

ТЕХНОЛОГИИ ФИЗИЧЕСКОГО УРОВНЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Занятие №33

Спутниковые каналы передачи данных

1. Спутники связи
2. Геостационарные спутники
3. Средневысотные спутники
4. Низкоорбитальные спутники
5. Iridium
6. Globalstar
7. Спутники против оптоволокна
8. Вопросы

Спутники связи

В 1950-х и начале 60-х годов люди пытались организовать связь при помощи сигналов, отраженных от металлических метеозондов. К сожалению, мощность таких сигналов была слишком мала, и их практическое значение оказалось ничтожным. Затем ВМФ США обнаружил, что в небе постоянно висит некое подобие метеозонда — это была Луна. Была построена система для связи береговых служб с кораблями, в которой использовалось отражение сигналов от естественного спутника Земли.

Дальнейший прогресс в создании коммуникаций с помощью небесных тел на этом приостановился до запуска первого спутника связи. Ключевым отличием искусственной «луны» являлось то, что на спутнике было установлено оборудование, позволяющее усилить входящий сигнал перед отправкой его обратно на Землю. Это превратило космическую связь из забавного курьеза в мощную технологию.

Спутникам связи присущи определенные свойства, делающие их чрезвычайно привлекательными для самых разных областей применения. Проще всего представить себе спутник связи в виде своего рода огромного микроволнового повторителя, висящего в небе. Он включает в себя несколько транспондеров, каждый из которых настроен на определенную часть частотного спектра. **Транспондеры** усиливают сигналы и преобразуют их на новую частоту, чтобы при отправке на Землю отраженный сигнал не накладывался на прямой. Такой режим работы называется «узкая труба» (bent pipe).

Можно добавить цифровую обработку, для того чтобы по отдельности манипулировать или перенаправлять потоки данных в доступном диапазоне. Кроме того, спутник может получать и пересылать дальше цифровую информацию. Такой способ восстановления сигнала улучшает общую производительность по сравнению с «узкой трубой», так как спутник не увеличивает количество шума в восходящем сигнале.

Нисходящий луч может быть как широким, покрывающим огромные пространства на Земле, так и узким, который можно принять в области, ограниченной лишь несколькими сотнями километров. В соответствии с законом Кеплера, период обращения спутника равен радиусу орбиты в степени $3/2$. Таким образом, чем выше орбита, тем дольше период.

Вблизи поверхности Земли период обращения вокруг нее составляет примерно 90 минут. Следовательно, спутники, расположенные на малой высоте, слишком быстро исчезают из вида приемо-передающих устройств, расположенных на Земле, поэтому необходимо организовывать непрерывные зоны покрытия и устанавливать для их отслеживания наземные антенны. На высоте 35 800 км период составляет 24 часа. А на высоте 384 000 км спутник будет обходить Землю целый месяц, в чем может убедиться любой желающий, наблюдая за Луной. Конечно, период обращения спутника очень важно иметь в виду, но это не единственный критерий, по которому определяют, где его разместить.

Необходимо принимать во внимание так называемые пояса Ван Аллена (Van Allen belts) — области скопления частиц с большим зарядом, находящихся в зоне действия магнитного поля Земли. Любой спутник, попав в такой пояс, довольно быстро будет уничтожен этими частицами. В результате учета этих факторов были выделены три зоны, в которых можно безопасно размещать искусственные спутники. Они изображены на рис. 2.13. Из этого же рисунка можно узнать о некоторых из их свойств. Мы вкратце рассмотрим спутники, размещаемые в каждой из этих трех зон.



Рис. 2.13. Спутники связи и их свойства: высота орбиты, задержка, число спутников, необходимое для покрытия всей поверхности земного шара

Геостационарные спутники

В 1945 году писатель-фантаст Артур С. Кларк (Arthur S. Clarke) подсчитал, что спутник, расположенный на высоте 35 800 км на круговой экваториальной орбите, будет оставаться неподвижным относительно Земли. А значит, следить за ним будет гораздо проще (Clarke, 1945). Он развил свою мысль и описал целую коммуникационную систему, использующую такие (пилотируемые) геостационарные спутники. Он описал орбиты, солнечные батареи, радиочастоты и даже процедуры связи. К сожалению, в конце концов он пришел к неутешительному выводу, что такие спутники вряд ли будут иметь практическое значение, потому что на их борту невозможно разместить энергоемкие, хрупкие ламповые усилители.

В связи с этим, Кларк не стал больше развивать свою идею, хотя и написал несколько фантастических рассказов о подобных искусственных спутниках. Положение вещей изменило изобретение транзистора, и вот в июле 1962 года производится запуск первого в мире спутника связи Telstar. С тех пор спутники связи стали многомиллиардным бизнесом и единственным прибыльным делом, связанным с космическими технологиями. Про спутники, вращающиеся на большой высоте, говорят, что они расположены на геостационарной орбите (GEO, Geostationary Earth Orbit).

Современные технологии таковы, что расположение спутников чаще, чем через каждые два градуса в 360-градусной экваториальной плоскости, является нерациональным. В противном случае возможна интерференция сигналов. Итак, если на каждые два градуса приходится один спутник, то всего их в экваториальной плоскости можно разместить $360/2 = 180$. Сто восемьдесят спутников могут одновременно находиться в небе и вращаться в одной и той же плоскости на одной и той же высоте. Тем не менее у каждого транспондера есть возможность работы на разных частотах и с разной поляризацией, что позволяет увеличить максимальную пропускную способность всей системы.

Со временем возникла необходимость предотвращения беспорядочного использования околоземных орбит. Навести порядок в небе было поручено организации ИТУ. Процесс выделения орбит очень сильно связан с политикой, причем многие страны в борьбе за свой «кусочек» неба напоминают далеких предков человека из каменного века.

Это объясняется очень высокими потенциальными доходами, которые государство может извлечь, сдавая в аренду кусочки космоса.

В то же время некоторые страны заявляют, что их государственные границы в высоту простираются до самой Луны и что использование орбит, проходящих над их территорией, иностранными государствами является нелегальным. Жаркие споры на эту тему подогревает еще и тот факт, что коммерческая связь — это далеко не единственное применение спутников связи, а значит, и их орбит. Ими пользуются операторы спутникового телевидения, правительственные структуры и военные.

Современные спутники могут быть довольно большими, весят более 5000 кг и потребляют до нескольких киловатт электроэнергии, вырабатываемой солнечными батареями. Эффекты гравитации, вызванные Солнцем, Луной и другими планетами, постепенно вызывают смещение с орбит и изменение ориентации. Приходится компенсировать это с помощью бортовых двигателей. Действия по сохранению параметров орбит спутников называются **позиционированием**. И все же приходит момент, когда топливо у бортовых двигателей заканчивается (обычно такое случается после десяти лет использования). Тогда спутник начинает беспомощно дрейфовать, постепенно сходя с орбиты. Понятно, что он перестает быть дееспособным и его нужно отключать. Обычно спутники связи заканчивают свою жизнь, постепенно входя в плотные слои атмосферы и сгорая там либо (крайне редко) падая на землю. Участки орбит — это не единственный предмет, за который борются страны и отдельные компании. Разумеется, распределению между всеми желающими подлежат и рабочие диапазоны частот, поскольку нисходящие сигналы спутников могут вызывать помехи в работе микроволновых устройств. Поэтому ИТУ были выделены частотные диапазоны, предназначенные исключительно для спутников связи. Самые важные из них показаны в табл. 2.3.

Таблица 2.3. Основные частотные диапазоны спутников связи

Диапазон	Нисходящие сигналы, ГГц	Восходящие сигналы, ГГц	Ширина полосы, МГц	Проблемы
L	1,5	1,6	15	Узкая полоса; переполнен
S	1,9	2,2	70	Узкая полоса; переполнен
C	4,0	6,0	500	Наземная интерференция
Ku	11	14	500	Дождь
Ka	20	30	3500	Дождь, стоимость оборудования

Диапазон С был первой полосой частот, предназначенной для трафика коммерческих спутников. Он разбивается на два поддиапазона. Один из них предназначен для сигналов с Земли (восходящих), другой — для сигналов со спутника (нисходящих). Таким образом, для двусторонней передачи требуется сразу два канала. Они уже переполнены пользователями, поскольку на тех же частотах работают наземные микроволновые устройства связи. В 2000 году, в соответствии с международным соглашением, было добавлено два дополнительных диапазона: S и L. Тем не менее они тоже весьма узки и уже заполнены.

Следующий высокочастотный диапазон коммерческой связи называется Ku (K under, то есть «под K»). Полоса пока еще не переполнена, и работающие на ее самых высоких частотах спутники могут располагаться на угловом расстоянии один градус друг от друга. У диапазона Ku имеется еще одна проблема: волны этих частот глушатся дождем. Вода очень плохо пропускает микроволновый сигнал. К счастью, очень сильные ливни обычно бывают весьма узко локализованы, поэтому проблему удастся решить с помощью нескольких наземных установок, расположенных довольно далеко друг от друга. Цена, которую приходится платить за «проблему дождя», весьма высока: это

дополнительные антенны, кабели и электронные устройства для быстро переключения станций.

Наконец, самым высокочастотным диапазоном является Ка (K above, то есть, «над К»). Основной проблемой является очень высокая стоимость оборудования для работы на этих частотах. Помимо коммерческих диапазонов, существует также множество военных и правительственных. На современном спутнике имеется порядка 40 транспондеров, чаще всего с полосами в 36 МГц. Обычно каждый транспондер работает по принципу «узкой трубы», однако недавно появились спутники, оснащенные бортовыми процессорами для обработки сигналов. В первых спутниках разделение транспондеров по каналам было статическим: весь доступный рабочий диапазон просто разделялся на несколько фиксированных полос. Теперь же сигнал транспондера разделяется на временные слоты, то есть каждому пользователю выделяется на передачу определенный промежуток времени.

Первые геостационарные спутники связи имели один луч, который охватывал примерно 1/3 земной поверхности и назывался точечным лучом. Однако по мере удешевления, уменьшения размеров и энергоемкости микрoeлектронных элементов, стали появляться более сложные стратегии. Стало возможно оборудовать каждый спутник несколькими антеннами и несколькими транспондерами. Каждый нисходящий луч сфокусировали на небольшой территории; таким образом, смогли осуществить одновременную передачу нескольких сигналов. Обычно эти так называемые пятна имеют форму овала и могут иметь относительно малые размеры — порядка нескольких сотен километров. Американский спутник связи охватывает широким лучом 48 штатов, а также имеет два узких луча для Аляски и Гавайских островов.

Новым витком развития спутников связи стало создание недорогих терминалов со сверхмалой апертурой — VSAT (Very Small Aperture Terminal) (Abramson, 2000). У этих небольших станций имеется антенна диаметром всего один метр (сравните с 10-метровой антенной GEO), их выходная мощность составляет примерно 1 Вт. Скорость работы в направлении Земля — спутник обычно составляет до 1 Мбит/с, зато связь спутник-Земля можно поддерживать до нескольких мегабит в секунду.

Спутниковое широкоэмитательное телевидение использует эту технологию для односторонней передачи сигнала. Многим микростанциям VSAT не хватает мощности для того, чтобы связываться друг с другом (через спутник, разумеется). Для решения этой проблемы устанавливаются специальные наземные концентраторы с большой мощной антенной. Концентратор (хаб, ретранслятор) распределяет трафик между несколькими VSAT, как показано на рис. 2.14.

В таком режиме либо приемник, либо передатчик обязательно имеет большую антенну и мощный усилитель. Недостатком такой системы является наличие задержек. Достоинством — низкая цена за полноценную систему для конечного пользователя.

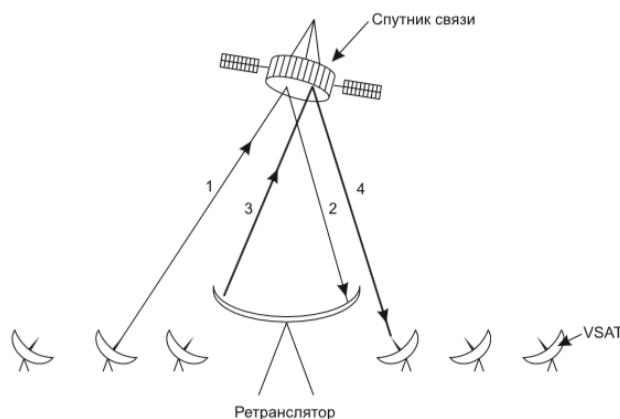


Рис. 2.14. Микростанция VSAT и наземный концентратор

Системы VSAT имеют большие перспективы использования в сельской местности. Об этом как-то не очень часто вспоминают, но половина населения земного шара живет минимум в часе ходьбы от ближайшего телефона. Протянуть телефонные линии ко всем селам и деревням не по карману большинству стран так называемого «третьего мира».

Однако средств на установку тарелки VSAT, питающейся от солнечной батареи, может хватить не только у администрации региона, но и у частных лиц. Таким образом, VSAT — это технология, которая может позволить организовать связь в любой точке планеты. Спутники связи обладают рядом свойств, которые радикально отличают их от любых наземных систем связи между абонентами. Во-первых, несмотря на предельно высокую скорость распространения сигнала (собственно, она практически равна скорости света — 300 000 км/с), расстояния между наземными приемо-передающими устройствами и спутниками таковы, что в технологии GEO задержки оказываются весьма значительными.

В зависимости от взаимного расположения пользователя, наземной станции и спутника, время передачи может составлять 250–300 мс. Обычно оно составляет 270 мс (соответственно, в два раза больше — 540 мс — в системах VSAT, работающих через концентратор). Для сравнения, сигнал в наземных микроволновых системах связи имеет задержку распространения примерно 3 мкс/км, а коаксиальный кабель и оптоволокно имеют задержку порядка 5 мкс/км. Разность задержек здесь объясняется тем, что в твердых телах сигнал распространяется медленнее, чем в воздухе.

Еще одним важным свойством спутников является то, что они — исключительно широкоэмитальное средство передачи данных. На отправку сообщения сотням абонентов, находящихся в зоне следа спутника, не затрачивается никаких дополнительных ресурсов по сравнению с отправкой сообщения одному из них. Для некоторых применений это свойство очень полезно. Например, можно представить себе кэширование на спутнике популярных веб-страниц, что резко повысит скорость их загрузки на сотни компьютеров, находящихся довольно далеко друг от друга. Конечно, широкоэмитальное вещание симулируется обычными двухточечными сетями, однако спутниковое вещание в этом случае обходится значительно дешевле.

С другой стороны, с точки зрения конфиденциальности данных, спутники — это прямо-таки беда: кто угодно может прослушивать абсолютно все. Здесь на защиту тех, кому важен ограниченный доступ к информации, встает криптография. Спутники связи обладают еще одним замечательным свойством — независимостью стоимости передачи от расстояния между узлами. Звонок другу, живущему за океаном, стоит столько же, сколько звонок подруге, живущей в соседнем доме. Космические телекоммуникационные технологии, кроме того, обеспечивают очень высокую степень защиты от ошибок и могут быть развернуты на местности практически мгновенно, что очень важно для военных и служб МЧС.

Средневысотные спутники

На гораздо более низких высотах, нежели геостационарные спутники, между двумя поясами Ван Аллена, располагаются средневысотные спутники (MEO, MediumEarth Orbit Satellites). Если смотреть на них с Земли, то будет заметно их медленное дрейфование по небосводу.

Средневысотные спутники делают полный оборот вокруг нашей планеты примерно за 6 часов. Соответственно, наземным приемопередатчикам необходимо следить за их перемещением. Поскольку эти спутники находятся гораздо ниже, чем геостационарные, то и «засвечиваемое» ими пятно на поверхности Земли имеет более скромные размеры. Зато для связи с ними требуются менее мощные передатчики.

Спутники MEO используются для поддержки навигационных систем, а не в телекоммуникациях. Примерами средневысотных спутников являются около 30

спутников системы GPS (Global Positionin System, Глобальная система определения местонахождения), вращающихся вокруг Земли на высоте около 20 200 км.

Низкоорбитальные спутники

Снизим высоту еще больше и перейдем к рассмотрению низкоорбитальных спутников (LEO, Low-Earth Orbite Satellites). Для того чтобы создать целостную систему, охватывающую весь земной шар, нужно большое количество таких спутников. Причиной тому является, прежде всего, высокая скорость их движения по орбите.

С другой стороны, благодаря относительно небольшому расстоянию между наземными передатчиками и спутниками, не требуется особо мощных наземных передатчиков, а задержки составляют всего лишь несколько миллисекунд. Расходы на запуск тоже значительно ниже. Далее мы рассмотрим два примера спутниковых группировок, применяемых для голосовой связи: Iridium и Globalstar.

Iridium

В течение первых 30 лет существования спутников связи низкоорбитальные спутники использовались очень мало, поскольку они появлялись и исчезали из зоны видимости передатчика слишком быстро.

В 1990 году фирма Motorola совершила большой прорыв в этой области, попросив FCC разрешить ей запустить 77 спутников связи для нового проекта Iridium (77-м элементом таблицы Менделеева является Иридий).

Впрочем, планы вскоре изменились, и было решено использовать только 66 спутников, поэтому проект следовало бы переименовать в Dysprosium, но это название звучало бы менее благозвучно. Идея состояла в том, что на место исчезающего из вида спутника будет тотчас приходить следующий. Этакая карусель. Такое предложение породило новую волну безумной конкуренции среди коммуникационных компаний. Каждая из них захотела «повесить» в небе свою цепочку низкоорбитальных спутников.

После семи лет притирки компаний друг к другу и решения вопросов финансирования совместными усилиями удалось, наконец, запустить спутники. Услуги связи начали предоставляться с ноября 1998 года. К сожалению, коммерческий спрос на большие и тяжелые телефоны спутниковой связи оказался незначительным, потому что за семь лет конкурентной борьбы, которые прошли до запуска проекта Iridium, сотовая связь шагнула очень далеко вперед. В результате Iridium практически не приносил прибыли, и в августе 1999 его пришлось объявить банкротом — это было одно из самых эффектных корпоративных фиаско в истории.

Спутники, как и другое имущество (стоимостью порядка \$5 миллиардов), были проданы инвестору за \$25 миллионов в качестве своего рода космической распродажи старого барахла. Другие предприятия по предоставлению услуг спутниковой связи вскоре последовали печальному примеру.

Проект Iridium был вновь запущен в марте 2001 года и продолжает расти. Эта система предоставляет связь с любой точкой земного шара при помощи ручных устройств, связывающихся напрямую со спутниками. Можно передавать речь, данные, факсы, информацию для пейджеров, а также навигационную информацию. И все это работает и на суше, и на море, и в воздухе.

Основными клиентами Iridium являются судоходные, авиационные компании, фирмы, занимающиеся поиском нефти, а также частные лица, путешествующие в местах, где отсутствует телекоммуникационная инфраструктура (например, пустыни, горы, южный полюс, некоторые страны третьего мира).

Спутники Iridium вращаются по околоземной круговой полярной орбите на высоте 750 км. Они составляют ожерелье, ориентированное вдоль линий долготы (по одному спутнику на 32° долготы). Шесть таких ожерелий опоясывают Землю, как показано на рис. 2.15. У каждого спутника максимум 48 ячеек (пятен от лучей сигналов), а полоса

пропускания вмещает 3840 каналов. Некоторые каналы используются пейджинговыми компаниями и для навигации, остальные — для передачи данных и речи.



Рис. 2.15. Шесть ожерелий Земли из спутников Iridium

Шесть ожерелий позволяют покрыть всю поверхность Земли, как видно на рисунке. Интересным свойством Iridium является то, что в этой системе обмен данными между очень удаленными друг от друга абонентами происходит в космосе, как показано на рис. 2.16, а. Абонент на Северном полюсе напрямую связывается со спутником, который находится над ним. У каждого спутника четыре соседа, с которыми он может обмениваться данными: два в том же ожерелье (см. рис. 2.15) и два в соседних. Спутники передают голосовые данные по этой сетке, и в результате речь первого абонента достигает второго абонента на Южном полюсе.

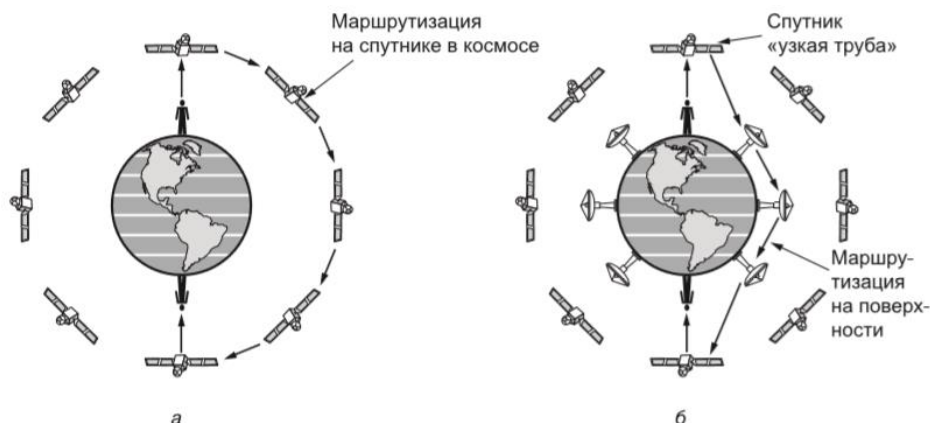


Рис. 2.16. Пересылка данных в космосе (а); пересылка данных наземными станциями (б)

Globalstar

Альтернативой проекту Iridium является система Globalstar. Она построена на 48 низкоорбитальных спутниках, но имеет иную схему ретрансляции сигналов. Если в Iridium в качестве маршрутизаторов используются сами спутники, передающие по цепочке сигнал (что требует наличия на них довольно сложного оборудования), то в Globalstar применяется обычный принцип «узкой трубы».

Допустим, звонок приходит на спутник с Северного полюса (рис. 2.16, б). Принятый сигнал отправляется обратно на Землю и захватывается крупной наземной приемопередающей станцией рядом с домиком Санта-Клауса. Маршрутизация производится между такими станциями, разбросанными по всему миру. Наземная цель сигнала — ближайший ко второму абоненту наземный маршрутизатор. Через находящийся рядом с ним спутник вызов поступает к абоненту.

Преимуществом такой схемы является то, что наиболее сложное оборудование устанавливается на поверхности Земли, а здесь работать с ним гораздо проще, чем на орбите. К тому же использование мощных наземных антенн позволяет принимать слабый сигнал со спутника; значит, можно уменьшить потребляемую мощность телефонов. В результате телефоны передают сигналы с мощностью всего несколько милливатт, и наземные антенны получают очень слабый сигнал, даже после его усиления спутником. Тем не менее такой мощности хватает для нормальной работы.

За год в космос запускается около 20 спутников, включая спутники-гиганты, весящие более 5000 кг. Организации, которые не могут позволить себе огромных бюджетных трат, используют крошечные спутники.

Для того чтобы сделать исследование космического пространства более доступным, академики из Калифорнийского политехнического института и Стэнфорда в 1999 году придумали стандарт миниатюрных спутников и подходящей пусковой установки, значительно снижающие стоимость запуска спутника (Nupent и др., 2008). CubeSat — это спутник, представляющий собой куб со стороной 10 см. Каждый такой спутник весит не более одного килограмма, а стоимость его запуска не превышает 40 000 долларов. Пусковая установка прикрепляется к летательным аппаратам, которые отправляются в коммерческие полеты. Фактически пусковая установка — это труба, вмещающая до трех миниатюрных спутников. На орбиту они выстреливаются при помощи ружины.

Уже запущено около 20 спутников CubeSat, и еще очень много проектов находятся в активной разработке. Большинство таких спутников общаются с наземными станциями в диапазонах УВЧ (UHF) и ОВЧ (VHF).

Спутники против оптоволоконна

Такое сравнение не только уместно, но и поучительно. Всего лишь 25 лет назад люди смогли осознать, что будущее телекоммуникационных систем — за спутниками связи. В конце концов, телефонная система не особо менялась последние 100 лет, и похоже, что не изменится и еще через 100 лет.

Такая стабильность вызвана, в том числе, и мощной регулятивной средой, которая обязывала телефонные компании предоставлять качественный сервис за разумные деньги и взамен предлагала гарантированную прибыль за счет инвестиций. Для тех, кому требовалось передавать не только речь, но и данные, сделали модемы на 1200 бит/с. Собственно, это все, что долгое время предоставляла телефонная система.

В 1984 году в США и чуть позднее — в Европе стала возникать конкурентная борьба в области связи, которая все поставила с ног на голову. Телефонные компании занялись прокладкой оптического волокна для междугородной телефонии и стали предоставлять услуги высокоскоростного доступа в Интернет, например, по ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line, Асимметричная цифровая абонентская линия).

Наконец-то стали снижаться искусственно завышенные тарифы на дальнюю связь, за счет которых долгое время удерживались низкие тарифы на местные переговоры. Довольно неожиданно оптоволоконные кабели стали победителями среди средств связи.

Тем не менее у спутников имеются свои области применения, в которых оптоволоконно, увы, бессильно. Во-первых, если речь идет о быстром развертывании, преимущество спутников бесспорно. Быстрая реакция крайне важна для военных целей, особенно во время войны, а в мирное время — для служб МЧС. После серьезного землетрясения и последующего цунами в Суматре в декабре 2004 года восстановить связь удалось всего за 24 часа — и все благодаря спутникам. В этом регионе существует рынок поставщиков услуг спутниковой связи, на котором крупные игроки, такие как компания Intelsat, владеющая более чем пятьюдесятью спутниками, арендуют мощности там, где это необходимо.

Для клиентов, которые обслуживаются в существующих сетях спутниковой связи, в любой точке земного шара можно быстро развернуть микростанцию VSAT, обеспечив связь со скоростью до мегабита в секунду.

Вторая область применения спутников — связь в регионах с плохо развитой наземной инфраструктурой. Сегодняшние пользователи хотят иметь возможность общаться в любых уголках мира. Сети мобильной связи хорошо покрывают регионы с большой плотностью населения, но в других местах (например, в море или пустыне) они почти недоступны. Iridium же предоставляет услуги голосовой связи по всему миру, даже на Южном полюсе.

Кроме того, развертывание наземной инфраструктуры стоит недешево и в большой степени зависит от территориальных условий и прав собственности. В Индонезии используется собственный спутник для внутреннего телефонного трафика. Приобрести его оказалось дешевле, чем проложить подводный кабель между всеми 13 667 островами архипелага.

Третья интересующая нас область — широко вещание. Пакет данных, отправленный со спутника, одновременно принимается тысячами наземных станций. Поэтому со спутников вещают многие сетевые телеканалы. На современном рынке даже есть услуга прямого вещания со спутника: спутниковый телевизионный или радиоприемник устанавливается прямо в доме или автомобиле пользователя. Рассылать таким способом можно любое содержимое, не только телепрограммы. Например, передавать данные о стоимости акций, облигаций и ценах на товары тысячам дилеров может оказаться дешевле с применением спутника. Развернуть широко вещание с помощью наземных средств будет и дороже, и сложнее.

В целом, основным средством телекоммуникаций на Земле, вероятно, будет комбинация оптоволоконна и сотовой радиосвязи, но для некоторых специальных применений будет использоваться спутниковая система. Однако есть одно «но», которое может приостановить развитие всего этого: экономика. Хотя оптоволоконные кабели обладают очень высокой пропускной способностью, беспроводные системы, как наземные, так и спутниковые, вероятно, будут вести очень жесткую ценовую конкуренцию. Если будет продолжаться удешевление спутниковых систем (например, если какие-нибудь будущие космические корабли будут способны выводить на орбиту одновременно десятки спутников связи), а низкоорбитальные спутники постепенно будут все больше использоваться в телекоммуникациях, то не исключено, что оптоволоконные сети уйдут с ведущих ролей на большинстве рынков.

Вопросы

1. 66 низкоорбитальных спутников проекта Iridium образуют шесть ожерелий вокруг Земли. Период их обращения составляет 90 минут. Каков средний интервал, необходимый наземному передатчику для осуществления передачи (handoff)?
2. Вычислите общее время передачи пакета для спутников GEO (высота: 35 800 км), MEO (высота: 18 000 км) и LEO (высота: 750 км).
3. Каково время ожидания вызова, сделанного на Северном полюсе до достижения Южного полюса, если звонок направлен через спутники Iridium? Предположите, что время коммутации в спутниках составляет 10 мкс и радиус земли составляет 6371 км.