

УДК 621.391

СИСТЕМЫ СВЯЗИ 6G: КОНЦЕПЦИЯ, ТРЕНДЫ, ТЕХНОЛОГИИ ФИЗИЧЕСКОГО УРОВНЯ

© 2024 г. Д. А. Покаместов*, Я. В. Крюков, Р. Р. Абенов, Е. В. Рогожников, А. А. Бровкин, А. С. Шинкевич, Г. Н. Шалин

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
просп. Ленина, 40, Томск, 634050 Российская Федерация

*E-mail: dmaltomsk@mail.ru

Поступила в редакцию 01.03.2023 г.

После доработки 14.04.2023 г.

Принята к публикации 17.05.2023 г.

Представлен обзор и анализ вышедших к настоящему моменту научных работ, посвященных различным аспектам 6G. Акцент сделан на технологиях физического уровня, поскольку именно они в большей степени заложены в основу и определяют потенциал будущей системы. К ним относятся множественный доступ, многопользовательские многоантенные системы, реконфигурируемые отражающие поверхности, а также методы модуляции и канального кодирования. Кроме того, рассмотрены перспективные сценарии применения, новые сервисы и услуги, прогнозируемые требования, концепции сетевой архитектуры 6G, роль искусственного интеллекта и машинного обучения, а также новые частотные диапазоны.

Ключевые слова: множественный доступ, многопользовательские многоантенные системы, реконфигурируемые отражающие поверхности, методы модуляции и канального кодирования

DOI: 10.31857/S0033849424010016, EDN: LAWAWQ

СПИСОК ПРИНЯТЫХ В ОБЗОРЕ СОКРАЩЕНИЙ

БС – базовая станция

ДН – диаграмма направленности

ИИ – искусственный интеллект

МО – машинное обучение

МП – метаповерхности

МСЭ – Международный союз электросвязи

AP – access point

CD-NOMA – code domain-NOMA

CF – cell-free

CU – central unit

DMA – dynamic metasurface antenna

DU – distributed unit

eMBB – enhanced mobile broadband

HBF – holographic beamforming

IoT – internet of things

IoE – internet of everything

LDPC – low density parity-check

Li-Fi – light fidelity

LTE – long term evolution

LS-D-MIMO – large-scale distributed mimo

mMTC – massive machine-type communications

mMIMO – massive MIMO

MIMO_T – multiple input multiple output

NOMA – non-orthogonal multiple access

NR – new radio

OCC – optical camera communication

PD-NOMA – power domain-NOMA

QoS – quality of service

RAN – radio access network

RIS – reconfigurable intelligent surface

RSMA – rate splitting multiple access

SCMA – sparse code multiple access

SDN – software-defined networking

SIC – successive interference cancellation

umMIMO – ultra massive MIMO

URLLC – ultra-reliable low latency communication

VLC – visible light communication

XR – extended reality

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как правило, новое поколение мобильных систем связи появляется примерно раз в десятилетие. Запуск первой в мире коммерческой сети предыдущего, четвертого, поколения 4G LTE (Long Term Evolution) датируется 2009 г. Развертывание коммерческих сетей пятого поколения, 5G NR (New Radio), началось в 2019 г. и продолжается по сей день. Исследовательские работы по тематике 5G NR со стороны Международного союза электросвязи (МСЭ) в рамках проекта IMT-2020 (International Mobile Telecommunications) начались еще в 2013 г., а технические требования к ним были приняты в 2017 г. [1]. Параллельно с этим в работу по формированию технического облика будущих сетей включился мировой консорциум 3GPP (Generation Partnership Project). В 2016 г. началась разработка пятой версии, 5G NR, и уже в 2017 появились первые спецификации [2]. К настоящему моменту работы продолжаются в рамках 18-й и 19-й версий спецификаций.

В подавляющем большинстве случаев сети 5G NR удовлетворяют сегодняшним потребностям пользователей. Однако технологии непрерывно развиваются, появляются новые услуги и сервисы, а объем передаваемого трафика год от года экспоненциально растет. Крупные корпорации и множество стартапов работают над приложениями виртуальной и дополненной реальности [3], для которых необходима связь с низкими задержками и высокой пропускной способностью. Кроме того, концепция «интернета вещей» IoT (Internet of Things) трансформируется в «интернет всего» IoE (Internet of Everything), согласно которой множество устройств будет иметь доступ к сети. Поэтому можно с уверенностью утверждать о необходимости разработки следующего поколения мобильных систем связи.

В научном мировом сообществе уже началось обсуждение концепций и технологий 6G. Поскольку ни МСЭ, ни 3GPP не выпустили спецификации по тематике 6G, можно лишь прогнозировать облик будущих телекоммуникационных систем. Мы проанализировали и попытались обобщить данные, опубликованные в нескольких крупных обзорах [3–29]. В отличие от большинства этих работ мы концентрируемся на технологиях физического уровня, а иные рассмотренные темы (тренды, архитектура сетей, машинное обучение) затрагиваем в

контексте вызовов, требований и возможностей для применения средств и методов работы с физическими сигналами телекоммуникационных систем. В табл. 1 приведена информация о рассмотрении ключевых, с нашей точки зрения, вопросов, напрямую влияющих на структуру физического уровня в наиболее крупных обзорах. К сожалению, ни в одном из них не рассмотрены достаточно подробно основные перспективные технологии физического уровня, поэтому мы попытались обобщить имеющиеся знания по представленным темам и дополнили отсутствующей информацией из работ других исследователей.

В обзоре приведены актуальные направления, сценарии эксплуатации, приложения, услуги и сервисы, появление которых прогнозируется в будущем: связь с беспилотными средствами, роботами, виртуальная и дополненная реальность, нейроинтерфейсы, телемедицина, развитие интернета вещей, широкополосный доступ и др. Приведены прогнозируемые технические требования к новым сетям: величина задержки, скорости передачи, спектральной эффективности, количество поддерживаемых пользователей и др.

Дан обзор ключевых технологий, позволяющих добиться столь высоких характеристик связи. Описаны принципы построения и особенности новой сетевой архитектуры. Рассмотрено внедрение искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) в телекоммуникационные системы и перспектива дальнейшего развития этого направления. Также описана проблема освоения новых частотных диапазонов миллиметровых волн и терагерцового излучения, в том числе рассмотрено использование диапазона видимого излучения.

Кроме того, рассмотрены многоантенные системы MIMO (Multiple Input Multiple Output). Именно MIMO обеспечила в системах 5G NR кратный прирост спектральной эффективности за счет реализации пространственного разделения абонентов. Представлены существующие направления в этой области: развитие массивных MIMO, принципы бессотовых систем CF (Cell-Free) MIMO и др. Рассмотрена новая технология, получившая в последнее время колоссальное внимание исследователей – реконфигурируемые интеллектуальные поверхности, RIS (Reconfigurable Intelligent Surface).

Таблица 1. Информация о наиболее крупных обзорах, касающихся вопросов физического уровня 6G

Литература	Концепция, требования	Архитектура	ИИ	Частотные диапазоны	MIMO	RIS	МД и модуляция	Кодирование
Mahmoud H. и др. [3]	+							
Yang P. и др. [5]	+	+	+	+				
Zhang Z. и др. [6]	+			+	+	+		
Gui G. и др. [7]	+	+						
Chowdhury M.Z. и др. [8]	+		+	+				
Tataria H. и др. [9]	+	+	+	+	+	+		
Ray P. P. и др. [12]	+	+	+	+	+		+	
Saad W. и др. [14]	+	+		+				
Jain P. и др. [15]	+	+						
Lu Y. и др. [16]	+	+	+	+			+	
Chavhan S. и др. [19]	+	+		+				
De Alwis C. и др. [20]	+	+		+			+	
Jiang W. и др. [22]	+	+	+	+	+	+		
Shimaa A. A и др. [26]	+	+		+				
Guangyi L. и др. [27]	+	+						

Одной из основных технологий физического уровня, напрямую влияющей на спектральную эффективность, структуру кадра, принципы формирования и обработки сигналов, является метод множественного доступа. Основные кандидаты на эту роль в системах 6G – прежде всего методы неортогонального множественного доступа, предложенные еще при обсуждении стандарта 5G NR. Также описывается технология мультиплексирования с разделением абонентов по скорости RSMA (Rate Splitting Multiple Access). Кратко рассмотрены перспективы развития методов цифровой модуляции.

Рассмотрена еще одна базовая группа технологий физического уровня – помехоустойчивое кодирование. Описаны наиболее эффективные в настоящий момент методы: турбо, низкоплотностные и полярные коды.

Системы 6G должны отвечать на разнообразные вызовы и поддерживать гибкий подход к предоставляемым услугам. Это подразумевает

создание гетерогенных сетей, объединяющих каналы беспроводной связи разного типа: спутниковых, сотовых, работающих на разных частотах и в разном радиусе действия (макросоты, соты, микросоты, наносоты), в том числе с использованием оптического излучения, самоорганизующиеся сети, работающие вдали от базовых станций. Некоторые исследователи предлагают интегрировать акустические каналы для работы с подводными аппаратами [28]. Мы рассматриваем развитие только технологий сотовой мобильной связи, вскользь затрагивая другие вопросы.

Отметим также ключевые работы по некоторым не рассмотренным нами направлениям: коммерциализация, эффективное энергопотребление и «зеленые технологии» [13, 17, 29], одновременная передача энергии и информации SWIPT (Simultaneous Wireless And Information Power Transfer) [30], интегрированное зондирование и коммуникации [18], квантовая связь [31], медицинские и психологические проблемы [4].

Цель работы – продемонстрировать образ будущих систем и новые тенденции в тематике систем связи, а также отметить перспективные научные направления.

2. ОБЛАСТИ И СЦЕНАРИИ ПРИМЕНЕНИЯ СОТОВОЙ СВЯЗИ ШЕСТОГО ПОКОЛЕНИЯ 6G

Используемые в настоящее время сети связи 5G имеют три сценария работы: 1) сверхширокополосная мобильная связь eMBB (Enhanced Mobile Broadband) – передача больших объемов трафика на высоких скоростях, 2) сверхнадежная связь с низкими задержками URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communication) – обеспечивает минимальную сетевую задержку при невысоких скоростях передачи данных, 3) массовая межмашинная связь mMTC (massive machine-type Communications) – обеспечивает большое количество сетевых подключений устройств «интернета вещей» (сенсоры, контроллеры, электронные замки и др.).

Для следующего поколения связи – 6G – прогнозируется как развитие этих сценариев, так и появление новых.

Активно развивается тематика беспилотного транспорта: летательные аппараты, автомобили, поезда, сельскохозяйственная техника и др. Для них необходима низкая сетевая задержка, минимальная вероятность ошибок, высокая стабильность подключения и в разных приложениях – разные скорости передачи данных.

Технологии расширенной XR (Extended Reality) [3], дополненной (Augmented Reality), смешанной MR (Mixed Reality) и виртуальной (Virtual Reality) реальности [33], в том числе с эффектом голографии [9], требуют передачи огромного объема трафика, поддержки облачных вычислений и низкой задержки. Современные сети 5G не способны в полной мере удовлетворить эти требования [3]. В ряде источников отмечается, что XR будущего будет включать в себя не только видеоизображение, но и передачу тактильных ощущений [8].

Различные медицинские и биологические технологии, в частности интерфейсы мозг – компьютер BCI (Brain-Computer Interface) [33], и телемедицина требуют функционирования стабильных каналов связи. При этом главным

критерием остается обеспечение защиты и конфиденциальности информации [28].

Концепция интернета вещей IoT, или шире – «интернета всего» IoE [9, 23], идея умных городов с автоматизацией дорожного трафика и парковки, беспилотным общественным транспортом, системой безопасности и др. [9], требуют создания масштабной сети с огромным числом сетевых подключений и высоким уровнем безопасности [23].

В информационных технологиях важную роль заняли облачные вычисления. Они применяются в том числе и в телекоммуникациях, например в рамках концепции Cloud RAN (Radio Access Network) [9].

Пандемия COVID-19 стала причиной выхода колоссального количества сотрудников на удаленную работу, что привело к значительному росту передаваемого трафика. По оценкам экспертов объем мирового трафика в 2010 г. составлял $7.462 \cdot 10^{18}$ бит/мес, в 2022 $158 \cdot 10^{18}$ бит/мес, а к 2030 вырастет до $5016 \cdot 10^{18}$ бит/мес [35]. В то же время количество абонентов мобильных сетей вырастет с 5.32 до 17.1 млрд [35]. Это является двигателем дальнейшего развития сервиса eMBB.

2.1. Новые сервисы 6G

Рассмотренное выше позволяет прогнозировать появление следующих сервисов.

1. Связь на большие расстояния с высокой мобильностью LDHMC (Long-Distance And High-Mobility Communications) [6]. Это может быть достигнуто как с помощью специальных подходов на физическом уровне (увеличения энергетики, повторения символов, расширения спектра, помехоустойчивого кодирования с низкой скоростью и др.), так и на основе принципа гетерогенных сетей, объединяющих сеть базовых станций (БС), спутниковых каналов связи [8], соединения между устройствами без БС.

2. Коммуникации с чрезвычайно низким энергопотреблением ELPC (Extremely Low-Power Communications) [6]. Этот сервис будет востребован для задач интернета вещей, подключения датчиков, которые редко передают небольшие пакеты данных.

3. Мобильная широкополосная связь с низкой задержкой MBRLLC (Mobile Broadband Reliable Low Latency Communication),

объединяющая требования к eMBB и URLLC для поддержки приложений XR и VCI [3, 7, 22].

4. Высокоскоростные массовые подключения mMBS (Massive Broad Bandwidth Machine Type), сочетающие сценарии eMBB и mMTC для работы высокоскоростных устройств интернета вещей [7, 22].

5. Массивные URLLC (mURLLC), объединяющие требования к URLLC и mMTC, необходимые для совместной работы большого числа разнообразных датчиков, обеспечивающих производство на современных фабриках [3], интернета вещей, роботов и блокчейн-приложений [3, 22].

6. Многоцелевые услуги, связанные с конвергенцией коммуникаций, вычислений, управления, локализации и зондирования для беспроводной передачи энергии для интеллектуальных устройств [3].

Также возможен принципиальный отказ от работы в рамках сервисов и поддержания определенного качества обслуживания QoS (Quality of Service). Вместо этого каждым абонентом может быть выбрана своя рабочая точка, включающая значения скорости, задержки, надежности и других параметров [21].

2.2. Требования к системе связи 6G

Традиционно работа над новым стандартом начинается с формулировки требований к

будущему поколению систем связи. Это своего рода техническое задание, составляемое МСЭ. В настоящий момент эти требования не сформулированы, однако в ряде работ проводится их оценка. В табл. 2 приведены данные для 6G из различных источников и дано сравнение их с системой 5G [1]. Для 6G демонстрируются экстремальные значения, без конкретизации направления передачи: восходящий или нисходящий каналы.

Анализируя данные табл. 2, можно констатировать существенный рост характеристик 6G относительно 5G. Один из параметров – пиковая скорость передачи данных, определяемая суммой скоростей всех подключенных к базовой станции устройств. В рассмотренных источниках сложился консенсус по его значению – 1 Тбит/с, что превосходит значения 5G (для нисходящего канала) в 20 раз. Для удовлетворения этих требований необходимо расширить полосу пропускания до десятков гигагерц и освоить новые диапазоны частот [108].

Показатель пользовательской скорости передачи – значение, которое необходимо обеспечивать при предоставлении услуг мобильной связи. Это скорее ориентир и усредненный показатель пользовательского опыта. В часы низкой загрузки сети 5G способны поддерживать пользовательскую скорость значительно выше 100 Мбит/с, в то время как в нагруженных

Таблица 2. Сводные требования к характеристикам 5G и 6G

Параметр	5G [1]	6G*
Пиковая скорость передачи	20 Гбит/с (нисходящий) 10 Гбит/с (восходящий) (eMBB)	1 Тбит/с [3, 4, 6, 8, 11] и др.
Пользовательская скорость передачи	100 Мбит/с (нисходящий) 50 Мбит/с (восходящий) (eMBB)	1 Гбит/с [6, 19] 100 Гбит/с [11]
Задержка	4 мс (eMBB) 1 мс (URLLC)	< 10...100 мкс [6, 15] < 1 мс [3, 4, 8, 11, 14] и др.
Спектральная эффективность, бит/с/Гц	30	60 [4] > 90 [11] 100 [3] 150...300 [6, 19]
Плотность подключений, устройств/ км ²	10 ⁶ (mMTC)	>10 ⁷ [11, 26]
Мобильность, км/ч	500 (eMBB/URLLC)	> 1000 [6, 26]

*Без разделения на восходящий и нисходящий и сценарии работы.

сотах скорость будет значительно ниже. Разброс чисел (от 1 до 100 Гбит/с) для 6G объясняется не до конца сформированной концепцией и различием приложений 6G, в то же время дает представления о возможных ориентирах.

Показатель задержки критически важен в ряде новых приложений (XR, нейроинтерфейсы, беспилотные средства и др.). Большинство источников приводит требуемое значение менее 1 мс, а некоторые указывают и более низкие показатели, вплоть до 10 мкс [6]. Отметим, что такие значения сейчас выглядят недостижимыми, поскольку требуют переработки всего стека протоколов. Если рассматривать физический уровень, то для снижения задержки на два порядка необходимо значительно уменьшать длительность символов (повышая частоту дискретизации), использовать другие подходы к каналному кодированию и множественному доступу, принципиально менять структуру кадра.

Показатель спектральной эффективности напрямую влияет на скорость передачи, которая может быть увеличена за счет новых многочисленных технологий физического уровня. Как видно из табл. 2, сейчас нет единого мнения относительно конкретного значения, можно лишь прогнозировать ее кратный рост. Далее описаны основные технологии, благодаря которым это может быть достигнуто.

Среди остальных характеристик нами выделены следующие: рост числа подключений на порядок до более 10^7 устройств/км для IoE; поддержка абонентов, перемещающихся на высокой скорости, более 1000 км/ч, – сценарии работы с БПЛА и высокоскоростными поездами будущего.

3. АРХИТЕКТУРА СЕТЕЙ 6G

В настоящее время опубликовано достаточно много работ [36–46], посвященных сетевой архитектуре 6G. В работе [26] представлен ряд проектов по дальнейшему видению систем 5G (Beyond 5G) и 6G. Однако конкретная сетевая архитектура 6G находится на начальной стадии разработки. Приведем общие подходы и соображения, которые используют авторы при описании своих концепций.

3.1. Архитектура существующих сетей

Одним из базовых принципов по разработке и внедрению новых поколений систем связи

является их преемственность. Поэтому рассмотрим архитектуру сети 5G (рис. 1), которая, несомненно, ляжет в основу 6G. Ключевой особенностью архитектуры сети 5G является внедрение информационных технологий на уровне ядра сети.

Это позволило сделать сервисно-ориентированную структуру сети [47], реализовать выделение сетевых ресурсов «по требованию», отделить плоскость управления (Control Plane) от плоскости пользователя (User Plane), реализовать поддержку виртуального разделения сети на слои [48], внедрить программно-конфигурируемые [49] и виртуальные сети [50].

Разделение сети на слои позволяет операторам создавать несколько виртуальных сетей (слоёв) в рамках единой физической сетевой инфраструктуры, используя программно-конфигурируемые и виртуальные сети. Каждый слой настраивается для удовлетворения конкретных потребностей абонентов или приложений (надежность, безопасность, задержка и др.). Сетевые операторы могут динамически распределять сетевые ресурсы и функции между слоями в зависимости от текущих требований.

В архитектуру сети радиодоступа RAN внедрена возможность расположения распределенного блока DU (Distributed Unit), выполняющего протоколы низкого уровня, отдельно от центрального блока CU (Central Unit), выполняющего протоколы высокого уровня. Это позволяет увеличить гибкость развертывания сети и подключить несколько DU к одному удаленному CU. Таким образом, совместное расположение CU и DU позволяет уменьшить сетевую задержку для удовлетворения сервиса URRLC, а удаленное расположение позволяет упростить сетевую инфраструктуру и сократить издержки.

Несмотря на нововведения, внедрение и обслуживание ядра сети 5G NR для операторов мобильной связи осложнилось рядом проблем: высокая стоимость эксплуатации и большое энергопотребление БС, трудность обслуживания, а также сложность совмещенной работы с сетями предыдущих поколений (3G, 4G).

К решению указанных проблем ученые пытаются подойти с двух направлений. С одной стороны, для увеличения эффективности эксплуатации и обслуживания предлагается использование ИИ [51, 52] и МО [53] для оптимизации работы сети и создания автономной

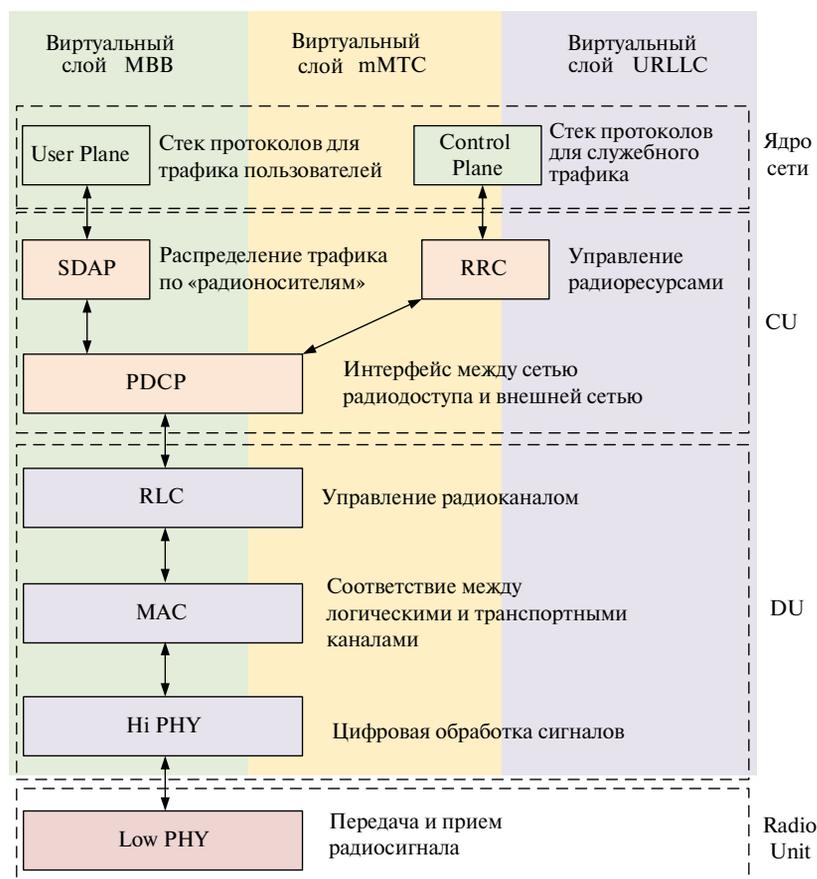


Рис. 1. Архитектура сетей 5G.

среды. С другой стороны, для снижения затрат мобильных операторов на развертывание сети разрабатывается (и уже используется в 5G) проект с открытым исходным кодом Open RAN [54]. Его цель заключается в разработке открытого интерфейса между различными модулями БС и построение архитектуры сети на основе аппаратного и программного обеспечения с открытым исходным кодом.

3.2. Принципы перехода к 6G

Концепция архитектуры сети 6G включает три основных аспекта [55]: выполнение новых требований по скорости передачи, задержкам и пр. для поддержки услуг и сервисов 6G, слияние телекоммуникационных и информационных технологий (ИТ) [14, 56] (облачные вычисления, ИИ и др.) для увеличения эффективности сетевой архитектуры [57–59], а также устранение недостатков архитектур 3G-5G.

Остановимся подробнее на недостатках архитектуры 5G. Во-первых, последовательное выполнение стека протоколов приводит

к дополнительной сетевой задержке на каждом следующем уровне. Во-вторых, технология разделения сети на слои не выполнена на требуемом техническом уровне [60] из-за проблем технической реализации и стандартизации. В-третьих, на должном техническом уровне не воплощено разделение аппаратных и вычислительных возможностей между CU и DU, некоторые подходы обсуждаются в [61]. Кроме того, сети 5G отличаются высоким энергопотреблением и сложностью обслуживания (по сравнению с 4G), что снижает темпы их коммерческого внедрения.

Несомненно, новая архитектура сети 6G должна претерпеть существенные изменения, чтобы решить упомянутые выше недостатки. Разработчиками называются следующие ключевые критерии при проектировании: простота, масштабируемость, гибкость (способность сети адаптироваться к изменяющимся условиям и запросам), скорость ввода в эксплуатацию и уменьшение ошибок при передаче данных. Окончательные требования еще не сформирова-

ны, но разными группами ученых предлагаются собственные концепции новой сетевой архитектуры [62] с учетом существующей и перспективной технологической базы.

3.3. Тенденции и новые функции сетевой архитектуры 6G

Основываясь на обзоре существующих концепций, опишем ключевые особенности и новые функции, которые станут неотъемлемой частью 6G.

1. Полное внедрение программно-определяемых сетей SDN (Software-Defined Networking) и виртуализация сетевых функций NVF (Network Functions Virtualization) для быстрого развертывания и обновления программного обеспечения, динамического совместного использования ресурсов (например, радиочастотного спектра, вычислений и хранения), а также автоматизации и интеллектуальности сети и моментального доступа к услуге/сервису по запросу.

2. Построение архитектуры сети вокруг ИИ [63, 64]. Архитектура сетей 4G/5G не была спроектирована с учетом поддержки ИИ, поэтому для расширения возможностей 6G разработчикам потребуется заложить ИИ в основу новой архитектуры.

3. Выполнение услуг и предоставление радиоресурсов по требованию в реальном времени, благодаря возможностям прогнозирования и предсказания ИИ.

4. Сети 6G должны обеспечить повсеместное покрытие на земле, на море, в космосе и в воздухе, обеспечивая пользователям стабильный канал связи и низкую задержку при бесшовном хендвере [65].

5. Предполагается, что сеть 6G будет работать в широком диапазоне частот: низкочастотный диапазон может быть использован для сценариев с широкой зоной покрытия (например, IoT), а высокочастотный диапазон – для передачи данных на сверхвысоких скоростях.

7. Обеспечение безопасности современных сетей является не частью архитектуры сети, а ее надстройкой. Однако стремительное развитие новых сетевых технологий (например, ИИ) предоставляет возможность включить безопасность в структуру новой архитектуры. Сеть будет отслеживать состояние безопасности в режиме реального времени и прогнозировать потенци-

альные риски. Цифровые двойники [66, 67] (сетей, пользователей, предприятий, государственной инфраструктуры и др.) будут существовать в сетевом пространстве, поэтому безопасность сети приобретает еще более важное значение. Кроме того, высказывается предположение о том, что будущие конфликты будут разворачиваться не в физическом мире, а в цифровом пространстве с дальнейшим влиянием или распространением на физический мир. Поэтому сеть 6G пройдет путь модернизации от безопасности интернета до безопасности киберпространства [62].

8. Внедрение блокчейн-технологии для повышения безопасности децентрализованных вычислений [68, 69], например, в контексте анализа больших данных.

9. Построение сетей на основе бессотовой топологии. Эта концепция тесно связана с использованием многоантенных систем.

4. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ

Рост вычислительных мощностей и доступ к большим объемам данных привел к созданию моделей глубокого обучения, которые основаны на искусственных нейронных сетях. Существует множество архитектур глубокого обучения, которые используются для решения различных задач, а некоторые из них могут использоваться в беспроводной связи.

Искусственному интеллекту придают особое значение в 6G, потому что универсальность алгоритмов МО позволяет использовать их для решения самых разных задач. В документах [72, 73] представлено несколько вариантов применения МО на различных уровнях: физическом, канальном, сетевом и прикладном.

На прикладном уровне МО помогает достичь высокой гибкости сети, а также обеспечивает рост вычислительных возможностей, снижение затрат на хранение и обработку данных, расширение доступности данных и совершенствование сервисов.

4.1. Применение на физическом уровне машинного обучения сетей 6G

В последние годы проводились исследования использования МО на физическом уровне беспроводной связи [74]. В основном они направлены на решение проблем в области кодирования, синхронизации, геолокации, оценки

канала и формирования диаграммы направленности. Актуальной задачей для исследователей является оценка эффективности, вычислительной сложности и других параметров глубокого обучения в реальных системах.

Для решения задач позиционирования мобильных устройств в качестве эффективного подхода может рассматриваться глубокое обучение. Большинство систем позиционирования разрабатывается для определенных сценариев использования 6G, поэтому одним из перспективных путей решения является адаптация модели обучения под конкретные условия канала распространения радиоволн [75, 76].

Во многих стандартах связи, включая LTE и NR, оценка параметров канала является обязательной процедурой, которая необходима для компенсации искажений при частотно-селективных замираниях. Линейная оценка с минимальной среднеквадратичной ошибкой LMMSE (linear minimum mean square error) обеспечивает оптимальную точность, если канал является линейным и стационарным. Но в реальных каналах LMMSE не всегда может обеспечить необходимую точность. В этом случае оценка параметров канала может быть получена с помощью глубокого обучения с использованием нейронных сетей [77]. Однако существующие методы оценки параметров каналов на основе глубокого обучения имеют один общий недостаток. Нейронную сеть приходится обучать в автономном режиме. Из-за требований к длительному периоду обучения и большому объему обучающих данных несоответствие между реальными каналами и каналами на этапе обучения может негативно влиять на точность оценки. В будущих исследованиях перспективными подходами для преодоления этой проблемы могут стать онлайн-обучение и генерация обучающих данных, соответствующих реальному каналу.

К наиболее успешным сценариям применения МО на физическом уровне можно отнести формирование луча в антенных решетках mMIMO (massive MIMO) [78–82].

4.2. Применение машинного обучения на MAC-уровне сетей 6G

Уровень управления доступом к среде (Media Access Control, MAC) в сотовых сетях выполняет задачи распределения радиоресурсов между пользователями, группировки пользователей

для систем MIMO, выбора сигнально-кодовых конструкций, а также управления мощностью передачи восходящего канала, случайным доступом и хендовером. Инструменты МО могут быть использованы для улучшения работы переносимых процедур. Механизмы обучения с подкреплением подходят для решения задач, в которых сеть может адаптироваться к изменяющимся условиям (например, состояние канала) и учиться оптимальным стратегиям. Например, планировщик должен научиться предсказывать характеристики буферного трафика, скорость и изменения канала во времени и использовать эти прогнозы для принятия разумных решений по планированию. Например, в [83] описан метод федеративного обучения для минимизации эффектов прерывания присутствия, позволяющий улучшить качество услуг виртуальной реальности. МО в этом приложении используется для повышения точности прогнозирования положения и ориентации.

Прогнозируемое распределение радиоресурсов является еще одной задачей для МО на канальном уровне. Особенно остро эта проблема ощущается при большом количестве устройств в сценарии mMTC, решение которой рассмотрено в [84, 85].

Применение МО рассматривается для увеличения автономности устройств mMTC. С одной стороны, прогнозирование мощности передачи на основе фактических условий сети с использованием методов обучения с подкреплением может привести к улучшению энергоэффективности. С другой стороны, прогнозирование трафика и сегментации пакетов с помощью МО позволяет улучшить адаптивное энергосбережение.

Еще одним важным направлением MAC-уровня является гибкий дуплекс [86]. Данная концепция позволяет динамически распределять ресурсы одновременно во временной и частотной областях определения вместо статических временного и частотного разделения каналов. Развертывание гибкого дуплексирования для широкополосной связи нужно в случаях, когда трафик в нисходящей линии связи оказывается больше, чем в восходящей. В этом случае ресурсы восходящей линии связи будут переназначены для нисходящей. Проблема заключается в том, что на сигнал нисходящей линии будут накладываться помехи в виде сигналов пользователей восходящей линии из соседней соты. Отсюда возникает

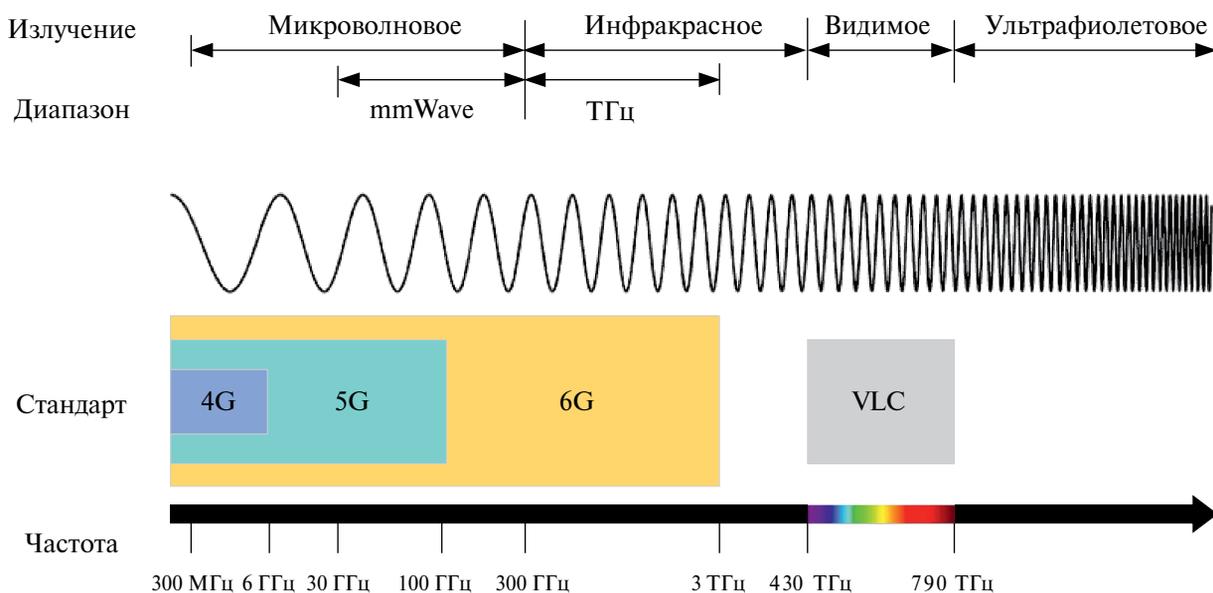


Рис. 2. Частотные диапазоны 6G.

необходимость в интеллектуальном управлении. Алгоритмы на основе МО могут контролировать этот процесс, так как концепция основана на данных о трафике и сетевой активности.

Таким образом, технологии МО займут важную позицию в построении сетей следующего поколения, решая задачи физического, канального и сетевого уровней.

5. НОВЫЕ ЧАСТОТНЫЕ ДИАПАЗОНЫ

Для выполнения требований к 6G (см. табл. 2) необходимо использовать более широкие по сравнению с 5G полосы частот, что, в свою очередь, неизбежно сопряжено с освоением новых частотных диапазонов. В настоящее время точно не известно, какие именно диапазоны будут выделены для 6G, а решение данного вопроса будет рассмотрено на одной из ближайших всемирных конференций радиосвязи [109].

На рис. 2 представлены частотные диапазоны, рассматриваемые для мобильных систем. Сети 4G LTE работают в диапазоне до 6 ГГц, который к сегодняшнему дню полностью занят.

Поэтому в 5G NR началось освоение диапазона миллиметровых волн 30...300 ГГц, которое продолжается до сих пор (в настоящее время максимально определенная стандартом частота 71 ГГц). Это позволило решить проблему нехват-

ки полосы пропускания в диапазоне до 6 ГГц. Для удовлетворения растущих потребностей 6G исследователи рассматривают возможность передачи данных в терагерцовом (ТГц) диапазоне. Предполагается, что сети 6G смогут работать в широком диапазоне частот, вплоть до 3 ТГц.

5.1. Освоение радиодиапазона от 30 ГГц до 3 ТГц

Основная системная проблема миллиметрового диапазона (30...300 ГГц) с точки зрения радиосвязи заключается в высоких потерях энергии сигнала при его распространении в свободном пространстве, а различные препятствия (например, бетонные перекрытия стен) на трассе приводят к большому затуханию. Из-за этого дальность связи оказывается на порядок меньше, чем в используемых сейчас диапазонах 1...6 ГГц. Эта проблема частично решается с помощью технологии многоантенной передачи данных mMIMO с использованием нескольких десятков (или даже сотен) антенных элементов. Технология mMIMO позволяет фокусировать основную часть энергии сигнала в требуемой точке пространства, увеличивая отношение сигнал/шум на входе приемного устройства. В работах [95, 98, 99] рассмотрены диапазоны частот, которые могут быть использованы для высокоскоростной передачи данных на дальности до 1 км с помощью Massive MIMO с высоким коэффициентом усиления.

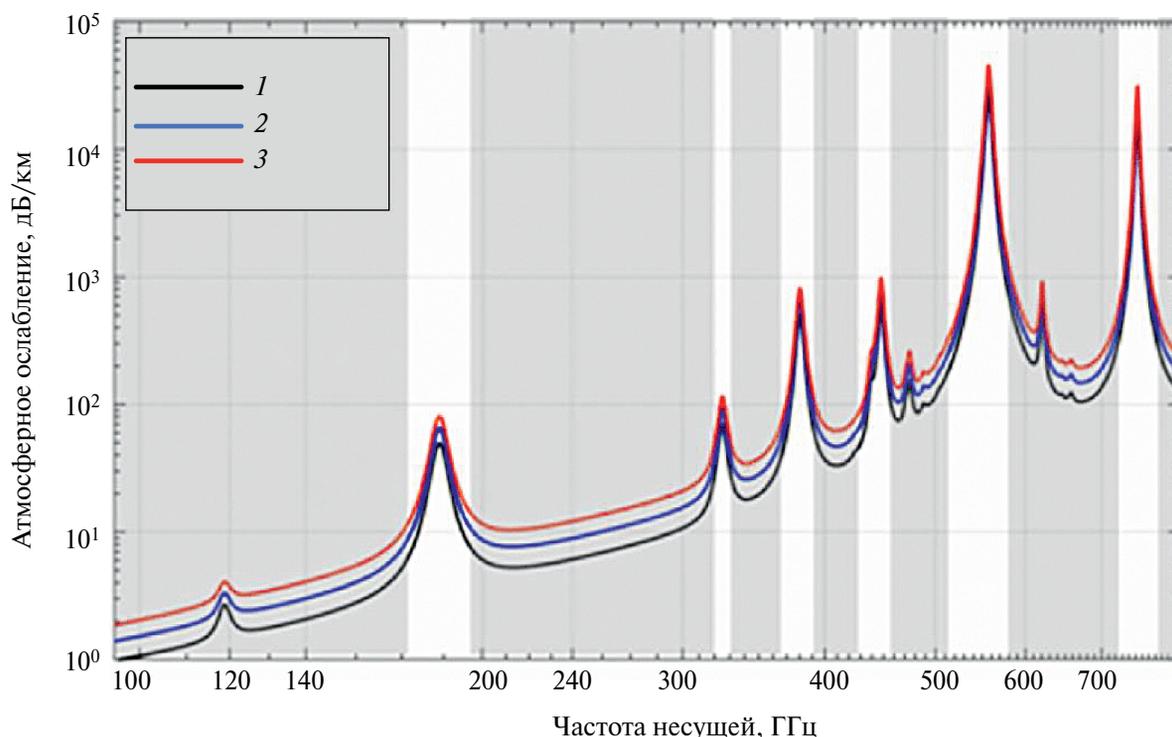


Рис. 3. Зависимость ослабления сигнала от частоты несущей для различных уровней влажности: 1 – 60%, 2 – 80%, 3 – 100% [97].

Наиболее широкие полосы пропускания доступны в свободном терагерцовом диапазоне (0.3...3 ТГц). Для его освоения потребуются решить множество задач, начиная от разработки приемопередатчиков и антенн и заканчивая разработкой алгоритмов и сетевых протоколов, позволяющих максимально эффективно использовать этот частотный диапазон.

Проблемы ТГц-диапазона лежат не только в технической области, но и в области медицины. Комитет по потенциальным эффектам воздействия электромагнитных полей на здоровье человека в своем докладе [102] отметил, что исследователям предстоит провести тщательную работу по оценке биологического и молекулярного воздействия ТГц-излучения на здоровье человека. Рекомендуются обратить особое внимание на исследование воздействия ТГц-волн на чувствительные ткани и органы, в частности кожу и роговицу [102, 103].

При освоении новых диапазонов решающим фактором является поглощение радиоволн в атмосфере. Проведено огромное количество исследований, посвященных оценке затухания радиосигнала в атмосфере в зависимости от его частоты [91]. На частотах ниже 6 ГГц ослабление

сигнала в основном вызвано молекулярным поглощением, которое остается небольшим [92]. Однако на более высоких частотах длина волны приближается к размеру частиц пыли, дождя, снега или града, что приводит к дополнительным эффектам рассеяния [93, 94]. Наличие атомов кислорода, водорода и других газов в атмосфере приводит к тому, что в ряде диапазонов частот величина ослабления сигнала существенно выше.

На рис. 3 показано, что сигналы с частотой 183, 325, 380, 450, 550 и 760 ГГц испытывают большие потери за счет атмосферного поглощения.

С одной стороны, эти частотные диапазоны не подходят для передачи данных на большие расстояния из-за повышенного атмосферного ослабления. С другой стороны, они могут быть использованы для передачи конфиденциальных данных на малые расстояния (несколько метров) из-за быстрого затухания сигнала [95–97].

5.2. Использование диапазона видимого света

Помимо радиодиапазона рассматривается возможность передачи данных в диапазоне видимого излучения 430...790 ТГц. Это направление

имеет название VLC (visible light communication). В качестве передатчиков VLC могут быть любые источники светового излучения, которые могут использоваться как для освещения помещений, так и для передачи информации. Поэтому обязательным требованием VLC является неразличимость факта передачи данных человеческим глазом.

Наибольшую популярность VLC получил после публикации работы [104], в которой продемонстрирована способность светодиодов LED (light-emitting diode) осуществлять передачу информации. В 2010 г. консорциумом IEEE была образована рабочая группа для стандартизации VLC. Наиболее перспективными технологиями VLC являются Li-Fi (light fidelity) и OCC (optical camera communication).

В Li-Fi-технологии модуляция сигнала осуществляется за счет изменения интенсивности светового излучения, а в качестве приемника выступает фотодетектор. Для модуляции используются классические методы импульсной модуляции ООК (on-off keying) и VPPM (variable pulse position modulation). Определен новый метод модуляции – CSK (color shift key) [111], который позволяет кодировать информацию при помощи цветовой палитры. Светодиоды, входящие в состав LED-ламп, могут излучать разный цвет (RGB LED-лампы), а изменение интенсивности света способствует изменению цвета светового излучения.

В отличие от технологии Li-Fi, которая использует фотодиод для обработки принятой оптической интенсивности, OCC-технология основана на использовании камеры высокого разрешения и методов обработки изображения для приёма информации. Приемник при помощи камеры способен захватывать информацию не только от нескольких близко расположенных светодиодов, но и от цифровых LCD- и OLED-дисплеев. Кроме того, захват изображения OCC увеличивает дальность связи на открытом пространстве вплоть до 1 км за счет использования методов обработки изображения, большой длительности дискретизации и линз.

Важно отметить, что системы на основе OCC в основном ориентированы на низкоскоростную передачу из-за низкой частоты дискретизации, которая определяется частотой кадров камеры. Большинство цифровых камер работает в диапазоне 30...60 кадров/с при разрешении

1920 × 1080 пикселей. Таким образом, максимальная скорость передачи данных OCC не может превышать нескольких десятков мегабайт в секунду. Однако новые цифровые камеры позволяют работать при 960 кадрах/с при том же разрешении [110] и способны обеспечить большую скорость передачи данных OCC.

6. ТЕХНОЛОГИИ МНОГОАНТЕННЫХ СИСТЕМ

Одним из методов, позволяющих повысить спектральную эффективность и пропускную способность, является использование технологии многоантенных систем MIMO. Она применялась еще в системах 3G и 4G в конфигурациях 2×2, 4×4 (количество приемных и передающих антенн). А уже в 5G NR технология MIMO с большим числом элементов mMIMO позволила существенно увеличить спектральную эффективность (до 30 бит/с/Гц) и пропускную способность (до 20 Гбит/с). Это связано с возможностью организовать пространственное разделение каналов SDMA (space division multiple access), при котором несколько абонентов используют один и тот же частотно-временной ресурс в полном объеме с минимумом межканальной интерференции. Кроме того, MIMO может использоваться для повышения отношения сигнал-шум для одного абонента, без создания параллельных потоков.

Многоантенные системы позволяют осуществить адаптивное диаграммообразование (beamforming) в цифровом, аналоговом или гибридном (цифровом и аналоговом) виде [112]. Существует несколько подходов к реализации диаграммообразования: в цифровом виде наибольшее распространение получили алгоритмы инверсии канала (канальной матрицы) [113], линейного прекодирования [114], кодирования на «грязной бумаге» DPC (dirty paper coding) [115].

Дальнейшим развитием этого направления является переход от mMIMO к сверхбольшим многоантенным системам umMIMO (ultra-mMIMO) [116]. Проблема заключается в том, что увеличение количества антенных элементов приводит к росту энергопотребления, массогабаритных характеристик и требуемой вычислительной мощности. Для решения этих проблем актуальными направлениями для исследований является разработка новых материалов и микросхемотехники [117], алгоритмов с использовани-

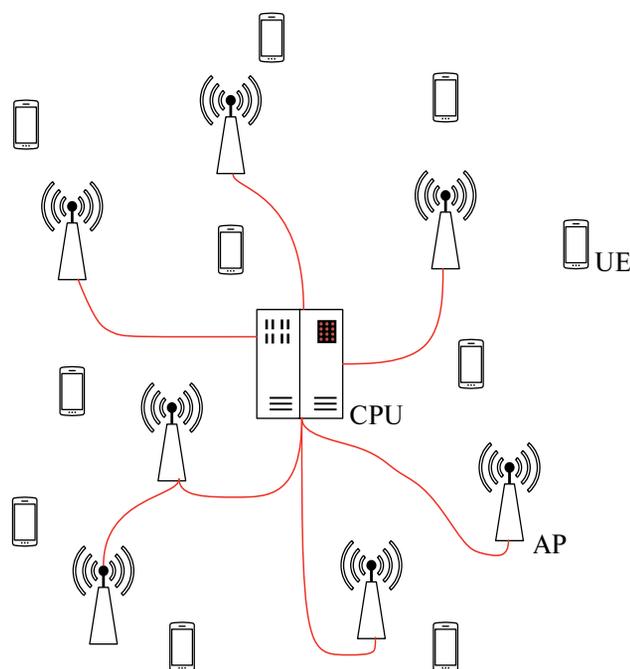


Рис. 4. Топология сети CF-MIMO.

ем машинного обучения [118], а также распределенных и облачных вычислений [119].

6.1. Бессотовые многоантенные сети

Классический подход построения систем связи подразумевает расположение антенны mMIMO на базовой станции и разнесение антенных элементов на половину длины волны. Однако существует другой подход организации таких систем — крупномасштабно распределенные антенные решетки LS-D-MIMO (large-scale distributed MIMO) [120]. Он заключается в распределении нескольких антенных решеток в зоне покрытия. Возможным вариантом такого распределения является концепция бессотовых многоантенных систем CF-MIMO [120]. Благодаря возможности использования множества антенных элементов в LS-D-MIMO и концепции CF-MIMO системы mMIMO будут трансформированы в umMIMO (ultra mMIMO).

Концепция CF-MIMO позволяет отойти от классической концепции мобильной связи разделения зоны обслуживания на соты. В системах CF-MIMO несколько точек доступа AP (access point) с антенными решетками подключены к центральному процессорному блоку CPU (central processing unit) по транспортной сети

с высокой пропускной способностью и низкой задержкой [121]. CPU управляет синхронизацией и формированием сигналов через каждый антенный блок. Таким образом, одного пользователя может обслуживать сразу несколько разнесенных антенных решеток. Иллюстрация топологии такой сети представлена на рис. 4.

Концепция CF-MIMO близка к SDN (см. разд. 2) и реализуется на ее основе.

В ряде сценариев системы CF-MIMO могут обеспечить более равномерную зону покрытия по сравнению с mMIMO [122], позволяют решить проблему хендвера [123] и реализовать эффективное пространственное разделение абонентов [124]. Все это делает CF MIMO перспективной технологией и кандидатом на внедрение в 6G [120]. Отмечается также, что эта технология может дать больший эффект при совместной работе с RIS [125, 126].

Несмотря на существенные преимущества, необходимо отметить и ряд проблем. Во-первых, эффективность работы LS-D-MIMO напрямую зависит от способа кластеризации взаимодействующих AP, что является темой ряда исследований [127–130]. Во-вторых, синхронизация между AP требует сверхмалых задержек [134] и отсутствия межканальной интерференции [131]. В-третьих, оценка параметров канала и эквализация также должны выполняться совместно, что в свою очередь приводит к существенному увеличению вычислительной сложности [132]. В-четвертых, высокая стоимость развертывания и обслуживания CF-MIMO (за счет большого количества антенн, точек доступа и др.) должна быть существенно снижена путем применения новых недорогих компонент с низким энергопотреблением [133]. Перечисленные выше нерешенные задачи CF-MIMO являются одними из ключевых для дальнейших исследований.

6.2. Динамические метаповерхностные антенны DMA

Еще одно новое направление в MIMO — использование динамических метаповерхностных антенн (Dynamic Metasurface Antenna, DMA), что является новым подходом конструкции антенных решеток с использованием метаматериалов [135–137]. Концепция DMA позволяет уменьшить физические размеры антенны и энергопотребление благодаря уменьшению (относительно классических систем) количе-

ства радиочастотных цепей [135]. Управление диаграммой направленности DMA происходит с помощью твердотельных переключателей, встроенных в конструкцию решетки [138].

Однако применение DMA обычно ограничивает спектральную эффективность. Для устранения этого недостатка предлагается использование RIS [139].

6.3. Голографическое формирование диаграммы направленности

Развитием адаптивного формирования диаграммы направленности (ДН) [140, 141] является голографическое формирование ДН (Holographic Beamforming, HBF), которое основывается на использовании программно-определяемых антенн (Software-Defined Antennas, SDA). Голографическим данный метод называется в силу того, что антенна похожа на голографическую пластину в оптической голограмме. Радиочастотный сигнал поступает на заднюю часть антенны и рассеивается по ее передней части, где миниатюрные элементы корректируют форму ДН [140]. Антенны SDA имеют меньшие массогабаритные характеристики, более низкое энергопотребление, а также меньшую стоимость по сравнению с традиционными системами [142]. Технология HBF позволяет существенно увеличить точность позиционирования (вплоть до сантиметров) [142, 143] и отношение сигнал/шум приемного устройства [8].

Метод HBF будет особенно важен в миллиметровом и терагерцовом диапазонах, потому что формирование сверхузкой ДН поможет преодолеть серьезные потери при распространении, а также уменьшить интерференцию между соседними сотами [144].

6.4. MIMO в оптическом диапазоне

Учеными рассматривается использование MIMO в оптическом диапазоне OMIMOS (Optical MIMO System), включая диапазон видимого света VLC-MIMO. В данных системах предлагается использование нескольких LED/инфракрасных/лазерных диодов в качестве передатчиков и нескольких фотодиодов в качестве приемников. В [146] приведены результаты эксперимента, в котором в лабораторных условиях удалось достичь скорости передачи 249 Мб/с, а в работе [147] с помощью математического моделирования продемонстрирована скорость около 450 Гб/с.

Как и в системах 5G, в 6G MIMO будет играть ключевую роль в обеспечении высокой

скорости и спектральной эффективности [118]. Можно рассчитывать на полноценную реализацию концепции CF-MIMO, что позволит гораздо более эффективно использовать свойства пространственных каналов и улучшить качество обслуживания (помехоустойчивость, бесшовный хендовер, скорость передачи и др.) [122]. Технологии многоантенных систем одни из наиболее динамично развивающихся в области физического уровня систем связи, и с ними связано много перспектив по улучшению будущих мобильных сетей.

7. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ОТРАЖАЮЩИЕ ПОВЕРХНОСТИ RIS

В современные системы связи заложены широкие возможности для управления передачей данных на физическом, канальном и сетевом уровнях [148] в предположении, что среда распространения радиоволн остается неконтролируемой. Однако новейшие исследования показали, что с помощью новых метаматериалов можно создавать «умные» отражающие или перенаправляющие радиосигнал метаповерхности (МП), которые становятся дополнительной компонентой канала распространения между передатчиком и приемником (рис. 5).

Рассмотрим основную идею применения реконфигурируемых МП в телекоммуникационных системах. В научном сообществе такие МП имеют несколько закрепившихся наименований, нами используется обозначение «реконфигурируемая интеллектуальная поверхность» RIS. Термин RIS недавно появился в тематике беспроводной связи [149], однако сама технология рассматривалась и раньше [150–153].

Плоскость RIS можно представить в виде матрицы, содержащей дискретные элементы с изменяемыми электромагнитными свойствами, что позволяет управлять их амплитудно-фазовым откликом с помощью контроллеров и переключателей. Таким образом, рассеяние, поглощение, отражение и дифракционные свойства поверхности могут изменяться во времени и ими можно управлять программно.

Долгосрочное видение этой технологии заключается в создании интеллектуальных радиосред [154]. Это позволит расширить стек протоколов, включив в него канал распространения

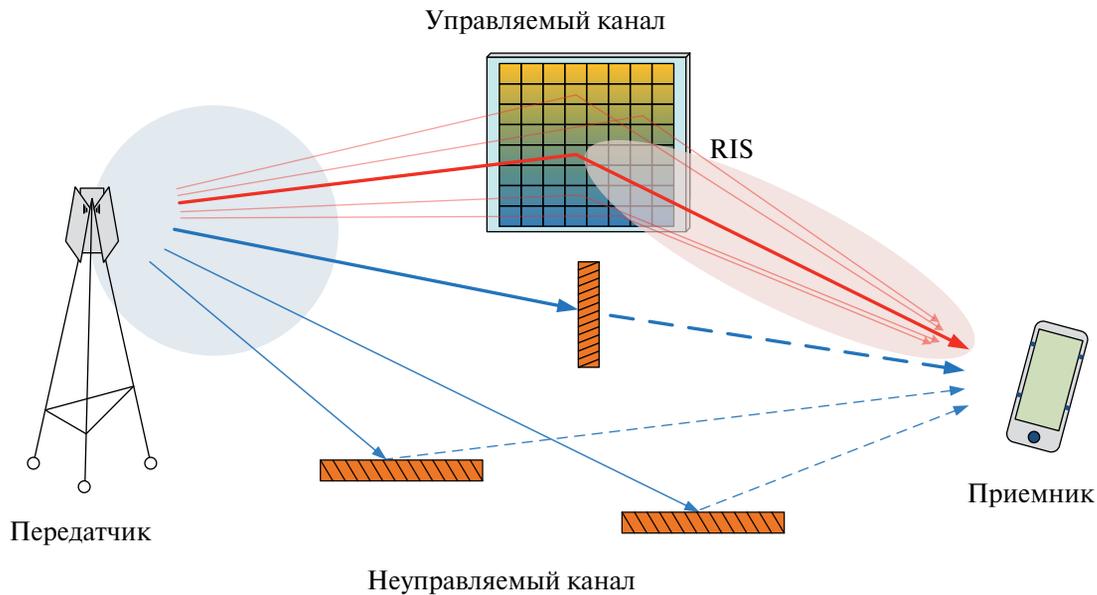


Рис. 5. Применение RIS в телекоммуникационных системах.

(Layer 0), и рассмотреть новые подходы сквозного взаимодействия протоколов Layer 0–3 с учетом нового уровня.

Кратко рассмотрим базовые принципы RIS, которые помогут получить первичное представление о физике работы, сценариях использования, преимуществах и недостатках, а также о дальнейших перспективах этой технологии.

7.1. Метаматериалы, метаповерхности и аппаратная реализация RIS

Сначала рассмотрим метаматериалы и состоящие из них МП, которые лежат в основе RIS. Метаматериалы являются искусственно созданными материалами, обладающими особыми свойствами (например, отрицательным показателем преломления), которые не встречаются в природных материалах. Они состоят из металлических/диэлектрических микро/наноструктур (их называют мета-атомами) с предустановленными электромагнитными (ЭМ) характеристиками, которые расположены в определенном порядке на ультратонкой поверхности. Такую поверхность называют метаповерхностью, а структура расположения на ней мета-атомов определяет ЭМ-свойства всей поверхности [151].

Падающая на поверхность ЭМ-волна взаимодействует с каждым мета-атомом, формируя импульсный отклик системы. Таким образом, располагая мета-атомы с желаемыми свойствами в заранее определенном порядке (структуре),

можно реализовать МП с требуемой импульсной характеристикой (распределением амплитуд и фаз) для отраженных или проходящих сквозь них ЭМ-волн [155–160].

Существует несколько подходов к созданию структуры МП в зависимости от вида падающей ЭМ-волны. Применительно к радиоволнам чаще всего рассматривается МП, состоящая из матрицы электрически связанных резонаторов квадратной или круглой формы с заданной магнитной восприимчивостью [161].

На рис. 6 приведена типичная архитектура RIS [162]. Она состоит из трех слоев и интеллектуального контроллера.

Во внешнем слое на диэлектрической подложке располагается большое количество металлических элементов, которые взаимодействуют с падающими радиосигналами. Для уменьшения утечки энергии сигнала используется медная пластина, расположенная на среднем слое. Внутренний слой представляет собой плату управления, которая отвечает за управление откликом амплитуды/фазы каждого элемента с помощью контроллера, реализованного в программируемой интегральной схеме.

Метаповерхности могут быть как пассивными, так и активными. Пассивные МП не имеют возможности внешнего управления, не могут реконфигурироваться и обладают постоянной импульсной характеристикой. В отличие от них, активные МП поддерживают внешнее управ-

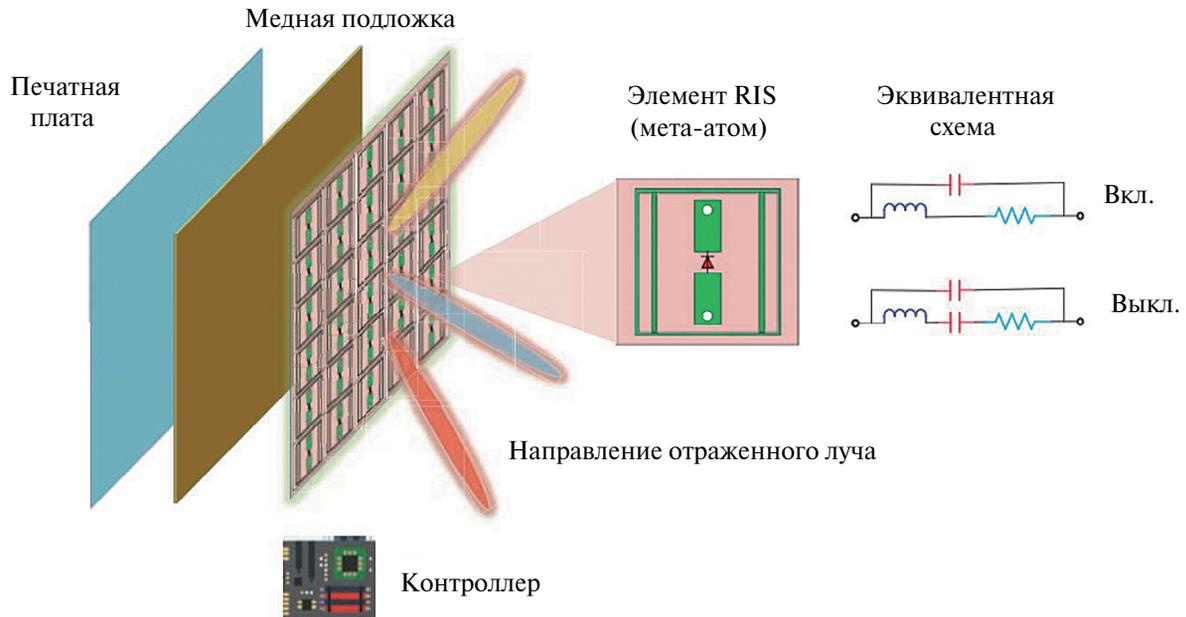


Рис. 6. Пример реализации RIS [162].

ление и являются реконфигурируемыми, а их импульсным откликом можно управлять. Для телекоммуникационных систем в основном рассматриваются активные МП [155–160, 163–166] из-за возможности частичного управления средой распространения радиоволн.

Активные МП бывают однородными (элементы поверхности управляются совместно) и неоднородными (каждый элемент поверхности может управляться независимо от других). Кроме того, существует несколько способов воздействия на элементы поверхности для управления ее характеристиками: электрический [167–169], механический (электро-механический) [170–172], оптический [173–175], термический [176], химический [177] и другие, включая комбинированные.

Пример структуры отдельного элемента вместе с реализацией управления его характеристиками также показан на рис. 6. В каждый элемент МП встроен *pin*-диод, а управляя напряжением смещения по линии DC, можно переключать его состояние между “включено” и “выключено” и создавать фазовый сдвиг в пределах π рад [178]. Таким образом, фазовыми сдвигами элементов RIS можно управлять независимо друг от друга путем установки соответствующих напряжений смещения в контроллере.

Для эффективного управления амплитудой отражения используется переменный резистор [179]. При изменении значения сопротивле-

ния в каждом элементе рассеивается требуемая часть энергии падающего сигнала, что позволяет добиться управляемой амплитуды отражения в диапазоне $[0, 1]$. Таким образом реализуется одновременное управление отклика амплитудой и фазы падающего на RIS сигнала.

7.2. Использование RIS в телекоммуникационных системах

Реконфигурируемая интеллектуальная поверхность может принимать сигналы с любого направления, к которому обращены её элементы, и настраивать картину коэффициентов отражения на элементах для переизлучения сигналов с желаемым направлением и формой луча. Каждый элемент выполняет пассивную фильтрацию входного сигнала, потенциально уменьшая амплитуду, внося задержки и/или изменяя поляризацию.

Опишем упрощенную системную модель канала связи с RIS и формулировку решаемой задачи. Рассмотрим распространение сигнала от передатчика (*Tx*) к приемнику (*Rx*), используя RIS (рис. 7) в одноантенной системе. Передаваемый сигнал x излучается и распространяется до RIS, отражается от ее поверхности и поступает в приемник.

Сигнал на входе приемника, прошедший RIS, обозначим переменной y . Траектория распространения сигнала представлена на рис. 7.

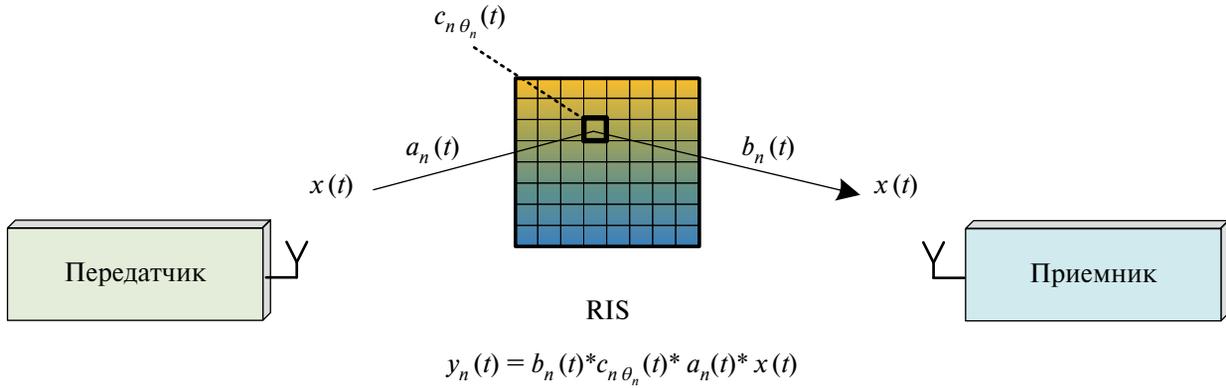


Рис. 7. Передача сигнала в канале связи с RIS.

Поверхность RIS состоит из N рассеивающих элементов. Каждый n -й элемент ($n = 1, \dots, N$) обладает собственной управляемой импульсной характеристикой $c_{n, \theta_n}(t)$, в которой подстрочный индекс θ_n обозначает переменную, отвечающую за внешнее управление импульсной характеристикой элементов RIS. Соответственно, общий импульсный отклик поверхности RIS конфигурируется набором переменных $\theta_1, \dots, \theta_N$.

Обозначим n -й элемент RIS как RIS_n . Отражение сигнала от RIS_n равносильно его прохождению через фильтр с характеристикой $c_{n, \theta_n}(t)$, которая является перенастраиваемой с помощью переменной θ_n . Примем допущение, что импульсные характеристики не изменяются в процессе передачи сигнала. Тогда принятый сигнал y_n , отраженный от RIS_n , можно описать с помощью

$$y_n(t) = b_n(t) * c_{n, \theta_n}(t) * a_n(t) * x(t),$$

где $a_n(t)$ и $b_n(t)$ – импульсные характеристики каналов $Tx \rightarrow RIS_n$ и $RIS_n \rightarrow Rx$ соответственно, $(*)$ – операция свертки. Сигнал на входе приемника является суперпозицией всех отраженных от RIS сигналов, поэтому

$$y(t) = \sum_{n=1}^N (b_n(t) * c_{n, \theta_n}(t) * a_n(t) * x(t)),$$

а общая импульсная характеристика канала передачи может быть выражена с помощью выражения

$$h_0(t) = \sum_{n=1}^N (b_n(t) * c_{n, \theta_n}(t) * a_n(t)).$$

Основная задача управляемой RIS заключается в выборе такой конфигурации θ отражающих

элементов поверхности RIS, которые обеспечат каналные коэффициенты $h_0(t)$, максимизирующие отношение сигнал/шум в точке приема.

Для управления θ необходимо передавать дополнительные служебные данные по сетевой инфраструктуре. Рассматривается два основных способа передачи служебной информации: внеполосная и внутриволновая передача. Внеполосный канал управления находится вне полезной полосы пропускания, поэтому не влияет на передачу полезных данных. В отличие от него внутриволновой канал управления потребляет часть полезной полосы пропускания, что снижает пропускную способность системы.

7.3. Перспективы RIS в 6G

Как и любая перспективная технология, концепция RIS должна обладать существенными преимуществами, чтобы она нашла свое практическое применение в 6G. Например, Massive-MIMO и mm-Wave доказали свою эффективность в 5G, поскольку первая позволяет увеличить количество одновременно обслуживаемых пользователей в несколько раз, а вторая – увеличить скорость передачи данных пользователю благодаря широкой полосе пропускания. RIS обладает привлекательными техническими характеристиками [180, 181], но вопрос ее эксплуатационного преимущества относительно конкурирующих технологий остается открытым.

Переход в ТГц-диапазон осложняется высоким затуханием радиосигнала на трассе распространения. RIS является эффективным инструментом для увеличения энергетика канала в случае отсутствия прямой радиовидимости

за счет возможности направленного переотражения сигнала от RIS в приемник (см. рис. 1). Остальные сценарии в основном предполагают использование RIS как вспомогательного элемента на трассе для частичного управления каналом распространения и увеличения энергетики [182]. Другими словами, RIS рассматривается как новая степень свободы при организации канала связи, которая может обеспечить дополнительные преимущества, но и требует решения ряда проблем: производство, управление RIS в реальном времени, увеличенная вычислительная сложность и др.

8. МНОЖЕСТВЕННЫЙ ДОСТУП И МОДУЛЯЦИЯ

Технология множественного доступа напрямую влияет на ключевые характеристики систем связи, и в настоящее время идет широкая дискуссия по выбору множественного доступа для сетей 6G. Учеными озвучена парадигма перехода от традиционных ортогональных методов множественного доступа к неортогональным NOMA (non-orthogonal multiple access), т.е. к обслуживанию нескольких пользователей в едином частотно-временном ресурсном сегменте. Это связано с огромным ростом числа сетевых устройств в беспроводных сетях, для которых невозможно организовать одновременную передачу данных в единой сети радиодоступа при ортогональном разделении каналов. Показано [183–186], что NOMA позволяет не только увеличить плотность сетевых устройств, но и увеличить спектральную эффективность многоканальной системы связи за счет дополнительного домена для мультиплексирования каналов.

8.1. Неортогональный множественный доступ

NOMA рассматривалась в качестве основного кандидата для 5G, однако так и не вошла в заключительный стандарт версии 17. Причиной этому является ряд нерешенных проблем, что ставит под сомнение коммерческую целесообразность её применения в сетях пятого поколения. Среди существенных проблем выделяют повышенную вычислительную сложность, увеличение стоимости устройств и скромный диапазон эксплуатационных сценариев, в которых NOMA обеспечит ощутимый выигрыш. Кроме того, эта технология недостаточно проработана и исследована, для того чтобы внедрить ее

в 5G на требуемом уровне. Еще одной причиной является многообразие различных схем NOMA, предложенных крупными компаниями, и их конкуренция между собой, что мешает стандартизации. Тем не менее NOMA активно рассматривается для будущей модернизации стандарта 5G (5G Beyond) с последующим включением этой технологии в 6G [187–189].

В группе NOMA можно выделить две группы подходов: разделение каналов в мощностном домене Power Domain–NOMA (PD–NOMA) [190] и в кодовом домене Code Domain–NOMA (CD–NOMA) [191–193], которые имеют свои преимущества и недостатки. CD–NOMA объединяет в себе сразу несколько подходов: LDS (low-density signature) [194], LDS–OFDM [195], SCMA (sparse code multiple access) [196], PDMA (pattern division multiple access) [197] и др.

I. Ключевая идея PD–NOMA заключается в разделении пользовательских каналов по мощности в едином частотно-временном ресурсном сегменте (например, OFDM–поднесущей) [183–190], основанном на принципе суперпозиционного кодирования [198] для формирования группового сигнала. Согласно PD–NOMA одновременно и в одном частотном подканале можно передать сигналы для двух и более пользователей с отличной друг от друга мощностью. То есть вводится контролируемая межканальная интерференция, а уплотнение каналов становится неортогональным. Мощностной домен является дополнительной степенью свободы при мультиплексировании (наряду с частотным, временным, пространственным и другими доменами), что увеличивает гибкость многоканальной системы.

Коротко рассмотрим процедуру формирования сигнала. Основная задача заключается в корректном распределении доступной мощности между пользователями. Групповой сигнал PD–NOMA формируется с помощью суперпозиции сигналов пользователей с разными весовыми мощностными коэффициентами. Распределение доступного мощностного ресурса осуществляется в соответствии с качеством канала передачи пользователей: пользователь с лучшим качеством канала передачи получит наименьшую долю мощности, и наоборот. Межканальная интерференция оказывает существенное влияние на процедуры физического уровня, поэтому для поддержки PD–NOMA действующий стек протоколов должен быть существенно

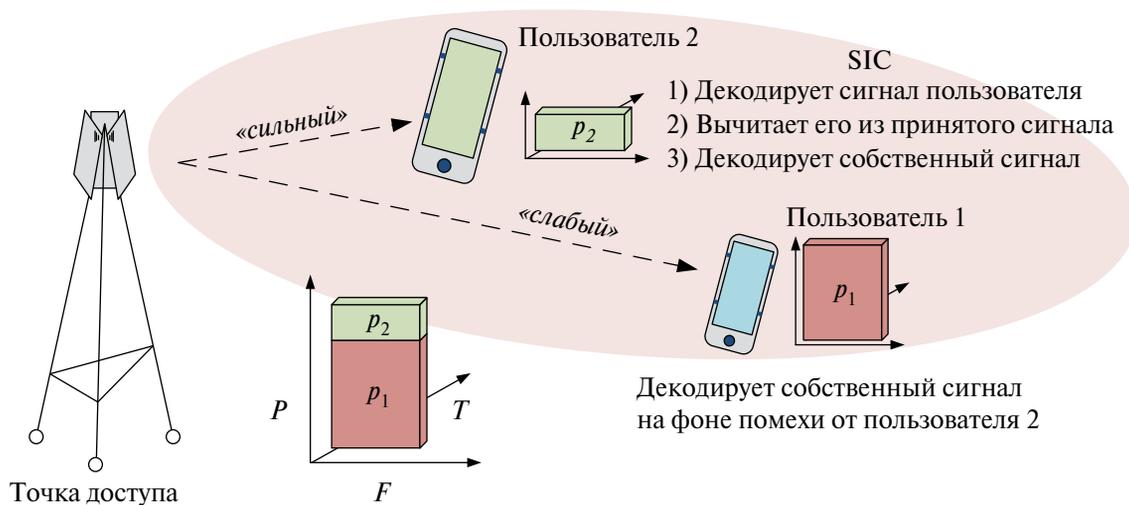


Рис. 8. Пример PD-NOMA для двух пользователей.

переработан. Кроме того, дополнительная степень свободы кратно усложняет планирование сетевых ресурсов и это должно быть оптимизировано в дальнейшем.

Для обработки группового сигнала на приемной стороне используется метод последовательного подавления помех SIC (Successive Interference Cancellation). Подход SIC заключается в последовательном декодировании пользовательских каналов в порядке уменьшения их мощности. Для того чтобы декодировать сигнал пользователя с наименьшей мощностью, необходимо предварительно декодировать сигналы остальных пользователей с большей мощностью. Подобное каскадное декодирование не только обладает повышенной вычислительной сложностью, но и является причиной накопления ошибок: при неверной демодуляции «сильных» сигналов существенно увеличивается вероятность неправильной демодуляции следующих по уровню мощности сигналов.

PD-NOMA может использоваться как в прямом, так и в обратном канале. Однако типовым сценарием для PD-NOMA является мультиплексирование пользователя с высоким и низким качеством канала передачи в прямом канале (рис. 8).

PD-NOMA может работать вместе с другими технологиями множественного доступа, такими как OFDMA, SDMA и др. Например, предложена одновременная передача данных на одной ортогональной поднесущей с помощью одновре-

менного использования PD-NOMA и OFDMA для систем LTE-A [199]. Другим применением PD-NOMA является мультиплексирование с посылным разделением [200], включенное в стандарт цифрового телевидения для одновременной передачи нескольких потоков данных.

II. К группе CD-NOMA относится несколько методов, но наибольшее внимание получила технология множественного доступа на основе разреженных кодов SCMA, предложенная в 2013 г. для организации физического уровня 5G [196]. В SCMA также реализуется одновременная передача сигналов несколькими абонентами в едином частотно-временном ресурсе. Отличие от PD-NOMA заключается в использовании более сложных подходов к формированию и обработке сигналов [201, 202]. Показано, что среди методов CD-NOMA именно SCMA обладает большей эффективностью и является одним из наиболее вероятных кандидатов для применения в 6G [203].

Обычно в работах рассматриваются системы связи с SCMA-символами, которые передаются на поднесущих OFDMA, однако могут использоваться и другие ортогональные ресурсные элементы. Каждый абонент передает свои символы на нескольких d_j поднесущих, т.е. использует принципы частотного расширения. На каждой поднесущей расположены символы нескольких d_k абонентов, что делает систему перегруженной, а количество абонентов J может превосходить число поднесущих K . Принцип распределения пользователей можно проиллюстрировать с помощью фактор-графа (рис. 9а).

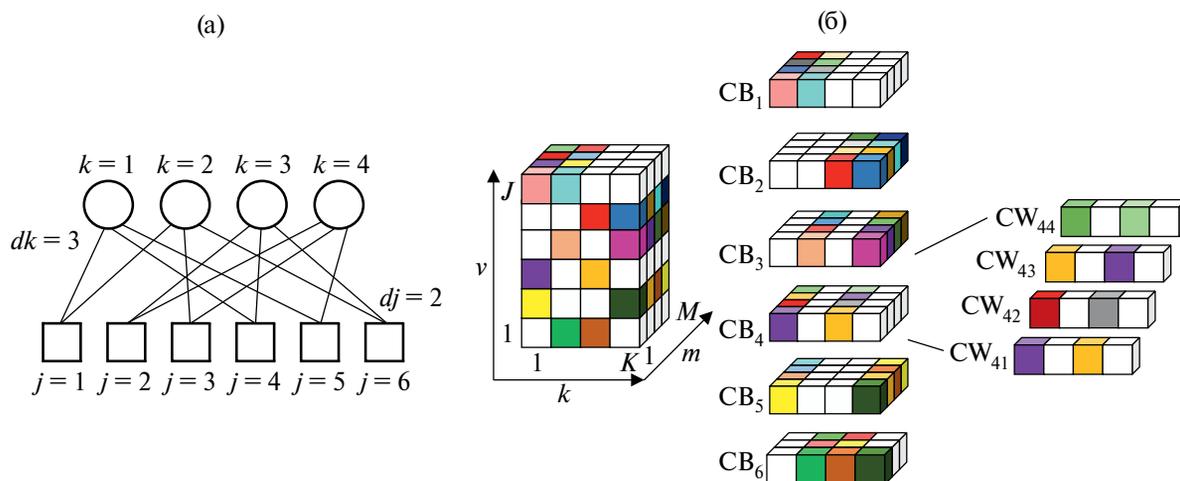


Рис. 9. Фактор-граф SCMA: круги – поднесущие, квадраты – условный абонент, линии – связь между ними (а); кодовые блоки (CB) и кодовая книга (CW) SCMA для $K=4, J=6, dk=3, dj=2$ (б).

Символы абонентов называются кодовыми словами и являются разреженными комплексными векторами – лишь dj из K его элементов отличны от нуля. Кодовые слова хранятся в кодовых книгах – трехмерных матрицах, которые формируют алфавит возможных передаваемых символов (рис. 9б).

Итоговые символы формируются путем суперпозиции всех выбранных кодовых слов. Обратим внимание, что SCMA объединяет модуляцию и множественный доступ в одну процедуру, поскольку комплексные огибающие формируются на этапе выбора и суперпозиции кодовых слов. Для детектирования SCMA-символов используют различные версии алгоритма передачи сообщений MPA (message passing algorithm), схожего с алгоритмами декодирования низкоплотных LDPC (low density parity-check) кодов. SCMA работает совместно с OFDM [202], MIMO [204] и другими технологиями физического уровня. Метод SCMA демонстрирует лучшую помехоустойчивость и потенциально способен обеспечить большую пропускную способность по сравнению с PD-NOMA [205], однако обладает гораздо более высокой вычислительной сложностью алгоритмов декодирования. Количество сетевых слоев SCMA превосходит количество физических ортогональных ресурсов, поэтому в сценарии mMTC может быть обеспечено большое число подключений и меньшая задержка [203].

Тематика SCMA имеет ряд не до конца решенных проблем. Эффективность систем связи с этим методом зависит от структуры кодовых

книг. Несмотря на то, что вышло большое число работ по тематике их формирования [206], разработка кодовых книг для сложных каналов с разными требованиями к скорости и помехоустойчивости до сих пор является актуальной задачей. Также вызывает интерес работа SCMA в условиях неидеальной синхронизации и ошибки оценки параметров канала [207]. Выходит большое число статей, посвященных совместной работе SCMA с другими технологиями: MIMO [208], RIS [209], машинным обучением [210] и др. Основной проблемой SCMA, из-за которой эта технология до сих пор не применяется на практике, является высокая вычислительная сложность алгоритма декодирования. Несмотря на то, что вышло множество работ, описывающих пути упрощения MPA (и его вариаций), можно констатировать, что проблема далека от решения, поскольку базовая идея MPA – пересчет вероятностей при обходе графа в течение ряда итераций – достаточно сложна. Однако, с одной стороны, вычислительная техника развивается и может поддерживать все более сложные алгоритмы, а с другой – существуют надежды на применение методов машинного обучения, способных повысить эффективность и снизить сложность MPA [210].

8.2. Метод множественного доступа с разделением по скорости RSMA

В работах [211–213] и др. предложен новый метод множественного доступа с разделением по скорости RSMA (rate-splitting multiple access). RSMA объединяет подходы OMA, NOMA и

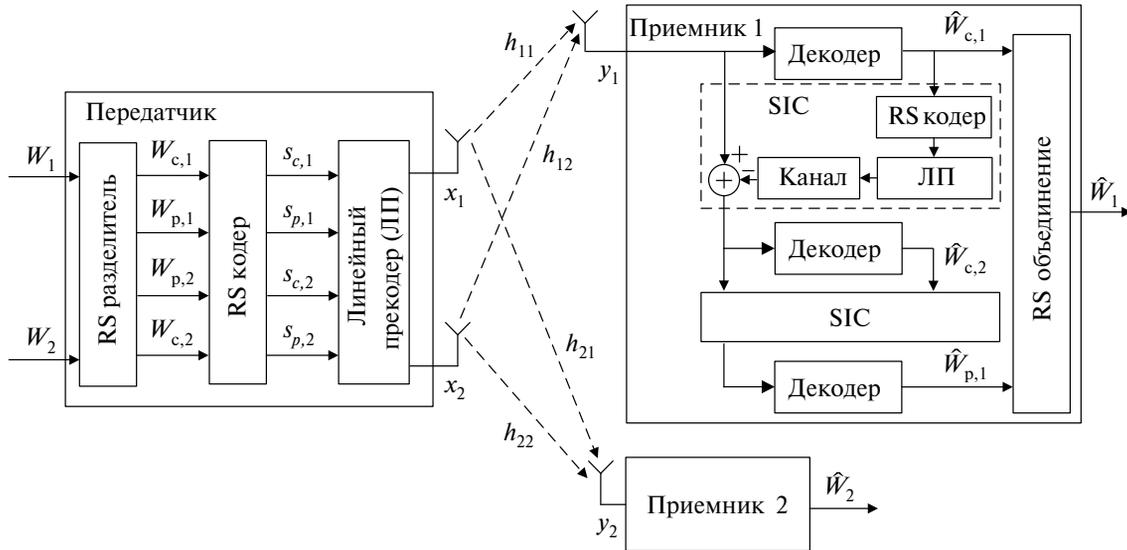


Рис. 10. Обобщенная схема канала связи с RSMA на основе линейного прекодирования для двух абонентов.

SDMA: в зависимости от состояния канала по-разному работает с межпользовательской интерференцией: декодирует ее как NOMA, рассматривает как помехи в соответствии с подходами SDMA, или вовсе ортогонализирует сигналы как OMA. Обобщенная схема канала связи с RSMA и линейным прекодированием изображена на рис. 10.

В этой схеме для организации пространственного разделения используется линейное прекодирование [114], которое может быть заменено на другие методы SDMA без изменения общего принципа.

Блок RS-разделитель делит сообщения абонентов на две части: приватные $W_{p,k}$ (предназначенные только k -му абоненту) и общие $W_{c,k}$ (получаемые обоими абонентами), $k = 1, 2$ (для упрощения рассмотрим случай, когда мультиплексируется два абонента). RS кодер отображает сообщения в символы модуляции $W_{c,1} \rightarrow S_{c,1}$, $W_{c,2} \rightarrow S_{c,2}$, $W_{p,1} \rightarrow S_{p,1}$ и $W_{p,2} \rightarrow S_{p,2}$. Линейный прекодер, используя матрицу предобработки, формирует сигналы, предназначенные каждому абоненту, при этом

$$X_1 = P_{c,1}S_{c,1} + P_{p,1}S_{p,1} \text{ и } X_2 = P_{c,2}S_{c,2} + P_{c,2}S_{p,2},$$

где $P_{c,1}$, $P_{c,2}$, $P_{p,1}$, $P_{p,2}$ — прекодеры общих и приватных частей. Приемник содержит пространственный декодер, основанный на умножении сигнала на матрицу постобработки и последовательность блоков SIC.

При неидеальной оценке параметров канала распространения радиоволн (в частности, канальной матрицы) ортогональность пространственных абонентских каналов нарушается, что ведет к созданию межпользовательских помех. RSMA, управляя долями парциальных мощностей $p_{c,1}$, $p_{c,2}$, $p_{p,1}$ и $p_{p,2}$, а также процедурами прекодирования и постобработки, совмещает оба подхода — декодирования помех и их рассмотрения в качестве шума. Это дает дополнительную степень свободы и увеличивает пропускную способность систем связи [214].

Несмотря на то что основы подхода RSMA были описаны давно [215], интерес к его практической реализации возник только в последние годы на фоне распространения многопользовательских многоантенных систем [216]. Однако это направление только начинает развиваться и многие вопросы до сих пор не решены, например, такие как реализация на основе CD-NOMA, оценка целесообразности использования RSMA в реальных условиях эксплуатации и т.д.

8.3. Ортогональный множественный доступ и дальнейшее развитие

Среди перспективных подходов развития ортогонального множественного доступа можно отметить технологию мультиплексирования на основе орбитального углового момента OAM-MDM (orbital angular momentum-based mode-division multiplexing) для передачи в миллиметровом диапазоне частот [217]. OAM использует

электромагнитные свойства (направления фазового фронта) электромагнитных волн и позволяет их ортогонально мультиплексировать в зоне прямой видимости на близком расстоянии от передатчика [217, 218].

Среди перспективных подходов модуляции нужно упомянуть индексную модуляцию IM (index modulation), рассматриваемую для 5G [219–221]. Согласно принципам IM биты информации отображаются не только в комплексные амплитуды (QAM-символы), но и в индекс доступного для передачи ресурса. В качестве ресурса могут выступать пространственные каналы, в этом случае IM называется пространственной модуляцией SM (spatial modulation) [219]. Также может использоваться номер OFDM поднесущей (случай OFDM-IM) [219].

Можно предположить, что разработчики стандарта 6G примут решение развивать текущий подход ортогонального множественного доступа. В этом случае можно прогнозировать применение более совершенных методов фильтрации для снижения ПИК-фактора (отношение максимальной амплитуды сигнала к его среднеквадратичному значению) и уровня внеполосного излучения [222, 223] или замену OFDM на FBMC (filterbank multicarrier) [224], или другие модификации OFDM [225]. Также при сохранении подходов OMA будет повышен индекс используемой QAM модуляции – от 256 в 5G NR до, по крайней мере, 1024 в 6G.

Предлагаемые еще для 5G, эти методы до сих пор не вошли в стандарт, однако в большом числе публикаций [189, 191, 203, 214] прогнозируется их включение в 6G. Вопрос о выборе конкретной технологии доступа до сих пор остается открытым. Однако отметим, что RSMA является обобщением OMA и NOMA для многоантенных систем и подразумевает реализацию на основе PD или CD-NOMA. Вместе с тем, это самый новый и наименее изученный к настоящему моменту метод, результаты исследования которого опубликованы всего несколькими коллективами [213, 214].

9. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЕ КОДИРОВАНИЕ

Помехоустойчивые коды используются во всех современных системах цифровой связи. Вместе с модуляцией и множественным доступом они определяют структуру и основные параметры физического уровня: длину пакетов,

структуру кадра, скорость передачи и вероятность битовой ошибки. Именно применение помехоустойчивых кодов в комплексе с адаптивной модуляцией позволяет вести передачу в условиях сложных каналов с вероятностью ошибки, не превышающей заданную.

Теорема Шеннона определяет предельную пропускную способность канала связи в зависимости от отношения сигнал-шум на входе приемника. Шеннон в своих работах показал, что обеспечить стремящуюся к этому пределу скорость передачи возможно с помощью применения помехоустойчивых кодов большой длины. К настоящему времени существует три класса наиболее эффективных кодов: турбокоды, LDPC и полярные коды.

Турбокоды основаны на параллельном использовании нескольких простых (например, сверточных) кодов совместно с перемежителем, благодаря чему увеличивается длина слов, без существенного увеличения вычислительной сложности [226]. Турбокоды применяются в системах связи четвертого поколения 4G LTE [227].

Блочные LDPC-коды используют разреженные матрицы больших размеров, что также приводит к удлинению кодовых слов [228]. Свойство разреженности, с одной стороны, позволяет хранить в памяти только положения ненулевых элементов, а с другой, реализовать эффективные алгоритмы декодирования с низкой сложностью. Благодаря своей высокой эффективности LDPC нашли применение в 5G NR для передачи в каналах пользовательского трафика [229].

Полярные коды – самый новый из перечисленных классов кодов, предложенный в 2008 г. [230]. Это несистематические блочные коды, основанные на «поляризации» канала – разделении битовых потоков на наиболее и наименее помехоустойчивые. Ненадежные каналы «замораживаются», что позволяет адаптивно менять исправляющую способность и скорость кодирования. Как и LDPC, полярные коды применяются в 5G NR, но уже для передачи служебной информации и в сценариях, где нужно обеспечить малую задержку [231].

Все три перечисленных класса кодов являются кандидатами на применение в 6G. Для будущих кодов выдвигается ряд требований, основные из которых – высокая исправляющая способность, низкая задержка и приемлемая вычислительная сложность [5]. Известно, что более эффек-

тивными являются коды большой длины [232], однако накопление большого пакета битов и его обработка приводит к появлению дополнительной задержки. Короткие коды лишены этой проблемы, однако обладают худшей исправляющей способностью [233]. В случае если они не смогут исправить появившиеся при демодуляции сигналов ошибки, приемник будет вынужден отправить запрос на повторную передачу пакета. Это, во-первых, вызовет рост задержки из-за ожидания пакета и его обработки. Во-вторых, потребует энергии на отправку сигнала запроса приемником, что является проблемой для устройств интернета вещей с низким энергопотреблением. Таким образом, проблема оптимизации параметров кода для каналов с малыми задержками становится сложной оптимизационной задачей, которую предлагается решать с помощью методов МО [234]. Кроме обеспечения низкой задержки, повышаются требования к надежности и значению блоковой вероятности ошибок BLER (block error rate): 10^{-2} в 4G LTE, 10^{-5} в 5G NR, 10^{-7} ... 10^{-9} в 6G (прогноз).

Опубликовано большое число работ по вопросам развития трех описанных выше семейств кодов, рассмотрим наиболее интересные из них. Развитие турбокодов описано в [235]. Следует упомянуть модель декодирования TurboNet [236], в которой традиционный метод оценки апостериорного максимума комбинируется с глубокими нейронными сетями. Алгоритм TurboNet имеет лучшую исправляющую способность и меньшую вычислительную сложность по сравнению с традиционными алгоритмами турбодекодера и содержит значительно меньше параметров по сравнению с другими декодерами, основанными на нейронных сетях [237]. Главной особенностью TurboNet является способность обучаться и адаптироваться под различные отношения сигнал/шум [238].

Другой перспективной темой в области турбокодов являются методы автокодирования, также основанные на нейронных сетях [239, 240]. Этот метод позволяет адаптировать процедуры кодирования под условия сложных каналов с неканоническими моделями ошибок [239]. Демонстрируется положительный результат для умеренных длин кода [239].

Коды LDPC показали высокую исправляющую способность и являются основным средством исправления ошибок в каналах передачи пользовательского трафика 5G NR [227].

Их эффективность обусловлена большой длиной формируемых кодовых слов, однако из этого факта вытекают и их недостатки. Во-первых, длинные кодовые слова невозможно использовать для передачи коротких пакетов. Во-вторых, при обработке больших пакетов невозможно обеспечить низкую сетевую задержку. По этой причине применение LDPC-кодов ограничено в сервисах URLLC и будущих схожих приложениях 6G. В настоящее время в ряде работ описано улучшение низкоплотностных кодов и их применение в специфических задачах. Например, в [241] рассматривается применение LDPC-кодов в системах с кодовой модуляцией с чередованием битов с итеративным декодированием BICM-ID (bit-interleaved coded modulation with iterative demapping and decoding). В [242] для схожего применения предлагается использовать коды с нерегулярными протографами. Активно развивается направление QLDPC (quantum LDPC) для квантовых вычислений [243]. Как и в других приложениях, для LDPC-кодов рассматривается применение МО и нейронных сетей [244].

Среди всех помехоустойчивых кодов наибольшее развитие в последнее десятилетие получили полярные коды [230]. Это связано с простотой алгоритмов декодирования и высокой эффективностью. Вместе с тем они проигрывают в исправляющей способности LDPC-кодам при передаче пакетов большой длины. Поэтому в 5G они получили применение для сервисов URLLC с малой задержкой, которой можно добиться, передавая небольшие пакеты. Схожие применения для полярных кодов прогнозируются и в 6G. Полярные коды рассмотрены в большом числе работ, описывающих улучшение алгоритмов декодирования [245], реализацию совместно со сверточными кодами и NOMA [246], работу в каналах со случайным доступом [247]. Существуют исследования, рассматривающие увеличение длин кодовых слов [248].

В сам принцип функционирования помехоустойчивых кодов может внести изменения использование технологий NOMA и RSMA (см. разд. 7). В этом случае, при одновременной передаче символов нескольких абонентов, вносимая избыточность может формироваться сразу для нескольких абонентов [246, 249]. Такой подход добавляет гибкости в процедуры кодирования и модуляции, за счет чего может быть увеличена спектральная эффективность [250]. Кроме того, появились новые перспективные классы кодов,

например, спинальные [251] и низкоплотностные решетчатые [252]. Отметим, что для всех классов кодов стоят проблемы аппаратной реализации алгоритмов декодирования [253], а результаты, демонстрирующие эффективность, приводятся для идеализированных моделей. Как и отмечалось выше, большую роль начинают играть методы, основанные на нейронных сетях и МО [254, 255].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящее время исследования в области 6G находятся на начальной стадии. Несмотря на это, уже сейчас можно выявить основные направления и перспективные технологии, благодаря которым можно осуществить технический прорыв и перейти к новому поколению мобильных сетей. В работе представлен обзор опубликованных научных работ по этой тематике и проанализировано современное состояние направления 6G.

Важнейшее место во всех аспектах работы будущих систем связи будет занимать искусственный интеллект. Исключением не является и физический уровень, где с помощью машинного обучения предлагается решать проблемы оценки параметров канала, управления многоантенными системами, исправления ошибок с помощью помехоустойчивых кодов и др. [72, 73, 76, 78]. Явно прослеживается тенденция перехода в диапазоны более высоких частот, вплоть до 100 ГГц и выше. Это позволит расширить полосы используемых частот и тем самым обеспечить рост пропускной способности [5, 16, 108]. Многоантенные системы ММО, как и в 5G, в 6G будут являться основным источником роста спектральной эффективности за счет адаптивного диаграммообразования и пространственного разделения абонентов [116, 118]. Связанная с ММО новая технология RIS позволит управлять самим каналом распространения радиоволн и увеличит отношение сигнал-шум на входе приемника [149, 162, 174]. В области множественного доступа прогнозируется изменение концепции формирования ортогональных каналов на неортогональную передачу сигналов абонентами. Это можно реализовать с помощью подходов PD, CD-NOMA и RSMA, что повысит эффективность использования частотно-временных ресурсов [189, 203, 214]. Совместно со схемами множественного доступа и модуляции

будет применяться помехоустойчивое кодирование – вероятнее всего, это будут модифицированные LDPC и полярные коды [245, 246].

Технический облик 6G будет проясняться с каждым годом и очевидно, что не все описанные в обзоре технологии будут внедрены на практике. Однако потенциальная эффективность рассмотренных методов позволяет применить их в смежных областях радиотехники и связи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-10148).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Minimum Requirements Related to Technical Performance for IMT-2020 Radio Interface (s). Report ITU-R M2410-0. Geneva: Radicommun. Sector of Int. Telecommun. Union, 2017. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2410-2017-PDF-E.pdf.
2. 3GPP TR 21.915 V0.0. 1. Release 15 Description; Summary of Rel-15 Work Items. Techn. Report. Sophia Antipolis: 3rd Generation Partnership Project, 2018. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=33893>.
3. *Mahmoud H.H.H., Amer A.A., Ismail T.* // Trans. Emerging Telecommun. Technol. 2021. V. 32. № 4. P. 4233.
4. *Imoize A. L., Adedeji O., Tandiya N., Shetty S.* // Sensors. 2021. V. 21. № 5. P. 1709.
5. *Yang P., Xiao Y., Xiao M., Li S.* // IEEE Network. 2019. V. 33. № 4. P. 70.
6. *Zhang Z., Xiao Y., Ma Z., et al.* // IEEE Vehicular Technology Magaz. 2019. V. 14. № 3. P. 28.
7. *Gui G., Liu M., Tang F. et al.* // IEEE Wireless Commun. 2020. V. 27. № 5. P. 126.
8. *Chowdhury M.Z., Shahjalal M., Ahmed S., Jang Y.M.* // IEEE Open J. Commun. Soc. 2020. V. 1. P. 957.
9. *Tataria H., Shafi M., Molisch A.F. et al.* // Proc. IEEE. 2021. V. 109. № 7. P. 1166.
10. *Mourad A., Yang R., Lehne P.H., Oliva A.D.L.* // Electronics. 2020. V. 9. № 2. P. 351.
11. *Rajoria S., Mishra K.* // Wireless Networks. 2022. V. 28. № 7. P. 2901.
12. *Ray P. P.* // J. Systems Architecture. 2021. V. 118. Article No. 102180.

13. *Huang T., Yang W.* // IEEE Access. 2019. V. 7. Article No. 175758.
14. *Saad W., Bennis M., Chen M.* // IEEE Network. 2019. V. 34. № 3. P. 134.
15. *Jain P., Gupta A., Kumar N.* // Phys. Commun. 2022. V. 55. Article No. 101917.
16. *Lu Y., Zheng X.* // J. Industrial Inform. Integration. 2020. V. 19. Article No. 100158.
17. *Yap K.Y., Chin H.H., Klemeš J.J.* // Renewable and Sustainable Energy Rev. 2022. V. 167. Article No. 112722.
18. *Liu F., Cui Y., Masouros C. et al.* // IEEE J. Selected Areas in Commun. 2022. V. 40. № 6. P. 1728.
19. *Ravi D.K., Chavhan S.* // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. V. 54. № 3. Article No. 102666.
20. *De Alwis C., Kalla A., Pham V.Q., Kumar P.* // IEEE Open J. Commun. Soc. 2021. V. 2. P. 836.
21. *Letaief K.B., Chen W., Shi Y. et al.* // IEEE Commun. Magaz. 2019. V. 57. № 8. P. 84.
22. *Jiang W., Han B., Habibi M.A., Schotten H.D.* // IEEE Open J. Commun. Soc. 2021. V. 2. P. 334.
23. *Qadir Z., Le K., Saeed N., Munowar H.S.* // ICT Express. 2023. V. 9. № 3. P. 296.
24. *Giordani M., Polese M., Mezzavilla M. et al.* // IEEE Commun. Magaz. 2020. V. 58. № 3. P. 55.
25. *De Alwis C., Kumar P., Pham Q.-V. et al.* // ICT Express. 2023. V. 9. № 4. P. 525.
26. *Hakeem S.A.A., Hussein H.H., Kim H.W.* // J. King Saud Univ.-Computer and Inform. Sci. 2022. V. 34. № 1. P. 2419.
27. *Liu G., Huang Y., Li N., Dong J.* // China Commun. 2020. V. 17. № 9. P. 92.
28. *Dang S., Amin O., Shihada B., Alouini M.* // Nature Electronics. 2020. V. 3. № 1. P. 20.
29. *Naser S., Bariah L., Muhaidat S. et al.* Zero-Energy Devices Empowered 6G Networks: Opportunities, Key Technologies, and Challenges. TechRxiv Preprint. N.Y.: IEEE, 2022. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.21558030.v2>. 2022
30. *Ponnimbaduge Perera T.D., Jayakody, D.N.K., Sharma S.K. et al.* // IEEE Commun. Surv. Tutor. 2018. V. 20. P. 264.
31. *Manzalini A.* // Quantum Rep. 2020. V. 2. № 1. P. 221.
32. *Gupta R., Nair A., Tanwar S., Kumar N.* // IET Commun. 2021. V.15. № 10. P. 1352.
33. *Kohli V., Tripathi U., Chamola V., Rout B. K.* // Microprocessors and Microsystems. 2022. V. 88. № 15. Article No. 104392.
34. *Miraz M.H., Ali M., Excell P., Picking R.* // Internet Technol. Applications (ITA). Wrexham. 08-11 Sep. N.Y.: IEEE, 2015. P. 219.
35. IMT Traffic Estimates for the Years 2020 to 2030. Report ITU-R M2370-0. Geneva: Radiocomm. Sector of Int. Telecommun. Union, 2015. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2370-2015-PDF-E.pdf
36. *Shah A.F.M.S.* // 12th Annual Comp. and Com. Workshop and Conf. (CCWC): Las Vegas. 26–29 Jan. 2022. N.Y.: IEEE, 2022. P. 1117.
37. *Ghildiyal Y., Singh R., Alkhayyat A., Gehito A.* // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2023. V. 56. № 4. Article No. 103047.
38. 6G Enabling Technologies. New Dimensions to Wireless Communication / Eds N. A. Mihovska, A. R. Prasad and R. Prasad. Gistrup: River Publ., 2023. P. 273.
39. *Ziegler V., Viswanathan H., Flinck H. et al.* // IEEE Access. 2020. V. 8. Article No. 173508.
40. *Shen L.-H., Feng K.-T., Hanzo L.* // ACM Computing Surveys. 2023. V. 55. № 11. Article No. 235
41. *Wang C. X., Xiaohu Y., Gao X., Zhu X.* // IEEE Commun. Surveys & Tutorials. 2023. V. 25. № 2. P.904.
42. *Hokazono Y., Kohara H., Kishiyama Y., Asai T.* // IEEE Wireless Commun. and Networking Conf. (WCNC). Austin 10–13 Apr. 2022. N.Y.: IEEE, 2022. P. 138.
43. *Juneja S., Gahalan M., Dhiman G., Kautish S.* // Sci. Programming. 2021. V. 2021. Article ID 9101782.
44. *An X., Wu J., Tong W. et al.* // Joint Euro. Conf. on Network and Commun. & 6G Summit (EuCNC/6G Summit). Porto. 08–11 Jun. 2021. N.Y.: IEEE, 2021. P. 592.
45. *Wang D., Giordani M., Alouini M., Zorzi M.* // IEEE Vehicular Technol. Magaz. 2021. V. 16. № 3. P. 99.
46. *Shi Y., Zhou Y., Wen D. et al.* // arXiv preprint arXiv:2303.10920.
47. *Liu G., Cai F., Qi H., Zhu J.* // Ocean & Coastal Management. 2019. V. 177. № 1. P. 166.
48. Study on Enhancement of Network Slicing. Technical Report 3GPP TR 23.740 V0.7.0. Sophia Antipolis Cedex: 3rd Generation Partnership Project, 2018.
49. Software-Defined Networking: The New Norm for Networks. Report. Palo Alto: Open Networking Foundation, 2012. <https://opennetworking.org/sdn-resources/whitepapers/software-defined-networking-the-new-norm-for-networks/>
50. Network Functions Virtualization (NFV); Management and Orchestration. Erop. Telecommun. Standard Inst. Standard GSNFV-MAN 001-V1.1.1. Sophia Antipolis Cedex: ETSI; 2014. 184 p.
51. New WID on Autonomous Network Levels. Revision of S5-215165In: 3GPP TSG-SA5 Online Meeting 88e:

- May 25 – Jun 3; Sophia Antipolis: 3rd Generation Partnership Project, 2020.
52. Huawei. SP-180899: New WID on Intent Driven Management Service for Mobile Networks. 3GPP TSG-SA5 Meeting 81: Gold Coast. Sep 12–14. Sophia Antipolis: 3rd Generation Partnership Project, 2018.
 53. Zero-Touch Network and Service Management (ZSM); Reference Architecture Erop. Telecommun. Standard Inst. standard GS ZSM 002 V1.1.1 Sophia Antipolis Cedex: ETSI; 2019.
 54. *Wypiór D., Klinkowski M., Michalski I.* // Appl. Sci. 2022. V. 12. № 1. P. 408.
 55. *Liu G., Huang Y., Li N. et al.* // China Commun. 2020. V. 17. № 9. P. 92.
 56. *Wang Z., Du Y., Wei K. et al.* // Sci. China Inform. Sci. 2022. V. 65. № 5. Article No. 151301.
 57. *Kumar J., Samriya J.K., Bolanowski M. et al.* // First Int. Conf. ICACIS-2022, Virtual Event, Oct 20–21, 2022. P. 1.
 58. *Li R., Toy M., Trossen D. et al.* // Focus Group Technologies on Network 2030. FG-NET. Geneva: ITU, 05 Jul. 2019.
 59. *Weissberger A.* ITU-R: Future Technology Trends for the Evolution of IMT Towards 2030 and Beyond (Including 6G) //IEEE Commun. Soc. Technol. Blog. N.Y.: IEEE, 2020. <https://techblog.comsoc.org/2020/10/16/itu-r-future-technology-trends-forthe-evolution-of-imt-towards-2030-and-beyond-including-6g/>
 60. *Wang W., Lu G., Chen X.* // ZTE Tech J. 2020. V. 26. № 3. P. 9.
 61. Study on New Radio Access Technology; Radio Access Architecture and Interfaces. Technical Report 3GPP TR 38.801 V0.0.1. Sophia Antipolis: 3rd Generation Partnership Project, 2018.
 62. *Liu G., Li N., Deng J. et al.* // Engineering. 2022. V. 8. P. 42.
 63. *Zhou L., Chen X.* // Proc. 5th Int. Conf. on Computer and Commun. (ICCC). Chengdu. Dec. 6–9 2019. N.Y.: IEEE, 2019. P. 1103.
 64. *Dong R., She C., Hardjawana W. et al.* // IEEE Trans. 2019. V. WC-18. № 10. P. 4692.
 65. *Liu C., Lu L., Wang S., Hu Y.* // Mobile Commun. 2020. V. 44. № 6. P. 116.
 66. *Khan L.U., Saad W.* // IEEE Commun. Magaz. 2022. V. 60. № 1. P. 74.
 67. *Sun W., Zhang H., Wang R., Zhang Y.* // IEEE Trans. 2020. V. VT-69. № 10. P. 12240.
 68. *Hewa T., Gür G., Kalla A. et al.* // Proc. 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT). 17–29 Mar. 2020. Levi. N.Y.: IEEE, 2020. Article No. 9083784.
 69. *Maksymyuk T., Gazda J., Volosin M. et al.* // IEEE Commun. Magazine. 2020. V. 58. № 9. P. 86.
 70. *Бринк Х., Ричардс Д., Февееролф М.* Машинное обучение. СПб: ИД “Питер”, 2017.
 71. *Флах П.* Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. М.: ДМК ПРЕСС, 2015.
 72. *Ali S., Saad W., Rajatheva N., Chang K.* // arXiv:2004.13875.73.
 73. *Du J., Jiang C., Wang J. et al.* // IEEE Vehicular Technol. Magaz. 2020. P. 15. № 4. P. 122.
 74. *Gündüz D., De Kerret P., Slidiroopoulos N. D. et al.* // IEEE J. Selected Areas in Commun. 2019. V. 37. № 10. P. 2184.
 75. *Nessa A., Adhikari B., Hussain F., Fernando X.N.* // IEEE Access. 2020. V. 8. Article No. 214945.
 76. *El Boudani B., Kanaris L., Kokkinis A. et al.* // Sensors. 2020. V. 20. № 19. P. 5495.
 77. *Ye H., Li G., Juang B.H.* // IEEE Wireless Commun. Lett. 2017. V. 7. № 1. P. 114.
 78. *Wen C., Shih W., Jin S.* // IEEE Wireless Commun. Lett. 2018. V. 7. № 5. P. 748.
 79. *Huang H., Song Y., Yang J. et al.* // IEEE Trans. 2019. V. VT-68. № 3. P. 3027.
 80. *Sanguinetti L., Zappone A., Debbah M.* // 252 nd Asilomar Conf. on Signals, Systems, and Computers. N.Y.: IEEE, 2018. P. 1257.
 81. *Huang H., Yang J., Song Y. et al.* // IEEE Trans. 2018. V. VT-67. № 9. P. 8549.
 82. *Chun C. J., Kang J. M., Kim I. M.* // IEEE Wireless Commun. Lett. 2019. V. 8. № 4. P. 1228.
 83. *Chen M., Semiari O., Saad W. et al.* // IEEE Trans. 2019. V. WC-19. № 1. P. 177.
 84. *Ali S., Rajatheva N., Saad W.* // IEEE Commun. Magaz. 2019. V. 57. № 3. P. 97.
 85. *Ali S., Ferdowsi A., Saad W. et al.* // Globecom Workshops (GC Wkshps). Abu Dhabi 09–13 Dec. 2018. N.Y.: IEEE, 2018. Article No. 8644350.
 86. *Ohtsuki T.* // IEICE Trans. 2023. V. COM-106. № 2. P. 75.
 87. User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception; Pt 1: Range 1 Standalone (Release 18). Technical Report 3GPP TS 38.101-1 V0.0.1 Sophia Antipolis: 3rd Generation Partnership Project, 2023. 11 p.
 88. *Ahmad I., Rodriguez F., Huusko J., Seppanen K.* // Electronics. 2023. V. 12. № 6. P. 1472.
 89. *Rappaport T.S., Heath R.W., Daniels R.C., Murdock J.N.* Millimeter Wave Wireless Communications. Hoboken: Prentice Hall, 2015.
 90. *Xing Y., Rappaport T.S.* // Global Commun. Conf. Abu Dhabi. 09–13 Dec. 2018. N.Y.: IEEE, 2018. Article No. 8647921.
 91. *Liebe H.J., Manabe T., Hufford G.A.* // IEEE Trans. 1989. V. AP-37. № 12. P. 1612.

92. Yang Y., Mandehgar M., Grischkowsky D. // Opt. Express. 2014. V. 22. № 4. P. 4388.
93. Ma J., Adelberg J., Shrestha R. et al. // J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. 2018. V. 39. № 6. P. 505.
94. Ma J., Shrestha R., Moeller L., Mittleman D.M. // APL Photonics. 2018. V. 3. № 5. Article No. 051601.
95. Rappaport T. S., Xing Y., Kanhere Q. et al. // IEEE Access. 2019. V. 7. P. 78729.
96. Harvey J., Steer M. B., Rappaport T. S. // IEEE Access. 2019. V. 7. P. 52350.
97. Singh A.K., Mahto S.K., Kumar P., Sinha R. // Int. J. Circuit Theory and Appl. 2023. V. 51. № 3. P. 1460.
98. Attenuation by Atmospheric Gases. Recommendation ITU-R P.676–11. Geneva: Inst. Telecommun. Union, 2016. 25 p.
99. Sun S., Yan H., Mac Cartney G. R. Jr., Rappaport T. S. // Int. Conf. on Commun. (ICC). Paris. 21–25 May. 2017. N.Y.: IEEE, 2017. Article No. 7996408.
100. Xu H., Rappaport T. S., Boyle R. J., Schaffner J. H. // IEEE J. Selected Areas in Commun. 2000. V. 18. № 3. P. 310.
101. Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods, Propagation in Non-Ionized Media. Recommendation ITU-R 838-3. Geneva: Inst. Telecommun. Union, 2005.
102. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) // Bioelectromagnetics. 2015. V. 36. № 6. P. 480.
103. Черкасова О., Сердюков Д.С., Ратушняк А.С. и др. // ЖТФ. 2020. Т. 128. № 6. С. 852.
104. Horikawa S., Komine T., Haruyama S., Nakagawa M. // IEICE Technical Rep. 2004. V.103. № 721. P. 93.
105. Samimi M.K., Rappaport T.S., George R. // IEEE Wireless Commun. Lett. 2015. V. 4. № 4. P. 357.
106. Gu D., Andreev K., Dupre M. E. // China CDC Weekly. 2021. V. 3. № 28. P. 604.
107. Cisco and SAS Edge-to-Enterprise IoT Analytics Platform/Solution Overview. San Jose: Cisco Systems, Inc, 2017. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/data-center-virtualization/big-data/solutionoverview-c22-740248.html>
108. 6G The Next Hyper – Connected Experience for All // Samsung Research. Seoul: Samsung, 2002. <https://research.samsung.com/next-generation-communications#6gPop>.
109. Resolution 1399 – Agenda of the World Radiocommun. Conf. (WRC-23). Geneva: Inst. Telecommun. Union, 2023. <https://www.itu.int/wrc-23/wp-content/uploads/sites/12/2021/12/RESOLUTION-1399.pdf>
110. Haruta T., Nakajima T., Hashizume J. et al. // Proc. IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. San Francisco. 5–9 Feb. 2017. N.Y.: IEEE, 2017. P. 76.
111. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Pt 15.7: Short - Range Wireless Optical Communication Using Visible Light, IEEE Std. 802.15.7- 2011. N.Y.: IEEE, 2011. <https://doi.org/10.1109/IEEEESTD.2011.6016195>
112. Ali E., Ismail M., Nordin R., Abdulah N.F. // Frontiers of Inform. Technol. & Electronic Engineering. 2017. V. 18. P. 753.
113. Peel C.B., Hochwald B.M., Swindlehurst A.L. // IEEE Trans. 2005. V. COM-53. № 1. P. 195.
114. Spencer Q.H., Swindlehurst A.L., Haardt M. // IEEE Trans. 2004. V. SP-52. № 2. P. 461.
115. Caire G., Shamai S. // IEEE Trans. 2003. V. IT-49. № 7. P. 1691.
116. Akyildiz I.F., Jornet J.M. // Nano Commun. Networks. 2016. V. 8. P. 46.
117. Katz M., Matinmikko-Blue M., Latva-Aho M. // 10th Latin-American Conf. on Commun. (LATINCOM). Guadalajara. 14–16 Nov. 2018. N.Y.: IEEE, 2018. Article No. 8613209.
118. Chataut R., Akl R. // Sensors. 2020. V. 20. № 10. P. 2753.
119. Ke M., Gao Z., Wu Y. et al. // IEEE J. on Selected Areas in Commun. 2020. V. 39. № 3. P. 756.
120. Interdonato G., Bjornson E., Ngo H.Q. et al. // EURASIP J. on Wireless Commun. and Networking. 2019. V. 2019. № 197. P. 1.
121. Obakhena H.I., Imoize A.L., Anyasi I.F., Kavitha K.V.N. // J. Engineering and Appl. Sci. 2021. V. 68. № 1. Article No. 13.
122. Ngo H.Q., Ashikhmin A., Yang H. et al. // IEEE Trans. 2017. V. WC-16. № 3. P. 1834.
123. Salahdine F., Han T., Zhang N. // Annals of Telecommun. 2023. V. 78. № 5–6. P. 525.
124. Mazlan M.H., Behjati M. Nordin R., Ismail M. // Proc. IEEE 12th Malaysia Int. Conf. on Commun. (MICC). Kuching. 23–25 Nov. 2015. N.Y.: IEEE, 2015. P. 230.
125. He H., Yu X., Zhang J. et al. // J. Commun. and Inform. Networks. 2021. V. 6. № 4. P. 321.
126. Hu S., Rusek F., Edfors O. // IEEE Trans. 2018. V. SP-66. № 10. P. 2746.
127. Bassoy S., Farooq H., Imran M.A., Imran A. // IEEE Commun. Surveys Tutorials. 2017. V. 19. № 2. P. 743.
128. Wang S., Ran C. // IEEE Wireless Commun. 2016. V. 23. № 2. P. 118.
129. Georgakopoulos P., Akhtar T., Politis I., Tselios C. et al. // IEEE Network 2019. V. 33. № 4. P. 63.
130. Feng K., Haenggi M. // IEEE Trans. 2019. V. COM-67. №. 9. P. 6415.

131. *Kotzsch V., Fettweis G.* // Proc. IEEE Wireless Commun. Networking Conf. Sydney. 18–21 Apr. 2010. N.Y.: IEEE, 2010. Article No. 5506397.
132. *Akyildiz I.F., Kak A., Nie S.* // IEEE Access. 2020. V. 8. Article No. 133995.
133. *Zhang J., Chen S., Lin Y. et al.* // IEEE Access. 2019. V. 7. Article No. 99878.
134. *Chen S., Zhang J., Zhang J. et al.* // Digital. Commun. Networks. 2022. V. 8. № 5. P. 695.
135. *Shlezinger N., Alexandropoulos G.C., Imani M.F. et al.* // IEEE Wireless Commun. 2021. V. 28. № 2. P. 106.
136. *You L., Xu J., Alexandropoulos G.C. et al.* // IEEE Trans. 2022. V. WC-22. № 1. P. 393.
137. *Hunt J., Driscoll T., Mrozack A. et al.* // Sci. 2013. V. 339. № 6117. P. 310.
138. *Shlezinger N., Dicker O., Eldar Y. C. et al.* // IEEE Trans. 2019. V. COM-67. № 10. P. 6829.
139. *Zhang Q., Liang Y.-C., Poor H.V.* // IEEE Trans. 2021. V. COM-69. № 7. P. 4832.
140. *Chowdhury M.Z., Hossan M.T., Hasan M.K., Jang Y.M.* // Wireless Personal Commun. 2019. V. 107. № 3. P. 1401.
141. Pivotal Commware. 2017. P. 1.
<https://www.semanticscholar.org/paper/Holographic-Beam-Forming-and-MIMO-Black/075a476d1523229be6c8914008f94dec43a4afa9>
142. *Kim J.H.* // J. Management Analytics. 2021. V. 8. № 2. P. 316.
143. *Sarker M.A.L., Son W., Han D.S.* // Sensors. 2023. V. 23. № 7. P. 3713.
144. *Sun S., Rappaport T. S., Shaft M.* // Proc. IEEE INFOCOM 2018 – IEEE Conf. on Computer Commun. Workshops (INFOCOM Wkshps). Honolulu. 15–19 Apr. N.Y.: IEEE, 2018. P. 589.
145. *Zeng L., O'Brien D.C., Le Minh H. et al.* // IEEE J. Selected Areas in Commun. 2009. V. 27. № 9. 1654.
146. *Werfli K., Chvojka P., Ghassemlooy Z. et al.* // J. Lightwave Technol. 2018. V. 36. № 10. P. 1944.
147. *Sindhuja R., Shankar A. R.* // Proc. 3rd Int. Conf. Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). Tirunelveli. 23–25 Apr. 2019. N.Y.: IEEE, 2019. P.1080.
148. *Popovski P.* Wireless Connectivity: an Intuitive and Fundamental Guide. N.Y.: John Wiley & Sons, 2020.
149. *Huang C., Zappone A., Alexandropoulos G.C. et al.* // IEEE Trans. Wireless Commun. 2019. V. 18. № 8. P. 4157.
150. *Tsilipakos O., Tasolamprou A.C., Pitolakis A. et al.* // Adv. Optical Mater. 2020. V. 8. № 17. Article No. 2000783.
151. *He Q., Sun S., Zhou L.* // Research. 2019. V. 2019. Article No. 1849272.
152. *Huang J., Encinar J.A.* Reflectarray Antennas. N.Y.: John Wiley & Sons. 2007.
153. *Nayeri P., Yang F., Elsherbeni A.Z.* // IEEE Antennas Propagation Magaz. 2015. V. 57. № 4. P. 32.
154. *Di Renzo M., Debbah M., Phan-Huy D.T. et al.* // EURASIP J. Wireless Commun. and Networking. 2019. V. 2019. Article No. 129155.
155. *Zheludev N.I., Kivshar Y.S.* // Nature Mater. 2012. V. 11. № 11. P. 917.
156. *Fan K., Padilla W.J.* // Mater Today. 2015. V. 18. № 1. P. 39.
157. *Shaltout A.M., Shalaev V.M., Brongersma M.L.* // Sci. 2019. V. 364. № 6441. Article No eaat3100.
158. *Shaltout A.M., Kinsey N., Kim J. et al.* // Proc. IEEE. 2016. V. 104. № 12. P. 2270.
159. *Padilla W.J., Averitt R.D.* // J. Opt. 2017. V. 19. № 8. Article No. 084003.
160. *Shaltout A. M., Kildishev A. V., Shalaev V. M.* // J. Opt. Soc. Amer. B: Optical Phys. 2016. V. 33. № 3. P. 501.
161. *Katsarakis N., Koschny T., Kafesaki M. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. № 15. P. 2943.
162. *Wu Q., Zhang R.* // IEEE Commun. Magaz. 2019. V. 58. № 1. P. 106.
163. *Li A., Singh S., Stevenpiper D.* // Nanophotonics. 2018. V. 7. № 6. P. 989.
164. *Abdollahramezani S., Taghinejad H., Fan T., Kiarashinejad Y. et al.* // arXiv preprint arXiv:1809.08907..
165. *Staude I., Pertsch T., Kivshar Y.* // arXiv preprint arXiv:1810.10675.166.
166. *Nemati A., Wang Q., Hong M., Teng J.* // Opto-Electronic Adv. 2018. V. 1. № 5. Article No. 180009.
167. *Xu H., Sun S., Tang S. et al.* // Sci. Reports. 2016. V. 6. № 1. Article No. 27503.
168. *Bonaccorso F., Sun Z., Hasan T., Ferrari A.C.* // Nature Photonics. 2010. V. 4. № 9. P. 611.
169. *Lee S.H., Choi M., Kim T.-T. et al.* // Nature Mater. 2012. V. 11. № 11. P. 936.
170. *Karim M.F., Liu A. Alphones Q., Yu A.B.* // J. Micromechanics and Microengineering. 2006. V. 16. №. 4. P. 851.
171. *Liu A.Q., Zhu W.M., Tsai D.P., Zheludev N.I.* // J. Opt. 2019. V. 14. № 11. Article No. 114009.
172. *Fu Y.H., Liu A.Q., Zhu W.M. et al.* // Adv. Functional Mater. 2011. V. 21. № 18. P. 3589.
173. *Rensberg J., Zhang S., Zhou Y. et al.* // Nano Lett. 2016. V. 16. №. 2. P. 1050.
174. *Wang Q., Rogers E.T., Gholipour B. et al.* // Nature Photonics. 2016. V. 10. № 1. P. 60.
175. *Liu L., Kang L., Mayer T.S., Werner D.H.* // Nature Commun. 2016. V. 7. № 1. Article No. 13236.

176. *Driscoll T., Kim H., Chae B. et al.* // Science. 2009. V. 325. № 5947. P. 1518.
177. *Duan X., Kamin S., Liu N.* // Nature Commun. 2017. V. 8. Article No. 14606.
178. *Cui T.J., Qi M.Q., Wan X. et al.* // Light: Sci. & Appl. 2014. V. 3. № 10. P. e218.
179. *Yang H., Chen X., Yang F. et al.* // IEEE Antennas Wireless Propagation Lett. 2017. V. 16. P. 1159.
180. *Chen Y., Wang Y., Zhang J. et al.* // IEEE Vehicular Technol. Magaz. 2022. V. 17. № 2. P. 26.
181. *Renzo Di, Ntontin M., Song K. et al.* // IEEE Open J. Commun. Soc. 2020. V. 1. P. 798.
182. *Basharat S., Khan M., Iqbal M.* // IET Commun. 2022. V. 16. № 13. P. 1458.
183. *Saito Y., Kishiyama Y., Benjebbour A. et al.* // 77th Vehicular Technol. Conf. (VTC Spring). Dresden. 02–05 Jun. 2013. N.Y.: IEEE, 2013. Article No. 6692652.
184. *Dai L., Wang B., Yuan Y. et al.* // IEEE Commun. Magaz. 2015. V. 53. № 9. P. 74.
185. *Liu Y., Qin Z., Elakashlan M. et al.* // Proc. IEEE. 2017. V. 105. № 12. P. 2347.
186. *Ding Z., X. Lei, Karagiannidis G. K. et al.* // IEEE J. Selected Areas in Commun. 2018. V. 35. № 10. P. 2181.
187. *Liu Y., Zhang S., Mu X. et al.* // IEEE J. Selected Areas in Commun. 2022. V. 40. № 4. P. 1037.
188. *Al-Dweik A., Alsusa E., Dobre O. A. et al.* // techrxiv preprint techrxiv: 22258660
189. *Liu Y., Yi W., Ding Z. et al.* // arXiv preprint arXiv:2103.02334
190. *Islam S.R., Avazov N., Dobre O.A. et al.* // IEEE Commun. Surveys & Tutorials. 2016. V. 19. № 2. P. 721.
191. *Liu Z., Yang L. L.* // IEEE Trans. 2021. V. WC-20. № 8. P. 4768.
192. *Shental O., Zaidel B.M., Shitz S.S.* // Int. Symp. on Information Theory (ISIT). Aachen. 25–30 Jun. 2017. N.Y.: IEEE, 2017. P. 2628.
193. *Jamali M.V., MahdaviFar H.* // Global Commun. Conf. (GLOBECOM). Abu Dhabi. 09–13 Dec. 2018, N.Y.: IEEE. 2018. Article No. 8647945.
194. *Hoshyar R., Wathan F. P., Tafazolli R.* // IEEE Trans. 2008. V. SP-56. № 4. P. 1616.
195. *Hoshyar R., Razavi R., Al-Imari M.* // 71st Vehicular Technology Conf. 16–19 May. 2010, Taipei. N.Y.: IEEE, 2010. Article No. 5493941.
196. *Nikopour H., Baligh H.* // 24th Annual Int. Symp. on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). London. 8–11 Sept. 2013. N.Y.: IEEE, 2013. P. 332.
197. *Chen S., Ren B., Gao Q. et al.* // IEEE Trans. 2017. V. VT-66. № 4. P. 3185.
198. *Vanka S., Srinivasa S., Gong Z. et al.* // IEEE Trans. 2012. V. WC-11. № 7. P. 2628.
199. *Lee H., Kim S., Lim J.-H.* // Int. Conf. on Communications (ICC). 23–27 May. 2016. Kuala Lumpur. N.Y.: IEEE. 2016. Article No. 7510909.
200. *Zhang L., Li W., Wu Y. et al.* // IEEE Trans. 2016. V. BC-62. № 1. P. 216.
201. *Taherzadeh M., Nikopour H., Bayesteh A., Baligh H.* // IEEE 80th Vehicular Technol. Conf. (VTC2014-Fall). 14–17 Sept. 2014. Vancouver. N.Y.: IEEE, 2014. Article No. 6966170.
202. *Покаместов Д.А., Демидов А.Я., Крюков Я.В. и др.* // Электросвязь. 2016. № 10. С. 56.
203. *Yu L., Liu Z., Wen M. et al.* // IEEE Commun. Standards Magaz. 2021. V. 5. № 2. P. 92.
204. *Kanatbekuli I., Pokamestov D., Kryukov Y., Rogozhnikov E.* // 1st Int. Scientific Conf. «ASEDU-2020: Advances in Sci., Engineering and Digital Education». Krasnoyarsk. 08–09 Oct. 2020. Bristol: IOP Publishing, 2020. V. 1679. № 3. P. 032074.
205. *Farhadi Z.A., Bakhshi H.* // Trans. Emerging Telecommun. Technologies. 2020. V. 32. № 1. Article No. e4153.
206. *Alam M., Zhang Q.* // 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC). San Francisco. 19–22 Mar. N.Y.: IEEE. 2017. Article No. 7925767.
207. *Rebhi M., Hassan K., Raoof K., Chargé P.* // IEEE Open J. Commun. Soc. 2021. V. 2. P. 1205.
208. *Pan Z., Liu W., Lei J. et al.* // IEEE Trans. 2019. V. VT-68. № 7. P. 6657.
209. *Al-Nahhal I., Dobre O. A., Basar E.* // IEEE Commun. Lett. 2021. V. 25. № 6. P. 2058.
210. *Wei C. P., Yang H., Li C. P., Chen Y. M.* // IEEE Wireless Commun. Lett. 2020. T. 10. № 4. P. 878.
211. *Clerckx B., Mao Y., Schober R. et al.* // IEEE Open J. Commun. Soc. 2021. V. 2. P. 1310.
212. *Rimoldi B., Urbanke R.* // IEEE Trans. 1996. V. IT-42. № 2. P. 364.
213. *Mao Y., Clerckx B., Li V. O. K.* // EURASIP J. Wireless Commun. and Networking. 2018. V. 2018. Article No. 133.
214. *Dizdar O., Mao Y., Han W., Clerckx B.* // IEEE 92nd Vehicular Technology Conf. (VTC2020-Fall). Victoria. 04–07 Oct. 2020. N.Y.: IEEE, 2020. Article No. 9348672.
215. *Han T., Kobayashi K.* // IEEE Trans. 1981. V. IT-27. № 1. P. 49.
216. *Clerckx B., Mao Y., Jorswieck E. A., et al.* // IEEE J. Selected Areas in Commun. 2023. V.41. № 5. P. 1265.

217. Ren Y., Li L., Xie G. et al. // IEEE Trans. 2017. V. WC-16. № 5. P. 3151.
218. Allen L., Beijersbergen M., Spreuw R., Woerdman J. // Phys. Rev. A. 1992. V. 45. № 11. P. 8185.
219. Basar E. // IEEE Commun. Magaz. 2016. V. 54. № 7. P. 168.
220. Mao T., Wang Q., Wang Z., Chen S. // IEEE Commun. Surveys & Tutorials. 2019. V. 21. № 1. P. 315.
221. Basar E., Wen M., Mesleh R. et al. // IEEE Access. 2017. V. 5. P. 16693.
222. Al-Jawhar Y.A., Ramli K.N., Taher M.A. et al. // ETRI J. 2021. V. 43. № 2. P. 209.
223. Usha S. M., Mahesh H. B. // Int. J. Computer Networks and Commun. 2022. V. 14. № 3. P. 121.
224. Bellanger M., Le Ruyet D., Roviras D. et al. // PHYDYAS. 2010. V. 25. № 4. P. 7.
225. Schaich F., Wild T. // 6th Intern. Symp. Commun., Control and Signal Processing (ISCCSP). Athens. 21–23 May 2014. N.Y.: IEEE, 2014. P. 457.
226. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. // IEEE Int. Conf. on Commun. Geneva. 23–26 May. 1993. N.Y.: IEEE, 1993. P. 1064.
227. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and Channel Coding (3GPP TS 36.212 version 11.1.0 Release 11). Technical Specification. ETSI TS 136 212 V11.1.0. Sophia Antipolis Sedex: Europ. Telecommun. Standard Inst., 2013. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136212/11.01.00_60/ts_136212v110100p.pdf
228. Gallager R. // IRE Trans. 1962. V. IT-8. № 1. P. 21
229. Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Multiplexing and Channel Coding (Release 16). Technical Report 3GPP TS 38.212 V16.8. 0. Sophia Antipolis: 3rd Generation Partnership Project, 2020. 46 p.
230. Arikan E. // IEEE Commun. Lett. 2008. T. 12. № 6. P. 447.
231. Vaezi M., Azari A., Khosravirad S. R. et al. // IEEE Commun. Surveys & Tutorials. 2022. V. 24. № 2. P. 1117.
232. Polyanskiy Y., Poor H. V., Verdu S. // IEEE Trans. 2010. V. IF-56. № 5. P. 2307.
233. Liva, G., Gaudio, L., Ninacs, T., Jerkovits, T. // arXiv:1610.00873.
234. Gruber T., Cammerer S., Hoydis J., Brink S. T. // 51st Annual Conf. on Inform. Sci. and Systems. Baltimore. 22–24 Mar. 2017. N.Y.: IEEE, 2017. Article No. 7926071.
235. Sattiraju R., Weinand A., Schotten H. D. // arXiv preprint arXiv:1908.09523. 236.
236. He Y., Zhang J., Wen C., Jin S. // IEEE VTS Asia Pacific Wireless Commun. Singapore. 28–30 Aug. 2019. N.Y.: IEEE, 2019. Article No. 8851650. Symp. (APWCS).
237. Kim H., Jiang Y., Rana R.B. et al. // arxiv preprint arXiv:1805.09317i238.
238. He Y., Zhang J., Jin S. et al. // IEEE Trans. 2020. V. COM-68. № 10. P. 6127.
239. Jiang Y., Kim H., Asnani H. et al. // Annual Conf. on Neural Inform. Processing Systems (NeurIPS 2019). Vancouver. 8–14 Dec. 2019 / Eds. H.M. Wallach, H. Larochelle, A. Beygelzime et al. San Diego, 2019. P. 2754.
240. OShea T., Hoydis J. // IEEE Trans. 2017. V. CCI-3. № 4. P. 563.
241. Zhaojie Y., Yi F., Guojun H., Kazi M.S.H. // IEEE Internet of Things J. 2019. V. 8. P. 5149.
242. Fang Y., Bu Y., Chen P. et al. // IEEE Trans. 2021. V. ITS-24. № 2. P. 2060.
243. Pantelev P., Kalachev G. // Proc. 54th Annual ACM SIGACT Symp. on Theory of Computing. Rome. 20–24 Jun. 2022. N.Y.: Association for Computing Machinery (ACM). 2022. P. 375.
244. Wu X., Jiang M., Zhao C. // IEEE Access. 2018. V. 6. Article No. 50179.
245. Geiselhart M., Elkelesh A., Ebada M. et al. // IEEE Int. Symp. on Inform. Theory (ISIT). Los Angeles. 21–26 Jun. 2020. N.Y.: IEEE, 2020. P. 395.
246. Aya Kh. Ahmed, Hamed S. AI-Raweshidy // IEEE Access. 2022. V. 10. Article No. 39681.
247. Marshakov E., Balitskiy G., Andreev K., Frolov A. // 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conf. (VTC2019-Fall). Honolulu. 22–25 Sept. 2019. N.Y.: IEEE, 2019. Article No. 8891583.
248. Fazeli A, Hassani H, Mondelli M, Vardy A. // IEEE Trans. 2020. V. IF-67. № 9. P. 5693.
249. Zhang Y, Peng K, Chen Z et al // IEEE Access. 2019. V. 7. Article No. 30818.
250. Yuan Y, Zhao Y, Zong B, Parolari S. // Sci. China Inform. Sci. 2020. V. 63. № 8. Article No. 183301.
251. Perry, J., Iannucci, P. A., Fleming, K. et al. // ACM SIGCOMM Computer Commun. Rev. 2012. V. 42. № 4. P. 49.
252. Sommer N., Feder M., Shalvi O. // IEEE Trans. 2008. V. IF-54. № 4. P. 1561.
253. Ferraz, O., Subramaniyan S., Chinthala R. et al. // IEEE Commun. Surveys & Tutorials. 2021. V. 24. № 1. P. 524.
254. Nachmani E., Be'ery Y., Burshtein D. // 54th Annual Allerton Conf. on Communication, Control and Computing (Allerton). Monticello. 27–30 Sept. 2016. N.Y.: IEEE. 2016. P. 341.
255. Askri A., Othman G. R. B. // 2019 IEEE Int. Symp. on Information Theory (ISIT). Paris. 07–12 Jul. N.Y.: IEEE, 2019. P. 1172.

6G COMMUNICATION SYSTEMS: CONCEPT, TRENDS, PHYSICAL LEVEL TECHNOLOGIES

**D. A. Pokamestov*, Ya. V. Kryukov, R. R. Abenov, E.V. Rogozhnikov,
A. A. Brovkin, A. Shinkevich, G. N. Shalin**

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk 635050 Russian Federation

**E-mail: dmaltomsk@mail.ru*

A review and analysis of scientific papers published to date on various aspects of 6G is presented. The emphasis is on physical layer technologies, since they are the ones that largely form the basis and determine the potential of the future system. These include multiple access, multi-user multi-antenna systems, reconfigurable reflective surfaces, and modulation and channel coding techniques. In addition, promising application scenarios, new services and services, predicted requirements, concepts of 6G network architecture, the role of artificial intelligence and machine learning, as well as new frequency ranges are considered.

Keywords: multiple access, multi-user multi-antenna systems, reconfigurable reflective surfaces, modulation and channel coding methods