N-исследований одними из приоритетных для сетей 5G будут являться задачи создания эффективных алгоритмов выгрузки, учитывающих минимизацию суммарных затрат ресурсов системы по задержке и энергопотреблению при

выгрузке вычислительных задач транспортных средств. Эти же задачи останутся актуальными и для сетей последующих за 5G поколений.

Кроме этого, в Vehicle-to-Network крайне остро стоит проблема обеспечения сетевой безопасности из-за специфики работы VANET и важности невмешательства третьих сторон в работу системы, что требует применения специальных механизмов обеспечения безопасности. В работе [42] авторы предлагают для решения обозначенных проблем применение blockchain-технологии, которая позволит проводить исследования новых форм распределенных сетевых архитектур, где узлы смогут находить соглашения об их общих состояниях для децентрализованного и транзакционного обмена данными через V2N ненадежных участников, не полагаясь на центральный узел, которому должен доверять каждый компонент в системе. С учетом отмеченных выше результатов авторов из [21], данное направление заслуживает внимание для исследователей на ближайшую среднесрочную перспективу.

Беспилотные автомобили

Отдельный раздел в статье было решено посвятить беспилотным автомобилям, где с точки зрения сети существенно больше нерешенных вопросов, чем достижений.

Одной из новых технологий, которая должна получить широкое распространение при внедрении сетей 2030, являются беспилотные транспортные средства [72, 73]. Алгоритмы и сценарии каждый день развиваются и совершенствуются, однако беспилотным автомобилям рано выходить на дороги общего пользования. Работа алгоритмов распознавания объектов и согласования с фактическими моделями окружающего мира (городская среда, дорога и тому подобное) далека от идеала. Для правильной и синхронизированной работы всех элементов беспилотного автомобиля человеку необходимо передать весь свой интеллектуальный опыт вычислительным системам автомобиля. Разработчики работают над тем,

чтобы автомобиль мог видеть и понимать, что происходит вокруг него и «впереди», где его системы мониторинга окружающей обстановки (датчики, лидары, радары) «не видят». Однако, стоит отметить, что такие автомобили уже ездят по дорогам в тестовом режиме с пилотом, получают огромное количество информации и учатся. Уже сейчас, тестами и испытаниями было доказано, что беспилотные автомобили действительно безопаснее транспорта, управляемого людьми и после массового внедрения смертность на дорогах будет снижена в несколько раз и возможно, приближена к нулевым значениям.

Формируемые данные должны передаваться практически мгновенно между транспортом и вычислительной инфраструктурой (1мс круговой задержки) и с высокой скоростью между другими транспортными средствами. Для этого требуется введение нового высокоскоростного стандарта 5G, продвинутой дорожно-транспортной и телекоммуникационной инфраструктуры.

Наносети.

К 2030 году различные применения наносетей и нановещей [75,76] должны будут найти широкое применение в сетях связи. Нановещи многократно увеличат плотность сетей. Прогресс в области спектроскопии уже привел к тому, что доступными стали инфракрасные микро-спектрометры, которые уже могут быть встроены в смартфоны. Поэтому каждому пользователю сети 2030 ежедневно будет доступен анализ продуктов и других предметов, представляющих интерес, для оперативного подтверждения качества. Эта возможность обеспечивается получением спектрограммы и быстрым анализом в соответствующем облаке. Можно утверждать, что такие услуги будут широко использоваться и создадут новый значительный трафик на сети связи [77].

Использование инфракрасных спектрометров делает возможным применение феромонов для приема информации, о чем теоретически говорилось в работах [76,78]. Для передачи информации уже используются

синтезированные феромоны, а прием до сих пор мог осуществляться только особями живого мира. В работе [79] было предложено использовать феромоны для взаимодействия “От сердца к сердцу” He2He (Heart-toHeart), что в сетях 2030 уже не выглядит с точки зрения сетей связи нереализуемой возможностью. В настоящее время на кафедре создан стенд для исследований в области наносетей, подробная информация о котором представлена в [80].

Виртуализация рабочей среды.

Актуальность данного направления стала особенно заметна в период пандемии коронавируса, а именно при организации удаленной работы в различных областях деятельности [38]. Виртуализация рабочей среды предполагает создание независимой от местоположения пользователей рабочей среды, необходимой для выполнения всех операций, необходимых для обеспечения деятельности предприятий и организаций. Это направление включает в себя исследование методов построения такой среды для большого количества пользователей, определение показателей качества данной услуги и методов оценки объема необходимых ресурсов.

Современные технологии уже позволяют решать данную задачу, однако, показатели качества данной услуги, не всегда отвечают требованиям пользователей, также необходима разработка методов организации, позволяющих повысить эффективность использования сетевых ресурсов.

Выводы.

1. Опыт планирования научных исследований в соответствии с исследовательскими периодами МСЭ-Т полностью себя оправдал. Нацеленность на исследования в области новых технологий позволила добиться превосходных научных результатов:

- защищены две докторские и более 10 кандидатских диссертаций,
- число публикаций и цитирований в базах данных WoS и SCOPUS возросло на порядок, существенное число работ опубликовано в изданиях кварталей Q1 и Q2.

2. На ближайшую перспективу до 2021–2024 гг. основными направлениями научно-исследовательской деятельности в области сетей связи будут являться сверхплотные сети, сети связи с ультра малыми задержками, граничные вычисления, искусственный интеллект, микросервисы, большие данные, именованные данные, сети 6G, сети 2030, наносети, голографические копии, аватары, сети для беспилотных систем и ВАТС, мульти контроллерные сети.

Список литературы.

1. А.Е.Кучерявый, А.Г.Владыко, Р.В.Киричек, М.А.Маколкина, А.И.Выборнова, Р.Я.Пирмагомедов. Перспективы научных исследований в области сетей связи на 2017–2020 годы, Информационные технологии и телекоммуникации”, №3 2016 год, с.1-14.
2. Ateya, A.A. Multilevel cloud based Tactile Internet system / Ateya, A.A.; Vybornova, A.; Kirichek, R.; Koucheryavy, A. // In Proceedings of the 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Bongryeong, Korea, pp. 105–110, 19–22 February 2017.
3. Атея, А.А. Многоуровневая облачная архитектура для услуг Тактильного Интернета / А.А. Атея, А.И. Выборнова, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2017. – № 2. – С. 26-30.
4. Кучерявый, А.Е. Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками / А.Е. Кучерявый, М.А. Маколкина, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2016. – № 1. – С. 44-46.

5. Кучерявый А.Е., Тактильный Интернет / Кучерявый А.Е., Выборнова А.И. // Сборник научных статей V международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» АПИНО-2016. Том 1. С. 6-11.
6. А.Е.Кучерявый. Сети связи с ультра малыми задержками. Труды НИИР, 2020.
7. Z.Li, M.Uusitalo, H.Shariatmadari, B.Singh. 5G URLLC: Design Challenges and System Concepts. 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), October 8-9. Tokio, Japan, 2018, 6p.
8. P.Popovski and all. Wireless Access for Ultra-Reliable Low Latency Communications. IEEE Network, v.32, issue 2. March-April 2018, pp. 16-23.
9. Кучерявый А.Е. Сети связи 2030 / А.Е.Кучерявый, А.С.Бородин, Р.В.Киричек // Электросвязь. – 2018. - №11. – С.52-56.
10. Yastrebova A., Kirichek R., Koucheryavy Y., Borodin A., Koucheryavy A. Future Networks 2030: Architecture and Requirements. The 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT), November 2018, Moscow. Proceedings, 2018.
11. Li, R. Network 2030: Market Drivers and Prospects. First ITU Workshop on Network 2030. New York City, US, October 2, 2018. <https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/201810/Pages/Programme.aspx>
12. Ateya A., Muthanna A., Gudkova I., Abuarqoub A., Vybornova A., Koucheryavy A. Development of intelligent core network for Tactile Internet and future smart systems // Journal of Sensor and Actuator Networks. - 2018. - V. 7. - № 1. - Pp. 1.
13. Атея, А.А. Интеллектуальное ядро для сетей связи 5G и тактильного интернета на базе программно-конфигурируемых сетей / А.А. Атея, А.С. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2019. № 3. С. 34-40.

14. Abdelhamied A. Ateya, Ammar Muthanna, Anastasia Vybornova, Abeer D. Algarni, Abdelrahman Abuarqoub, Y. Koucheryavy, Andrey Koucheryavy. Chaotic Salp Swarm Algorithm for SDN Multi-controller Networks. Engineering Science and Technology, an International Journal. - 2019. – 22.
15. Bratton, D. Defining a standard for particle swarm optimization / Bratton, D. and Kennedy, J. // In Proc. Swarm Intelligence Symposium, SIS 2007, IEEE, 2007, pp. 120–127.
16. Faris, H. Grey wolf optimizer: a review of recent variants and applications / Faris, H.; Aljarah, I.; Al-Betar, M. A. and Mirjalili, S. // Neural Computing and Applications, pp. 1–23, 2017.
17. Rath, H. K. Optimal controller placement in Software Defined Networks (SDN) using a non-zero-sum game / Rath, H. K.; Revoori, V.; Nadaf, S. M. and Simha, A. // In Proc. IEEE 15th International Symposium on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), IEEE, Jun. 2014, pp. 1–6.
18. Кучерявый А.Е, Прокопьев А.В., Кучерявый Е.А. Самоорганизующиеся сети // СПб, “Любавич”, 2011.
19. А.Е.Кучерявый. Интернет Вещей. Электросвязь, №1, 2013, с.21-24.
20. Kirichek R. Model networks for internet of things and SDN / Kirichek R., Vladyko A., Zakharov M., Koucheryavy A. // 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2016, pp. 76-79.
21. Muthanna A., Ateya A.A., Khakimov A., Gudkova I., Abuarqoub A., Samouylov K., Koucheryavy A. Secure and reliable IoT networks using fog computing with software-defined networking and blockchain // Journal of Sensor and Actuator Networks. 2019. T. 8. № 1. С. 15.
22. Pirmagomedov, R., et al. Facilitating mmWave Mesh Reliability in PPDR Scenarios Utilizing Artificial Intelligence. IEEE Access, vol. 7.
23. Ateya A.A., Muthanna A., Gudkova I., Gaidamaka Yu., Algarni A.D. Latency and energy-efficient multi-hop routing protocol for unmanned aerial

- vehicle networks // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2019. T. 15. № 8
24. Abdelhamied A. Ashraf Ateya, Ammar Muthanna, Ruslan Kirichek, Mohammad Hammoudeh, Andrey Koucheryavy. Energy- and Latency-Aware Hybrid Offloading Algorithm for UAVs // IEEE Access. - 2019. - 7.
25. Маколкина, М.А. Развитие услуг дополненной реальности в рамках концепции тактильного интернета / М.А. Маколкина // Электросвязь. - 2017. - № 2. - С. 36-40.
26. Маколкина, М.А. Распределение ресурсов при предоставлении услуги дополненной реальности / М.А. Маколкина, А.И. Парамонов, А.А. Гоголь, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. - 2018. - № 8. - С. 23-30.
27. Makolkina, M. Resource Allocation for the Provision of Augmented Reality Service / A. Koucheryavy, M. Makolkina, A. Paramonov // Lecture Notes in Computer Science. – 2018. – V. 11118. - С. 441-455.
28. Маколкина, М.А. Моделирование движения пользователя услуги дополненной реальности / М.А. Маколкина, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. - 2019. - № 4. - С. 32-40.
29. Маколкина, М.А. Исследование модели движения пользователя и моделей трафика для приложений дополненной реальности / М.А. Маколкина // Электросвязь. - 2019. - № 8. - С. 13-22.
30. Makolkina, M. The models of moving users and IoT devices density investigation for augmented reality applications // M. Makolkina, A. Koucheryavy, A. Paramonov // Lecture Notes in Computer Science. - 2017. - T. 10531. - С. 671-682.
31. Makolkina, M. Interaction of AR and IoT applications on the basis of hierarchical cloud services / M. Makolkina, Van Dai Ph., R. Kirichek, A. Gogol, A. Koucheryavy // В сборнике: Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems 18th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking (NEW2AN), and 11th Conference on Internet of Things and Smart Spaces (ruSMART). - 2018. - С. 547-559.

32. Rustam Pirmagomedov, Ruslan Kirichek, Mikhail Blinnikov, Andrey Koucheryavy. UAV-based gateways for wireless nanosensor networks deployed over large areas // Computer Communications. - 2019. - 146.
33. Бородин А.С. Маршрутизация трафика в сети беспроводной связи, построенной на базе D2D-технологий / Бородин А.С., Парамонов А.И. // Электросвязь, №2, 2019, с. 38-44.
34. Бородин А.С. Метод построения сети связи на базе D2D-технологий с использованием дополнительных маршрутизаторов / А.С.Бородин, А.Е.Кучерявый, А.И.Парамонов // Электросвязь, №4, 2019, с.86-92.
35. Блануца В. И. Цифровое агломерирование городских поселений Сибири по сверхмалым задержкам в сетях электросвязи // Географический вестник. 2019. № 1 (48). С. 5–14.
36. Блануца В. И. Территориальная структура цифровой экономики России: предварительная делимитация “умных” городских агломераций и регионов // Пространственная экономика. 2018. № 2. С. 17–35.
37. Борцов Ю.С. Социокультурные контуры четвертой промышленной революции. Ростов-на Дону, Фонд науки и образования, 2017, 220с.
38. Бородин А.С., Кучерявый А.Е. Сети связи и пандемия. Электросвязь, №5, 2020. С. 8-10.
39. Ярцев С.В., Кучерявый Е.А., Владыко А.Г. Исследование структуры потоков широковещательного трафика в сетях VANET // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11. № 3. С. 7-19.
40. Vladyko A., Khakimov A., Muthanna A., Ateya A.A., Koucheryavy, A. Distributed Edge Computing to Assist Ultra-Low-Latency VANET Applications // Future Internet, 2019, vol. 11, iss. 6, pp. 128.

41. Владыко А.Г., Мутханна А.С., Кучерявый А.Е. Метод выгрузки трафика в V2X/5G сетях на основе системы граничных вычислений // Электросвязь. 2020. № 8. С. 64-70.
42. Elagin V., Spirkina A., Buinevich M., Vladyko A. Technological Aspects of Blockchain Application for Vehicle-to-Network // Preprints, 2020.
43. Выборнова А.И., Обзор подходов к созданию кодеков тактильной информации / Выборнова А.И. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2019. Т. 7. № 1. С. 31-40.
44. Сапунова Е.С., Анализ трафика параметрического кодека тактильной обратной связи / Сапунова Е.С., Леонтьев С.С., Выборнова А.И. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8. № 2. С. 67-76.
45. Владимиров С.С., Кучерявый А.Е. Механизм компенсации задержек для приложений тактильного интернета // Электросвязь. 2018. № 3. С. 62-67.
46. Владимиров С.С., Владимиров С.А. Nartic-кодек в структуре тактильного интернета // Информация и космос. 2018. № 2. С. 30-36.
47. Владимиров С.С. Передача данных в тактильном интернете // Электросвязь. 2018. № 5. С. 44-48.
48. Владимиров С.А., Владимиров С.С. Обобщенная модель сигнального процесса Nartic-кодека на базе быстросходимых полиномов // Информация и космос. 2018. № 4. С. 20-24.
49. Кучерявый А.Е., Кучерявый Е.А., Киричек Р.В., Бородин А.С., Маколкина М.А., Выборнова А.И., Фам В.Д., Ястребова А.А. Интернет навыков // Электросвязь. 2018. № 1. С. 29-32.
50. Fragouli C., Soljanin E. Network Coding Fundamentals // Foundations and Trends in Networking. 2007. Vol.2. No.1. P. 1–133. DOI: 10.1561/13000000003.

51. Габидулин Э.М., Пилипчук Н.И., Колыбельников А.И., Уривский А.В., Владимиров С.М., Григорьев А.А. Сетевое кодирование // Труды МФТИ. 2009. Том 1. № 2. С. 3–28.
52. Владимиров С.С. Коды Голда и коды максимальной длины в сетевом кодировании // Электросвязь. 2020. № 1. С. 61-66.
53. Владимиров С.С. 8-разрядные коды с прямой коррекцией ошибок в линейном сетевом кодировании // Электросвязь. 2020. № 7. С. 51-58.
54. Halloush R., Liu H., Dong L., Wu M., Radha H. Hop-by-hop Content Distribution with Network Coding in Multihop Wireless Networks // Digital Communications and Networks. 2017. Vol. 3. Iss. 1. P. 47–54.
55. Кайсина И.А., Васильев Д.С., Абилов А.В. Сетевое кодирование в сетях FANET // Электросвязь. 2018. № 1. С. 64-68.
56. Amanowicz M., Krygier J. On Applicability of Network Coding Technique for 6LoWPAN-based Sensor Networks // Sensors. 2018. Vol. 18(6). P. 1–20. DOI:10.3390/s18061718.
57. Габидулин Э.М., Пилипчук Н.И. Ранговые подкоды в многокомпонентном сетевом кодировании // Проблемы передачи информации. 2013. Том 49, вып. 1. С. 46–60.
58. Migabo M.E., Djouani K., Olwal T.O., Kurien A.M. A Survey on Energy Efficient Network Coding for Multi-hop Routing in Wireless Sensor Networks // Procedia Computer Science. 2016. Vol. 94. P. 288–294.
59. Кайсина И.А., Васильев Д.С., Абилов А.В., Мейтис Д.С., Кайсин А.Е. Применение метода сетевого кодирования в сетях БПЛА // Выставка инноваций - 2018 (осенняя сессия). Сборник материалов XXVI Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов. 2018. С. 35-40.
60. Li, G. «Holographic display for see-through augmented reality using mirror-lens holographic optical element» / G. Li, D. Lee, Y. Jeong, J. Cho, and B. Lee // Opt. Lett. – 2016. – V. 41. – Pp. 2486–2489.

61. Park, J. «Optical see-through holographic near-eye-display with eyebox steering and depth of field control» / J. Park, S. Kim // Optical Express. – 2018. – N. 26. – Pp. 27076–27088.
62. Zehao, He. «Progress in virtual reality and augmented reality based on holographic display» / Zehao He, Xiaomeng Sui, Guofan Jin, Liangai Cao // Applied Optics. – 2019. - Vol. 58. - No. 5. – Pp. 74-81.
63. ITU-T. «Towards a New Internet for the Year 2030 and Beyond» ITU-T, FG-NET-2030.https://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2017-2020/13/Documents/Internet_2030%20.pdf
64. Zhang L. et al. Named data networking //ACM SIGCOMM Computer Communication Review. – 2014. – Т. 44. – №. 3. – С. 66-73.
65. Блинников М. А., Пирмагомедов Р. Я., Молчанов Д. А., Кучерявый Е. А. (2019). Применение технологий именованных данных в беспроводных ячеистых сетях. Электросвязь, №11, 2019. С. 22-28.
66. Абделлах А.Р., Мутханна А., Кучерявый А.Е. Применение робастных М-оценок для машинного обучения в сетях VANET. Электросвязь, №5, 2020, с.41-46.
67. Abdellah A., Koucheryavy A. Survey on Artificial Intelligence Techniques in 5G Networks. Информационные технологии и телекоммуникации, т.8, №1, 2020, с.1-10.
68. Абделлах А.Р., Кучерявый А.Е. Исследование методов прогнозирования трафика в сетях 5G на основе глубокого обучения. СПбНТОРЭС, Труды ежегодной НТК, №1 (75), 2020, с.155-156.
69. Khayyat, M., Elgendy, I. A., Muthanna, A., Alshahrani, A., Alharbi, S., & Koucheryavy, A. (2020). Advanced Deep Learning-based Computational Offloading for Multilevel Vehicular Edge-Cloud Computing Networks. IEEE Access, 1–1. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3011705>
70. Volkov, A., Ateya, A. A., Muthanna, A., Koucheryavy, A. (2019). Novel AI-Based Scheme for Traffic Detection and Recognition in 5G Based Networks. In Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture

Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) (Vol. 11660 LNCS, pp. 243{255). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-30859-921>.

71. Volkov, A., Proshutinskiy, K., Adam, A. B. M., Ateya, A. A., Muthanna, A., Koucheryavy, A. (2019). SDN Load Prediction Algorithm Based on Artificial Intelligence. In Communications in Computer and Information Science (Vol. 1141 CCIS, pp. 27(40). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-36625-43>.

72. Khayyat M., Alshahrani A., Alharbi S., Elgendy I., Paramonov A., Koucheryavy A. Multilevel service-provisioning-based autonomous vehicle applications Sustainability. 2020. Т. 12. № 6. С. 2497.

73. Мутханна А.С. Интеллектуальная распределенная архитектура сети связи для поддержки беспилотных автомобилей. Электросвязь. 2020. № 7. С. 29-34.

74. Кашкаров Д.В., Кучерявый А.Е. Анализ приложений и перспектив развития технологий граничных вычислений с множественным доступом в сетях связи // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Том 8. No 1. С. 28–33. DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-1-28-33.

75. Akyildiz Y.F., Jornet J.M. Internet of Nano-Things. IEEE Wireless Communications. December 2010, v.17, №6, pp.58-63.

76. Кучерявый А.Е. Введение в наносети. 66-я научная конференция, посвященная Дню Радио. Труды конференции, 2011, с.186-187.

77. Захаров М.В., Кучерявый А.Е., Киричек Р.В. Молекулярные наносети. Сбор информации из наномира. Электросвязь, №10, 2018.

78. Akyildiz Y.F. at all. Nanonetworks: A New Communication Paradigm. Computer Networks, Elsevier, 2008.

79. Koucheryavy A. From Ubiquitous Sensor Network (USN) to Heart to Heart (He2He) Communications. Kaleidoscope 2014. ITU-T. <https://www.itu.int/en/ITU-T/academia/kaleidoscope/2014/Pages/programme.aspx>.

80. Zakharov M., Muthanna A., Kirichek R., Koucheryavy A. Real-Time Molecular Analysis Methods based on Cloud Computing/ International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT'22, 22nd International Conference on Advanced Communications Technology: Digital Security Global Agenda for Safe Society, ICACT 2020 - Proceeding. 2020. C. 620-623.