

ОБЩЕСИСТЕМНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.396.74+621.397.2

*Б. М. БУЛГАКОВ, д-р техн. наук, С. А. КРАВЧУК, Т. Н. НАРЫТНИК, канд. техн. наук,
В. В. ПОПОВСКИЙ, д-р техн. наук, С. И. ТАТАРЧУК, канд. техн. наук*

КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВЫХ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Ранее радиоволны использовались только в радиовещании, дальней радиосвязи, телевидении и радиолокации. Однако с началом массового применения электромагнитного излучения (ЭМИ) возникла еще одна экологическая проблема глобального масштаба. Доказано, что даже слабые электромагнитные поля могут воздействовать на биологические объекты [1; 2]. В частности, это подтверждает лечение людей путем их облучения ЭМИ [3]. Группой экспертов ООН проведен анализ данных, полученных учеными разных стран, и подтверждено существование влияния ЭМИ на нервную систему человека и на его защитные механизмы, препятствующие развитию заболеваний [4]. Таким образом, существует противоречие между дальнейшим развитием телекоммуникационных радиосистем и экологической безопасностью живых организмов на Земле. Данное противоречие можно разрешить, если в телекоммуникационных системах повсеместно начнут применяться новые технологии, позволяющие наращивать объемы передаваемой информации, но на экологически безопасном уровне. Частично подобные технологии уже существуют: это использование спутниковых систем и волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Если бы удалось довести оптическое волокно до каждого абонента, то он имел бы все виды информационных услуг. В результате исчезли бы мощные источники ЭМИ, например эфирное телевидение. Однако названное решение сложно и очень дорого, поэтому необходимы другие, альтернативные. Одним из таких решений может быть использование радиосистем сантиметрового, миллиметрового (ММ) и субмиллиметрового (СММ) диапазонов. В указанных диапазонах, особенно в последних двух, антенны имеют остронаправленное излучение и микромощные передатчики. Тем самым удовлетворяются экологические требования при существенном возрастании объемов передаваемой информации. Этим волнам соответствуют частоты от 30 до 3000 ГГц, т.е. диапазон в 100 раз шире, чем для всех других радиочастот, вместе взятых.

Итак, системы ММ- и СММ-диапазонов имеют малые массу и габаритные размеры, легко перемещаются, их излучение (подобно оптическому) может фокусироваться в узкие лучи, на которые практически не влияют подстилающая поверхность и любые предметы, находящиеся вне луча. Это позволяет организовывать в заданном географическом районе большое количество радиолиний и обеспечивать их электромагнитную совместимость. Высокая концентрация излучения дает возможность использовать малые мощности и малое энергопотребление, а высокая рабочая частота обеспечивает полосу частот для передачи информации до 5 ГГц. Однако системы ММ- и СММ-диапазонов имеют ряд особенностей: они являются системами прямой видимости и на распространение их радиоволн в атмосфере сильно влияют погодные условия [5]. В результате эти диапазоны не использовались для дальней связи. Однако при появлении линий связи ближнего действия ситуация изменилась. К системам ММ-диапазона начал проявляться значительный интерес [6 – 9]. Уже реализованы телекоммуникационные системы ближнего действия, использующие ММ-диапазон. К ним относятся: сеть LMDS (Local Multipoint Distribution Service), работающая в диапазоне 27,5 – 29,5 ГГц; сеть MVDS (Multipoint Video Distribution System), работающая в диапазоне 40,5 – 42,5 ГГц, и др.

Особенности миллиметровых и субмиллиметровых волн. Для радиолиний мощность принятого сигнала может быть рассчитана с учетом затухания в атмосфере по формуле

$$P_r = P_t G_1 G_2 (\lambda/4\pi d)^2 \exp(-\alpha d),$$

где P_t , P_r , – мощности на входе приемника и на выходе передатчика; d – расстояние; α – коэффициент затухания. Значение α зависит от частоты, влажности, высоты над поверхностью земли и других факторов. Накоплены статистические данные, которыми можно пользоваться при расчетах. Наиболее существенным метеорологическим фактором, сильно влияющим на затухание радиоволн, являются дожди. На рис. 1 показана зависимость максимальной дальности, на которой может быть принят цифровой сигнал ФМ-4 передатчика мощностью 10 мВт в спокойной атмосфере и в дождях различной интенсивности R , от частоты. Если приемник и передатчик имеют одинаковые антенны с коэффициентом усиления 36 дБ, сигнал превышает шум на 24 дБ, а приемник имеет коэффициент шума 7 дБ и предельную чувствительность. Существуют частоты, для которых наблюдается поглощение даже в отсутствие дождя, и некоторые участки частот, называемые «окнами прозрачности» атмосферы (на рис. 1 отмечены кружками), где затухание сигнала минимально. Ниже приведены частоты, соответствующие «окнам прозрачности» в ММ- и частично в СММ-диапазонах, и указано затухание сигнала в спокойной атмосфере для этих частот, а также (для сравнения) представлены аналогичные данные по 3 см-диапазону:

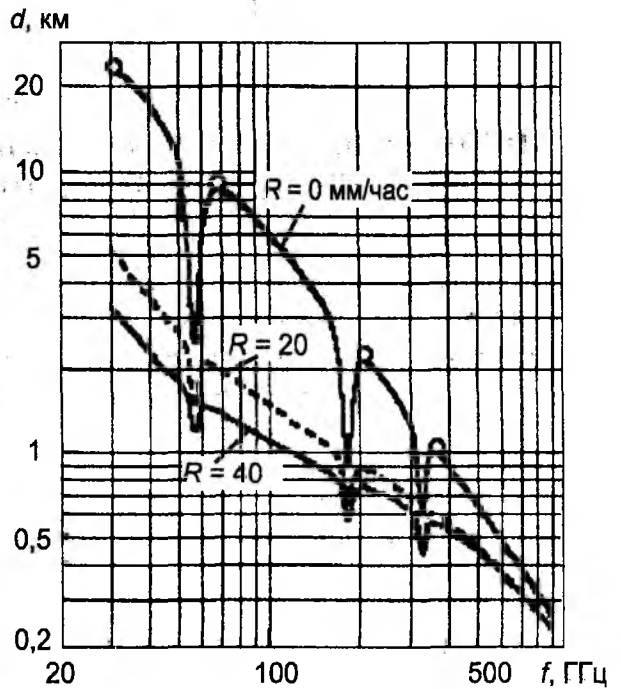


Рис. 1

Окно прозрачности, ГГц	10	35	94	140	240
Поглощение в спокойной атмосфере, дБ/км	0,005	0,07	0,5	1,0	2,2

Разность расстояний в спокойной атмосфере и в дожде определяет необходимый запас чувствительности системы. По мере повышения частоты растет поглощение радиоволн в атмосфере, но если при этом уменьшать длину пролета, то уровень сигнала на входе приемника можно сохранить. Имея статистические данные о том, как часто в данной местности бывают интенсивные дожди, снегопады, туманы и т.д., можно оценить надежность связи и необходимый запас чувствительности приемного устройства. В качестве примера на рис. 2 отражены результаты расчета для 8 мм-диапазона, с учетом погодных условий центральных районов Украины. По оси ординат отложено допустимое время t ухудшения качества связи (минуты в течение месяца). По оси абсцисс отложен необходимый при этом запас чувствительности аппаратуры, рассчитанный для отношения сигнал-шум 43 дБ, для трасс длиной D , равной 1, 3, 5, 7 и 10 км.

Расчет проведен для радиорелейной линии (РРЛ), укомплектованной передатчиком с мощностью 10 мВт, при коэффициенте усиления антенны 39 дБ. Результаты относятся к варианту, в котором требуется превышение уровня полезного сигнала над шумом не менее 43 дБ. Аппаратура может обладать запасом чувствительности до 40 дБ, а из этого следует, что при допустимом времени ухудшения качества связи до 60 мин в течение месяца данная РРЛ может быть использована на расстояниях до 7 км.

Следует иметь в виду, что ухудшение качества связи не означает прекращения связи вообще. Даже при потерях до 40 дБ система связи продолжает работать. Для малых трасс (около 1 км) при запасе чувствительности в 20 дБ время снижения качества канала связи составит не более нескольких минут в течение месяца.

Из изложенного следует, что для систем с коротким пролетом снижаются технические требования к аппаратуре и далеко не столь существенно поглощение этих волн в атмосфере и в осадках. При пролетах менее 1 км могут использоваться передатчики с мощностью около 1 мВт, и они способны обеспечить надежную связь практически при любых погодных условиях. На коротких пролетах, измеряемых сотнями метров, РРЛ могут работать во всех окнах прозрачности ММ- и СММ-диапазонов, указанных выше. А проблемы, вызванные поглощением ММ- и СММ-волн в атмосферных осадках, в значительной степени теряют остроту. С другой стороны, радиорелейные линии ММ- и СММ-диапазонов имеют малые габаритные размеры и массу, высокую мобильность, способны передавать большой объем информации и характеризуются узкой диаграммой направленности, что при малой мощности обеспечивает экологическую безопасность системы и затрудняет несанкционированный доступ к информации. В локальных информационных сетях, действующих на расстояниях менее 1,5 км, могут применяться частоты, на которых происходит интенсивное поглощение радиоволн атмосферным кислородом [8]. В этом случае поглощение является не недостатком, а преимуществом, так как атмосфера экранирует отдельные системы друг от друга и устраняет их взаимные помехи.

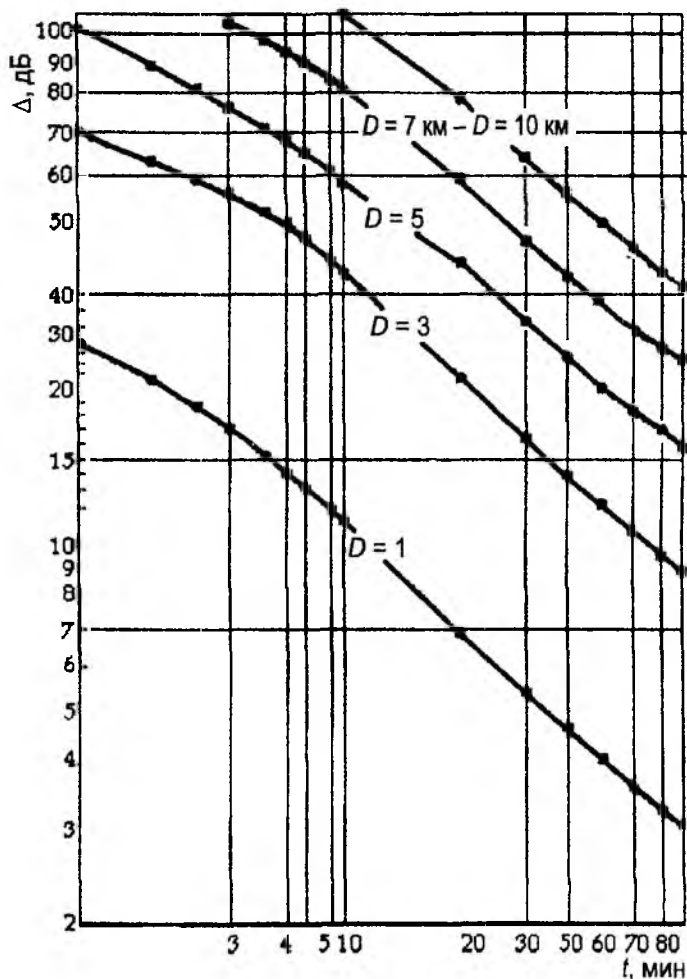


Рис. 2

Радиорелейные системы прямой видимости на большие и средние пролеты. РРЛ прямой видимости сантиметрового и длинноволновой части ММ диапазона являются неотъемлемой частью любых радиосистем [10]. Они обеспечивают функционирование радиолиний между базовыми станциями сотовой связи, объединяют компьютерные сети и районные АТС, используются для связи с удаленными пунктами в пределах городской застройки и промышленных зон, где прокладка кабелей затруднена. Особенно необходимы такие РРЛ ММ-диапазона в крупных городах при наличии трасс, где ощущаются проблемы, связанные со взаимными помехами станций, а также станций и спутниковых систем. В ММ-диапазоне предоставляется значительно больший простор при выборе рабочих частот. Эти системы широко распространены и могут войти в качестве составных частей в более сложные телекоммуникационные системы ММ- и СММ-диапазонов. Существует большой ассортимент подобных РРЛ, и их выбор полностью зависит от конкретного проекта. Предполагается их использовать в качестве радиолиний между удаленными сотами систем ММ- и СММ-диапазонов, которые будут рассмотрены отдельно.

Системы многостанционного радиодоступа. Сверхвысокочастотные сотовые системы ММ-диапазона [11] способны обеспечить интерактивную связь с большим числом абонентов. Эти возможности можно показать на примере системы сантиметрового диапазона MITRIS, которая действует в ряде городов Украины.

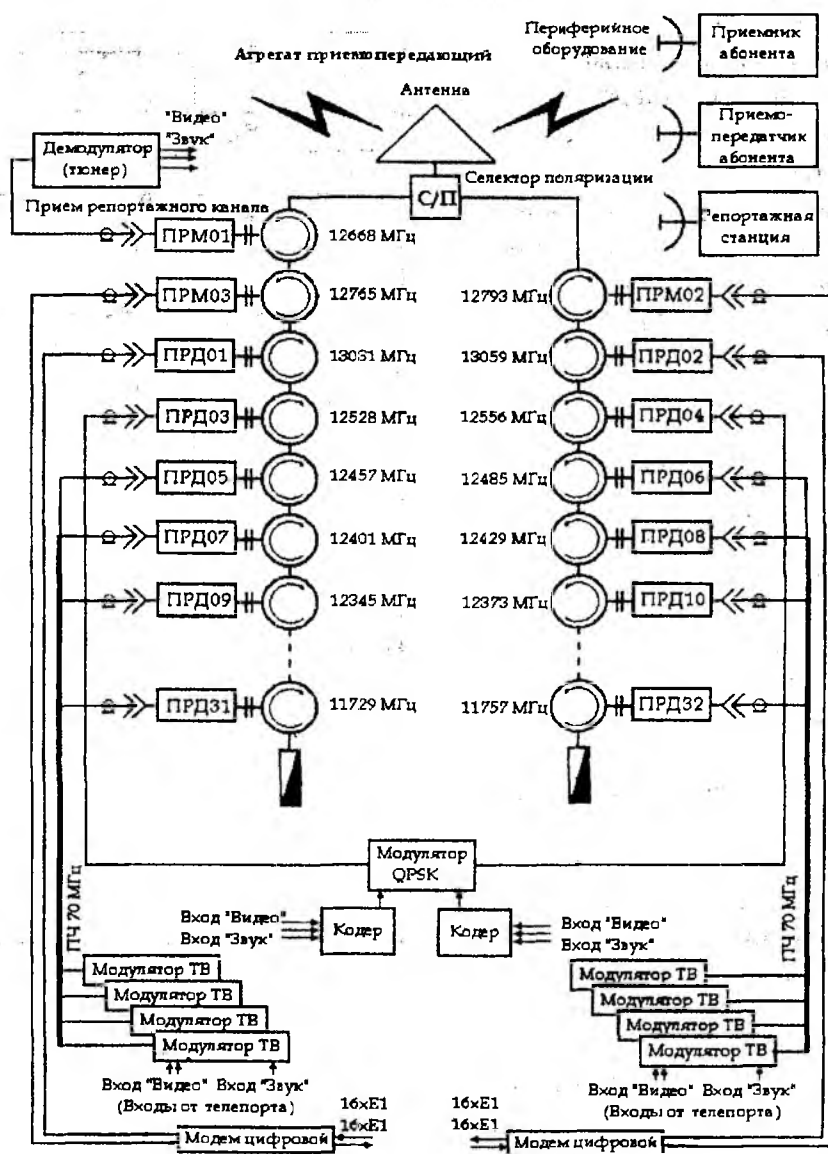


Рис. 3

Система MITRIS имеет антенну с круговой диаграммой направленности, ширина которой в вертикальной плоскости составляет 4 – 5°. Она создает информационное поле в радиусе до 40 км и предназначена в основном для распределения телевизионных программ. Структура ее центральной приемопередающей станции показана на рис. 3. Стремление получить прибыль с минимальными затратами обусловило использование аналогового телевидения, несмотря на то что в цифровом виде можно передать в шесть раз больше телепрограмм. Местное кабельное телевидение конкурирует с MITRIS либо входит в ее состав в качестве коллективного абонента.

Одним из препятствий на пути распространения MITRIS по территории Украины является совпадение части ее рабочих частот с частотами спутниковых систем связи. Чтобы избежать этого, используются приемные станции с узкой диаграммой направленности антенн и выбирается рациональное место расположения центральной станции. Но в городе,

при наличии отражений сигналов, иногда трудно избавиться от помех только указанными средствами [12 – 14]. И тогда приходится корректировать частотный план системы. При переходе в ММ-диапазон устранение взаимных с другими радиосредствами помех значительно упрощается.

Другое препятствие заключается в том, что MITRIS – система прямой видимости. А это означает, что многие потенциальные абоненты попадают в «мертвые зоны», затененные рельефом местности или строениями, т. е. недоступные для сигнала базовой станции (БС). Поэтому в состав системы должны войти дополнительные технические средства. К ним относятся: пассивные и активные ретрансляторы, локальные кабельные сети. Однако создание подобных дополнительных средств только для распределения телепрограмм не оправдывает себя экономически. Иное дело – полностью цифровая система ММ-диапазона, объединяющая в одном групповом потоке практически все виды информации: телефонную связь, телепрограммы, Интернет и др. Для подобной системы окупается создание инфраструктуры, предназначенной для охвата практически всех жителей региона.

Расстояние между спутником и абонентом на Земле очень большое. Поэтому увеличение поглощения в атмосфере от 0,012 дБ/км в сантиметровом диапазоне до 0,14 дБ/км в 8 мм-диапазоне делает нецелесообразным использование ММ-, а тем более СММ-волн на трассах Земля – космос в спутниковых системах. Тем самым снимаются проблемы, вызванные взаимными помехами данных систем и спутниковых систем связи. В отличие от MITRIS, система ММ-диапазона должна быть полностью цифровой. Радиус охвата территории БС ММ-диапазона составит 5 – 10 км. Поэтому для покрытия большой территории понадобится много ретрансляторов. В результате систему можно назвать сотовой телекоммуникационной системой ММ-диапазона. Назначение этой системы состоит в том, чтобы интегрировать существующие виды связи и предоставить жителям города и его пригородов все виды информационных услуг. А именно: телепрограммы; телефон и видеотелефон; электронную почту и Интернет; охранную сигнализацию; включение в локальные сети; справочные данные; автоматизированные системы контроля (транспорта, экологической обстановки, расходования энергетических ресурсов, навигационные системы летательных аппаратов и т. д.). Наиболее впечатляет возможность быстрого развития на основе системы ММ-диапазона самого массового вида связи – телефонии. При этом отпадает необходимость в строительстве и эксплуатации кабельных сетей, зданий АТС, сокращаются затраты на содержание обслуживающего персонала и другие эксплуатационные расходы. Появляется возможность в короткий срок обеспечить услугами телефонной связи и другими информационными услугами огромный контингент жителей и снизить себестоимость этих услуг.

Структура сети базовых станций системы ММ-диапазона приведена на рис. 4. Станции-ретрансляторы должны располагаться в соответствии с рельефом местности и застройкой населенных пунктов. Каждый ретранслятор перекрывает зону в радиусе 5 – 10 км.

Подобную систему можно условно разбить на три составляющие. *Первая составляющая* (см. рис. 4) – это центральная базовая станция (ЦБС) и комплекс БС, выполняющих функции ретрансляторов. ЦБС содержит телепорт для обмена информацией со спутниковыми системами, узел связи с местными телефонными сетями и коммутатор, обеспечивающий формирование цифровых потоков и коммутацию сигналов внутри системы. Если большое число БС – это недостаток, то он компенсируется отсутствием проблем со спутниковыми системами связи и расширением полосы используемых рабочих частот до 4 ГГц и более. В такой полосе можно применить совместное частотное и временное уплотнение цифровых потоков. Используя поляризационную развязку между соседними каналами и фильтры с полосой 0,5 %, можно реализовать работу на общую антенну до 20 передатчиков с частотами, отстоящими друг от друга на 90 мГц, и прием 20 обратных каналов. Таким образом, система будет иметь до 20 стволов с полосой до 70 мГц каждый. Временное уплотнение в каждом из каналов позволит передать цифровые потоки, соответствующие загрузке примерно 1000

телефонных каналов. Если задействовать все стволы, то в общей сложности система способна обеспечить одновременную работу до 20 000 дуплексных цифровых телефонных каналов.

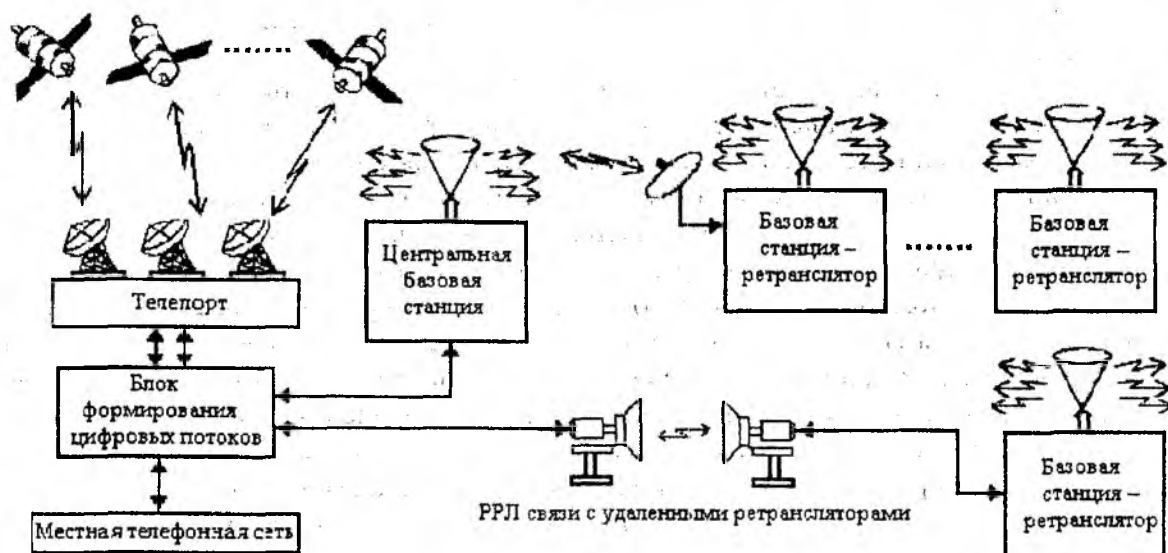


Рис. 4

С учетом неодновременности использования системы связи абонентами и существующих возможностей уплотнения цифровой информации число обслуживаемых системой абонентов составит несколько миллионов. Этого более чем достаточно даже для очень крупного города. Кроме того, может осуществляться коммутация сигналов в пределах зоны каждого ретранслятора. Имея столь большие возможности, можно сохранять значительную часть стволов в резерве для повышения надежности системы и на случай помех со стороны других радиосредств. По мере совершенствования аппаратуры временного уплотнения полоса частот каналов может быть расширена. Окончательный выбор полосы частот и количества стволы зависит от возможностей аппаратуры временного уплотнения. Ретрансляторы – БС могут работать на одинаковых частотах, так как узкая диаграмма антенн приемных станций позволит избежать интерференции сигналов разных БС. Если же интерференция все же возникнет, ее можно устранить с помощью поляризационной развязки или путем перехода на резервные частоты. Проблема заключается только в том, как развязать вход и выход ретранслятора между собой.

Предполагается использовать БС двух типов. При первом варианте в БС, как и в ЦБС, в антенном тракте складываются сигналы от независимых источников: усилителей или генераторов. В этом случае достигается высокий уровень сигнала на выходе из ретранслятора и имеется возможность изменять частоты выходных сигналов по отношению к частотам входных сигналов. Появляется возможность обслуживания абонентов внутри зоны БС, без выхода на ЦБС. При втором варианте БС принимает групповой канал непосредственно от ЦБС или от других БСР и после соответствующего усиления излучает этот же групповой сигнал в открытое пространство. Развязка между входом и выходом БСР осуществляется за счет диаграмм направленности приемной и передающей антенн ретранслятора и путем чередования поляризации. Для приема и передачи используются отдельные антенны, и передающая антенна в горизонтальной плоскости может иметь диаграмму направленности в секторе углов 90° , 120° , 180° или 270° . Для связи между ЦБС и БС, удаленными на значительные расстояния, используются направленные РРЛ СМ- либо ММ-диапазона. Таких РРЛ существует достаточно много, и выбираются те, которые способны перекрыть заданные пролеты и обеспечить передачу необходимых объемов информации.

В телекоммуникационных системах существует так называемая «проблема последней мили». Сетью БС создано простирающееся над городом сплошное информационное поле.

Как теперь войти в это поле многочисленным пользователям системы? Существует проблема, как доставить сигнал абонентам, находящимся в зонах, затененных зданиями или рельефом местности от прямого сигнала БС. Необходимы дополнительные технические средства, позволяющие пользователям подключиться к БС или к другому абоненту. Эти средства и являются *второй составляющей* системы. Оценки показывают, что подавляющее большинство пролетов, которые необходимо перекрыть, находится в пределах от сотен метров до двух километров. Если расстояние меньше 100 м, то можно проложить кабель, но при этом сузится полоса передаваемых частот. Могут быть использованы пассивные ретрансляторы, но главную роль должны сыграть специально для этой цели созданные РРЛ ближнего действия коротковолновой части ММ- и СММ-диапазонов. Важно обеспечить низкую стоимость и простоту этих РРЛ, так как при их массовом использовании стоимость типичной РРЛ сильно повлияет на общую стоимость системы. Особенности РРЛ ближнего действия коротковолновой части ММ- и СММ-диапазонов более подробно рассмотрены ниже.

Сеть БС в условиях города способна «осветить» главным образом верхние этажи и крыши зданий. Там, куда попадает сигнал системы, могут быть установлены станции абонентов. Эти станции и являются *третьей составляющей* системы. Пользователи системы имеют значительные различия в финансовых возможностях и потребностях, велики и различия в конструкции и расположении зданий. Это приводит к необходимости разработки комплекса средств, способных удовлетворить потребности пользователей в любых условиях. Рассмотрим три вида станций абонентов.

1. Приемная станция индивидуального пользователя (рис. 5, а). Учитывая высокую стоимость передающей аппаратуры, некоторые индивидуальные пользователи предпочтут иметь только приемную станцию. В этом случае им можно доставить телепрограммы и услуги быстрого Интернета. Практически такая станция обеспечивает те же услуги, что и спутниковое телевидение. Поэтому данный вид станций не получит широкого применения.

2. Приемопередающая станция индивидуального пользователя (рис. 5, б). Этот вид отличается тем, что станция работает в интерактивном режиме. Интернет связан с системой широкополосным радиоканалом. Пользователь получает в свое распоряжение телефон. Стоимость станции возрастает из-за наличия в составе аппаратуры передатчика и цифровой системы разделения каналов. Учитывая высокую стоимость аппаратуры, эта станция будет доступна лишь узкому кругу пользователей.

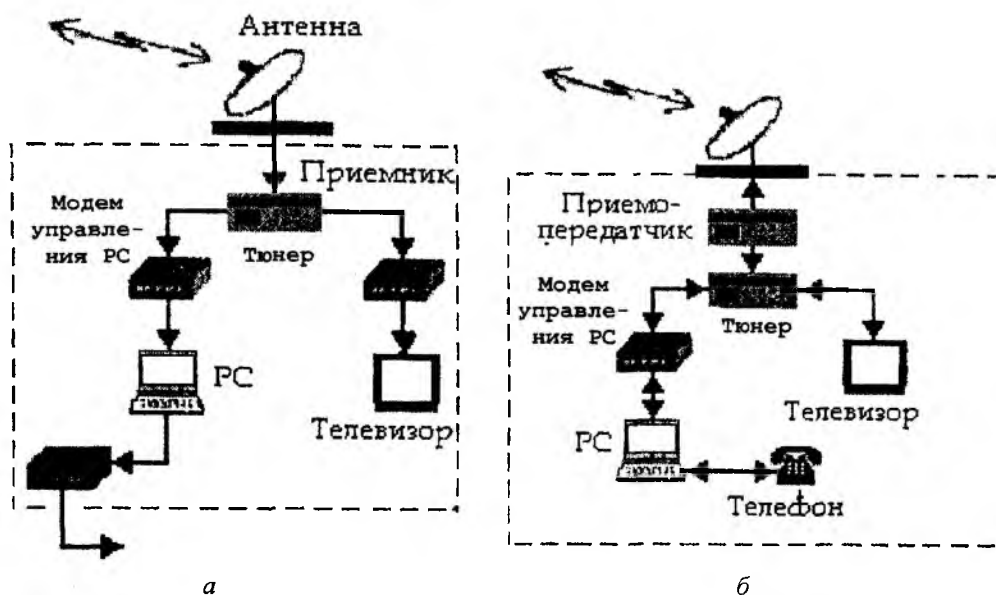


Рис. 5

3. Приемопередающая станция коллективного пользования (рис. 6). Высокая стоимость этой станции компенсируется большим числом пользователей, обслуживаемых ею через распределительную систему. Поэтому данный вид станций будет основным в системе. Принятая информация с помощью кабельной системы доставляется абонентам. Для доставки сигналов абонентам можно использовать также низкочастотные радиосистемы, действие которых ограничивается территорией здания (ближним эфиром). В этом случае действие системы напоминает систему мобильной связи, но с широкой полосой частот и малой мощностью излучения. В составе БС и приемопередающих станций коллективного пользования в качестве ближних линий связи найдут эффективное применение РРЛ ММ- и СММ-диапазонов с короткими пролетами.

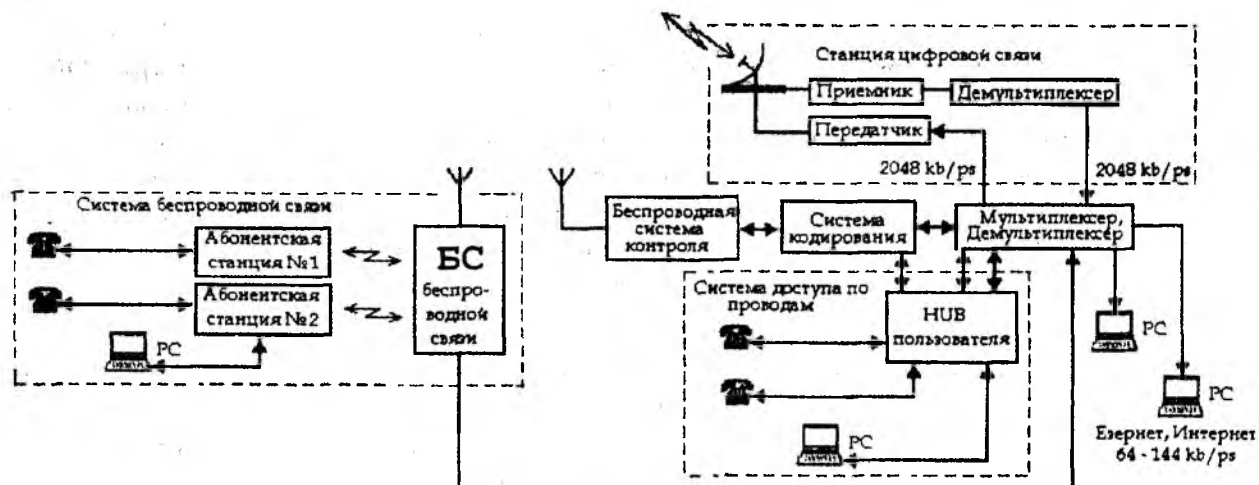


Рис. 6

Все большее распространение получают новые технологии, которые дают возможность в сравнительно узкой полосе частот передать огромные объемы информации. Особенно перспективно применение технологий Интернета, позволяющих большому числу пользователей одновременно общаться между собой на одной и той же частоте или через общий кабель. Все эти технологии могут быть реализованы в предлагаемой системе.

Отметим, что здесь основное внимание уделено особенностям построения одного из вариантов телекоммуникационных систем ММ-диапазона, поэтому оставлены в стороне вопросы применения протоколов связи и многие другие частные вопросы использования системы.

РРЛ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с короткими пролетами. Выше упоминалось, что на коротких пролетах можно использовать РРЛ в диапазонах частот 35, 94, 140 и 240 ГГц. На всех частотах длина пролета превосходит 2 км. Можно было бы осваивать частоты вплоть до 3000 ГГц, но в настоящее время отсутствует необходимая для этого элементная база. На рис. 1 прослеживается тенденция сокращения требуемого динамического диапазона РРЛ по мере уменьшения пролета. При длине пролета в 1 км и запасе чувствительности всего в 10 дБ отношение сигнал-шум может быть меньше 24 дБ менее 10 мин в течение месяца. Уменьшение динамического диапазона системы и повышение уровня сигнала на входе приемника позволяют для коротких пролетов существенно упростить аппаратуру и снизить ее стоимость. Мощность передатчика может быть довольно малой. Например, на частоте 140 ГГц (длина волны 2,15 мм) при мощности всего 1 мВт возможна надежная связь при длине пролета до 1 км. Отклонения луча в результате воздействия различных внешних факторов практически не сказываются на коротких пролетах. К тому же не вызывает трудностей визуальная ориентировка лучей станций. Поэтому можно использовать антенны с узкими диаграммами направленности, менее $0,5^\circ$, и с большими

коэффициентами усиления. В диапазоне 140 ГГц диаметр антенны с коэффициентом усиления около 50 дБ не будет превышать 150 мм.

Простейший вариант подобной РРЛ ближнего действия (рис. 7) работает без усилителя мощности, и сигнал на антенну поступает непосредственно с преобразователя частоты вверх. Используется общий гетеродин – для преобразования частоты как вверх, так и вниз. В РРЛ для развязки передающего и приемного каналов передача и прием сигнала ведутся с разной поляризацией.

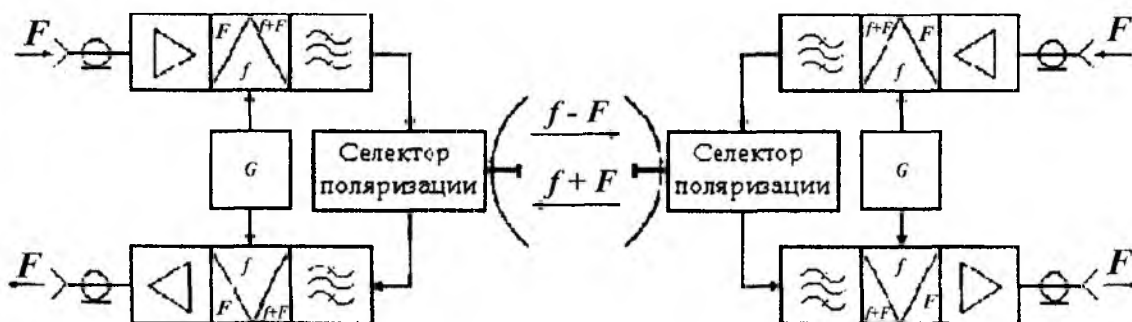


Рис. 7

Разность частот передатчика и приемника равна $2F$, где $F = 0,9 \div 2,0$ ГГц. Это частота, на которой передается групповой сигнал. Обычно поляризационные селекторы обеспечивает переходное затухание между каналами до 40 дБ. В сочетании с полосовыми фильтрами можно обеспечить достаточную развязку между каналами. Для симплексных РРЛ, где одна из станций передающая, а вторая приемная, нет необходимости применять поляризационные селекторы, и это также упрощает конструкции станций. Во многих случаях абонентам системы требуется не очень широкая полоса частот и ограниченное число каналов; тогда упрощается преобразователь частоты вверх. Таким образом, стоимость аппаратуры ММ-диапазона для коротких трасс может быть существенно снижена. В длинноволновой части ММ-диапазона применяются элементы, которые мало отличаются от элементов сантиметрового диапазона. На рынке появляются транзисторы ММ-диапазона для все более высоких частот, однако для самых коротких волн пока транзисторов нет. Поэтому в системах, подобных изображенной на рис. 7, в качестве генераторов и преобразователей частоты могут использоваться лавинно-пролетные диоды (ЛПД). Таким образом, техническая возможность построения систем связи ММ-диапазона не вызывает сомнений. Сложнее обстоит дело с СММ-диапазоном.

Для длин волн короче 3 мм малый размер волновода, высокие требования к точности его изготовления и большие потери энергии на единицу длины заставляют искать другие технические решения. Одно из них основано на использовании сверхразмерных волноводов. Широкое применение находят квадратные металлодиэлектрические волноводы с размером сечения 14×14 мм², используемые в частотном диапазоне 118 – 260 ГГц, и с размером 10×10 мм² – в диапазоне 178 – 405 ГГц. Эти волноводы обладают малыми потерями, однако в них могут возбуждаться нежелательные моды. Для коротких отрезков волновода указанный недостаток не имеет существенного значения. Для данных размеров сечений разработаны аналоги всех волноводных устройств и построены устройства, которые на обычных волноводах построить невозможно. Применение поляризаторов в виде решеток, уголковых отражателей и других средств, заимствованных из оптики, позволяет в квадратном сверхразмерном волноводе управлять движением сигналов с

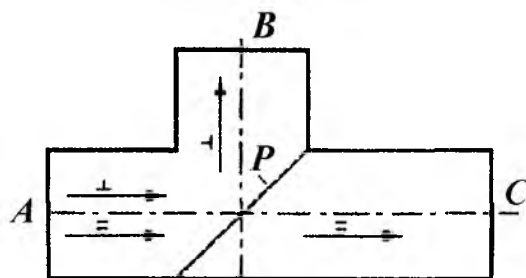


Рис. 8

ортогональной поляризацией. Например, поляризационный селектор на сверхразмерном волноводе (рис. 8) разделяет с помощью решетки P из тонких проволочек поступающие на вход A сигналы с ортогональной поляризацией. Если же вращать решетку P , то устройство будет играть роль поляризационного делителя сигнала или аттенюатора.

Особую роль могут сыграть открытые резонаторы (ОР). Высокая добротность, разреженный спектр колебаний и практически неограниченный диапазон рабочих частот (вплоть до оптического диапазона) привлекают внимание к ОР. В отличие от характеристик объемных резонаторов, характеристики ОР при повышении частоты улучшаются. На основе ОР

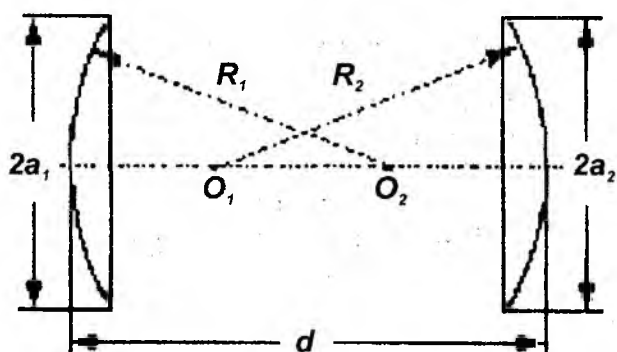


Рис. 9

можно построить активные приборы ММ- и СММ-диапазонов, а также многофункциональные приборы [15]. В числе функций последних может быть и излучение через полупрозрачное зеркало, как это имеет место в лазерах. Наиболее часто используются ОР с плоскими и сферическими (рис. 9) зеркалами. Число пучностей q стоячих волн вдоль оси ОР называют продольным индексом моды колебаний. Длина ОР $d = q\lambda/2$, а число Френеля $N = a^2 / \lambda d = 1,2 \div 1,5$ определяет апертуру зеркал a .

Размеры ОР велики по сравнению с длиной волны, на их основе можно построить активные приборы и приемопередающие модули ММ- и СММ-диапазонов. Если одно из зеркал ОР полупрозрачное, то оно может служить антенной или использоваться как облучатель параболического зеркала. В этом случае антенны могут иметь диаграмму направленности менее $0,5^\circ$ и большой коэффициент усиления.

Обзор работ по исследованию твердотельных квазиоптических приборов ММ-диапазона имеется в [15]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что на основе ОР могут быть созданы высокостабильные генераторы, преобразователи частоты вверх и вниз, устройства с когерентным сложением мощности многих твердотельных источников, умножители частоты, приборы, интегрирующие несколько функций в одном резонаторе. Ведутся работы по применению фотолитографии и других планарных микронных технологий при разработке твердотельных квазиоптических приборов [16].

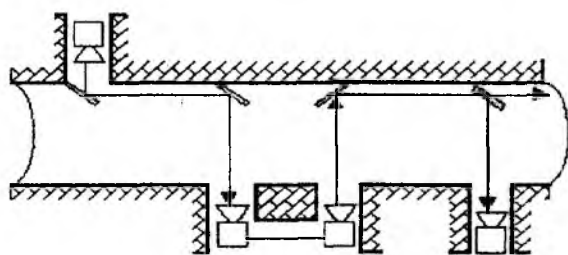


Рис. 10

Кроме квазиоптических приборов, можно построить системы связи, похожие по своей структуре на оптические. Высокие отражающие свойства ММ- и СММ-волн открывают возможности для использования самых разных видов пассивных ретрансляторов, изменяющих направление луча и способных эффективно управлять поляризационными характеристиками сигналов. Один из примеров подобной системы приведен на рис. 10. Особенно перспективны такого рода системы в туннелях, метро, шахтах. Защищен-

ность пространства от погодных влияний обеспечивает радиосистемам рассматриваемых диапазонов достижение их предельно возможных характеристик.

Таким образом, средства радиосвязи ММ- и СММ-диапазонов способны обеспечить надежную связь и передачу больших объемов информации на коротких расстояниях. На их основе может быть создана цифровая интегрированная телекоммуникационная система, покрывающая своими сотами территорию крупного города или любого другого населенного

пункта и способная предоставить информационные услуги практически каждому жителю. Широкая полоса частот, малая мощность и узкая диаграмма направленности антенн обеспечивают абонентам возможность обмена большими объемами информации и экологическую безопасность системы. Освоение новых, ранее не используемых диапазонов и значительное увеличение объемов передаваемой информации наделяют систему качественно новыми свойствами. Система интегрирует существующие телекоммуникационные системы и может стать важным звеном глобальной информационной системы. Малые расстояния пролета сигнала в ММ- и СММ-диапазонах позволяют упростить аппаратуру и снизить ее стоимость, а большое поглощение этих волн в атмосфере снижает взаимные помехи и затрудняет несанкционированный доступ к информации.

Список литературы: 1. Булгаков Б.М. Экологические проблемы современной радиоэлектроники / Б.М. Булгаков, В.Н. Скрасанов, А.Ф. Яненко // Радиотехника. 1998. Вып. 108. С. 3 – 10. 2. Холодова Ю.А. Реакции нервной системы человека на электромагнитные поля / Ю.А. Холодова, Н.Н. Лебедева. М.: Наука, 1992. 154 с. 3. Девятков Н.Д. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности / Н.Д. Девятков, М.Б. Голант, О.В. Бецкий. М.: Радио и связь, 1991. 168 с. 4. Гигиенические критерии состояния окружающей среды. Радиочастоты и микроволны / Совмест. изд. Программы ООН по окружающей среде, Всемир. орг. здравоохранения и Междунар. ассоц. по радиационной защите. Женева, 1984. 145 с. 5. Факторы, влияющие на распространение ММ-волн в приземном слое атмосферы / Г.К. Загорин, А.Ю. Зражевский, Е.В. Коньков и др. // Журн. радиоэлектроники. 2001. № 8. 6. Быстров Р.П. Миллиметровые волны в системах связи / Р.П. Быстров, А.В. Петров, А.В. Соколов // Там же. 2000. № 5. 7. Gulyaev Y.V. World Mobile communication // Financial Times Conf., 1990, 24 – 25 Sept., London. 8. Любченко В.Е. Линии связи миллиметрового диапазона волн в локальных информационных сетях / В.Е. Любченко, А.В. Соколов, Л.В. Федорова // Радиотехника. 1998. № 12. С. 68 – 75. 9. Бирюков В.А. Применение миллиметровых радиоволн на сотовых линиях связи небольшой протяженности в городе / В.А. Бирюков, Ю.В. Гуляев, А.В. Соколов // Радиотехника. 1995. П, С. 3 – 5.1. 10. Радиорелейная связь сегодня / Т.Н. Нарытник, В. Сайко, В. Потиеенко, А. Войтенко // Сети и телекоммуникации. 2001. № 4. С. 38 – 45. 11. Микроволновые технологии в телекоммуникационных системах / Т.Н. Нарытник, В.П. Бабак, М.Е. Ильченко, С.А. Кравчук // Киев: Тэхника, 2000. 12. Распространение ультракоротких волн в городах / А.Н. Куликов, Ю.В. Лаврентьев, Г.А. Пономарев и др. // Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника. 1991. Т. 42. 13. Экспериментальные исследования отражения и рассеяния миллиметровых волн от шероховатых поверхностей зданий / Ю.В. Лаврентьев, А.В. Соколов, Л.В. Федорова и др. // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35, № 3. 14. Лаврентьев Ю.В. Квазидетерминированная трехмерная модель многолучевого канала распространения миллиметровых волн в городской застройке // Журн. радиоэлектроники. 2000. № 5. 15. Borodkin A.B. Quasi-optical solid-state oscillators / A.B. Borodkin, B.M. Bulgakov // Telecommunications and Radio Eng. 1997. Vol. 51, N 4. P. 1 – 21. 16. Millimeter and submillimeter wave quasi-optical oscillator with Gunn diodes / J. Bae, Y. Aburakaba, H. Kondo et al. // IEEE Trans. of Microwave Theory and Techn. 1993. Vol. MTT-41, N 10. P. 1851 – 1855.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 14.05.2003