

ЭВОЛЮЦИЯ РАДИОТЕХНОЛОГИЙ как история освоения радиочастотного спектра 120-летию изобретения радио посвящается

Часть 2

Н.Борисова, кандидат технических наук,
заместитель директора Центрального музея связи им. А.С.Попова

Представлен ретроспективный взгляд на эволюцию радиотехнологий как на движение к использованию более высокочастотных участков электромагнитного спектра, опирающееся на результаты фундаментальных физических исследований.

ОСВОЕНИЕ ДИАПАЗОНОВ ДЛИННЫХ, СРЕДНИХ И КОРОТКИХ ВОЛН

Развитие беспроводной связи шло по пути постепенного освоения все более высоких участков радиочастотного спектра (соответственно, более коротких волн). На начальном этапе (начало 1900-х – середина 1920-х гг.) получили распространение два основных диапазона волн (доступные для техники того времени): средние волны (СВ) от 300 до 600 м и длинные волны (ДВ) свыше 2000 м. С целью увеличения дальности связи и улучшения качества постоянно совершенствовались конструкции и схемы антенн, передающих и приемных устройств. Передатчики на заре развития радиосвязи были искровыми – они генерировали затухающие колебания и создавали широкий спектр помех, что вызывало много неудобств, поэтому конструкторская мысль стала развиваться в направлении поиска способов генерации незатухающих колебаний.

Переход к использованию незатухающих колебаний в радиосвязи происходил постепенно и занял около десяти лет (1905–1915 гг.). За это время было разработано несколько методов генерирования незатухающих колебаний – с помощью электрической дуги, электрических машин

повышенных частот и посредством нового прибора – электронной лампы. Надо отметить, что в области радиопередающих устройств изобретение лампы сперва прошло незамеченным. Столь маломощные устройства как первые электровакуумные приборы не могли поначалу решать проблемы передающих устройств. Но зато в области приемной техники появление электронной лампы совершило революцию – появилась возможность усиливать слабые сигналы на приеме и повышать дальность связи.

Таким образом, средства радиосвязи в течение почти 20 лет развивались только в низкочастотных участках спектра – в диапазонах длинных и средних волн. Все это время диапазон коротких волн (КВ) у профессионалов считался непригодным для дальней радиосвязи, поэтому примерно к концу 20-летнего периода развития радиосвязи его предоставили радиолюбителям. Как ни удивительно это оказалось, но на практике радиолюбители смогли получить дальность связи на коротких волнах намного больше, чем на длинных. Теоретическое объяснение этому нашлось позднее. Было выявлено, что длина волны определяет специфику распространения электромагнитной энергии в условиях Земли,

и что волны каждого из диапазонов имеют свои особенности распространения. Длинные и средние волны распространяются как поверхностные лучи. У длинных волн зона уверенного приема составляет 2000–3000 км. В диапазоне средних волн поверхностный луч претерпевает более сильные поглощения и может распространяться на расстояние до 500–1500 км. КВ-лучи, в виду своей малой длины, имеют другую природу распространения. Они преодолевают огромные расстояния, благодаря многократному отражению от слоев ионосферы.

Кроме увеличения дальности, КВ-радиосвязь имеет еще одно важное достоинство. За счет того, что КВ-каналы являются более широкополосными (по сравнению с каналами связи в диапазонах длинных и средних волн), появилась возможность беспроводной передачи большого объема радиовещательных, телеграфных, телефонных сообщений. Начавшаяся на заре 20 века эпоха радиоламп способствовала созданию в 1920-х годах первых радиосредств КВ-диапазона, которые смогли передавать на большие расстояния намного больше информации. С помощью мощных радиоламп оказалось возможным создать новое для того времени поколение ламповых радиопередатчиков.

Электроламповые генераторы и приемники электромагнитных колебаний на долгие годы стали основой построения радиовещательных сетей, работающих во всех трех диапазонах (ДВ, СВ, КВ). Бытовые радиоприемники выпускались с возможностью настройки на радиостанции, работающие во всех трех диапазонах (рис.5). В последующем, когда появилась соответствующая элементная база, радиовещание распространилось и на УКВ-диапазон.

Начало освоения микроволнового диапазона – радиорелейная связь

Следующие диапазоны частот, относящиеся к сверхвысоким частотам (СВЧ) не развивались вплоть до появления электронных ламп, способных генерировать СВЧ-колебания. Диапазон СВЧ (так называемый микроволновый, или диапазон ультракоротких волн УКВ) на первых порах не интересовал связистов, так как дальность связи у микроволн небольшая. Радиоволны этого диапазона по свойствам в большей степени напоминают световые лучи. Они практически не отражаются от ионосферы, очень незначительно огибают земную поверхность и распространяются только в пределах прямой видимости. Именно



Рис.5. Радиоприемник "Родина-47". Воронежский завод "Электросигнал". СССР, 1947 г.

в этом заключалось их преимущество для радиосвязи – появилась возможность многократного использования одних и тех же частот (без взаимных помех) радиостанциями, расположенными друг от друга на расстоянии, превышающем прямую видимость (150–200 км).

Свойства радиоволн диапазона от 100 МГц и выше еще более близки к световым лучам, их можно сфокусировать в узкие пучки с помощью зеркальных антенн. Возможность фокусировки и излучения – еще одно преимущество УКВ-диапазона. За счет направленного излучения создается меньше помех другим системам связи, находящимся не в створе луча, а узкий луч обеспечивает меньшее рассеивание энергии в побочных направлениях, что позволяет применять менее мощные передатчики для достижения заданной дальности связи. Для низкочастотных волн такую антенну построить невозможно, так как слишком велики были бы ее размеры (диаметр зеркала должен быть намного больше, чем длина волны).

Возможность фокусирования высокочастотных радиоволн обеспечила их широкое применение в радиолокации, радиорелейной связи, спутниковом вещании, мобильной связи, беспроводной передаче данных, радиоастрономии и т.д.

Радиорелейная связь первой освоила микроволновый диапазон в начале 1930-х годов. Этот вид связи относится к наземной радиосвязи, основан на многократной ретрансляции радиосигналов микроволнового диапазона. Радиорелейная связь осуществляется, как правило, между стационарными объектами. Отличительной ее



Рис.6. Спутник связи "Молния-1".

особенностью от всех других видов наземной радиосвязи является использование узконаправленных антенн, а также дециметровых и сантиметровых (а позднее и миллиметровых) радиоволн. Разновидностью радиорелейной является тропосферная связь, использующая эффект отражения дециметровых и сантиметровых радиоволн от турбулентных и слоистых неоднородностей в нижних слоях атмосферы – тропосфере. Использование эффекта дальнего тропосферного распространения радиоволн УКВ-диапазона дало возможность организовывать связь на расстояние до 300 км при отсутствии прямой видимости между радиорелейными станциями. Дальность связи может быть увеличена до 450 км при расположении радиорелейных станций на естественных возвышенностях.

Исторически радиорелейные линии использовались для организации каналов связи телевизионного и радиовещания, а также для связи телеграфных и телефонных станций на территории со слабо развитой инфраструктурой. Современные радиорелейные линии связи обеспечивают также передачу больших объемов информации от базовых станций всех поколений к элементам опорной сети сотовой связи. В соответствии с рекомендацией МСЭ-Р F.746 для

радиорелейной связи прямой видимости утверждены диапазоны частот от 400 МГц до 94 ГГц. К "классическим" радиорелейным частотным диапазонам относятся диапазоны от 2 до 38 ГГц.

СПУТНИКОВАЯ СВЯЗЬ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Развитием традиционной радиорелейной связи в микроволновом диапазоне с начала 1960-х годов стала спутниковая связь, организованная путем вынесения ретранслятора на искусственный спутник Земли (ИСЗ) на большую высоту (от десятков до сотен тысяч км). Появление этого вида связи стало возможным только после того, как были созданы ракеты, способные вывести спутники на околоземную орбиту. Вначале в космической связи использовался сантиметровый диапазон волн, в последующем освоили и более высокие частоты. Спутниковые линии позволили осуществлять многоканальную связь на очень большие расстояния.

На геостационарной орбите высотой 36 000 км спутник перемещается со скоростью вращения Земли (один оборот за 24 ч). В этом случае можно с помощью трех спутников, расположенных под углом 120°, обеспечить связь на территории всего земного шара. Как известно, первый спутник был запущен в СССР в 1957 году. Благодаря космической связи появилась возможность доставлять телевизионные программы на обширную территорию нашей страны, главным образом туда, где не было проводных линий (от Урала до Дальнего Востока). Первый экспериментальный спутник связи "Молния-1" (рис.6) в СССР был запущен в 1965 году. Он работал в диапазоне частот 800–1000 МГц, "Молния -2" (1971 г.) – в международном спутниковом диапазоне частот 4–6 ГГц.

На основе таких спутников в нашей стране были созданы первые в мире сети спутникового телерадиовещания, которые постоянно совершенствовались: "Орбита" (1967 г.), "Экран" (1976 г.), "Москва" (1979 г.) и др. За рубежом первоначально спутниковая связь развивалась как средство передачи больших объемов международного (в том числе межконтинентального) телефонного трафика. Вскоре появились спутниковые системы, в которых можно было организовывать индивидуальные линии связи, используя недорогие земные станции с малыми антеннами (VSAT – Very Small Aperture Terrestrial).

Спустя десятилетия появилась мобильная спутниковая связь, в которой абонентское устройство имеет почти такой же размер, как сотовый

телефон. Благодаря спутниковым системам для миллионов жителей Земли, живущих в труднодоступных для создания наземной инфраструктуры местах, стала доступна и мобильная связь, и телерадиовещание. Продвижение спутниковых систем во все более высокочастотные области связано с расширением задач, решаемых с помощью спутниковой связи – появились системы космической навигации (GPS, ГЛОНАСС и др.), спутниковые метеорология и системы исследования Земли, в том числе картографирования всей поверхности земного шара и т.п. Частоты, используемые в спутниковой связи, разделяют на диапазоны, обозначаемые буквами. Ориентировочные значения даны в рекомендации МСЭ-Р V.431-6: L – 1,5 ГГц; S – 2,5 ГГц; C – 4 ГГц, 6 ГГц; Ku – 11 ГГц, 12 ГГц, 14 ГГц; K – 20 ГГц; Ka – 30 ГГц.

ОСВОЕНИЕ УКВ-ДИАПАЗОНА СИСТЕМАМИ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

Мобильная сотовая связь, как и радиорелейная, и спутниковая, относится к радиосвязи, основанной на многократной ретрансляции радиосигналов УКВ-диапазона. Только в данном случае эта ретрансляция осуществляется сетью наземных базовых станций. Предшественником сотовой персонализированной связи можно считать транкинговые системы профессиональной подвижной связи, первым отечественным представителем которой являлась система "Алтай" (рис.7).



Рис.7. Абонентская радиостанция "Алтай АС". Диапазон частот 430–440 МГц

Сотовый принцип связи, предполагающий повторное использование частот, был предложен в 1947 году. Практическое воплощение этого принципа стало возможно только спустя несколько десятилетий после того, как вычислительная техника и элементная база в своем развитии достигли уровня, позволившего создавать инфраструктуру мобильной связи и малогабаритные абонентские терминалы. Хотя первые мобильные телефоны трудно было назвать компактными (рис.8).

Мобильная сотовая телефония родилась как связь, оказывающая на достаточно больших расстояниях только голосовые услуги, но за 30 лет (начало 1980-х – начало 2010-х гг.) перечень услуг пополнился сначала передачей данных, а потом видео. Начинаясь в 1990-х годах с трансляции данных в простейших компьютерных сетях, беспроводной широкополосный доступ за 20 лет превратился в конкурента мобильной сотовой связи, как по составу оказываемых услуг (их перечень пополнился видео и голосовой информацией), так и по получению разрешений на частоты.

При освоении радиочастотного спектра технологиями мобильной связи стала наглядно проявляться проблема уменьшения дальности с увеличением частоты. Сети 2G/GSM в России работают на частотах 900 и 1800 МГц. Под сети 3G/HSPA был первоначально выделен диапазон 2,1 ГГц. Сети 4G (в том числе LTE и WiMAX) вынуждены были осваивать еще более высокие диапазоны 2,3, 2,6



Рис.8. Телефон мобильный Nokia Citymen-900. 1990-е гг. Стандарт NMT, диапазоны частот: 890–915, 935–960 МГц

и 3,5 ГГц. Конечно, в более высокочастотном диапазоне можно разместить втрое больше каналов связи, чем в диапазоне 800–900 МГц, но для обеспечения сплошного покрытия с целью гарантирования качества связи необходимо втрое увеличить количество сот и, соответственно, базовых станций. Цена таких проектов с учетом развития наземной кабельной инфраструктуры и увеличения количества базовых станций возрастает, что повышает стоимость новых инфокоммуникационных услуг и негативно сказывается на доступности связи. Несколько ослабить, но не решить напряженность проблемы работы мобильных систем в высокочастотной области может применение операторами связи малых сот – компактных базовых станций, устанавливаемых в местах с проблемным покрытием, например, внутри зданий, и подключаемых через сеть широкополосного доступа к базовой сети мобильного оператора.

АТМОСФЕРНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ

Говоря об освоении радиотехнологиями высокочастотных участков спектра, нельзя не упомянуть существование беспроводной оптической связи, которая, правда, не нашла столь широкого применения, как проводная волоконно-оптическая связь. Оптическая (атмосферная) связь (иногда называемая лазерной) стала применяться в конце 1990-х годов, когда были разработаны недорогие источники когерентного оптического излучения (полупроводниковые лазеры) мощностью около 100 мВт и более, а применение цифровой обработки сигналов позволило избежать недопустимого затухания сигналов и выполнять повторную передачу пакетов при обнаружении ошибок. Тем не менее, обеспечить должное качество связи вследствие большого поглощения волн в атмосфере и разных помех другого рода удалось только на небольших расстояниях. Поэтому сфера применения беспроводной оптической связи ограничена: для преодоления сложных участков сети (например, водной преграды), как временная связь при прокладке подземных линий связи или при проведении мероприятий, а также в локальных сетях.

Лазерная связь осуществляется посредством модуляции низкочастотным информационным сигналом электромагнитных волн инфракрасного диапазона (граничащих с видимым светом). Механизмы поглощения этих волн в атмосфере во многом аналогичны тем, которые происходят в оптоволокне. В результате в атмосфере

электромагнитные волны передаются в тех же "окнах прозрачности" (850, 1310, 1550 нм), что позволяет заимствовать элементную базу и технологии, применяемые в волоконно-оптической связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как следует из представленного обзора, вплоть до недавнего времени повышение скорости и объема информации достигалось посредством разработки новых радиотехнологий, занимающих все более высокочастотные участки электромагнитного спектра. Платой за улучшение перечисленных показателей при этом становилось уменьшение радиуса действия аппаратуры связи, работающей на более высоких частотах, что связано с особенностью распространения электромагнитных волн различной длины. Длинные и средние волны (ДВ-, СВ-диапазоны), освоенные в начальный период развития радиосвязи, могли огибать земную поверхность и обеспечивать таким образом дальнюю связь. Короткие волны (КВ-диапазон), несмотря на затухания, за счет многократных отражений от ионосферы также поддерживали дальние связи. Микроволны (УКВ-диапазон), обладающие большим затуханием, были доступны только в зоне прямой видимости, что вызвало необходимость применения ретрансляции. Атмосферная оптическая связь (инфракрасный и световой диапазоны) способна действовать только на небольших расстояниях и в исключительно хороших погодных условиях (без дождя и туманов).

Сегодня на пути превращения мобильного телефона в современное универсальное средство персональной связи для общения, работы и развлечения стоит серьезная проблема. Она заключается в необходимости понижения рабочих частот и "возврата" новых технологий (в частности LTE) в более низкие радиочастотные диапазоны (450–1800 МГц); примерно в этом же диапазоне находятся оптимальные частоты для цифрового телерадиовещания, для транкинговой связи. Организационно-техническими процедурами, регламентирующими указанную проблему, занимаются специалисты телекоммуникационной отрасли на международном и национальных уровнях. Означает ли приведенный пример, что поступательное движение новых радиотехнологий по шкале электромагнитных волн к более высоким частотам остановилось? Или все же последнее слово за учеными-физиками, результаты фундаментальных исследований которых традиционно прокладывают дорогу радиоинженерам и связистам? ■