

Министерство образования и науки Российской Федерации
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова
Кафедра инфокоммуникаций и радиофизики

Т. К. Артёмова
А. С. Захаров

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Учебное пособие

Ярославль
ЯрГУ
2018

УДК 654(075)

ББК 388я73

А86

Рекомендовано

*Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного издания. План 2018 года*

Рецензенты:

Г. С. Гохберг, кандидат технических наук, доцент;
кафедра физики Федерального государственного казенного
военного образовательного учреждения высшего образования
«Ярославское высшее военное училище
противовоздушной обороны»

Артёмова, Татьяна Константиновна.

А86 Перспективные системы связи : учебное пособие
/ Т. К. Артёмова, А. С. Захаров ; Яросл. гос. ун-т
им. П. Г. Демидова. — Ярославль : ЯрГУ, 2018. — 80 с.

ISBN 978-5-8397-1164-8

Пособие содержит материалы авторского курса, разработанного преподавателями кафедры инфокоммуникаций и радиофизики, знакомит с перспективными направлениями развития систем связи, существующим фундаментом для внедрения новых разработок, стоящими на этом пути проблемами и возможными путями их решения. В конце глав приводятся вопросы для самоконтроля, формирующие и развивающие способность обучающихся изучать опыт разработок и внедрения систем связи и их элементов, умение соотносить потенциальные возможности новых разработок и современные или перспективные требования к их качеству.

УДК 654(075)

ББК 388я73

ISBN 978-5-8397-1164-8

© ЯрГУ, 2018

Введение

Учебное пособие предназначено для обучающихся по специальности «Радиофизика».

Материал представлен в четырёх главах. Для удобства работы с пособием литература приведена по главам, определения выделены полужирным курсивом, элементы классификаций — полужирным прямым шрифтом, термины, содержание которых в данном пособии не раскрывается (но которые, однако, нужно освоить для грамотного владения материалом на высоком уровне, т. е. метки для самостоятельного поиска информации), — курсивом. Актуальность всех электронных ресурсов подтверждена на 01.02.2018.

Каждая глава завершается списком вопросов для самоконтроля; вопросы, не имеющие прямых ответов в тексте пособия, помечены «звёздочкой». Для практической отработки требуемых умений, навыков и самостоятельного получения знаний на основе анализа различных источников научной информации рекомендуется найти публикацию (статью, доклад или патент) с описанием перспективной разработки, выделить её количественные показатели, сравнить их со значениями для аналогов и описать, в чём заключается перспективность разработки и какие могут встретиться трудности на пути её внедрения на современном этапе. Для самостоятельного подбора материала рекомендуем использовать открытые полнотекстовые статьи в Научной электронной библиотеке (<http://elibrary.ru>), библиотеке «КиберЛенинка» (<http://CyberLeninka.ru>), в базе публикаций IEEE (<http://ieeexplore.ieee.org>, при сортировке результатов выберите “open access”), а также материалы международных и всероссийских научных конференций. Для анализа технического аспекта можно использовать открытые реестры патентов РФ на сайте ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности» (<http://www1.fips.ru>).

Глава 1. Особенности разработок и инноваций в области систем связи

1.1. Разработки в области систем связи

Система связи состоит из ряда реализующих определённые функции элементов, которые, взаимодействуя друг с другом некоторым образом, вместе служат для передачи, приёма и обработки информации. Система имеет внутренний трафик, предназначенный для обеспечения её нормального функционирования — самоконтроля, установления режимов, настройки параметров передатчика, приёмника или блоков хранения, обработки и защиты информации, т. е., помимо информационных потоков данных, есть и служебные. Разработчики могут создавать новые элементы системы — новые блоки, закладываемые в них алгоритмы и технологии, сигналы, методы настройки и самоконтроля, а также модели описания системы в целом и её элементов.

Один из вариантов классификации таких новшеств заключается в соотнесении функционала разработки с уровнями моделей описания взаимодействия систем и устройств связи, например принятой в ГОСТ [1] *базовой эталонной модели*. Она использует 7 уровней: прикладной, уровень представлений, сеансовый, транспортный, сетевой, канальный, физический. С точки зрения теории систем — науки, изучающей устройство и поведение систем, — один и тот же элемент системы может быть описан на разных уровнях.

На каждом уровне оперируют своим операндом — логически неделимым элементом данных, с которым система что-то делает: на физическом уровне это бит, на других — сообщения: на канальном — кадр, на сетевом — пакет, на транспортном — сегмент. Операндами трёх верхних уровней являются сообщения в общем виде.

На каждом уровне и между уровнями действуют *протоколы* [2] — наборы правил и действий, позволяющие устанавливать и разрывать связь, а также передавать информацию определённым образом. С внедрением новых методов связи могут изменяться и протоколы. С другой стороны, можно создавать новые

устройства и технологии с расчётом на применение с каким-то конкретным протоколом; такой подход обеспечивает совместимость старых элементов системы и внедряемой разработки.

Проанализируем уровни модели, описанной в ГОСТ [1], с точки зрения перечня возможных разработок и их особенностей, в том числе протоколов, на которые следует ориентироваться, или форматов данных, которых необходимо придерживаться.

С точки зрения верхнего, 7-го, уровня модели — **прикладного (уровня приложений)** [1] — система связи обеспечивает взаимодействие пользовательских приложений с сетью: позволяет приложениям использовать сетевые службы, обеспечивает передачу служебной информации, удалённый доступ к файлам и базам данных, предоставляет приложениям информацию об ошибках и т. п. Приложения выдают различные запросы в соответствии со своим функционалом и получают ответные сообщения. На этом уровне разработки осуществляют управление доступом и правами доступа, распределение ресурсов между многочисленными запросами, а функционирование узлов и коммуникация между ними регулируются такими широко известными протоколами, как HTTP, SMTP, POP3, FTP, SIP, TELNET, или разрабатываемыми новинками.

Следующий, 6-й уровень модели — **уровень представлений**. На этом уровне описывается преобразование протоколов и кодирование/декодирование данных. Запросы приложений, полученные с прикладного уровня, преобразуются в формат для передачи по сети, а полученные из сети данные преобразуются в формат приложений. Осуществляются сжатие/распаковка или шифрование/дешифрование, организация структуры передаваемых данных (в том числе побитовая передача графики), а также перенаправление запросов другому сетевому ресурсу, если они не могут быть обработаны локально. Данные представляются в стандартных форматах: изображения — в форматах TIFF, JPEG, Quick Draw и др., звуки — в MIDI и др., видео — в MPEG, Quick Time и др. [3]. Один из самых известных протоколов этого уровня — X.25 PAD — Packet Assembler/Disassembler Protocol.

К 5-му, **сеансовому уровню** модели относятся методы и алгоритмы обеспечения сеанса связи: управления началом/за-

вершением сеанса, обменом информацией, синхронизацией задач, определением прав на передачу данных и поддержанием сеанса в периоды неактивности приложений. Принятые на этом уровне протоколы: PTP, RPC, SMPP, SCP, SDP.

Четвёртый, **транспортный уровень** модели предназначен для обеспечения надёжной передачи данных от отправителя к получателю с различной степенью надёжности и различными возможностями организации пересылки данных: как простой передачи без защиты от потери данных в протоколе UDP, так и с разрезанием на несколько блоков или склейкой одного из нескольких в протоколе TCP и других.

Разработки 3-го, **сетевого уровня** решают задачи адресации и определения пути передачи — перевод логических адресов и имён в физические, определение кратчайших маршрутов, коммутацию и маршрутизацию, отслеживание неполадок и «пробок» в сети. Удачными новинками в своё время оказались протоколы IP/IPv4/IPv6, IPsec.

На 2-м, **канальном уровне** работают коммутаторы, мосты и другие устройства, обеспечивающие взаимодействие сетей: данные, полученные от физического уровня в битах, упаковываются в кадры с использованием алгоритмов помехоустойчивого кодирования, результат проходит проверку на целостность и передаётся на сетевой уровень для передачи по каналу. Множество разработок этого уровня представляют собой алгоритмы кодирования, а также (в законченном виде) драйверы сетевых плат, программные интерфейсы взаимодействия. Протоколы этого уровня: IEEE 802.3 (Ethernet), IEEE 802.11 wireless LAN, Point-to-Point Protocol, x.25.

Нижний, 1-й уровень — **физический** [1]. На этом уровне описывается практическая реализация различных аспектов передачи данных — стыковки сигналов со средой передачи (оптоволоконными линиями, витой парой, коаксиальными кабелями, радиоканалами с некоторой моделью прохождения сигнала от передатчика к приёмнику), модуляции и демодуляции, синхронизации, линейного кодирования (например, с помощью кодов RZ, NRZ или «Манчестер II»), регенерации, преобразования. На этом же уровне работают концентраторы, медиаконвертеры, сетевые

интерфейсы (например, RS-232 или RJ-45, BNC-разъёмы), а основное устройство, реализующее всё перечисленное, — сетевой адаптер или порт. Именно на этом уровне производится большое количество перспективных разработок. Широко известные сегодня протоколы этого уровня: IEEE 802.15 (Bluetooth), RS-232, RS-485, DSL, ISDN, SONET/SDH, 802.11 Wi-Fi.

1.2. Понятие перспективности разработки

Согласно толковому словарю С. И. Ожегова, «**перспективный**» — имеющий хорошие перспективы, способный успешно развиваться в будущем [4], т. е. многообещающий.

Новые разработки в области систем связи отличаются от предыдущих структурами, реализуемыми методами, технологией исполнения компонентов, физическими носителями и материалами и предлагают некоторый выигрыш, количественно оцениваемый в росте одной из **функциональных характеристик** (например, скорости передачи информации), одной из **потребительских характеристик** (например, числе абонентов сети связи) или в **экономических показателях** — сокращении стоимости, срока окупаемости, уменьшении затрат при производстве, установке или в сокращении сроков и удешевлении ремонта во время эксплуатации.

Для того чтобы новые разработки продемонстрировали эти эффекты, требуется ряд условий.

Это и спрос у потребителей, который, возможно, ещё надо обеспечить за счёт информирования о направлениях развития и создания позитивного образа перемен.

Это и достаточный уровень технологий на производстве, позволяющий выпустить оборудование с нужным качеством при приемлемых расходах.

Это и техническая возможность интеграции новшества в существующие системы связи, что подразумевает, во-первых, достаточный уровень гибкости существующих систем, допускающий их модернизацию, в том числе использование при их построении модульного принципа, позволяющего замену одних блоков другими без потери связности функционирования;

во-вторых, подчинение единым нормативам, т. е. сертификацию на соответствие уже существующим стандартам.

Это и наличие финансирования, которое требуется в значительном объёме на начальном этапе в условиях высоких рисков некупаемости.

Наконец, это и наличие государственной политики, поощряющей развитие таких систем, в том числе преференциями в правовом поле и экономическими льготами.

Таким образом, разработка может в идеальных условиях обещать «в перспективе» некоторые выгоды, а в конкретных условиях реализации — не обеспечить их.

Подходы к внедрению новых разработок можно условно разделить на **постепенный переход** и **скачок**. Первый отличается неспешностью, начинается с единичных реализаций и небольших изменений и только спустя некоторое время, когда уже очевидно, что переход к новому неизбежен, осуществляется за счёт срабатывания рыночных механизмов: с рынка исчезает старое оборудование, провайдеры отказываются предоставлять услуги по старым технологиям и т. п. Примером такого перехода может служить внедрение систем связи 3-го поколения в России — с промежуточным этапом в виде поколения 2,5. Второй подход требует определённых усилий со стороны государства, наличия государственной политики и существенного финансирования; при этом разрабатываются и реализуются программы перехода на новые технологии и оборудование. Примером может служить внедрение «цифровых органов власти» — в этом случае для заказчика более важным было улучшение управляемости, увеличение степени прозрачности действий, положительный социальный, а не финансовый или технологический эффект.

Так как для реализации новшества, как правило, требуется преодолеть финансовый порог выхода на новый уровень, то для оценки перспективности следует сопоставить возможные в конкретных условиях величину и характер эффектов и величину затрат. Для некоторых разработок ещё просто не пришло время, некоторые дают слишком маленький эффект, чтобы рассматривать их в качестве кандидатов на реализацию. Так или иначе, перспективность разработки — понятие, измеримое количе-

ственно, причём в терминах сравнения с неким эталоном. Это может быть текущее состояние дел там, куда планируется внедрение, а может быть сравнение с аналогичными разработками. В последнем случае можно использовать сравнение как со средним уровнем аналогов, так и с лучшим на текущее время.

1.3. Инновации и их поддержка государством

Перспективная разработка, будучи внедрённой, становится ***инновацией*** — введённым в употребление новым или значительно улучшенным продуктом, товаром, услугой, процессом, новым методом [5, ст. 2] и т. п. Внедрение производится в рамках ***инновационных проектов*** [5, ст. 2] — комплекса направленных на достижений экономического эффекта мероприятий по коммерциализации научных и (или) научно-технических результатов, в ходе *инновационной деятельности*. Для содействия внедрению создаётся ***инновационная инфраструктура*** [5, ст. 2] — совокупность организаций, способствующих реализации инновационных проектов, включая предоставление управленческих, материально-технических, финансовых, информационных, кадровых, консультационных и организационных услуг.

Основное правовое, финансовое и организационное регулирование внедрения перспективных разработок берёт на себя Российская Федерация. Органы федеральной власти в соответствии с [5, ст. 12] разрабатывают и проводят единую *государственную научно-техническую политику*, в соответствии с которой они [5, ст. 12]:

- выбирают *приоритетные направления развития науки, технологий и техники в РФ* (например [6],
 - информационно-телекоммуникационные системы,
 - индустрия наносистем,
 - транспортные и космические системы);
- формируют и реализуют федеральные научные и научно-технические программы и проекты (например,
 - «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013–2025 годы»,
 - «Развитие науки и технологий, плановый период — 2020 год»,

- «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы»);
 - устанавливают системы льгот по уплате налогов, сборов, таможенных платежей;
 - организуют научно-техническое прогнозирование, формулируя в том числе *перечни критических технологий РФ* (например, технологий [6]:
 - доступа к широкополосным мультимедийным услугам,
 - информационных, управляющих, навигационных систем,
 - наноустройств и микросистемной техники);
 - формируют рынки научной и научно-технической продукции, работ и услуг РФ, в том числе формулируя технические задания на НИР, например задания на работы в рамках **«Национальной технологической инициативы»** (НТИ) [7] — программы государственной поддержки направлений развития, которые в ближайшие 20 лет могут стать основой мировой экономики, в том числе в таких перспективных направлениях, как *«ТехНет»* (передовые производственные технологии), *«НейроНет»*, *«ХелсНет»*. «НейроНет» [8] включает в себя создание нового поколения глобальной сети на основе нейрокомпьютерных интерфейсов и разработку систем нейрокоммуникации. НТИ включает в себя также «МариНет» и «АвтоНет» [9] — создание интеллектуальных транспортных систем в области морского транспорта и беспилотных автомобилей;
 - финансируют научную деятельность за счёт средств федерального бюджета;
 - содействуют развитию инновационной деятельности субъектов РФ,
- а также формируют систему технического регулирования, систему обеспечения единства измерений, системы научно-технической информации, патентно-лицензионного дела и управление ими. На уровне субъектов РФ органами власти этих субъектов принимаются и реализуются свои научные, научно-технические и инновационные программы.

Государственная поддержка инновационной деятельности заключается в том числе в предоставлении образовательных услуг, информационной, консультационной поддержки, содей-

ствии в формировании проектной документации, в финансовом обеспечении (субсидиях, грантах, гарантиях, взносах в уставный капитал, кредитах и займах), в формировании спроса на инновационную продукцию и поддержке экспорта, а также в обеспечении инфраструктуры [5, ст. 16.2].

Взаимодействие с научными структурами осуществляется через *технологические платформы* (ТП), в том числе «Национальную программную платформу», «СВЧ-технологии», «Национальную космическую ТП», «Национальную суперкомпьютерную ТП», «Национальную информационную спутниковую систему», «Развитие российских светодиодных технологий».

Для поддержки инноваций существуют *территориальные кластеры*, в том числе «Зеленоград» (Москва), «Кластер информационных технологий», «Кластер радиоэлектроники, приборостроения, средств связи и инфотелекоммуникаций» (Санкт-Петербург). Поддержка осуществляется на конкурсной основе в результате сравнительного анализа инновационных проектов, обладающих сходными целями и характеристиками.

Получению государственной и частной финансовой поддержки способствует соответствие разработки *перечню критических технологий РФ* [6], например технологий:

- доступа к широкополосным мультимедийным услугам,
- информационных, управляющих, навигационных систем,
- наноустройств и микросистемной техники.

Особое внимание государство уделяет государственным корпорациям и компаниям с государственным участием. Например, многопрофильный гигант Государственная корпорация «Ростех» проводит НИОКР в том числе и в области связи по разработке высокотехнологичных продуктов и перспективных технологий:

- электронной компонентной базы с СВЧ-техникой,
- современных средств отображения информации и систем связи,
- автоматизированных систем управления и средств радиоэлектронных измерений нового поколения,
- новых композиционных материалов и производство изделий из них для авиационной и космической промышленности и т. п.

Корпорация имеет программу инновационного развития на текущий период (см. паспорт программы [10]), в соответствии с которой определены приоритетные направления инновационного развития, согласованные с государственными приоритетами научно-технологического развития, и разработаны мероприятия, направленные на решение ряда задач, в том числе:

- создание и вывод на рынок глобально конкурентоспособных продуктов и услуг,
- разработку и внедрение новых технологий мирового уровня,
- существенное улучшение потребительских свойств производимой продукции,
- формирование и развитие инновационной инфраструктуры и системы управления технологическими компетенциями,
- технологическое развитие организаций корпорации, включая эффективное внедрение перспективных промышленных, базовых и критических технологий и передовых производственных технологий, применение новых методов и технологий проектирования и инжиниринга, использование новых материалов, повышение экологичности производственных процессов, широкое применение механизмов открытых инноваций.

«Ростех» получает все перечисленные виды государственной поддержки и эффективно использует этот ресурс для развития.

1.4. Оценка перспективности разработки

Согласно гражданскому кодексу РФ (ст. 1125) выделяют следующие охраняемые результаты интеллектуальной деятельности:

- конструкции (полезные модели, промышленные образцы, изобретения),
- программы для ЭВМ,
- топологии интегральных микросхем,
- секреты производства (ноу-хау), в том числе технологии, технологические карты, технические условия.

К результатам интеллектуального труда можно также отнести:

- концепции,
- математические модели,
- нормативно-технические документы (стандарты, регламенты, технические условия),

- нормативно-методические документы (инструкции, методики).

Для каждого из этих видов существуют свои показатели качества. Некоторые из них являются предметом конкретных нормативных документов, например показатели для программного обеспечения — стандартов семейства ГОСТ 9001 ИСО [11], другие являются обобщёнными и могут быть найдены в литературе по метрологии и квалиметрии (например, [12]). Показатели качества, сопоставленные с значениями для аналогов, зачастую служат *технико-экономическим обоснованием* [13] для перспективности разработки. Например, если некоторый приёмник обеспечивает приемлемое для пользователя качество связи при отношении «сигнал — шум» на входе -20 дБ (т. е. в ситуации воздействия существенных помех и слабого полезного сигнала), в то время как аналоги гарантируют такое же качество только при 0 дБ (т. е. при уровне помех, сравнимом с уровнем сигнала), то заложенные в него принципы, реализованные алгоритмы, концепции, схемы, тип сигнала, методы обработки однозначно являются перспективными, т. к. позволяют либо сэкономить ресурсы (в данном случае мощность работающего в паре с приёмником передатчика), либо обеспечить новый, ранее недостижимый уровень качества связи.

Помимо привлекательных технических показателей качества, для того чтобы разработка стала перспективной, а её реализация — возможной, необходим ряд условий, в том числе организационного характера [5, ст. 16.5]:

- соответствие работ основным направлениям государственной поддержки;
- измеримость поставленных целей и задач;
- взаимосвязи целей и задач с ключевыми показателями эффективности структурных подразделений и руководства поддерживаемой организации, с системой мотивации его работников;
- наличие системы оценки ответственности за недостижение поставленных целей;
- наличие и прозрачность внутренних процедур контроля процессов внедрения;
- наличие предусмотренных процедур коллегиального принятия решений и привлечения независимых профессиональных экспертов.

При оценке эффективности поддержки научно-исследовательских, опытно-конструкторских и инновационных проектов учитывается высокорисковый характер инновационной деятельности, неопределённость рыночных и технологических перспектив инновационных проектов. Для оценки того, стоит ли внедрять разработку, в каком масштабе и в какие сроки, используют **уровень готовности технологии** [11] — степень развития технологии, разрабатываемой с целью её внедрения в конечный продукт, выраженная в единицах девятибалльной шкалы.

Начальный этап технологии характеризуется **уровнем 1** — «**выявлены и зафиксированы фундаментальные принципы технологии**». В ходе работ сформулированы идеи решения некоторой задачи, продемонстрирована его потенциальная возможность на простейшем оборудовании, проведено при существенном упрощении моделирование, сформулированы идеи о возможном применении.

Уровень 2 «концепция или выбор варианта» соответствует только что созданной, но ещё не исследованной технологии. Проведены работы по обоснованию возможности её создания, даны рекомендации по применению, начата теоретическая разработка, пройдена первичная оценка экспертным сообществом, т. е. результаты представлены и получили положительные отзывы на конференциях, выставках.

На 1-м и 2-м этапах рассуждения о потенциальном эффекте остаются ещё на уровне теорий, говорить о перспективности разработки нельзя.

Проработка деталей технологии в лабораторных условиях соответствует **уровню 3 «расчётное и (или) экспериментальное обоснование эффективности технологий»**. На этом этапе разработка проходит серьёзные испытания, определяются ключевые моменты её реализации; концепции, сформулированные на 2-м уровне, обретают обоснованные формы.

На **уровне 4 «исследование макетов и (или) компонентов в лабораторных условиях»** демонстрируется работоспособность на подробных, но ещё лабораторных макетах, выполняется подробное моделирование, проводится детальное описание технологии.

Уровни 3 и 4 уже соответствуют ситуации, когда понятны перспективы разработки и остаётся собрать на следующем, **5-м уровне «верификация макетов и (или) компонентов при подходящих условиях»** фактические доказательства её возможностей в конкретных условиях будущего применения для привлечения внимания инвесторов и потребителей и начала работ по внедрению. Испытания проходят уже не прототипы, а детализированные макеты устройств. Уже закончена НИР и начаты опытно-конструкторские работы.

Уровни с 6 по 9 соответствуют работе над конкретными продуктами, которые могут быть внедрены в ближайшее время.

Уровень 6 «моделирование систем (подсистем) или испытания трёхмерных моделей в подходящих условиях» соответствует пройденным испытаниям на устойчивость, надёжность работы новинки как практически готового с технической точки зрения устройства.

На **7 уровне «разработка прототипа системы, продемонстрированная на действующем продукте»** разработка не просто функционирует, а удовлетворяет потребностям, в том числе к эргономике (с точки зрения удобства использования), экономичности, экологичности, безопасности. Если разрабатывался отдельный модуль, на этом этапе проверяется возможность интегрировать его в систему.

Испытания нового устройства или технологии в собранном виде проводятся на **уровне 8 «сборка реальной системы и проверка работоспособности в условиях, близких к реальным»**.

Наконец, **9 уровень «работа реальной системы в реальных условиях»** означает запуск серийного производства новинки, успешно прошедшей все «полевые» испытания.

По мере увеличения уровня технической готовности уменьшаются риски невнедрения.

Научное и финансовое сообщества уделяют особое внимание оценке перспективности различных разработок, в том числе для потенциально возможных новинок оставляют заготовки в семействах стандартов, формируют международные рабочие группы, называют технологии «говорящими» наименованиями, как например, NGN — «сеть следующего поколения».

Вопросы для самоконтроля

1. Какие разработки можно считать перспективными?
2. Какую поддержку может получить новая разработка от государства и других заинтересованных сторон?
3. На каких уровнях базовой сетевой модели могут вестись разработки?
4. Почему только на старших уровнях готовности технологии можно говорить о реальном потенциале внедрения разработки?
5. Назовите приоритетные направления развития науки и техники в РФ.
6. Приведите пример критических технологий в области связи.
- 7*. Приведите примеры моделей различного уровня в системах связи.
- 8*. При каких условиях разработка будет действительно перспективной?
- 9*. Приведите примеры технических показателей качества систем связи.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99. Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель. — М. : Стандартинформ, 2006.
2. Протокол передачи данных // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Протокол_передачи_данных
3. Сетевая модель OSI // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Сетевая_модель_OSI.
4. Ожегов, С. И. Толковый словарь русского языка / С. И. Ожегов, Н. Ю. Шведова. — М. : Азъ, 1992.
5. Федеральный закон от 23.08.1996 № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике». — URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_11507/
6. Указ Президента РФ от 07.07.2011 № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации». — URL : <http://static.kremlin.ru/media/events/files/41d38565372e1dc1d506.pdf>

7. Национальная технологическая инициатива [Электронный ресурс]. — URL : <http://www.nti2035.ru/nti/>

8. Нейронет // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : <https://ru.wikipedia.org/wiki/Нейронет>

9. Национальная технологическая инициатива // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Национальная_технологическая_инициатива

10. Паспорт Программы инновационного развития Государственной корпорации «Ростех» на период 2016–2020 годов». — URL : <https://rostec.ru/innovations/projects/Паспорт%20ПИР%20ГКРТ%202018.pdf>

11. ГОСТ Р 56861-2016 «Система управления жизненным циклом. Разработка концепции изделия и технологий. Общие положения». — URL : <http://docs.cntd.ru/document/1200132491>

12. Анисимов, Э. А. Квалиметрия и управление качеством : учеб. пособие / Э. А. Анисимов. — Йошкар-Ола : ПГТУ, 2018. — 74 с. — URL : <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=486989>

13. Миньков, С. Л. Техничко-экономическое обоснование выполнения проекта : метод. пособие / С. Л. Миньков. — Томск : ТУСУР, 2014. — 30 с. — URL : http://asu.tusur.ru/learning/spec080801/d26/s080801_d26_work.pdf

Глава 2. Перспективные направления развития систем связи

2.1. Современное состояние и тенденции развития систем связи

В настоящее время существует множество наработок, чей потенциал ещё не исчерпан, и наряду с работой над будущим сетей связи реализуются проекты по расширению доступа к существующим технологиям, обеспечению связью большего количества людей и организаций, охват связью труднодоступных районов.

С точки зрения развития особенностями настоящего момента являются:

- во-первых, большая загруженность частотного спектра в диапазонах до десятков ГГц, порождающая освоение новых диапазонов частот и исследование физических принципов, на которых можно было бы построить эффективную аппаратуру в этих диапазонах, разработка новых элементов и устройств, создание методов приёма и обработки с учётом особенностей частотного диапазона;

- во-вторых, стремление к миниатюризации, обеспечивающее тот же или более мощный функционал при большей мобильности и вызывающее потребности в применении новых материалов и сверхплотном размещении элементов, в интеграции приёмопередатчиков и элементов их антенно-фидерных трактов в одном кристалле, в дроблении одного крупногабаритного устройства на сеть из множества мелких устройств при сохранении общих характеристик и управляемости;

- в-третьих, потребность во всё больших скоростях передачи и обработки информации, что заставляет расширять полосу используемых частот, искать способы построения всё более широкополосных устройств, разрабатывать схемы и программы компенсации неоднородности свойств основных блоков аппаратуры, а также экономить мощность и энергоресурсы приёмопередатчиков, разрабатывая методы адаптивного диаграммоформирования для антенно-фидерных систем и адаптивного энергопотребления, методы контроля занятости частотных по-

лос и оптимизации частотного спектра для передачи с минимальными затратами, методы энергетически эффективных модуляции и кодирования, приёма сигналов в условиях априорной неопределённости, идентификации свойств сигнала для адаптации приёмника к нему и т. п.;

- в четвёртых, необходимость обеспечивать всё более высокое качество сигнала на выходе приёмника одновременно с уменьшением мощности и габаритов передатчика порождает потребность во всё более точном измерении уровня сигнала на входе приёмника (в том числе для компенсации потерь в канале), выделении его из-под помех и внутренних шумов аппаратуры, в разработке методов снижения собственных шумов устройств (в том числе за счёт охлаждения), методов повышения радиоконтраста «сигнал — фон», в том числе за счёт обработки или прогнозирования вероятностно-статистических свойств помех и шумов;

- в-пятых, из-за огромного количества одновременно работающих устройств и наличия нелицензируемых полос частот появляется потребность в обеспечении их электромагнитной совместимости с запасом «по умолчанию», в том числе за счёт использования для работы шумоподобных сигналов, оказывающих слабое влияние на устройства с «чужой» формой кодового сигнала, а также в координации их работы, т. е. в существенно большем быстроедействии вычислителей.

Традиционные задачи, стоявшие перед разработчиками систем связи, получают новое развитие. «Вечные» задачи построения и апробации физических моделей каналов и распространения сигналов в них (для использования их в вероятностных моделях приёма (в том числе многоканального) и обработки информации расширяются на новые условия лесов и лесополос с конкретными условиями посадок, различных ситуаций городской застройки, турбулентной атмосферы с различными нестационарными процессами, для комбинированных каналов связи на большие расстояния, наконец, для таких новых каналов, как межспутниковые (с учётом гравитации, накопившегося космического мусора и действующих космических аппаратов). Анализируется возможность использования традиционных каналов связи для качествен-

ной передачи новых сигналов. Требуются методы защиты информации в сетях, основанных на новых физических принципах, как, например, квантовые сети. К «вечным» задачам можно отнести и разработку аппаратуры, способной обеспечить связь в новых диапазонах частот, например надёжного сверхчувствительного приёмника терагерцевого диапазона с применением дешёвых в массовом производстве материалов.

Однако сегодня стоят и новые задачи. Это проблемы использования тела человека как среды для распространения сигналов связи и других устройств ближнего действия. Среди таких задач — создание антенн систем персональной связи или медицинского наблюдения, интегрированных в кожу человека, но безопасных для него. Это и задачи обеспечения физической целостности системы «живой организм — бионический протез», хорошей проводимости сигналов, управляемости рабочих элементов, например пальцев вживлённой роботизированной руки, интеграции электрических цепей с нервными волокнами в единый сигнальный канал и исследование его свойств, временных и других характеристик. Наконец, это задачи организации в сеть и управления поведением множества различных устройств, от команды роботов до временной группы из устройств, способных сформировать Интернет вещей. При этом разработчики обращают внимание на новые интересные материалы: лёгкие, прочные композитные материалы, в том числе метаматериалы, обладающие свойствами, не обнаруживаемыми у природных веществ, которые можно выращивать, с большой точностью формируя как химическую структуру, так и форму поверхности; прозрачные материалы для электродов, антенн, дисплеев, обладающих новыми свойствами; сверхпроводники, в которых можно управлять фазой, спином или поляризацией для организации квантовых сетей; биоразлагаемые полимеры и биосовместимые материалы для имплантации или внутреннего употребления в теле человека или животных для получения биомедицинской телеметрии; гибкие материалы для устройств подвижной связи; двумерные материалы, обусловившие современный технологический прорыв в области элементной базы устройств связи.

2.2. Миниатюризация устройств связи

Миниатюризация — постоянное требование, связанное с растущими потребностями перемещающихся пользователей. Сегодня актуальны следующие направления миниатюризации:

- уплотнение размещения элементов в одной схеме, в том числе многослойное размещение вместо двустороннего или даже реализация «в одном кристалле»,

- более плотная компоновка в антенной решётке за счёт применения фрактальных антенн,

- переход к меньшим размерам за счёт повышения частоты,

- высвобождение мощностей и места с помощью распределенных систем управления, обработки и хранения информации.

Однако существуют пределы миниатюризации при работе на существующих принципах и требуются прорывные идеи для их преодоления.

Требующиеся малые размеры и высокое быстродействие побуждают разрабатывать в качестве основы современной и перспективной цифровой схемотехники транзисторы, управляемые полем (полевые), причём искать новые геометрические решения для выполнения и взаимного размещения их элементов.

Одна из основ современной миниатюризации устройств — использование так называемых **двумерных материалов** [1] — материалов толщиной в один атом. Первым двумерным материалом был двумерный углерод, принимающий форму лент (*графен*, полупроводник) или трубок (*фуллереновые нанотрубки* [2], проводник или полупроводник). Сегодня известны сотни типов двумерных кристаллов, которые используют по отдельности или соединяют в различных комбинациях. Есть материалы, которые превосходят графен по свойствам.

Полевые транзисторы на графене и графеноподобных веществах [3; 4] разрабатывают и исследуют уже несколько лет. Обнаружено, что в однослойном графене отсутствует запрещённая зона, а в двухслойном, узких полосках и нанотрубках величина запрещённой зоны мала. Это приводит к малому отношению токов открытого и закрытого состояний в полупроводниковых транзисторах на их основе, что затрудняет различение этих состояний. Таким образом, эффективность использования графено-

подобных полупроводников для создания канала в транзисторах со стандартной структурой «металл — диэлектрик — полупроводник», используемых для построения логических схем вычислителей, невелика. Потребовалась разработка новой, нестандартной геометрии [5].

Достоинства графена и графеноподобных материалов многочисленны: низкое энергопотребление, возможность соединения напрямую, работа до 2 ТГц, сверхвысокое быстродействие за счёт большой подвижности носителей заряда. Обнаружился и ряд новых эффектов, в частности у графеновых приборов есть свойство управляемости с помощью магнитного поля, причём при наложении магнитного поля ток течёт быстрее, а не медленнее, как обычно. Это свойство сумели использовать, построив транзистор из трёх углеродных нанотрубок [6]. Две целые, расположенные по краям, являлись проводниками — источниками магнитного поля, а центральная с частичным разрывом посередине (что сделало её эквивалентом графеновой ленты) являлась затвором, работа которого регулировалась магнитным полем боковых трубок. Оказалась возможной регулировка токов в боковых трубках как по отдельности (при этом формируется аналог простейшего логического элемента), так и одновременно (в этом случае один такой элемент реализует целую логическую схему). Такая элементная база получила название *спиновой*.

Магнитные явления в твёрдых телах, обусловленные наличием собственного и орбитального моментов электронов, и создание устройств обработки информации на их основе [7] изучает наука *спинтроника* [8; 9]. Спиновые транзисторы могут представлять собой и слоистую структуру «ферромагнетик — кремний — ферромагнетик — кремний с примесями», в которых после прохождения первого слоя магнетика электрический ток приобретает спин-поляризацию, которая частично сохраняется при дальнейшем движении через слой кремния. Путём изменения ориентации магнитных полей двух слоёв можно управлять значением спинового тока. Последние исследования показывают, что спиновые приборы могут оказаться и устойчивыми к радиации. Такое свойство позволит существенно миниатюризовать и сде-

лать надёжной элементную базу для спутниковых и космических систем связи, что является прорывом.

Применение двумерных материалов для создания элементов узлов систем связи не ограничивается логическими схемами или усилителями. Появились детекторы для терагерцового диапазона, построенные с применением графеновых нанолент [10] или углеродных нанотрубок [11], антенны из композитных материалов, в том числе с использованием графена [12], фотодиоды терагерцового и инфракрасного диапазонов [13] на основе нанолент графена, а также управляемые поляризаторы [14].

Нанотрубку можно считать и антенной, и приёмником сигнала одновременно. Практически это способ организовать реализацию различных функциональных узлов «в одном кристалле».

Одна из интересных тенденций — применение наночастиц в качестве матрицы излучателей или приёмников излучения различных диапазонов. Одиночная наночастица является излучателем в оптическом диапазоне. Такой частицей может быть даже одиночный атом вещества — его моделируют диполем Герца, а может быть цепочка атомов — её моделируют элементарной магнитной антенной. Наноантенны, нагруженные на квантовые точки [15], могут работать с хорошей эффективностью как нано-патч-антенны, обеспечивая как ненаправленные, так и направленные диаграммы направленности за счёт дипольного, квадрупольного и других излучений в разных диапазонах, в том числе терагерцовом. Наночастицы, например, кремния могут быть заключёнными в оболочку из тонкого слоя металла — серебра, золота, меди. Такое решение может обеспечить лучшие свойства, чем наноантенна сама по себе, за счёт резонансных и фокусирующих свойств оболочки [15].

Открытие графена положило начало и ещё одному направлению миниатюрных элементов — биосенсорам. **Биосенсоры** [16] — устройства, способные чувствовать и распознавать биологически активные молекулы, что можно применить в медицинских целях (для распознавания ферментов, ДНК-зондирования и анализа работоспособности иммунной системы), а также в системах обеспечения безопасности (как датчик импеданса, обнаружитель электрохемилюминесценции или флуоресцирования, маркер ве-

ществ биологического происхождения). Они состоят из рецептора и преобразователя. Рецептором, способным прореагировать на конкретное вещество, может служить наночастица или молекула любого материала, вступающего в специфическую (что характеризуется количественно) химическую реакцию с анализируемым веществом. В роли преобразователя выступает полевой транзистор с графеновой нанолентой в роли канала. В процессе распознавания химическое взаимодействие между молекулой рецептора и анализируемой изменяет плотность носителей заряда в слое преобразователя, а следовательно, и проводимость канала. Метод оказывается очень чувствительным, прекрасно индицирует наличие заряженных молекул, что позволяет применить его для анализа молекул ДНК, являющихся полярными, т. е. несущими заряд. При этом возможно управлять процессом, изменяя свойства графенового преобразователя, в том числе используя не одну ленту, а несколько параллельных.

В 2016 г. появились первые полевые транзисторы с затвором размером 1 нм [17]. Это было достигнуто за счёт замены кремния на сульфид молибдена. Транзистор размещается на кремниевой подложке, покрытой слоем диоксида циркония. Канал представляет собой натянутую в два слоя тонкую плёнку дисульфида молибдена MoS_2 , а затвором служит однослойная углеродная нанотрубка, проходящая через слой ZrO_2 . Разработана и технология [18], позволяющая промышленное производство таких транзисторов: медленное осаждение в печи молекул MoS_2 на обработанный кислородом лист графена создаёт плёнки только в нужных местах.

Есть разработки и с применением других материалов, позволяющие одновременно с уменьшением размеров добиться и улучшения свойств. Например, предлагают строить алмазную электронику на метал-оксид-полупроводниковых полевых транзисторах, выращенных с помощью электронного напыления из кристаллов искусственных алмазов с различными в разных частях транзистора примесями с изолирующими плёнками оксида иттрия [19]. Помимо большей теплопроводности, обеспечивающей возможность работы в условиях высоких температур, алмазные устройства оказываются существенно более

стойкими к радиации, что позволяет рассматривать их в качестве основы для космической аппаратуры.

Не таким радикальным, но всё же решением для миниатюризации является использование **фрактальных антенн** [20–22] — антенн, имеющих фрактальную геометрию. В качестве излучающего элемента берётся и запитывается в некоторой «точке» проводник в форме фрактала некоторого порядка (например, в форме ковра Серпинского у печатных антенн Серпинского или в форме фрактала Коха в монополе Коха) или их комбинаций (два плеча диполя Коха выполняются как ломаные Коха, или в антенне «снежинка Коха» ломаные Коха заменяют собой стороны равностороннего треугольника, образуя замкнутую линию).

Фрактальная геометрия обеспечивает ряд свойств антенн:

- компактность (за счёт увеличения длины физического пути тока по сравнению с линейными антеннами);
- многодиапазонность (за счёт масштабного изменения длин рабочих участков проводников при сохранении формы);
- экономичность (меньшая масса и меньший расход материала, чем планарные антенны тех же размеров).

Кроме того, именно фрактальные антенны могут обеспечить нормальную (без недопустимого влияния друг на друга) работу при более плотном, чем традиционное (с интервалом в половину длины волны), размещении элементов в решётке. Например, в габаритах пятиэлементной решётки Дольфа — Чебышёва из квадратных излучателей можно расположить семь элементов Минковского [20].

Одно из современных применений фрактальных антенн — в системах ММО, где множественность входов и выходов обеспечивается антенными решётками передатчиков и приёмников.

Помимо формирования непосредственно проводящих путей, фракталы могут использоваться для формирования технологии частотно-селективных поверхностей, обечаек зеркальных рефлекторов, построения профилей апертуры рупорных антенн, фрезеровки пазов в щелевых антеннах [21].

2.3. Интеллектуализация систем связи

Системы связи получают интеллектуальную надстройку над существующим оборудованием и технологиями, или, что более интересно, с самого начала строятся системы, способные как проводить самотестирование и самоотладку, так и удовлетворять запросы пользователей в соответствии с ситуацией или контекстом.

Интеллект вводится в различные инфокоммуникационные системы, например:

- системы связи (интеллектуальная телефония, видео по запросу),
- контекстная реклама, в том числе видео- и аудио-, в поисковиках,
- Интернет (подстройка содержимого выдач под профиль пользователя),
- поисковые системы (интеллектуальные помощники — «Алиса» Яндекса, «Сири» Гугла),
- интеллектуальный транспорт и транспортные системы [23] — системы, в которых применяются информационные и коммуникационные технологии в сфере транспорта (включая инфраструктуру, транспортные средства, дорожно-транспортное регулирование),
- интеллектуальный Интернет проекта «НейроНет», основанный на нейрокомпьютерных интерфейсах [24].

Существующие интеллектуальные сети [25] представляют собой надстройку над существующими сетями, реализуемую на прикладном уровне и организующую интерактивное взаимодействие с абонентом. Интеллектуальная часть сети запрашивает данные — адреса, коды доступа, настройки биллинга, выполняет над ними логические и математические операции и осуществляет соединение, выдачу информации или уведомлений, открытие доступа к контенту или службам. Перспективное направление развития — интеллектуализация управления сетью. Развитие Интернета вещей и других сетей с множеством узлов привело к пониманию, что стандартные модели уже не соответствуют современным требованиям к уровню точности, т. к. реальное поведение объектов сети отличается от модельного. Реализации сетей отличаются большим разнообразием, поэтому очевидным решением является по-

строение сети на основе некоторой модели, наблюдение и сбор данных о её поведении, а затем модификация модели с учётом накопленных данных. Собирая данные с некоторой периодичностью, получим динамические модели, отображающие состояние сети с заданной точностью. Их можно использовать для оптимизированного управления маршрутизацией в сети и другими её функциями. Таким образом, сеть получает интеллектуальное управление при помощи технологий, основанных на анализе больших массивов данных и машинном обучении. Подобная архитектура управления когнитивными сетями описана в группе промышленных стандартов «experimental network intelligence» ETSI.

Решению различных задач могут помочь различные виды анализа данных [26]:

- **описательный анализ** (фиксирует поведение сети и абонента),

- **диагностический** (определяет причины, выявляет аномалии в работе сети),

- **предсказательный** (позволяет построить модели трафика, использования ресурсов, изменения во времени качества услуг, поведения пользователя, определить его будущее местоположение, источники будущих ошибок и проблем и их влияние на работу сети),

- **предписательный анализ** (позволяет сформулировать критерии и алгоритмы принятия решений и планирования нормальной работы сети, построить планы расширения сети, эффективного использования её ресурсов, необходимых мер по исправлению и предотвращению ошибок).

В результате анализа интеллектуальное программное обеспечение будет изменять работу сети: драйверы биллинга и услуг будут управлять трафиком так, чтобы качество услуг повысилось без повышения стоимости, т. е. в рамках действующего для абонента тарифа; драйверы использования ресурсов сети будут дифференцированно управлять маршрутизацией информационных потоков, при этом сеть должна будет выдерживать рост трафика даже без увеличения её ёмкости, только за счёт оптимизированного использования; драйверы технологий будут обеспечивать создание виртуальных сетей, вычисления, работу политик с соблюдением стандартов нового поколения.

2.4. Новое поколение систем мобильной связи

Сегодняшнее, четвёртое поколение сетей связи хорошо охарактеризовано в статье [27]. Новое, пятое поколение, которое, как ожидается, появится в 2020 г., унаследует лучшие черты предыдущего, но будет иметь и свои отличительные особенности, сформулированные в рекомендации ITU-T Y.3101 [28] и [29]:

- мультитехнологичность — поддержка как уже существующих стандартов GSM, UMTS, LTE, так и разрабатываемых в настоящее время;

- большое число одновременно подключённых к сети устройств, многие из которых «всегда онлайн»;

- поддержка технологии M2M (машина — машине) и развитие Интернета вещей;

- использование в качестве ключевой технологии MIMO, причём как в современных конфигурациях 1x2, 2x2, 4x4, так и для случая, когда на какой-либо из сторон коммуникации используется множество антенн — *Massive MIMO*;

- уменьшение энергопотребления устройств;

- виртуализация сети;

- расширение полос частот и активное использование широкополосных сигналов, а также выделение новых полос частот.

При этом предполагается достижение таких характеристик:

- пиковая скорость передачи данных: 20 Гбит/с в линии вверх и 10 Гбит/с в линии вниз;

- пиковая спектральная эффективность 30 и 15 Гбит/с/Гц соответственно;

- ширина полосы частотного канала — до 1 ГГц;

- максимальная плотность соединяемых абонентских устройств — до 1 млн на 1 км².

В радиоинтерфейсах сетей 5G предполагается использовать несколько сигнально-кодовых конструкций, в основе которых будут использоваться предварительно фильтрованные сигналы с множеством несущих: GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing), FBMC (Filter Bank Multicarrier), UFMC (Universal Filtered Multicarrier), BFDM (Bi-Orthogonal OFDM).

Для обеспечения заявленных скоростей передачи и совместимости с уже развёрнутыми сетями мобильной радиотелефон-

ной связи и сетями, работающими по технологиям WiFi и WiMax, будут использоваться две полосы частот: от 600 МГц до 6 ГГц и от 24 ГГц до 40 ГГц. В диапазоне выше 40 ГГц будут выделены дополнительные полосы, в которых дуплексный режим будет реализован с использованием временного разделения каналов TDD.

Архитектура сети будет содержать базовые станции трёх типов: макросотовые (обеспечивающие связь с абонентскими терминалами на расстояниях до 35 км), микросотовые — до 5 км и пикосотовые — до 2 км.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите тенденции развития систем связи.
2. Дайте краткую характеристику современного состояния систем связи.
3. Приведите примеры использования новых материалов в системах связи и телекоммуникационных устройствах.
4. Какими свойствами обладают метаматериалы?
5. Чем привлекательны двумерные материалы?
6. В каком диапазоне длин волн излучают наноантенны?
7. Какой принцип функционирования элементной базы обеспечивает её устойчивость к воздействию радиации?
8. Каков достигнутый сегодня уровень миниатюризации устройств?
9. Опишите работу биосенсоров.
- 10*. Какие материалы являются прозрачными для сигналов?
- 11*. Какие требования предъявляются к перспективной элементной базе?
12. Что означает интеллектуализация систем связи?
- 13*. Почему в настоящее время требуются новые принципы построения систем связи?
- 14*. Каковы перспективные потребности современных пользователей систем связи?
15. В чём отличие функционирования устройств с одной и с несколькими антеннами на современном этапе?
16. Каковы планируемые особенности сетей 5G?

Литература

1. Двумерный кристалл // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Двумерный_кристалл
2. Углеродные нанотрубки // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Углеродные_нанотрубки
3. Графеновый полевой транзистор // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Графеновый_полевой_транзистор
4. Туннельные полевые транзисторы на основе графена / Д. А. Свинцов, В. В. Вьюрков, В. Ф. Лукичёв и др. // Физика и техника полупроводников. — 2013. — Т. 47. Вып. 2. — С. 244–250. — URL : <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/4903>
5. Давидович, М. В. Терагерцевый транзистор на основе графена / М. В. Давидович, О. Е. Глухова, М. М. Слепченко // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Серия : Физика. — 2017. — Т. 17. Вып. 1. — С. 44–54. — URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/teragertsevyy-tranzistor-na-osnove-grafena>
6. Cascaded spintronic logic with low-dimensional carbon / J. S. Friedman, A. Girdhar, R. M. Gelfand and others // Nature Communication. — 2017. — № 8. — P. 1–7. — URL : <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms15635>
7. Фетисов, Ю. К. Спинтроника : физические основы и устройства / Ю. К. Фетисов, А. С. Сигов // Материалы семинара «Исследования в области спинтроники и перспективы создания элементной базы на её основе». 26 июня 2018, Москва. — URL : <http://www.niime.ru/upload/01.pdf>
8. Спинтроника // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : <https://ru.wikipedia.org/wiki/Спинтроника>
9. Данилов, Ю. А. Основы спинтроники: учеб. пособие / Ю. А. Данилов, Е. С. Демидов, А. А. Ежевский. — Нижний Новгород, 2009. — 173 с. — URL : http://www.unn.ru/books/met_files/spintronik.pdf
10. Детектор модулированного терагерцевого излучения на основе графеновых нанолент / Ю. В. Стебунов [и др.] // Журнал радиоэлектроники. — 2012. — № 7. — URL : <http://jre.cplire.ru/jre/jul12/1/text.html>
11. Резонансный детектор модулированного излучения терагерцевого диапазона на основе углеродных нанотрубок

/ Ю. В. Стебунов [и др.] // Журнал технической физики. — 2012. — Т. 82. Вып. 1. — С. 67–72. — URL : <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/10503>

12. Электродинамические характеристики рупорных СВЧ антенн из графеносодержащих углекомпозитных материалов / Н. А. Дугин [и др.] // Журнал технической физики. — 2018. — Вып. 2. — С. 276. — URL : <http://journals.ioffe.ru/articles/45421>

13. Рыжий, В. И. Фотодиоды терагерцевого и инфракрасного диапазонов на основе графеновых нанолент / В. И. Рыжий, М. В. Рыжий, Н. Л. Рябова // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия : Приборостроение. — 2011. — № S2. — URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/fotodiody-teragertsevogo-i-infrakrasnogo-diapazonov-na-osnove-grafenovyh-nanolent>

14. Макеева, Г. С. Математическое моделирование управляемых поляризаторов терагерцевого диапазона на основе периодических 2D-структур из прямоугольных нанолент графена / Г. С. Макеева, О. А. Голованов, В. В. Вареница, Р. А. Горелов // Известия вузов. Поволжский регион. Физико-математические науки. — 2015. — № 2 (34).

15. Arslanagić, S. Cylindrical and Spherical Active Coated Nanoparticles as Nanoantennas / S. Arslanagić, R. W. Ziolkowski // IEEE Antennas and Propagation Magazine. — 2017. — Dec. — P. 14–29.

16. Pumera, M. Graphene in biosensing / M. Pumera // Materials today. — 2011. — V. 14. № 7–8. — P. 308–315.

17. MoS₂ transistors with 1-nanometer gate lengths / S. B. Deasi, S. R. Madhvarathy, A. B. Sachid and others // Science. — 2016. — Vol. 354. — Issue 6308. — P. 99–102.

18. Large-scale chemical assembly of atomically thin transistors and circuits / M. Zhao, Y. Ye, Y. Han and others // Nature Nanotechnology. — 2016. — V. 11. — P. 954–959.

19. Enhancement-mode hydrogenated diamond metal-oxide-semiconductor field-effect transistors with Y₂O₃ oxide insulator grown by electron beam evaporator / J. W. Liu, H. Oosato, M. Y. Liao, Y. Koide // Appl. Phys. Lett. — 2017. — V. 110. — 203502.

20. Слюсарь, В. И. Фрактальные антенны / В. И. Слюсарь // Радиоаматор. — 2002. — № 9. — С. 54–56.

21. Слюсар, В. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип «ломаных» антенн / В. Слюсар // Электроника : наука, технология, бизнес. — 2007. — № 5. — С. 78–83.

22. Слюсар, В. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип «ломаных» антенн: часть 2 / В. Слюсар // Электроника : наука, технология, бизнес. — 2007. — № 6. — С. 82–89.
23. Интеллектуальная транспортная система // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Интеллектуальная_транспортная_система
24. Нейронет // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : <https://ru.wikipedia.org/wiki/Нейронет>
25. Intelligent Network // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Intelligent_Network
26. Kibria, M. G. Big Data Analytics, Machine Learning, and Artificial Intelligence in Next-Generation Wireless Networks / M. G. Kibria, K. Nguyen, G. P. Villardi et al. // IEEE Access. — 2018. — V. 6. — P. 32328–32338. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2837692.
27. Вишневский, В. М. Технология сотовой связи LTE — почти 4G / В. М. Вишневский, А. Красилов, И. В. Шахнович // Электроника : Наука, Технология, Бизнес. — 2009. — № 1. — С. 62–72.
28. Rec. ITU-T Y3101. Requirements of the IMT-2020 network.
29. Massive MIMO : white paper / Global TD-LTE Initiative. — 2017-02-06. — URL : <http://www.lte-tdd.org/d/file/Resources/rep/2017-03-01/fe7f17a192f762ed7049b6cbbd4f425.pdf>

Глава 3. Эффективные и перспективные технологии в системах инфокоммуникаций

3.1. Кодирование шумоподобными кодами

Перспективные коды сегодня ищут среди *псевдослучайных последовательностей (ПСП)* [1] — последовательностей чисел, которые могут быть вычислены по некоторому определённом арифметическому правилу, но имеют все свойства случайной последовательности чисел в рамках решаемой задачи.

Среди ПСП особую роль играют *двоичные последовательности*, в которых элементы принимаются два возможных значения («0» и «1» или «−1» и «+1»). На физическом уровне под «0», «−1» и «+1» понимают различные физические величины: нулевой и отличный от нуля уровни сигнала, большую и малую амплитуду импульсов — для сигналов с амплитудной манипуляцией, две различные частоты — для частотной, две ортогональные поляризации — для поляризационной, два независимых направления излучения или приёма — для пространственной модуляции, положительная и отрицательная полярности импульсов, модулирующих гармоническую несущую — для фазоманипулированных сигналов.

ПСП в роли кодов способны обеспечить более высокую помехоустойчивость связи, лучшую защищённость информации, лучшие условия для разделения сигналов различных абонентов, чем обычные последовательности. Поэтому не прекращаются попытки поиска и построения последовательностей, обладающих свойствами, которые гарантируют обеспечение таких возможностей при прочих привлекательных свойствах.

Последовательности могут быть **периодическими** (набор символов в таких последовательностях повторяется, а код представляет собой конечное число периодов) или **непериодическими**. Статистические свойства периодических ПСП должны удовлетворять ряду правил — *постулатов С. Голомба* [2]:

1) количество единиц и нулей в каждом периоде должно отличаться не более чем на единицу;

2) группы из одинаковых символов типа «00» и «11» должны составлять 1/4 всех символов периода, «000» и «111» — 1/8 и т. д., а половина символов в каждом периоде должна представлять собой отдельные «0» и «1»;

3) автокорреляционная функция ПСП должна принимать только два значения.

С этими требованиями часто сравнивают статистические свойства произвольных, т. е. не только периодических кодовых последовательностей, подразумевая, что перечисленный набор свойств гарантирует высокую эффективность применения кода.

ПСП характеризуют в первую очередь их непериодической **автокорреляционной функцией (АКФ)**:

$$R_j = \sum_{i=1}^{N-j} a_i a_{i+j}^*,$$

где индекс j обозначает количество символов, на которые сдвинута копия ПСП относительно оригинала, $1 \leq j < N$, а i — индекс дискретного времени. АКФ ПСП можно вычислять и с помощью выражения $R_j = (Aj - Dj) / N$, в котором для каждого сдвига j копии относительно оригинала количества согласованностей Aj и несогласованностей Dj между этими последовательностями вычитаются и затем делятся на число символов в периоде N . АКФ для отрицательных сдвигов во времени получают комплексным сопряжением к зеркальному отображению АКФ для положительных индексов относительно оси ординат. В АКФ выделяют **главный лепесток** (при нулевом сдвиге, $j = 0$) и **боковые** (при остальных величинах сдвига) **лепестки**.

По АКФ определяют:

1) уровень главного лепестка

$$УГЛ = R_0 = \left| \sum_{i=1}^N a_i a_i^* \right| = N;$$

2) **максимальный уровень боковых лепестков** в линейном или, что более информативно, логарифмическом масштабе:

$$УБЛ = \max(R_j), 1 \leq j < N,$$

$$УБЛ[дБ] = 20 \log(УБЛ / R_0);$$

3) **интегральный уровень боковых лепестков**, равный отношению энергии, заключённой в боковых лепестках, к энергии, заключённой в главной лепестке АКФ:

$$ИУБЛ = E_{бок.леп} / E_{гл.леп}.$$

Его вычисляют с помощью выражения для энергии символьной последовательности $E = 2 \sum_{i=1}^{N-1} R_i^2$:

$$ИУБЛ = E / R_0^2$$

и используют обычно в логарифмическом масштабе:

$$ИУБЛ[дБ] = 10 \lg(ИУБЛ).$$

Эти величины многое говорят о помехоустойчивости ПСП: чем ниже уровень боковых лепестков АКФ, тем лучше приёмник идентифицирует «свою» ПСП среди набора поступивших на вход кодов. Более того, при этом будут иметь лучшую различающую способность и функции взаимной корреляции (ВКФ) выбранной ПСП с любыми другими. Кроме общей характеристики, они позволяют анализировать потенциальную эффективность использования последовательности в конкретных приложениях. Так, низкий уровень боковых лепестков позволяет уменьшать влияние переотражений от точечных отражателей в задачах радиолокации, а низкий интегральный уровень лепестков — и от помех распределённых в пространстве отражателей.

В настоящее время широко распространены коды Баркера [3], Касами [4], Голда [5], m -последовательности [6], а также построенные с их использованием длинные коды, формирующие сигналы с большой базой. Такие коды занесены в общую базу данных по числовым последовательностям (см., например, последовательность A091704 [7], описанную ниже).

Одними из самых популярных сейчас являются **коды Баркера** — двоичные ПСП длины N с символами a_i , удовлетворяющие условию:

$$\left| \sum_{i=1}^{N-j} a_i a_{i+j} \right| \leq 1$$

для всех $1 \leq j < N$. Сегодня известны 9 найденных Р. Х. Баркером коротких последовательностей с длинами от 2 до 11 символов и доказано, что других последовательностей нечётной длины не существует вовсе, а чётной — в границах разумной (не более 1 миллиона символов, чего требует быстроедействие современной аппаратуры) длины ПСП (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Коды Баркера

N	Коды		УБЛ, дБ	ИУБЛ, дБ
2	+1 -1	+1 +1	-6,02	-3,01
3	+1 +1 -1		-9,54	-6,53
4	+1 +1 -1 +1	+1 +1 +1 -1	-12,04	-6,02
5	+1 +1 +1 -1 +1		-13,98	-7,96
7	+1 +1 +1 -1 -1 +1 -1		-16,90	-9,12
11	+1 +1 +1 -1 -1 -1 +1 -1 -1 +1 -1		-20,83	-10,83
13	+1 +1 +1 +1 +1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 +1		-22,28	-11,49

ПСП Баркера имеют минимальный из известных сегодня уровень боковых лепестков АКФ (равный $1/N$, или -22,278 дБ от уровня главного лепестка), а 4 из них удовлетворяют третьему постулату Голомба (ПСП с длинами 2, 3, 7 и 11). Благодаря таким замечательным свойствам 11-символьный (а не 13-символьный) код Баркера рекомендуется стандартом IEEE 802.11b для реализации технологии прямого расширения спектра (DSSS) в системах связи со скоростями 1 и 2 Мбит/с. При этом каждый единичный бит кодируется последовательностью Баркера, а каждый нулевой — её инверсией. Импульс длительности T_{δ} , соответствующий биту, делится на N чипов длительности $\tau_c = T_{\delta} / N$. Такое «уплотнение» сигнала («pulse compression» в английском языке) расширяет его спектр, а для систем радиолокации или радиовидения позволяет обеспечить лучшую разрешающую способность, чем без применения псевдослучайных кодов, т. к. с ростом ширины спектра система может всё лучше

локализовать объекты в пространстве, а значит, и различать, один объект наблюдается или несколько.

Используется внутриимпульсная двоичная фазовая модуляция: фаза сигнала для каждого чипа модулируется в соответствии со значением соответствующего элемента последовательности: 180° при « -1 » и 0° при « $+1$ ».

Модулированные ПСП сигналы принимают *корреляционными приёмниками*, которые хранят копию модулирующей последовательности в виде импульсной характеристики *согласованного с ней фильтра*. На выходе фильтра наблюдают взаимно-корреляционную функцию низкочастотного эквивалента принятого сигнала и использованной ПСП.

С точки зрения теории кодов у бинарных кодов Баркера определяют *кодировый алфавит* $S_2 = \{-1, +1\}$ — набор из двух используемых символов; при этом *кодировое пространство* (аналогично сигнальному, т. е. функциональное пространство) имеет размерность $2N$ (N раз по 2 символа).

Низкий уровень боковых лепестков кодов Баркера обуславливает их широкое применение и является причиной привлекательности этих коротких кодов, несмотря на очевидные потребности в длинных кодах. Один из способов описания ПСП — на основе теории групп.

Уровень боковых лепестков АКФ сохраняется при трёх преобразованиях ПСП Баркера [8]:

- **переворот** — отображение, при котором начальные и конечные символы меняются местами, например $\{+1, +1, -1\}$ заменяется на $\{-1, +1, +1\}$;

- **отрицание** — смена знака чипов: $\{+1, +1, -1\}$ заменяется на $\{-1, -1, +1\}$;

- **умножение на знакопеременную последовательность** — операция вида $Px = xA$, где $A = \text{Diag}(1, -1, 1, \dots, (-1)^{N-1})$.

Эти три операции образуют, с математической точки зрения, *группы*. Кодовое пространство разбивается на классы эквивалентности групп. Для кодов Баркера нечётной длины три операции порождают группу Абеля, изоморфную кодовому пространству с размерностью 6. Для кодов чётной длины эти операции

формируют неабелевы группы, что затрудняет поиск возможных кодов (до 10^{30} их не обнаружено, но, возможно, существуют интересные математиков как отдельная задача более длинные коды Баркера).

Баркер нашёл свои последовательности в середине XX в. С тех пор предпринимались попытки добиться лучших свойств путём дополнительных манипуляций с сигналом. Один из вариантов [9] — дополнительная амплитудная модуляция (АМ) сигнала чипа определённой формой — треугольной, гауссовской, экспоненциальной. Замена простого фазоманипулированного кодом Баркера сигнала на сигнал с дополнительной треугольной, а лучше с экспоненциальной или би-экспоненциальной (на разных участках интервала времени, соответствующего длительности чипа, показатель экспоненты имеет два различных значения) АМ не изменяет максимального уровня боковых лепестков, зато существенно (на 5,5 дБ для 13-символьного кода Баркера) снижает их интегральный уровень и сужает главный лепесток, что в случае с множественными переотражениями от протяжённых объектов (например, в условиях городской застройки) позволяет повысить помехозащищённость системы связи.

Одним из решений по «удлинению» кодов является двух-уровневое использование кодов Баркера — бит кодируется кодом Баркера одной длины, например 5, затем каждый чип кодируется кодом Баркера другой длины, например 3.

Ещё одно направление развития ПСП для связи и радиолокации — это построение новых последовательностей, которые хотя и наследуют некоторые свойства кодов Баркера, однако уже не являются даже двоичными: кодовый алфавит образуют m комплексных символов, а кодовое пространство имеет размерность mN . Есть несколько разновидностей таких ПСП [8]:

а) **обобщённые последовательности Баркера**, символы которой $x_m = \exp(i2\pi k / m)$, $k = 0, \dots, m-1$ для $m \geq 2$ представляют собой набор из m равномерно распределённых на окружности комплексных корней из единицы. Между чипами поддерживается постоянная разность фаз;

б) **полифазные последовательности**, для которых амплитуда чиповых сигналов тоже равна единице, но ограничений

на значения фаз нет, они не обязательно должны отличаться друг от друга на постоянную величину.

Более общее название обоих типов последовательностей — **унимодальные** [8], т. к. элементы кода имеют единичную величину. В отличие от кодов Баркера эти последовательности имеют эрмитову АКФ, уровень боковых лепестков которой может быть даже комплексным, однако не превосходит, за исключением пары экстремально больших лепестков, $1/(mN)$.

Строят и объединённые системы, включающие и длинные коды, например обобщённые последовательности Баркера длины N с размером алфавита строго больше двух, и короткие «настоящие» коды Баркера с двоичным алфавитом. Такие системы называют в отличие от кодов *последовательностями Баркера длины N* . При этом УБЛ сохраняется уже при четырёх операциях: комплексное сопряжение, обращение последовательности, умножение на число μ , модуль которого равен единице, и так называемое умножение на прогрессию с модулем $|\rho|=1$: операция вида $P_\rho x = xA_\rho$, где $A_\rho = \text{Diag}(\rho^0, \rho, \rho^2, \dots, \rho^{N-1})$. Эти 4 операции образуют с математической точки зрения группы, существует m групп, и все они неабелевы. Несмотря на это, такие последовательности искать гораздо легче, т. к. определяющая их формулировка поисковых критериев существенно менее строга, чем у кодов Баркера. Особенно легко искать полифазные последовательности с числом фаз, кратным 6. Доказано [10], что m -фазные обобщённые последовательности достаточно большой длины N существуют для всех $m \geq N$.

Для четверичных последовательностей Баркера (с четырьмя фазами сигналов чипов) УБЛ с ростом длины последовательности N повышается с 1 до 2 (при $N \geq 18$), а число таких последовательностей может быть как 1, так и 3, 4, ... 17 (при $N \leq 24$) [8].

Источник [11] среди оптимально в некотором практически удобном смысле сбалансированных бинарных и унимодальных кодов называет такие, как m -последовательности (последовательности Галуа), последовательности Лежандра, Сидельникова, а также конструкции из последовательностей: конструкции Холла, Мачетти, Диллон-Доббертин, Но-Чунь-Юнь, Гордон-Миллс-

Уэлч-конструкции, а также «the twin-prime construction» из двух последовательностей Лежандра, длины которых представляют собой отличающиеся на 2 простые числа.

Типичный уровень боковых лепестков двоичных последовательностей заключён в интервале от $o(1/\sqrt{\ln N})$ до 2 [11], а при стремлении длины последовательностей к бесконечности почти наверняка заключён в интервале от $1 - o(1)$ до $\sqrt{2}$ [12], что подтверждается работами, в которых производился перебор возможных вариантов последовательностей

Некоторые авторы, например [13], называют *оптимальными* те коды, ненормированная АКФ которых имеет величину максимального бокового лепестка, равную 1, а коды, уровень боковых лепестков АКФ которых близки, но всё же превышают 1, называют *субоптимальными*. В этой классификации коды Баркера являются оптимальными, а большинство последовательностей, конструируемых на их основе, — субоптимальными.

Для построения ПСП с хорошими свойствами используют различные методы. Это и методы комбинаторики длинных последовательностей [2], и методы теории полей и теории групп [14], алгебраические методы (подразумевающие составление и решение системы уравнений) [15], решение оптимизационной задачи [16] и другие. На основе сформулированных требований и формул строят алгоритмы генераторов кодовых последовательностей. Работу генераторов подвергают статистическому тестированию, проверяя соответствие постулатам Голомба, хорошо ли получается сжать получившийся поток символов [17].

Практически реализовать ПСП можно в том числе с помощью регистра сдвига с обратной связью [17]. Линейные регистры производят периодические последовательности, удовлетворяющие постулатам Голомба, которые способны обеспечить при применении в качестве модулирующих сигналов качественную связь, однако обладают невысокими криптографическими свойствами. Этот недостаток преодолевают при использовании нелинейных регистров сдвига, а также при комбинировании линейных и нелинейных регистров, например объединяя результат работы нескольких линейных регистров с помощью нелинейной функции, генерируя поток

как нелинейную функцию (нелинейный фильтр) от состояний или используя один линейный регистр как устройство тактирования для других линейных регистров [17].

Помимо двоичных, возможно применение и троичных последовательностей, однако теория троичных последовательностей, обладающих полезными для систем связи свойствами, на сегодня имеет существенные пробелы, не позволяющие рассматривать их как эффективные в ближайшей перспективе коды.

Ещё один вариант получения ПСП с заданными свойствами — построение пар так называемых *комплементарных последовательностей* [18]. Это последовательности длины $N = 2^n$, непериодические АКФ которых $R_a(k)$ и $R_b(k)$ имеют боковые лепестки некоторой величины, но сумма АКФ пары имеет только один отличный от нуля лепесток — главный, т. е. $R_a(k) + R_b(k) = 2N\delta(k)$, где $\delta(k)$ — символ Кронекера. Идея была впервые представлена М. Голэ, поэтому ещё одно название части таких последовательностей — пары Голэ. Пример пары Голэ из последовательностей длины 4 ($n = 2$): $(+1, +1, +1, -1)$ и $(+1, +1, -1, +1)$. Их АКФ соответственно: $(4, 1, 0, -1)$ и $(4, -1, 0, 1)$, а суммарная АКФ — $(8, 0, 0, 0)$. В дальнейшем теория комплементарных последовательностей получила развитие в виде полифазных, многоуровневых и произвольных комплексных комплементарных последовательностей. Сконструированы и комплементарные наборы, содержащие более двух последовательностей, и пары небинарных последовательностей.

Представление о том, как производится поиск ПСП, удовлетворяющих заданным свойствам, даёт статья [19]. Там же приведены найденные последовательности длины до 68 символов.

Хороший пример выбора сигнала для глобальной навигационной спутниковой системы приведён в [20]. Каждому космическому аппарату (спутнику) присваивается свой дальномерный код (сигнатура, адрес) — бинарная ПСП, задающая закон фазовой манипуляции общей для всех спутников несущей. Комплексную огибающую сигнала k -го спутника при этом можно записать в виде:

$$\dot{S}_k(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} a_{k,i} S_0(t - i\tau_c), \quad (1)$$

где $a_{k,i} = \pm 1$, $i = \dots, -1, 0, 1, \dots$ — бинарная кодовая ПСП, $S_0(\cdot)$ — форма элементарного импульса (чипа), τ_c — длительность чипа. Сигнатура периодична: $a_{k,i} = a_{k,i+N}$ для любого i и всех $k = 1, 2, \dots, K$. K — общее число сигналов, равное числу участников связи. С точки зрения теории кодов K — *мощность сигнатурного (кодowego) ансамбля*.

Задача синтеза ансамбля сигналов космических аппаратов состоит из двух подзадач: выбора формы и длительности чипа; оптимизации или синтеза оптимального ансамбля сигнатур.

Форма и длительность чипа должны обеспечить высокую спектральную эффективность, максимальную потенциальную точность измерения запаздывания сигнала и требуемую разрешающую способность по отношению к многолучевой помехе (способность системы отличать полезный сигнал, адресованный конкретному абоненту, от помехи). Длительность чипа выбирают, исходя из доступной полосы частот с учётом того, что основная доля энергии сигнала заключена в полосе частот, обратной длительности чипа. Форму же выбирают с учётом требований электромагнитной совместимости, на уровень мощности побочных излучений.

Гораздо сложнее задача оптимизации ансамбля сигнатур. Коды-адреса должны быть хорошо различимы. Следовательно, для анализа ансамбля кодов в целом требуется оценить значения **нормированных двумерных функций взаимной корреляции (ВКФ)** для каждой пары сигнатур, которые определяются следующим образом:

$$\rho_{kl}(\tau, F) = \frac{1}{E} \int_0^T \dot{S}_k(t) \dot{S}_l^*(t - \tau) \exp(-j2\pi Ft) dt, \quad k, l = 1, 2, \dots, K, \quad (2)$$

где E — энергия сигнала за период $T = N\tau_c$. Подставляя (1) в (2), получим, что модуль ВКФ k -го и l -го фазоманипулированных сигналов оказывается связанным с двумерной ВКФ чипа $\rho_0(\tau, F)$ и кодовой ПСП $\rho_{K,kl}(m, F\tau_c)$:

$$|\rho_{kl}(\tau, F)| = \left| \sum_{m=-\infty}^{\infty} \rho_{K,kl}(m, F\tau_c) \rho_0(\tau - m\tau_c, F) \right|, \quad k, l = 1, 2, \dots, K, \quad (3)$$

где **взаимно-корреляционная функция ПСП**

$$\rho_{K,kl}(m, F\tau_c) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} a_{k,i} a_{l,i-m} \exp(-j2\pi i F\tau_c) \quad (4)$$

есть мера сходства k -й и l -й сигнатур при их относительном сдвиге на m позиций по времени и взаимном набеге фазы за длительность чипа $F\tau_c$. Физически ВКФ (2) выражает отклик фильтра, согласованного с k -м сигналом, на l -й сигнал, расстроенный относительно фильтра на частоту F и нормированный к реакции фильтра на полезный сигнал. Если индексы k и l отличаются, то на вход приёмника пришёл чужой сигнал, он трактуется как *помеха множественного доступа*, и значения ВКФ должны быть как можно меньше в отличие от больших при приёме своего адреса. Модель (2) содержит задержку τ между полезным и сторонним сигналами, которая является произвольной из-за большого разброса длин трасс распространения сигнала от космических аппаратов до наземных адресатов, что свойственно природе спутниковых систем позиционирования. Так как при работе системы производится связь подвижных наземных абонентов с подвижными спутниками, то возникает и частотный сдвиг F , обусловленный различием доплеровских сдвигов сигналов спутников. Можно оценить величину частотного сдвига некоторой предельной величиной F_{\max} : $|F| \leq F_{\max}$.

Если теперь считать, что чип имеет прямоугольную форму, то ряд компонентов (1)–(4) приобретает простой вид. ВКФ чипа равна нулю за пределами длительности чипа: $\rho_0(\tau) = 0$ при $|\tau| > \tau_c$. Если теперь представить произвольную взаимную задержку сигналов в виде, явно указывающем на её кратность длительности чипа $\tau = m_0\tau_c + \tau_0$, где m_0 — целое, а $0 \leq \tau_0 < \tau_c$, то можно получить удобную для численного анализа форму ВКФ двух сигнатур

$$\begin{aligned} |\rho_{kl}(\tau, F)| = & |\rho_{K,kl}(m_0, F\tau_c)\rho_0(\tau_0, F) + \\ & + \rho_{K,kl}(m_0 + 1, F\tau_c)\rho_0(\tau_0 - \tau_c, F)|, \end{aligned} \quad (5)$$

где ВКФ прямоугольного чипа

$$\rho_0(\tau_0, F) = \frac{\sin[\pi F(\tau_c - |\tau_0|)]}{\pi F \tau_c} \exp[-j\pi F(\tau_c + \tau_0)]. \quad (6)$$

Задача оптимизации ансамбля сигналов заключается в построении таких кодовых последовательностей, при использовании которых помеха множественного доступа оказывается минимизированной. Так как при фиксированной форме чипа уровень этой помехи полностью определяется ВКФ кодовых последовательностей, то практическим критерием выбора сигнатурного ансамбля служит малый уровень взаимных корреляций между кодовыми последовательностями.

В стандартных задачах связи интегральным по ансамблю показателем минимума взаимного влияния сигналов является *среднеквадратический уровень взаимных корреляций* [20]

$$\rho_{ср.кв.} = \sqrt{\overline{|\rho_{K,kl}(m, F\tau_c)|^2}}, \quad (7)$$

где горизонтальная черта сверху означает усреднение по всем параметрам сигнатур $k \neq l$, всем их сдвигам по времени $0 \leq m \leq N-1$ и по частоте $|F| \leq F_{\max}$.

Для систем глобального позиционирования условия реализации связи далеки от идеальных: период сигнала составляет несколько миллисекунд, т. е. разрешение по частоте составляет около 1 кГц, и типичны широкие доплеровские расстройке частоты — до десятков килогерц (на десятки элементов разрешения по частоте). В этих условиях опираться на среднеквадратический уровень ВКФ не получается по двум причинам. Во-первых, при существенных частотных сдвигах среднеквадратический выброс взаимной корреляции любых двух фазомодулированных последовательностей не может быть ниже уровня $1/\sqrt{N}$, т. е. на существование оптимальных кодов рассчитывать не приходится. Во-вторых при случайном выборе фазоманипулированных сигнатур ожидаемое значение средней мощности помехи множественного доступа $\rho_{ср.кв.}^2$ равно $1/N$, т. е. эта величина практически не зависит от конкретной структуры кода, но зави-

сит от его длины, и значит, после того, как длина кода выбрана, уже нечем манипулировать в задаче оптимизации.

Ещё один стандартный параметр оценки качества кодового ансамбля — **максимальный по ансамблю пик ВКФ сигнатур** во всём диапазоне задержек во времени и частотных сдвигов [20]

$$\rho_{\max} = \max_{\substack{k \neq l \\ m, F}} |\rho_{K,kl}(m, F\tau_c)|. \quad (8)$$

Он, однако, тоже обладает недостатками: не учитывает статистическую природу помехи множественного доступа и подвержен влиянию густоты сетки, на которой производится анализ ВКФ (особенно сильно влияет сетка по частоте).

Наконец, из статистических критериев получили широкую известность **квантили помехи множественного доступа**, т. е. пороговые уровни, вероятность превышения которых выбросами ВКФ равна заданному значению, например 0,01.

Зачастую из-за невозможности провести синтез ансамбля, удовлетворяющего заданным критериям на всём интервале задержек и частотных сдвигов, рассматривают ситуацию нулевого частотного сдвига. Это объясняется тем, что приход сигнатуры стороннего спутника с нулевым частотным сдвигом — наиболее вероятная и наиболее болезненная для приёмника ситуация.

Потенциал минимизации нежелательных взаимных корреляций в ансамбле из K асинхронных сигнатур длины N лимитирован границей Велча [20]:

$$\rho_{\max}^2 \geq \rho_{\text{ср.кв.}}^2 \geq (K-1)/(KN-1) \approx 1/N \text{ при } K \gg 1. \quad (9)$$

Отсюда видно, что т. к. при случайном выборе сигнатур ожидаемое значение среднеквадратического уровня взаимных корреляций и при нулевом частотном сдвиге остаётся равным $1/N$, то всё, что можно сделать, — это пытаться искать ансамбли с минимальным значением корреляционного пика ρ_{\max} . Так как обеспечивается минимум максимального значения ВКФ, то получившиеся ансамбли называют **минимаксными**.

Если есть конкретные варианты ПСП, которые требуется проверить на соответствие минимаксному критерию, то остаётся

для каждого из них определить минимальную длину последовательности, которая обеспечивает это соответствие. Чем больше N , тем лучше ожидается в теории результат, однако на практике длина кода ограничивается возможностями аппаратуры: в первом поколении глобальных навигационных систем длины дальномерных кодов были ограничены значениями 1023 для GPS и 511 для ГЛОНАСС, т. к. приёмники могли включать лишь единицы корреляторов. С 2010-х гг. вполне реальны приёмники с сотнями корреляторов, что позволяет задействовать коды с длиной в десятки тысяч символов. В ближайшей перспективе возможен рост ещё на 2 порядка, обусловленный технологическим развитием приёмной аппаратуры. Примеры возможных вариантов минимаксных сигнатурных ансамблей и их параметров можно найти в [20], в том числе ансамбли Касами, Камалетдинова, Кердока и др. Известны и структуры генераторов таких ансамблей (см., например, [21]). Ансамбли отличаются как длиной кодов, так и их числом. Например, в ансамблях Касами и Камалетдинова порядка \sqrt{N} кодов, в ансамбле Кердока — порядка $N/2$, т. е. это действительно большой ансамбль: при длине кода 4094 число кодов не 45, а 2048. При практической реализации далее следует обратить внимание на сложность генераторов ансамблей, в том числе необходимое число триггеров. Сложность генераторов Касами и Кердока одного порядка.

Выбирая между минимаксными ансамблями, следует учесть ряд факторов:

- длина кода должна обеспечивать допустимый уровень помех множественного доступа при приемлемой продолжительности так называемого «холодного старта», когда приёмник только начинает устанавливать связь;

- при выбранной длине кода объём ансамбля должен быть достаточным для наделения всех космических аппаратов индивидуальными сигнатурами или парами сигнатур;

- желательна технологическая простота генерирования сигнатур;

- желательно иметь запас по возможным сигнатурам на случай наращивания группировки спутников;

- желательна защита информации, реализуемая в виде периодической смены кодов космических аппаратов, т. е. за счёт многократного резервирования объёма ансамбля.

Стоит учесть также особенности сложившейся практики и возможности аппаратуры, в том числе:

- удобство синтеза необходимой сетки частот из колебаний местного эталона;

- аппаратно-программные затраты на совместную обработку сигналов разных навигационных систем в одном приёмнике и т. д., в том числе стремление к унификации параметров с другими навигационными системами или, наоборот, к созданию особой системы.

Последний фактор может оказать критическое воздействие на саму возможность построить минимаксный ансамбль. Например, для фиксированной в некотором из поколений GPS и Galileo длины кода 10230 не удавалось найти минимаксных бинарных ансамблей и пришлось формировать ансамбли путём укорочения или расширения исходных ансамблей бинарных ПСП. Таковы дальномерные коды GPS L1C (сигнатуры — последовательности Вейля [22] длины 10223, расширенные семиэлементной «врезкой») и L2C (сигнатуры — N -символьные сегменты m -последовательности начальной длины $L = 2^{27} - 1$). Как показывают исследования [20], принудительная фиксация длины не сказывается на среднеквадратических и квантильных уровнях помехи множественного доступа — ПСП сохраняют свои псевдослучайные свойства. По привлекательности для использования в ГЛОНАСС авторы [20] называли самыми перспективными укороченные ансамбли Касами, затем — Кердока (они могут быть получены рекуррентно, что очень упрощает реализацию генератора), затем — относительно сложно реализуемые ансамбли Вейля, несмотря на их незначительное преимущество по помехоустойчивости.

Код Касами [4] — бинарная последовательность длины $N = 2^n - 1$, где n — чётное целое число. В ансамбле $K = \sqrt{N + 1}$ кодов, которые формируются следующим образом. Генерируется пара m -последовательностей: a_n длины N и b_n длины $N_1 = 2^{n/2} - 1$, причём короткая должна быть результатом децима-

ции (прореживания) длиной s индексом $q = 2^{n/2} + 1$, т. е. $b_n = a_{q \cdot n}$. Затем выполняется поэлементное суммирование a_n и циклически сдвинутой во времени b_n по модулю 2. Ансамбль Касами представляет собой набор таких последовательностей, вычисленных для каждого из $2^{n/2}$ сдвигов.

m-последовательности [6] — последовательности максимальной длины — двоичные последовательности, рекуррентно порождаемые при помощи регистров сдвига с линейной обратной связью и имеющие максимальный период $N = 2^n - 1$, где n — длина регистра. Процедура генерации запускается заданием n начальных символов, причём существует запрещённая стартовая комбинация — та, которая не позволяет производить периодические последовательности с заданным периодом. Например, для генератора из двух сдвиговых регистров можно записать рекурсивную формулу для получения последовательности: $a_i = -a_{i-1}a_{i-2}$. В этом случае при использовании алфавита $\{-1, +1\}$ запрещённой является стартовая комбинация $\{-1, -1\}$, т. к. она порождает последовательность, целиком состоящую из символов « -1 ».

m-последовательности удовлетворяют постулатам Голомба и имеют свойства:

- сумма по модулю 2 *m-последовательности* с её произвольным циклическим сдвигом также является *m-последовательностью*;
- периодическая АКФ имеет постоянный уровень боковых лепестков $-1/N$;
- АКФ усечённой последовательности (непериодическая последовательность длиной в 1 период) имеет уровень боковых лепестков $-1/\sqrt{N}$, т. е. по модулю больше, чем у кодов Баркера.

3.2. Квантовые технологии

Современные запросы потребителей порождают необходимость выполнять вычисления в узлах сетей или в устройствах связи в большими скоростями. Вычисления производят, например, при определении местоположения подвижного абонента

для предоставления ему услуг, соответствующих данной геолокации; при распознавании будущих возможных запросов потребителя для предоставления ему целевой рекламы — информации, ориентированной на конкретную аудиторию в зависимости от возраста, пола, потребительских привычек; при оценке параметров канала по данным текущих измерений для динамического выбора условий связи. Один из перспективных способов повышения быстродействия вычислителей, задействованных в системах связи, — это переход к квантовым вычислениям.

Квантовые вычисления основаны на идее представить вычисление как процедуру, производимую над квантово-механическим объектом, например квантовой точкой. Физически квантовая точка [23] представляет собой миниатюрный **нанокристалл** — наноразмерный кусочек проводника или чаще полупроводника некоторой формы (шар, эллипс, цилиндр и т. п.), покрытого стабилизирующей оболочкой. Она обладает оптоэлектронными свойствами полупроводников и физико-химическими свойствами молекул. При этом в формировании свойств играют огромную роль квантоворазмерные эффекты. Электрон в нанокристалле ведёт себя как в трёхмерной потенциальной яме, т. к. при достижении такого маленького размера влияние электростатических сил становится всё более выраженным. Имеются переходы между энергетическими уровнями, сопровождающиеся излучением или поглощением фотонов. Электронно-оптические свойства квантоворазмерных структур зависят от размера кристалла в направлении, по которому ограничено движение носителей заряда. Частота излучения (и следовательно, эффективная ширина запрещённой зоны полупроводника) определяется размерами квантовой точки, т. е. доступны для управления. Квантовые точки могут существовать не только в виде твёрдых тел, но и в виде растворов. Их получают, смешивая вещества (для растворов) или выращивая на поверхности подложки (метод эпитаксии) [24].

Квантовые вычисления используют квантово-механические эффекты: квантовый параллелизм и квантовую запутанность.

Квантовый объект, существующий сам по себе, без наблюдения его состояния с измерением характеристик, может одновре-

менно находиться в нескольких (в данном случае двух) состояниях $|j\rangle$ ($j = 0, 1$). Если организовывать двоичную систему, то требуются два отличающихся состояния, принимаемых за логический «0» и логическую «1». Физический элемент, допускающий такое явление, называется **кубитом** [25]. Он может находиться в состоянии $|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ или в состоянии $|1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, образующих ортонормированный базис («вычислительный базис») $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ в Гильбертовом пространстве, или (в общем случае) в их когерентной квантовой суперпозиции. Физически это могут быть два поляризационных состояния фотонов (например, горизонтальная или вертикальная поляризация), два электронных состояния изолированных атомов или ионов, два спиновых состояния (спин вверх, спин вниз) [25; 26], в каждом из которых волновая функция имеет свою вероятностную комплексную амплитуду λ_j . Поэтому волновая функция — квантовая суперпозиция состояний: $|\Psi\rangle = \lambda_0|0\rangle + \lambda_1|1\rangle$, где величины $|\lambda_j|^2$ имеют смысл вероятностей нахождения кубита в состояниях «0» или «1», $|\lambda_0|^2 + |\lambda_1|^2 = 1$. Векторное представление кубита в состоянии суперпозиции $\lambda_0|0\rangle + \lambda_1|1\rangle = \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \end{bmatrix}$. Состояние пары кубитов характеризуется уже четвёркой векторов

$$|00\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad |01\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad |10\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad |11\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

со своими вероятностными амплитудами, т. е.

$$|\Psi\rangle = \lambda_{00}|00\rangle + \lambda_{01}|01\rangle + \lambda_{10}|10\rangle + \lambda_{11}|11\rangle = \begin{bmatrix} \lambda_{00} \\ \lambda_{01} \\ \lambda_{10} \\ \lambda_{11} \end{bmatrix}.$$

Квантовое состояние может изменяться двумя различными путями.

Во-первых, может выполняться одна из унитарных квантовых операций, например над одним кубитом — поворот вектора до конкретной суперпозиции, над двумя — контролируемое «НЕ», организующее и устраняющее их квантовую запутанность. Эти две элементарные операции — основа квантовых вычислений. Простейшие логические операции над парой кубитов — операция Адамара, Паули, фазовый сдвиг, обмен местами (swap) и т. д. [27].

Рассмотрим операцию «контролируемое НЕ» [26]. Пусть есть кубит на зарядовых состояниях — электрон в двухъямном потенциале (что можно реализовать для квантовой точки), причём $|0\rangle$ означает его нахождение в левой яме, а $|1\rangle$ — в правой. Такая идея соответствует неопределённости положения электрона в пространстве до измерения. Тогда общее квантовое состояние кубита $|\Psi\rangle = \lambda_0|0\rangle + \lambda_1|1\rangle$, где зависимость амплитуд от времени даётся уравнением Шрёдингера $i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\Psi\rangle = \hat{H} |\Psi\rangle$. Оператор Гамильтона в силу своей эрмитовости и одинакового вида ям можно представить в виде $\hat{H} = \begin{pmatrix} a & -a \\ -a & a \end{pmatrix}$ с некоторой константой a , так что вектор $|\tilde{0}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ — собственный вектор оператора с собственным значением 0, описывающий основное состояние электрона, а $|\tilde{1}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$ — собственный вектор со значением $2a$, описывающий первое возбуждённое состояние электрона. В итоге состояние $|\Psi\rangle = \lambda_0|0\rangle + \lambda_1|1\rangle$ переходит с течением времени в состояние $\lambda_0 e^{0t} |\tilde{0}\rangle + \lambda_1 e^{-2at/\hbar} |\tilde{1}\rangle$. Следовательно, для реализации операции «НЕ», т. е. перехода $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$, достаточно подождать время $\pi\hbar / (2a)$. Чтобы эту процедуру контролировать, требуется ещё один кубит, который нужно расположить так, чтобы его парам была перпендикулярна пара ям первого кубита. Тогда констан-

та a для первой пары ям будет зависеть от того, в какой из ям находится электрон второго кубита: если ближе к первой, то константа будет больше. Итого, состояние электрона второго кубита определяет время совершения операции над первым.

Во-вторых, может производиться измерение, отличающееся тем, что сразу после него кубит переходит из квантового в классическое состояние («0» или «1») с вероятностью $|\lambda_j|^2$, т. е. его

волновая функция коллапсирует до значения конкретной вероятности. В квантовой механике измерение уничтожает исходное состояние квантового объекта, т. к. не может не являться воздействием на измеряемый объект. Самым интересным является измерение, выполняемое для пары запутанных кубитов. Если измерить только первый кубит, то вероятности распределятся следующим образом: первый кубит окажется в $|0\rangle$ с вероятностью

$$p_0 = |\lambda_{00}|^2 + |\lambda_{01}|^2 \quad (\text{при этом второй перейдёт в состояние } \frac{1}{\sqrt{|\lambda_{00}|^2 + |\lambda_{01}|^2}} (\lambda_{00}|0\rangle + \lambda_{01}|1\rangle)) \text{ или в состоянии } |1\rangle \text{ с вероятностью}$$

$$p_1 = |\lambda_{10}|^2 + |\lambda_{11}|^2 \quad (\text{тогда второй перейдёт в } \frac{1}{\sqrt{|\lambda_{10}|^2 + |\lambda_{11}|^2}} (\lambda_{10}|0\rangle + \lambda_{11}|1\rangle)) \quad [26].$$

Таким образом, достаточно измерить один кубит, чтобы определить и состояние второго, т. е. реализуется вычислительный параллелизм. Если работать с n кубит, то их 2^n состояния вычисляются одновременно, что даёт огромный выигрыш в быстродействии.

Данный подход будет нереализуем, если по какой-то причине квантовая запутанность кубитов нарушится. С момента первых опытов по разнесению запутанных пар в пространстве прошло уже 10 лет. За это время показано, что можно разносить пары на очень большое расстояние и при этом измерение состояния одного кубита автоматически влечёт за собой переход второго в конкретное из возможных состояний. Более того, были разработаны концепции **сильного измерения**, при котором процесс измерений нарушает естественную эволюцию квантового объекта, и **слабого измере-**

ния, при котором вмешательство незначительно. Оба этих варианта нашли применение в технологиях, удобных для связи. Слабое измерение фактически означает, что в процессе наблюдения можно сколько угодно раз «приоткрывать» крышку ящика, где «находится» передаваемый кубит, пока не обнаружим его в таком состоянии, когда на другом конце линии парный кубит окажется в заданном состоянии «1» или «0». Таким образом можно формировать любые заданные наперёд последовательности.

Работу квантового компьютера можно представить так: на систему кубитов записывается начальное состояние. Затем состояние всех или ряда кубитов изменяется посредством унитарных преобразований, выполняющих логические операции. Результат вычислений получают, применяя в конце измерение.

Так как суть эффекта ускорения вычислений заключается в организации параллельных вычислений, то наибольший эффект достигается при решении определённого круга задач, например для разложения натурального числа на простые множители (с помощью *алгоритма Шора*), моделирования унитарной эволюции квантовой системы из ряда частиц, определения, является ли функция двоичной переменной постоянной или нет, поиска по базе данных (*алгоритм Гровера*). При решении же простых задач квантовый компьютер не имеет преимуществ. Математика сегодня ушла существенно вперёд по сравнению с физической реализацией квантовых вычислений. Нарботаны библиотеки алгоритмов [28], в том числе квантовые аналоги, например квантовое преобразование Фурье [29], которое реализуется с помощью преобразований Адамара и фазовых сдвигов.

Можно реализовывать квантовые вычисления на обычных машинах, построив математические модели квантовых объектов. Существуют и языки программирования, оперирующие квантовой логикой и квантовыми объектами, например OpenQASM (Open Quantum Assembly Language) [30], Q# [31].

Для защиты информации предложены методы квантовой криптографии, позволяющие обнаружить факт подслушивания. Классическим решением в этой области, на котором основаны и более новые разработки, является алгоритм BB84 [32]. Основной принцип — использование «жёсткой» модели измерений, при которой изме-

ряемая информация изменяется. Отправитель создаёт генерацию фотонов со случайной поляризацией, выбранной из 0° , 45° , 90° и 135° . Получатель принимает фотоны по закрытому квантовому каналу, выбирает для каждого случайным образом способ измерения поляризации (+ или \times). Далее они общаются по открытому каналу: получатель сообщает, какой способ измерения он выбрал (не раскрывая результатов измерения), а отправитель говорит, правильный ли вид был выбран. Отбрасываются те фотоны, измерения которых были неверны. После этого происходит сравнение какой-то части данных, которыми можно пренебречь: отправитель открытым текстом передаёт получателю эти символы. Получатель сравнивает с тем, что он измерил, и если обнаруживает расхождения, то их во время передачи подслушивали, и можно измерить, сколько именно информации перехвачено. Вариант с использованием пары с когерентными спинами описан в [33]. В такой ситуации у корреспондентов может быть всего по 1 кубиту из квантово запутанной пары (они должны её предварительно получить каким-то образом), но, кодируя и декодируя с их помощью потоки данных, они обмениваются в 2 раза большим количеством информации, чем без использования такой пары. Выполняя лишь локальные операции над своим кубитом, каждый из корреспондентов может изменить состояние целой пары, т. е. 4 обычных символов. Такой способ называется **сверхплотным кодированием** [34].

Возможности квантовых вычислений таковы, что создаётся угроза традиционным методам шифрования информации. Поэтому одновременно с созданием квантовых каналов связи разработчики создают *постквантовую криптографию*, в том числе с применением кодов, исправляющих ошибки.

Квантовый подход оказался настолько интересным, что были разработаны и квантовая теория информации, квантовые модели каналов. *Квантовый канал* [35] с математической точки зрения — оператор, переводящий объект из конечномерного пространства состояний на передающем конце в объект из пространства состояний на приёмном конце линии связи, а объекты имеют квантовые состояния, описываемые квантово-механическими матрицами плотности вероятности. Говорят и о **квантовых сетях** [36] — коммуникационных сетях, защищающих данные с использовани-

ем законов квантовой механики. На физическом уровне в первую очередь такие сети реализуются как оптические сети, передающие по воздуху или по оптоволокну фотонные кубиты. Существующие ВОЛС можно использовать после доработки: требуется источник единичных фотонов, т. е. существующие лазеры следует ослабить. Запутанные пары фотонов генерируются с помощью спонтанного параметрического рассеяния, например направив лазерный поток определённой частоты и интенсивности на нелинейный материал (органические или неорганические кристаллы бета-бората бария, трибората лития, ниобата калия, L-аргинина малеина дигидрата и др.). Рассеянное излучение образует два конуса — один с вертикальной и другой с горизонтальной поляризацией, несущие пары фотонов в запутанном состоянии [37]. Неквантовую информацию и управляющие сигналы можно при этом отправлять вместе с квантовой по многомодовому волокну. Приёмниками являются фотодетекторы. В роли ретрансляторов же предложено использовать оптические полости с отдельными атомами, т. к. главной задачей при этом является сохранение квантового состояния фотона неизменным, а в такой полости фотонные квантовые состояния могут быть переданы как атомарные квантовые состояния. Оптоволокну как среда передачи может порождать потерю сигнала и декогерентность (нарушение запутанности). Существует теорема о запрете клонирования, поэтому напрямую усилить квантовый сигнал нельзя. Вместо этого можно использовать повторители, основанные на идее квантовой телепортации. Практическая реализация возможна путём выполнения операции свопинга — обмены запутанности, применённой к двум парам кубитов. Например, кубит А, находящийся у источника, запутан с кубитом Б (на ретрансляторе), а кубит В (тоже на ретрансляторе) запутан с Г (у получателя). Тогда, если обменять запутанность Б и В, Г автоматически получит состояние А. Первоначальные пары можно при этом передать через свободное пространство. Первые опыты в этой области уже прошли, и в ряде стран, в том числе в Китае, были открыты первые отрезки квантовых сетей связи.

3.3. Фрактальные технологии

Фрактал — самоподобная структура, части которой воспроизводят конфигурацию или поведение целого с некоторым масштабным коэффициентом. Фрактальные свойства были выявлены у различных одномерных и многомерных сигналов, в том числе в тонкой структуре сигналов, рассеянных на различных текстурах [38], у сигналов электрокардиограммы и электроэнцефалограммы, в экономических явлениях. Это привело к развитию фрактальной обработки сигналов, временных рядов (последовательно во времени зафиксированных значений различных величин) или информационных потоков [39].

С использованием фракталов можно решить целый ряд задач:

- фрактальное сжатие (кодирование) [40], обеспечивающее высокий коэффициент сжатия при сохранении визуально высокого качества;

- распознавание сигнатур, объектов и текстур на основе ряда фрактальных признаков, включая фрактальную размерность сигнала или изображения, в том числе с применением нейронных сетей [41; 42]. Фрактальные методы демонстрируют работоспособность в условиях помех и на малоконтрастных образцах;

- анализ поведения нелинейных систем, в том числе динамического хаоса [43].

Фрактальный анализ устанавливает, в какой степени в поведении сигналов проявляются фрактальные признаки. В первую очередь строят в двойном логарифмическом масштабе зависимости дельта-дисперсии и структурной функции от приращений времени. Если они хорошо аппроксимируются прямой в большом диапазоне изменения аргументов, то сигнал фрактален, а тангенс угла наклона определяет показатель Херста H (при анализе структурной функции) или его удвоенное значение (при анализе дельта-дисперсии). Фрактальная размерность D находится как $D = 2 - H$. Интервал, в пределах которого аппроксимация хорошая, определяет ширину области скейлинга. Считается, что фрактальный случайный процесс $X(t)$ может описываться моделью обобщённого броуновского движения с гауссовской статистикой, с дельта-дисперсией

$$E\left[\left(X(t_2) - X(t_1)\right)^2\right] = \sigma^2 |t_2 - t_1|^{2H}$$

и структурной функцией первого порядка (математическим ожиданием приращения сигнала)

$$E\left[|X(t_2) - X(t_1)|\right] = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma (t_2 - t_1)^H,$$

где параметр Херста ($0 < H < 1$) характеризует степень изрезанности графика временного ряда: при малых H он изрезан, при больших — почти гладкий [44]. Настоящее броуновское движение имеет $H = 1/2$. Параметр Херста показывает также характер влияния прошлых значений на будущие: при $H > 1/2$ с ростом в прошлом продолжится рост в будущем, при $H < 1/2$ в будущем будет убывание значений. Он связан с показателем α в степенном законе аппроксимации $P(f) \propto f^{-\alpha}$ спектральной плотности мощности стохастических сигналов ($\alpha = 0$ — у белого шума, $\alpha = 1$ — у розового, $\alpha = 2$ — у коричневого, $\alpha = 3$ — у чёрного): $\alpha = 2H + 1$. Это позволяет устанавливать фрактальность (и принадлежность к броуновским моделям, $0 < H < 1$) по спектру, если $1 < \alpha < 3$.

Для изображений, описываемых в системе координат (x, y) величиной X , используют двумерную модель [44] с додисперсией $\sigma^2 (\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2})^{2H}$, зависящей от смещения от центра координат $\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$; анализ ведут по структурной функции

$$S_n = \frac{1}{(N-k)^2} \sum_{i=1}^{N-k} \sum_{j=1}^{N-k} \left(|X_{i+k,j} - X_{i,j}| + |X_{i,j+k} - X_{i,j}| \right),$$

где n — целочисленное смещение точки, в которой определяется величина S . Фрактальная размерность изображения $D = 3 - H$.

Для мультифракталов определяют целый спектр фрактальных размерностей, а мультифрактальный анализ — разложение исходного множества по множествам однородных фракталов с чётко выраженной фрактальной размерностью.

3.4. Диаграммообразование и множественный доступ

Диаграммообразование — эффективный инструмент улучшения качества связи для перспективных систем связи. Базовые станции с антенными системами в виде антенных решёток могут генерировать направленное излучение сигналов в виде одного или нескольких лучей одновременно.

Диаграмма направленности (ДН) определяется (в грубом приближении) как результат двумерного пространственного преобразования Фурье от произведения ДН одного антенного элемента (патч-антенны, штыря, волновода) и комплексного амплитудно-фазового распределения (АФР) в раскрыве антенны, эквивалентного распределению тока по пространственно-распределённой антенне [45]. Если эквивалентное АФР не содержит знакоперемен, то будет излучаться один относительно широкий луч, если будут знакоперемены — будет несколько лепестков. При одном лепестке можно изменять его направление, если изменять скорость изменения фазы сигнала при переходе от одного антенного элемента к другому. Фазовые сдвиги обычно реализуют, вводя в диаграммообразующую схему фазовращатели. Для слежения за несколькими абонентами реализуется пеленгация их сигналов и адаптивная перестройка ДН на основе результатов обработки пеленгов.

Если многолучевая ДН решётки фиксирована, то для подвижного абонента качество сигнала при работе на конкретном луче рано или поздно ухудшится. Всё, что можно сделать в такой схеме, — переключить абонента на новый луч или даже передать его на луч соседней станции, ориентированный на него. Чуть больше свободы предоставляет антенная система, позволяющая выключать некоторые лучи, перенаправляя энергию передатчика в оставшиеся. Если делать это, задействуя аналитику о перемещении абонента и загруженности станций и методы машинного обучения, то результат будет более удовлетворителен [46].

Лучшим решением является использование адаптивного диаграммообразования совместно с методами машинного обучения. Тогда на одной и той же антенной решётке в зависимости от ситуации можно организовать связь с одиночным пользователем или компактной группой (один относительно широ-

кий луч), с распределённой группой (несколько узких лучей), с неподвижным абонентом (стационарный луч), с подвижными (сканирующие лучи).

Если все лучи станции заняты, поддерживать связь с ещё одним абонентом можно, только если есть ещё какие-то базовые станции в зоне его доступа, поэтому разумно иметь вспомогательные маленькие станции в тех местах, где такие ситуации возможны.

Диаграммообразующие схемы антенных решёток позволяют создавать системы, работающие по технологиям SISO (1×1), SIMO ($1 \times N$), MISO ($N \times 1$), MIMO ($N \times N$) в зависимости от числа антенн на каждой из сторон. При этом для каждой из ситуаций возможно формирование 1 или нескольких лучей, одновременно или по очереди. В последнем случае реализуют пространственно-временное разделение каналов TSDMA, например по простейшей схеме — схеме Аламоути [48]. При этом воплощается не MIMO, а MISO, т. к. каждый из абонентских терминалов принимает только свой сигнал, а не смесь.

Системы SISO работают с использованием одного, но мощного луча, возможно перемещающегося вслед за абонентом.

Многолучевые антенные решётки, формирующие излучение одной и той же информации в разных направлениях (по разным лучам) используются в MIMO [47; 48], при этом подразумевается, что излучается групповой сигнал и каждый абонентский терминал должен в результате обработки извлечь из него свою информацию. Возможна и одновременная передача разной информации разным абонентам, но тогда одной антенной решётки недостаточно — требуется организовать пространственное разделение различных потоков информации. Это можно сделать, например используя множество антенн, облучающих общее параболическое зеркало или другой фокусирующий элемент. При этом малое смещение каждого антенного элемента от точки фокуса преобразуется в существенное различие между направлениями излучения (и приёма). Пример разработки такой конфигурации для спутниковой связи подробно рассмотрен в [49].

Сегодня существует довольно много успешных схем и методов диаграммообразования, как аналоговых, так и цифровых. Не-

которые авторы упоминают так называемое голографическое диаграммообразование, в ходе которого в роли распределяющей излучение в пространстве апертуры играет некоторая пассивная структура [50].

Вопросы для самоконтроля

1. Охарактеризуйте коды Баркера.
2. Каков смысл постулатов Голомба?
3. Назовите методы синтеза «хорошего» кода?
- 4*. Чем определяется АКФ ПСП?
5. Что физически представляет собой кубит?
6. Каковы основные операции квантовых вычислений?
7. Чем привлекательно квантовое кодирование?
8. В чём суть фрактального анализа?
9. Каковы особенности фрактального сжатия?
10. Что показывает показатель Херста?
11. В чём отличие фрактальных антенн от других?
12. Каковы требования к диаграммообразованию антенных систем с точки зрения перспектив систем связи?
- 13*. Приведите примеры ситуаций, когда требуется создать 1 луч (много лучей) в ДН антенной системы.
- 14*. Какие геометрии чаще всего используются для синтеза фрактальных антенн и почему?
- 15*. Как по спектральной плотности мощности понять, фрактален ли сигнал?

Литература

1. Псевдослучайная последовательность // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Псевдослучайная_последовательность
2. Филатов, О. В. Вывод формул для постулатов Голомба. Способ создания псевдослучайной последовательности из частот Мизеса. Основы «Комбинаторики длинных последовательностей» / О. В. Филатов // Проблемы современной науки и образования. — 2016. — Т. 17 (59). — С. 11–18. — URL : <https://ipi1.ru/images/PDF/2016/59/vyvod-formul-dlya-postulatov-golomba.pdf>

3. Код Баркера // Интернет-энциклопедия «Википедия».
— URL : https://uk.wikipedia.org/wiki/Код_Баркера
4. Коды Касами // Интернет-энциклопедия «Википедия».
— URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Коды_Касами
5. Коды Голда // Интернет-энциклопедия «Википедия».
— URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Коды_Голда
6. Maximum length sequence // Интернет-энциклопедия «Википедия».
— URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Maximum_length_sequence
7. A091704. Number of Barker codes (or Barker sequences) of length n up to reversals and negations // The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences. — URL : <https://oeis.org/A091704>
8. Coxson, G. Do the Barker Codes End? A Problem for the WPI MPI Workshop / G. Coxson // WPI MPI Workshop, June 16–20, 2008, Worcester, MA, USA. — URL : <http://www.math.wpi.edu/MPI2008/TSC/TSC-MPI.pdf>
9. Ranganath, Pr. Effect of Pulse Shaping on Autocorrelation Function of Barker and Frank Phase Codes / Pr. Ranganath, S. Rao // Journal of Advanced Electrical and Computer Engineering. — 2014. — V. 1. — P. 22–31. — URL : <http://paper.uscip.us/jaece/JAECE.2014.1003.pdf>
10. Ein-Dor, L. Low autocorrelated multiphase sequences / L. Ein-Dor, I. Kanter, W. Kinzel // Physical Review E. — 2002. — V. 65. — P. 020102(R)-1–4.
11. Schmidt, K.-U. Sequences with small correlation / K.-U. Schmidt // Designs, Codes and Cryptography. — 2016. — V. 78, № 1. — P. 237–267.
12. Alon, N. Typical Peak Sidelobe Level of Binary Sequences / N. Alon, S. Litsyn, A. Shpunt // IEEE Trans. Inform. Theory. — 2010. — V. 56, № 1. — P. 545–554. — URL : <https://www.cs.tau.ac.il/~nogaa/PDFS/psl2.pdf>
13. Леухин, А. Н. Импульсные фазокодированные последовательности с единичным уровнем боковых лепестков / А. Н. Леухин // Известия высших учебных заведений России. — 2009. — № 6 (спецвыпуск «Широкополосные сигналы и системы»). — С. 13–18. — URL : http://www.eltech.ru/assets/files/Radio_6_2009.pdf

14. Гантмахер, В. Е. Синтез оптимальных импульсных последовательностей со свойством «не более одного совпадения» над расширенными полями Галуа второй и третьей степени / В. Е. Гантмахер, С. М. Платонов // Известия высших учебных заведений России. — 2009. — № 6. — С. 31–35. — URL : http://www.eltech.ru/assets/files/Radio_6_2009.pdf

15. Леухин, А. Н. Общий подход к построению фазокодированных последовательностей с одноуровневой периодической автокорреляционной функцией / А. Н. Леухин, Н. В. Парсаев // Известия высших учебных заведений России. — 2009. — № 6. — С. 5–12. — URL : http://www.eltech.ru/assets/files/Radio_6_2009.pdf

16. Быстров, Н. Е. Синтез многофазных импульсных сигналов методом нелинейной оптимизации / Н. Е. Быстров, И. Н. Жукова, Д. В. Чеботарев // Известия высших учебных заведений России. — 2009. — № 6. — С. 19–23. — URL : http://www.eltech.ru/assets/files/Radio_6_2009.pdf

17. Николенко, С. Н. Поточные шифры / С. Н. Николенко. — URL : <https://logic.pdmi.ras.ru/~sergey/teaching/aucryp11/03-streamciphers.pdf>

18. Complementary sequences // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Complementary_sequences

19. Leuknih, A. Bunary Sequences with Minimum Peak Sidelobe Level up to Length 68 / A. Leuknih, E. Potehin // International Workshop on Coding and Cryptography, WCC 2013, April 15–19, 2013, Bergen, Norway. — URL : <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1212/1212.4930.pdf>

20. К выбору сигнатурных ансамблей для нового поколения радиointерфейса системы ГЛОНАСС / Д. В. Гайворонский, В. П. Ипатов, И. М. Самойлов, С. Б. Болошин, Б. В. Шабшаевич // Известия высших учебных заведений России. — 2009. — № 6. — С. 44–55. — URL : http://www.eltech.ru/assets/files/Radio_6_2009.pdf

21. Ипатов, В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов : принципы и приложения / В. П. Ипатов. — М. : Техносфера, 2007. — 487 с.

22. Rushanan, J. The Spreading and Overlay Codes for the L1C Signal / J. Rushanan. — URL : https://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/07_0031.pdf
23. Васильев, Р. Б. Квантовые точки: синтез, свойства, применение / Р. Б. Васильев, Д. Н. Дирин. — М. : ФНМ, 2007. — 34 с.
24. Квантовая точка // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Квантовая_точка
25. Qubit // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : <https://en.wikipedia.org/wiki/Qubit>
26. Квантовый компьютер // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Квантовый_компьютер
27. Quantum logic gate // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_logic_gate
28. The C library for quantum computing and quantum simulation. — URL : <http://www.libquantum.de/>
29. Quantum Fourier transform // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_Fourier_transform
30. GitHub – Qiskit/openqasm : Gate and operation specification for quantum circuits. — URL : <https://github.com/QISKit/openqasm>
31. Q# // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Q_Sharp
32. Квантовая криптография // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Квантовая_криптография
33. Грозин, А. Ф. Квантовый компьютер для чайников : препринт ИЯФ 2004-40. — Новосибирск, 2004. — URL : <https://arxiv.org/pdf/1108.3445.pdf>
34. Квантовое сверхплотное кодирование // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Квантовое_сверхплотное_кодирование
35. Quantum channel // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_channel
36. Квантовая сеть // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Квантовая_сеть

37. Квантовая запутанность // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Квантовая_запутанность

38. Потапов, А. А. Фракталы, скейлинг и дробные операторы как основа новых методов обработки информации и конструирования фрактальных радиосистем / А. А. Потапов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — № 5. — С. 3–19.

39. Ландэ, Д. В. Фрактальные свойства тематических информационных потоков из Интернет / Д. В. Ландэ // Регистрация, сбор и обработка данных. — 2006. — Т. 8, № 2. — С. 93–99.

40. Алгоритм фрактального сжатия // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_фрактального_сжатия

41. Амосов, О. С. Исследование временных рядов с применением методов фрактального и вейвлет анализа / О. С. Амосов, Н. В. Муллер // Науковедение. — 2014. — № 3 (22). — URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vremennyh-ryadov-s-primeneniem-metodov-fraktalnogo-i-veyvlet-analiza>.

42. Алиев, М. В. Выделение контуров на малоконтрастных и размытых изображениях с помощью фрактальной фильтрации / М. В. Алиев, А. Х. Панеш, М. С. Каспарьян // Вестник Адыгейского гос. ун-та. Сер. 4. — 2011. — № 3. — URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/vydelenie-konturov-na-malokontrastnyh-i-razmytyh-izobrazheniyah-s-pomoschyu-fraktalnoy-filtratsii>

43. Малинецкий, Г. Г. Нелинейная динамика: подходы, результаты, надежды / Г. Г. Малинецкий А. Б. Потапов, А. В. Подлазов. — М. : КомКнига, 2006. — 279 с.

44. Короленко, П. В. Новационные методы анализа стохастических процессов и структур в оптике. Фрактальные и мультифрактальные методы, вейвлет-преобразования / П. В. Короленко, М. С. Маганова, А. В. Меснянкин. — М. : МГУ ; НИИЯФ, 2004. — 82 с. — URL : <http://optics.sinp.msu.ru/stud/fractal.pdf>

45. Артёмова, Т. К. Антенны : учеб. пособие / Т. К. Артёмова, Н. И. Фомичев. — Ярославль : ЯрГУ, 2007. — 128 с. — URL : lib.uniyar.ac.ru/edocs/iuni/20070702.pdf

46. Big Data Analytics, Machine Learning, and Artificial Intelligence in Next-Generation Wireless Networks / M. G. Kibria, K. Nguyen, G. P. Villardi et al. // IEEE Access. — 2018. — V. 6. — P. 32328–32338. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2837692.

47. MIMO // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : <https://ru.wikipedia.org/wiki/MIMO>

48. Слюсар, В. Системы MIMO: принципы построения и обработки сигналов / В. Слюсар // Электроника : наука, технология, бизнес. — 2015. — № 8. — С. 52–58. — URL : http://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_974_409.pdf

49. Милосердов, А. С. Бортовая многолучевая антенная решетка для системы спутниковой связи : дис. ... канд. техн. наук / А. С. Милосердов. — М., 2014. — URL : <https://mai.ru/upload/iblock/e13/e139cab306bd9ca3fbc1e2bfcabcd2fe5.pdf>

50. Black, E. J. Holographic Beam Forming and MIMO : описание технологии / E. J. Black. — URL : <https://pivotalcommware.com/wp-content/uploads/2017/12/Holographic-Beamforming-WP-v.6C-FINAL.pdf>

Глава 4. Перспективные системы связи

4.1. Трёхмерное и многомерное телевидение

Трёхмерное кино появилось в XX в., однако до сих пор не удаётся реализовать системы трёхмерного телевидения и кино, достаточно удобные для всех пользователей, поэтому такие системы остаются в числе перспективных. В каком-то смысле эти системы, ещё недавно испытывавшие бурный рост, временно замерли в развитии.

Широкому распространению трёхмерного телевидения мешает стоимость оборудования, сложность процедуры съёмки, относительно низкое качество реконструкции трёхмерного изображения и малое количество ракурсов, что приковывает потребителя к определённому месту для просмотра. Перспективы объёмного видения подтверждены, однако достигнутое качество изображения не удовлетворяет пользователей, а экономический эффект — производителей, нужны дальнейшие работы.

Концепция трёхмерности опирается на свойства человеческого зрения: во-первых, бинокулярность зрения, при которой изображение, формируемое каждым из глаз, несколько отличается ракурсом; во-вторых, инерционность процесса реконструкции изображения в мозге человека, при которой изображения, следующие во времени с некоторым интервалом, сливаются в непрерывный «фильм». Поэтому для организации трёхмерного телевидения требуется съёмка как минимум с двух ракурсов (двумя камерами), однако частота следования кадров может оставаться не слишком высокой.

Различные ракурсы упаковываются в общий пакет и передаются потребителю, где его телевизор должен восстановить изображение. В основе воспроизведения могут лежать различные принципы [1; 2].

Простейший вариант — использовать цветные фильтры — был реализован в **анаглифическом методе**. Зрителю выдаются очки с разными стёклами, цвета которых являются дополнительными, например малиновый и бирюзовый, жёлтый и фиолетовый. Если посмотреть через малиновое стекло на бирюзовый объект,

он покажется серым, причём яркость изображения будет низка из-за потерь в светофильтре. Этот метод реализовали первые популярные кинотеатры, воспроизводя проектором кадры, окрашенные разными цветами, для разных глаз.

Ещё один метод основывался на ортогональности двух поляризаций света и возможности некоторых веществ, будучи прозрачными, являться анализаторами поляризации, т. е. пропускать без потери интенсивности только свет определённой поляризации. Сегодня это самый популярный метод, реализованный в **поляризационных очках**, одно стекло которых пропускает свет вертикальной поляризации, которым записан кадр одного ракурса, а другое — свет горизонтальной поляризации кадра второго ракурса.

Третий метод — использовать **затворы**, перекрывающие на некоторое время путь световым лучам — для каждого глаза по очереди. Механические затворы в очках сменились электронно-управляемыми, но требовалась синхронизация с телевизором.

Целая группа **безочковых методов** предназначена для создания пространственного распределения светового поля, которое человеком воспринимается как трёхмерное изображение. Это и экраны, покрытые линзами различных форм — от цилиндрической до полусферической (подобно чечевице). В этом случае используются свойства собирающих линз направлять свет от разнесённых в пространстве освещённых участков в разных направлениях (в которых оказываются глаза смотрящего). Таковыми, например, были рекламные телевизоры и панели. Это и **голографические системы**, в которых изображение формировалось лучами просвечиваемой голограммы. Это и **проекционные системы**, в которых изображение проецируется на некую среду — поток песка, мелкодисперсной водяной пыли и т. п. Наконец, это **воксельные системы**, в которых используется объёмный экран с элементами — вокселями, которые светятся под действием какого-то управляющего воздействия. Светиться могут частицы плазмы, образующейся при пересечении лучей двух лазеров, быстро сканирующих объём дисплея, или частицы люминофора в теле дисплея под действием управляющего напряжения на паре наложенных прозрачных электродов.

На сегодня разработан каркас для стандартов в области трёхмерного телевидения [1], предложены схемы кодирования трёхмерных изображений для передачи по обычным телевизионным сетям (2D+Delta, 2D+глубина и другие).

Метод **2D+Delta** [3] является частью стандартов MVC (Multiview Video Coding), MPEG2 и MPEG4, а также поправкой к старому стандарту кодирования H.264. При этом передаётся общая часть стереопары изображений по одному каналу и разность кадров — по другому (как пользовательские данные, второй поток, независимый поток, слой улучшений к изображению и т. д.).

В методе **2D+Depth** [4] передаётся двумерное изображение и его карта относительных глубин (в палитре серого из 256 градаций). Она показывает, следует пиксель изображения выносить перед плоскостью экрана (белый цвет в карте) или помещать за экраном (чёрный цвет). Телевизионное оборудование выполняет отрисовку изображения в соответствии с картой глубин. Предложено и развитие метода, воплотившееся в формате **WOWvx Declipse**: вместе с изображением передаются 3 карты глубин — для объектов на переднем плане, для задних объектов, затеняемых передними, и карта относительных глубин передних объектов относительно задних. Так как информация, делающая изображение трёхмерным, передаётся малым числом бит, то необходимое расширение полосы частот составляет единицы процентов, что позволяет реализовывать его на обычном телевизионном оборудовании. Недостатки формата — невозможность учитывать прозрачность объектов или перекрытие одними объектами других — были компенсированы в ещё одном развитии — **2D+DOT**.

4D, 5D и т. п. системы подразумевают, что для зрителя воспроизводится всё, что можно ощутить, как если бы он присутствовал внутри снимаемого сюжета, — ряд тактильных ощущений, вибрация, запахи. Ведутся работы по созданию устройств быстрого синтеза ароматических веществ, но сегодня они очень далеки от промышленного производства. В то же время для тактильных ощущений требуется специальное снаряжение, как минимум — перчатки виртуальной реальности, штучный пока товар. И хотя дело движется к индивидуализации средств просмотра визуальной информации, есть запрос на обеспечение возмож-

ности не смотреть, уйти от устройства, отстраниться от сцены, т. е. потребители с огромной осторожностью воспринимают проекты формирования изображения неким надевающимся гаджетом типа гугл-очков. По-видимому, в ближайшей перспективе всё же стационарно размещаемые системы.

Системы 3D столкнулись с тем, что многие люди не обладают трёхмерным зрением, а у оставшихся его возможности сильно различаются. Это потребовало бы создания телевизора, способного адаптироваться к потребностям конкретного зрителя, что однозначно было бы прорывной технологией, которой сегодня нет. Несмотря на активную интеллектуализацию систем связи, она идёт по пути разнообразия контента или возможности предоставления его в любое время по запросу, но не по пути технической адаптации устройств под клиентов. Первый шаг, однако, на этом пути уже сделан — разработаны и частично внедрены системы, отслеживающие положение глаз зрителя, отработаны технологии отрисовки сцены под это положение. История трёхмерного телевидения изложена в [5]. В 2017 г. последний производитель телевизоров отказался от поддержки трёхмерных систем и было заявлено о гибели технологии [6]. Так хорошая идея не нашла практического воплощения. Можно сказать, что она опередила время.

4.2. Сети, определяющиеся знаниями

Интеллектуализация сетей идёт по пути внедрения систем сбора статистики и телеметрии, искусственного разума для управления сетью и её ресурсами и методов машинного обучения для обработки данных и принятия решений. Так как современная сеть содержит большое количество узлов, то будут собираться и анализироваться огромные массивы данных.

На практике такой анализ породит эффективное («разумное») поведение сети, поддерживающее высокую степень удовлетворённости абонента. Опорой в этом могут быть такие результаты анализа, как профиль пользователя, профиль мобильности пользователя, профиль сети в ближнем окружении пользователя, а также

- карта прогноза уровня сигнала для каждой из несущих частот вдоль возможной траектории перемещения абонента с учё-

том окружающей обстановки, что даёт возможность управления параметрами сигнала;

- профиль трафика — пространственно-временное распределение нагрузки в сети с учётом распределения загрузки каналов во времени, рабочих характеристик и расположения на местности базовых станций.

Инструментами управления качеством сети могут стать [7]:

- стратегия выделения ресурсов, обеспечивающая спектральную и энергетическую эффективность системы связи за счёт учёта профиля трафика, профиля мобильности абонента и информации об используемых в конкретный момент интернет-приложениях на терминале абонента;

- клиентоориентированная маршрутизация потоков, при которой производится перенаправление трафика с учётом профиля мобильности абонента, профиля загрузки сети и действующих подписок абонента, выполняемое таким образом, чтобы минимизировать задержки и джиттер;

- клиентоориентированная разгрузка трафика базовых станций макросот через станции микросот позволяет избежать лишних перенаправлений трафика, а также обеспечить лучшее качество связи благодаря использованию станций, близко расположенных к абоненту;

- оптимизированное размещение мини-сот в гетерогенных сетях — с учётом прогнозируемого перемещения абонента создаются временные мини-соты, даже с использованием других сетей, так что формируется виртуальная гетерогенная сеть, исчезающая, когда абонент выходит из зоны её действия. Путь абонента при этом «подсвечивается» организующимися на его пути мини-сотами;

- улучшенное выравнивание нагрузки между узлами сети, организуемое на основе анализа корреляции между профилем мобильности абонента и профилем трафика поблизости от него, что позволяет выделять абоненту ресурсы перегруженной сети только тогда, когда этого не избежать, а в остальных случаях организовывать маршрутизацию через свободные узлы;

- улучшенное диаграммообразование антенных систем, что позволяет улучшить уровни сигналов и скорость передачи за счёт

адаптивного динамического выбора луча многолучевой антенной решётки, в том числе включения/выключения конкретных лучей.

Сети, в которых для управления сетью реализуются методы машинного обучения, можно называть Knowledge Defined Network (KDN) — *сетями, определяющимися знанием*. Возможность реализации автоматического управления поддерживается программной реализацией множества управленческих функций, так что о таких сетях можно говорить и как о Software Defined Network (SDN, *программно-конфигурируемых сетях*) [8]. Их ключевые идеи — разделение процессов передачи и управления данными, централизация управления сетью при помощи унифицированных программных средств, виртуализация физических сетевых ресурсов.

В архитектуре такой сети выделяют три уровня: инфраструктурный (где функционируют сетевые коммутаторы и каналы передачи), управления (управляющее ПО под руководством сетевой операционной системы, организующей интерфейсы со средствами инфраструктурного уровня и с приложениями), сетевых приложений (набор SDN-приложений, взаимодействующих с SDN-контроллером через программный протокол (API) для управления сетью на уровне приложений. Технологию SDN реализует протокол OpenFlow [9].

Такие системы могут строиться на основе любых существующих стандартов, но максимальную эффективность интеллектуализация маршрутизации может обеспечить для сетей с передачей большого объёма данных, т. е. Интернета, для центров обработки данных, для сетей с большим количеством устройств, имеющих «поведенческие привычки», например Интернета вещей, а также для построения облачных сервисов, когда по запросу потребителя необходимо в кратчайшие сроки создавать виртуальные узлы сети и выделять для них виртуальные ресурсы.

Так как такое мощное управление реализуется на основе знаний, получаемых управляющими структурами о сети и пользователях, то было предложено ввести в описание таких сетей так называемую «плоскость (или уровень) знаний» [10]. При этом можно описывать распределённую структуру получения и применения знаний, управляемую из единого центра, куда стекаются

все данные, но одновременно предоставляющую некоторую свободу действий локальным центрам знаний для ускорения процессов принятия решений в ходе маршрутизации локальных масштабов. Итого, получается четырёхуровневая архитектура, которая описывает работу сети с позиции управления [10]:

- плоскость данных (хранение, транспортировка, обработка пакетов данных с помощью программируемых устройств);

- плоскость контроля (логически централизованные SDN-контроллеры программируют устройства для качественной передачи потоков данных);

- плоскость управления (обеспечение правильной долговременной работы сети за счёт управления топологией сети и конфигурированием сетевых устройств, сбора телеметрической информации и фиксации состояния сети и всего происходящего, реализуется тоже с помощью SDN-контроллеров);

- плоскость знаний (интеграция поведенческих моделей и процессов обоснования принятия решений в SDN-сеть на основе централизованного управления и единого целостного взгляда на происходящее с сетью).

В управлении сетью могут быть задействованы различные методы машинного обучения, включая использование искусственных нейронных сетей, в том числе для выделения и анализа виртуальных ресурсов. Применение различных методов машинного обучения для решения различных сетевых задач проанализировано в [11].

4.3. Новый Интернет

Современный Интернет развивается в сторону объединения большого количества устройств, и в первую очередь развивается Интернет вещей [13]. Новые характеристики Интернета вещей прописаны в спецификации будущего поколения связи 5G.

Среди устройств, объединяемых в сети Интернета вещей, могут быть датчики и контроллеры, создающие незначительный трафик и использующие сетевые ресурсы лишь время от времени, причём ряд применений не требует срочной передачи данных. Например, передача данных от счётчиков в места учёта не является срочной передачей и может быть произведена при наличии

ресурсов в какой-то уже существующей сети. Для таких устройств в 2016 г. разработан стандарт сотовой связи NB-IoT (Narrow Band Internet of Things, *узкополосный Интернет вещей*) [14]. Он может использоваться для подключения к цифровым сетям медицинских датчиков, счётчиков ресурсов, устройств умного дома и т. п. Сеть может быть развёрнута как на оборудовании сотовых сетей LTE (современное поколение 4G), так и поверх GSM-сетей. Предусматриваются следующие свойства сети NB-IoT: долгая (годы) работоспособность устройств без замены батареи за счёт оптимизации энергопотребления, огромная (сотни тысяч устройств на базовую станцию) ёмкость сети, дешёвые устройства, оптимизированная для улучшения чувствительности устройств модуляция сигнала.

Для удешевления оборудования связи, размещаемого в каждом объекте сети, было предложено отказаться от использования SIM-карт в пользу модификации электроники модема (стандарт Embedded SIM, eSIM [15], подразумевающий отказ от чипа — информация хранится в самом устройстве и загружается в него удалённо) или замены способа аутентификации на использование алгоритмов взаимодействия доверенных центров эмиссии параметров SIM, оператора сети и потребителя (стандарт Remote SIM Provisioning, RSP [16]). Отсутствие необходимости делать физическую карту упрощает конструкцию устройства: нет необходимости делать отдельный слот для неё, проще обеспечить пыле- и влагозащиту, можно сделать корпус тоньше. Кроме того, устройства с eSIM (умные часы, фитнес-трекеры и др.) больше не будут нуждаться в смартфоне или сети Wi-Fi и смогут существовать автономно, а защищённость устройств должна повыситься, т. к. без ведома владельца уже невозможно будет загружать новые идентификаторы, как это было раньше, когда просто вынимали старую SIM-карту и вставляли новую.

Устройства для NB-IoT проще создавать: согласно описанию, приведённому в 3GPP Release 13 [14], для таких устройств допускаются задержки до единиц секунд, задействуется полоса частот до 200 кГц, организуется полудуплексный режим связи. В декабре 2017 г. ГКРЧ выделил частотные полосы, и провайдеры запустили сеть в тестовом режиме.

В 2017 г. было предложено создавать *большие интеллектуальные поверхности* [17; 18] — новый тип беспроводных систем связи, являющийся расширением Massive MIMO. Концепция может позволить беспрецедентную фокусировку энергии в трёхмерном пространстве, дистанционное зондирование с высокой точностью, которые вписываются в концепцию 5G и Интернета вещей. Она подразумевает размещение больших антенных решёток на плоских поверхностях и связь одиночного абонентского терминала с этой решёткой. Размещение решётки на поверхности превращает поверхность в интеллектуальную приёмную решётку. Поверхность как бы становится электрически активной и позволяет организовывать беспроводную связь, беспроводную зарядку устройств, дистанционное зондирование. Концепция Massive MIMO при этом может быть доведена почти до предела, превратив в интеллектуальную поверхность электронные обои и коврики. Каждый квадратный метр такой поверхности может организовывать пространственное мультиплексирование для π / λ^2 абонентов [18]. Как полагают авторы, это будет Интернет, к которому смогут подключаться как люди с телекоммуникационными устройствами, так и роботы и машины.

4.4. Оптическая связь нового поколения

Оптические системы на современном этапе получают новое развитие. Активно развиваются не волоконно-оптические, а атмосферные оптические линии связи. *Беспроводная оптика* (оптика свободного пространства) [19] — вид оптической связи, использующий электромагнитные волны оптического диапазона, передаваемые через атмосферу, вакуум или космическое пространство. Данные передаются модулированным инфракрасным излучением со средней длиной волны 700–950 нм или 1550 нм. В качестве передатчика работает мощный полупроводниковый лазерный диод, излучение которого фокусируется оптической системой передатчика в узкий коллимированный лазерный луч, в качестве приёмника — высокочувствительный фотодиод или лавинный фотодиод.

Лазерный диод [20] — полупроводниковый лазер, построенный на базе диода. При инжекции носителей заряда от источника тока в области p - n -перехода возникает инверсия населённостей, при релаксации которой происходит излучение. Основа лазера — полупроводниковый кристалл диода в виде очень тонкой прямоугольной пластинки, одна сторона которой легирована для создания n -области, другая — для создания p -области. Боковые поверхности кристалла образуют оптический резонатор Фабри — Перо. При подаче на анод диода положительного потенциала электроны из n -области переходят в p -область и частично рекомбинируют с дырками, при этом происходит спонтанное излучение энергии в виде фотона определённой длины волны (соблюдается закон сохранения энергии) и фонона (в силу закона сохранения импульса). Остальные электроны и дырки могут находиться в одной области пространства, не рекомбинируя в отсутствие внешних воздействий довольно долго; при этом процесс рекомбинации может быть запущен прохождением через эту область фотона резонансной частоты. Фотон, выделяющийся в результате вынужденной рекомбинации, имеет такие же направление, вектор поляризации и фазу, как и фотон, выделяющийся в результате спонтанной рекомбинации. Так как диодный кристалл одновременно является резонатором, то случайный фотон спонтанного излучения, испущенный перпендикулярно граням кристалла, будет многократно отражаться от стенок, создавая новые и новые фотоны с теми же параметрами, и излучение будет в результате когерентной интерференции усиливаться. Когда усиление превысит потери, начнётся лазерная генерация. Длина волны излучения зависит от ширины запрещённой зоны между энергетическими уровнями p - и n -областей полупроводника.

Диоды могут быть как одномодовыми, так и многомодовыми. Для многомодовых лазеров чаще используются цилиндрические линзы, для одномодовых лазеров при использовании симметричных линз сечение луча будет эллиптическим, т. к. расхождение в вертикальной плоскости превышает расхождение в горизонтальной из-за формы резонатора.

Первоначальный вариант реализации лазерного диода как моноперехода со временем заменили более энергоэффективным лазером на двойной гетероструктуре. При этом слой полупро-

водника с узкой запрещённой зоной располагается между слоями полупроводника с широкой зоной. В результате область сосуществования электронов и дырок сосредоточена в тонком среднем слое, что и даёт выигрыш.

Дальнейшее развитие идеи — использование *диода с квантовой ямой*, которую образуют, делая средний слой диода на двойной гетероструктуре совсем тонким. При этом в вертикальном направлении энергия электронов начинает квантоваться, улучшая управляемость лазера.

Эффективности в удержании света в тонких структурах удалось добиться, добавив с двух сторон кристалла ещё два слоя с меньшим коэффициентом преломления, чем у центральных слоёв. Такая структура напоминает световод и хорошо удерживает свет.

Наконец, в системах многочастотной оптической связи используют ещё более сложные решения — *лазеры с распределённой обратной связью*. Поперечная насечка в районе *p-n*-перехода образует дифракционную решётку и позволяет вернуться обратно в резонатор и участвовать в дальнейшем усилении излучения только с одной длиной волны. Лазеры запускаются *драйверами* — устройствами, содержащими источник тока, порождающего спонтанное излучение и управляющего лазером, и блок управления охлаждением для лазеров с активным охлаждением.

Беспроводная оптика может эффективно применяться для решения ряда задач:

- организация связи между многоэтажными домами и узловыми точками сети;
- обеспечение скоростной связи при большом трафике от узлов связи оператора до базовых станций сотовой связи;
- развёртывание временной, быстро организуемой связи в месте, где связи не было раньше;
- создание радиоканала, невосприимчивого к радиопомехам и не создающего их, например вблизи аэропортов или линий электропередач;
- для обеспечения связи без задержек по сравнению с кабельными линиями;
- организация связи в труднодоступных районах, где невозможна прокладка ВОЛС.

Развитие беспроводной оптики идёт по пути конвергенции с радиотехнологиями, в том числе в сочетании атмосферной оптической и радиорелейной связи. В сухую погоду (97 % времени) связь осуществляется через атмосферную оптику, устойчивую к радиопомехам, а во время дождя работает миллиметровая система, что даёт дублирование, т. е. повышает надёжность.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите перспективные системы связи.
2. В чём перспективность трёхмерного телевидения?
3. Какие трудности встретились на пути внедрения трёхмерного телевидения?
- 4*. Что представляет собой искусственный разум в сетях, определяющихся знаниями?
5. Какие данные анализирует сеть, определяющаяся знаниями?
6. Какие возможности создаёт использование машинного обучения и анализа данных для сетей связи?
7. Чем новый Интернет отличается от уже существующего?
- 8*. Каким образом предлагается передавать сигналы узкополосного Интернета?
9. Какие устройства входят в систему оптической связи нового поколения?
10. Чем отличается атмосферная оптическая связь от связи с помощью ВОЛС?

Литература

1. DVB 3D TV // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://en.wikipedia.org/wiki/DVB_3D-TV
2. Stereo display // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Stereo_display
3. 2D plus Delta // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://en.wikipedia.org/wiki/2D_plus_Delta
4. 2D plus Depth // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : <https://en.wikipedia.org/wiki/2D-plus-depth>
5. 3D television // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://en.wikipedia.org/wiki/3D_television

6. Leswing, K. 3D TV is dead / K. Leswing // Business Insider. — 2017. — January, 24. — URL : <https://www.businessinsider.com/3d-tv-is-dead-2017-1>
7. Intelligent Network // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Intelligent_Network
8. Big Data Analytics, Machine Learning, and Artificial Intelligence in Next-Generation Wireless Networks / M. G. Kibria, K. Nguyen, G. P. Villardi et al. // IEEE Access. — 2018. — V. 6. — P. 32328–32338. DOI : 10.1109/ACCESS.2018.2837692
9. Программно-определяемая сеть // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Программно-определяемая_сеть
10. OpenFlow // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : <https://ru.wikipedia.org/wiki/OpenFlow>
11. Knowledge-Defined Networking / A. Mestres, A. Rodriguez-Natal, J. Carner et al. — URL : <https://arxiv.org/pdf/1606.06222.pdf>
12. State-of-the-Art Deep Learning: Evolving Machine Intelligence Toward Tomorrow's Intelligent Network Traffic Control Systems / Z. Md. Fadlullah, F. Tang, B. Mao et al. // IEEE Communications surveys and tutorials. — 2017. — V. 19, № 4. — P. 2432–2455.
13. Интернет вещей // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Интернет_вещей
14. NB IoT // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/NB_IoT
15. Шатлин, И. eSIM : что это и зачем? : блог Лаборатории Касперского. — URL : <https://www.kaspersky.ru/blog/what-is-esim/10971/>
16. Remote SIM Provisioning // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Remote_SIM_Provisioning
17. User Assignment with Distributed Large Intelligent Surface (LIS) Systems / Sh. Hu, Kr. Chitti, F. Rusek, O. Edfors. — URL : <https://arxiv.org/pdf/1709.01696.pdf>
18. Hu, Sh. The potential of Using Large Antenna Arrays on Intelligent Surfaces / Sh. Hu, F. Rusek, O. Edfors. — URL : <https://arxiv.org/pdf/1702.03128.pdf>
19. FSO (технология) // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : [https://ru.wikipedia.org/wiki/FSO_\(технология\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/FSO_(технология))
20. Лазерный диод // Интернет-энциклопедия «Википедия». — URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Лазерный_диод

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Особенности разработок и инноваций в области систем связи.....	4
1.1. Разработки в области систем связи.....	4
1.2. Понятие перспективности разработки.....	7
1.3. Инновации и их поддержка государством	9
1.4. Оценка перспективности разработки	12
Вопросы для самоконтроля	16
Литература	16
Глава 2. Перспективные направления развития систем связи	18
2.1. Современное состояние и тенденции развития систем связи	18
2.2. Миниатюризация устройств связи.....	21
2.3. Интеллектуализация систем связи	26
2.4. Новое поколение систем мобильной связи	28
Вопросы для самоконтроля	29
Литература	30
Глава 3. Эффективные и перспективные технологии в системах инфокоммуникаций	33
3.1. Кодирование шумоподобными кодами.....	33
3.2. Квантовые технологии	48
3.3. Фрактальные технологии.....	56
3.4. Диаграммообразование и множественный доступ.....	58
Вопросы для самоконтроля	60
Литература	60
Глава 4. Перспективные системы связи	66
4.1. Трёхмерное и многомерное телевидение.....	66
4.2. Сети, определяющиеся знаниями	69
4.3. Новый Интернет	72
4.4. Оптическая связь нового поколения.....	74
Вопросы для самоконтроля	77
Литература	77

Учебное издание

Артёмова Татьяна Константиновна

Захаров Александр Сергеевич

Перспективные системы связи

Учебное пособие

Редактор, корректор М. Э. Левакова

Верстка М. Э. Леваковой

Подписано в печать 27.11.18. Формат 60×84 1/16.

Усл.-печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 3,8.

Тираж 22 экз. Заказ

Оригинал-макет подготовлен
в редакционно-издательском отделе
Ярославского государственного университета

Ярославский государственный университет
им. П. Г. Демидова.
150003, Ярославль, ул. Советская, 14.