

PHYSICAL FOUNDATIONS OF MODERN SIGNAL TRANSMISSION LINES

V. V. SHEVCHENKO

Physical principles of the main signal transmission lines, proposed some time ago for application as communication means and still used at present, including two-conductor transmission line, electric cable, metallic waveguide, dielectric waveguide, radio relay line, beam guide mode and fibre optical line, are considered.

Изложены физические принципы работы основных линий передачи сигналов, предложенных в качестве средств связи и применяемых в настоящее время: двухпроводной линии, электрического кабеля, металлического волновода, диэлектрического волновода, радиорелейной линии, лучевой линии, волоконно-оптической линии.

© Шевченко В.В., 1997

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВРЕМЕННЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ

В. В. ШЕВЧЕНКО

Российский университет дружбы народов, Москва

ВВЕДЕНИЕ

Все разнообразие используемых в технике и быту систем связи, в основном радиосвязи, можно свести к трем видам, отличающимся способами передачи сигнала от передатчика к приемнику. На рис. 1 в упрощенной форме представлены эти системы связи. В первом случае используется ненаправленная радиосвязь от передатчика к приемнику, типичная для широкого вещания радио и телевидения. Такой способ радиосвязи имеет то преимущество, что позволяет охватить практически неограниченное число абонентов – потребителей информации. Недостатками такого способа являются неэкономное использование мощности передатчика и мешающее влияние на другие аналогичные радиосистемы. В тех случаях, когда число абонентов ограничено и

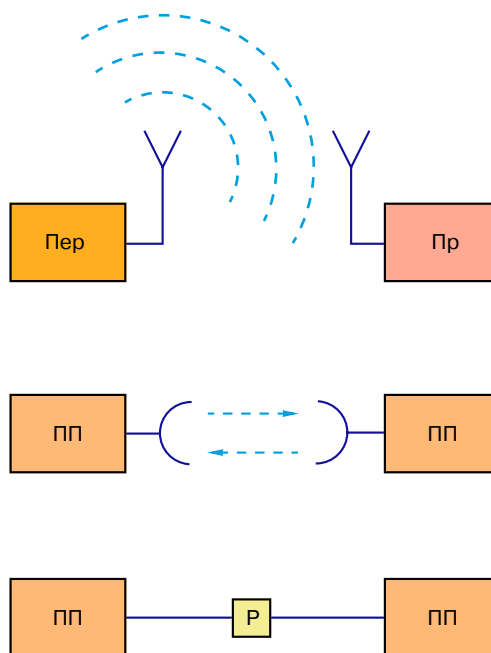


Рис. 1. Системы связи: Пер – передатчик, Пр – приемник, ПП – приемопередатчик, Р – ретранслятор

нет необходимости в широкополосности, используется передача сигнала с помощью направленно излучающих антенн, а также при помощи специальных устройств, называемых линиями передачи сигнала (ЛПС) или, короче, линиями передачи (рис. 1). Заметим, что этот укороченный термин применяется также к линиям передачи электрической энергии, например магистральным высоковольтным линиям, соединяющим электростанции с городами. В нашем случае речь идет о линиях, передающих малые мощности, или, как говорили в первой половине нашего века, о слабых (имеется в виду слабый ток) информационных устройствах, имеющих свою специфику [1].

В широкополосной связи обычно используется однонаправленная передача сигнала от радиостанции к потребителю, при направленной же связи, как правило, применяется двусторонняя связь, то есть на каждом конце системы связи имеются и передатчик и приемник (приемопередатчик – ПП). При направленной связи не нужны передатчики большой мощности, и их можно установить на обоих концах системы. При направленной магистральной связи на дальние расстояния через пространство и в линиях передачи используются так называемые ретрансляторы (Р), которые ставятся вдоль трассы (рис. 1). Они усиливают сигнал, очищают его от помех и передают (ретранслируют) дальше.

Линии передачи применяются как в виде магистральных линий, так и в качестве локальных (местных) линий, например для связи передатчика или приемника с антенной, а также в местных распределительных сетях.

Прежде чем рассматривать различные линии передачи, необходимо пояснить термин “сигнал”. Под сигналом понимается физический процесс, несущий информацию (сообщение). Носителем сигнала в радиотехнических цепях является электрический ток, а в пространстве и линиях передачи – электромагнитная волна. Напряженность электрического поля в волне можно записать в виде

$$E = A \cos[k(z - vt)],$$

где A – амплитуда волны, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны, z – координата, вдоль которой распространяется волна, например вдоль линии передачи, t – время, v – скорость распространения волны. Действительно, если следить за горбом волны, то есть за максимальным значением косинуса, для которого аргумент равен нулю ($z - vt = 0$), то получим $z = vt$. Таким образом, горб волны движется со скоростью v . Для электромагнитной волны в свободном пространстве $v = c$, где $c \approx 300\,000$ км/с – скорость света. В линии передачи скорость v может отличаться от c . Частота волнового колебания f , измеряемая в герцах (1 Гц равен одному колебанию в секунду), связана с длиной волны соотношением $f = v/\lambda$ или $f = c/\lambda$ при $v = c$.

Наиболее простым способом наложения на волновой процесс информации является модуляция (изменение во времени) амплитуды: $A = A(t)$. Модуляция амплитуды тока осуществляется в передатчике специальным устройством – модулятором, в котором электрический сигнал, например, звуковой частоты от микрофона накладывается на колебание высокочастотного генератора. Высокочастотный сигнал излучается антенной в пространство или линию передачи, а на другом конце в приемнике сигнал демодулируется (детектируется). Информация снимается, например, телефоном или звуковым динамиком. Амплитудная функция $A(t)$ может быть непрерывной для сигнала, передающего звук, или импульсной для сигнала, передающего телевизионное изображение. Импульсная модуляция используется также для связи вычислительных машин, работающих, как известно, с импульсными сигналами. В современной технике связи во всех случаях, когда требуется высококачественная передача информации, применяются импульсные сигналы, которые лучше восстанавливаются при наличии помех, искажающих передачу сигналов.

При меняющейся во времени амплитуде функция сигнала, строго говоря, не является гармонической, но она может быть представлена в виде суммы (или интеграла) по гармоническим функциям с частотами f_n , где $n = 1, 2, 3, \dots$, близкими к частоте f , и с соответствующими амплитудами A_n , уже не зависящими от времени. Они составляют так называемый спектр сигнала. Ширина полосы этого спектра Δf определяется количеством передаваемой информацией за единицу времени. Чтобы сигнал и, следовательно, информация проходили через систему связи с незначительными искажениями, необходимо выполнение условия $\Delta f \ll f$, из которого следует, что для передачи сигналов желательно использовать по возможности более высокие частоты. Поэтому развитие техники связи в целом и линий передачи в частности шло в направлении перехода к использованию более высоких частот. Эта тенденция хорошо прослеживается исторически на примере разработки и применения все новых линий передачи сигналов.

ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Рассмотрим принципы работы основных видов линий передачи сигналов, начиная от двухпроводной линии, которая начала применяться в начале нашего века и кое-где в сельских местностях используется до сих пор для передачи телеграфных и телефонных сигналов, и кончая современной волоконно-оптической линией, которая наряду с космической (спутниковой) связью несомненно составит связь будущего.

Двухпроводная линия

Двухпроводная линия отличается от обычного соединения с помощью двух проводов тем, что ее длина L может быть больше длины волны λ распространяющейся вдоль нее волны. Физическая причина такой ситуации состоит в конечности скорости распространения электромагнитного поля, при этом, как уже отмечалось, $\lambda = c/f$ (для двухпроводной линии скорость распространения волны $v = c$, как в свободном пространстве). Таким образом, при отличной от нуля частоте f длина волны λ конечна.

Основным требованием к конструкции линии является условие $d \ll \lambda$, где d – расстояние между проводами [2]. Провода подвешиваются на столбах, расстояние между проводами порядка метра. Двухпроводная линия может применяться для передачи сигналов на волнах порядка сотен и более метров, что соответствует частотам в диапазоне практически от нуля до $f \approx 1\,000\,000$ Гц = 1 МГц (1 мегагерц). Как уже говорилось, двухпроводные линии используются для передачи телеграфных и телефонных сигналов, а также для трансляции местного радиовещания.

Электрический кабель

Основной недостаток двухпроводной линии состоит в том, что это открытая линия, допускающая излучение волн в пространство и прием волн из пространства; с этим связаны потери мощности сигнала и влияние внешних помех на передачу сигнала, природных (молния) и являющихся результатом человеческой деятельности (искрение в технических устройствах). Излучение и прием волн происходят в местах нарушения прямолинейности линии (изломы в местах крепления проводов, изгибы из-за провисания проводов и др.). Электрический кабель, работающий на том же принципе, что и двухпроводная линия, свободен от указанного недостатка, так как является закрытой для электромагнитного поля линией [2]. В электрическом кабеле один из проводов имеет цилиндрическую форму и окружает второй провод, так что поле направляемой волны оказывается закрытым внутри этого цилиндра (рис. 2). Центральный провод размещается коаксиально, поэтому другое название линии – коаксиальный кабель.

Конструктивные требования к кабелю аналогичны требованиям, предъявляемым к двухпроводной линии. Поперечный размер кабеля $d \ll \lambda$, при этом обычно длина кабеля $L \gg \lambda$. Электрические кабели делятся на низкочастотные и высокочастотные, одножильные и многожильные. Кабели применяются для передачи сигналов на частотах до $1\,000\,000\,000$ Гц = 1 ГГц (1 гигагерц), что соответствует длинам волн от 30 см и более. Примером высокочастотного одножильного кабеля может служить широко известный телевизионный кабель, соединяющий антенну с телевизионным приемником.

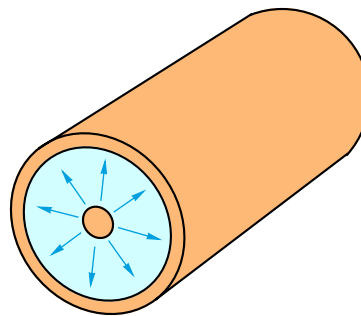


Рис. 2. Электрический коаксиальный кабель. Стрелки указывают направление электрического поля волны

Если антенна коллективная, то кабель используется для создания распределительной сети от антенны к телевизорам в каждой квартире дома.

Попыткам продвинуть применение кабеля в область более коротких волн препятствуют следующие обстоятельства. С уменьшением длины волны уменьшаются поперечный размер кабеля и особенно толщина центрального провода. Это приводит к увеличению его погонного (на единицу длины) сопротивления и, следовательно, к увеличению потерь мощности сигнала, что требует уменьшения допустимой длины кабеля между ретрансляторами в магистральной линии. Если же отказаться от требования $d \ll \lambda$, то при условии $d \approx \lambda$ и тем более $d > \lambda$ вдоль кабеля кроме основной волны (поле которой показано на рис. 2) смогут распространяться другие типы волн, которые нежелательны (паразитные волны), так как они имеют другие скорости распространения. В приемник приходит сразу несколько сигналов на всех этих волнах с разным запаздыванием относительно друг друга. В результате сигнал оказывается искаженным. Чтобы этого избежать, необходимо создать условие распространения только одной волны – условие одноволновости. Для кабеля это возможно только при $d \ll \lambda$ [2]. Одноволновый режим работы при $d \approx \lambda$ можно осуществить, если использовать вместо электрического кабеля другую линию передачи – металлический волновод.

Металлический волновод

Металлический волновод представляет собой полую металлическую трубку круглого или прямоугольного сечения. Плоская (для прямоугольного волновода) или цилиндрическая (для круглого) электромагнитные волны могут распространяться по волноводу, отражаясь от стенок. В результате интерференции отраженных под определенными углами волн образуются направляемые волновые структуры с синусоидальным или близким к нему распределением поля в поперечном сечении [2]. При этом амплитуды направляемых волн описываются

функциями от поперечных координат. Такие волновые структуры называются модами (от англ. mode). В кабеле эти моды оказались мешающими, паразитными. В волноводе же при отсутствии центрального провода уже не может распространяться “кабельная” волна, но одна из мод может быть использована для передачи сигнала. Одномодовый режим работы можно осуществить, например, для круглого волновода при $1,3d < \lambda < 1,7d$, где d – внутренний диаметр волновода. Заметим, что здесь $\lambda = c/f$. Она неравна длине волны моды в волноводе, которая имеет другое значение.

Из указанного условия видно, что в одномодовом режиме волновод может работать только в полосе частот, причем для каждой полосы частот необходим свой волновод. Ниже этой полосы волны (моды) вообще не могут распространяться в волноводе, а выше начинают распространяться другие моды, возникает многоволновость.

Металлические волноводы получили применение в качестве линий передачи сантиметровых и миллиметровых волн. Центры полос одномодовых режимов работы стандартных волноводов соответствуют $\lambda = 10$ см, 3,2 см и 8 мм. При уменьшении длины волны уменьшаются поперечные размеры волновода и возрастают потери мощности волны в стенках. Поэтому для волн с длинами порядка миллиметра и короче волноводы применяются лишь на очень короткие расстояния.

Среди мод круглого волновода имеются волновые структуры, обладающие уникальным свойством: потери мощности этих мод уменьшаются с ростом частоты. Поле этих мод осесимметрично, и оно возбуждает в стенке волновода только поперечные токи, которые в отличие от продольных токов уменьшаются с увеличением частоты. Поэтому круглый волновод с одной из таких мод с наиболее простой структурой поля (мода H_{01}) разрабатывался в нашей стране и за рубежом для применения в качестве дальней магистральной линии связи в миллиметровом диапазоне волн ($\lambda = 8$ мм). Основная трудность состояла в обеспечении одномодового режима работы такого волновода. И хотя технически это оказалось возможно, круглый волновод не получил применения для дальней связи, но уже по другой, экономической причине. Прокладка волноводной линии при тех условиях, которые требовалось выполнить (прямолинейность трассы и др.), оказалась очень дорогостоящей.

Диэлектрический волновод

Диэлектрический волновод – это стержень из диэлектрического материала, в котором могут распространяться электромагнитные волны с малыми потерями [2]. Для волн миллиметрового диапазона это полистирол и полиэтилен (фторопласт), малопоглощающие, так называемые неполярные диэлек-

трики. Электромагнитная волна может распространяться внутри стержня, отражаясь от его границ под углом полного внутреннего отражения. Как и в металлическом волноводе, при интерференции образуются направляемые волны – моды. При этом нет потерь мощности в металле, но имеют место потери в диэлектрике. Эти потери все же достаточно велики, поэтому диэлектрические волноводы получили применение для передачи сигнала на миллиметровых волнах на сравнительно короткие расстояния (метры, десятки метров).

Однако диэлектрические волноводы оказались чрезвычайно перспективными для применения в диапазоне световых волн, точнее, в диапазоне инфракрасных волн с длиной волны порядка микрометра (10^{-6} м). Они представляют собой волокна из стекла, поэтому получили название оптических волокон или волоконных световодов. Волоконные световоды мы рассмотрим несколько позже, когда речь пойдет о волнах оптического диапазона.

Радиорелейная линия

Наряду с разработкой волноведущих линий передачи развивались и исследования с целью применения систем, использующих направленные антенны. Чтобы обеспечить передачу сигнала за пределы прямой видимости (за горизонт), антенны с ретрансляторами помещали на высоко летящие объекты: самолеты и спутники, а также на специальные мачты высотой до 100 м, устанавливаемые вдоль трассы на расстоянии 40–50 км друг от друга (рис. 3). Эта система передачи сигнала получила название радиорелейной линии. Основное конструктивное требование накладывалось на размер зеркала антенны. Чтобы обеспечить хорошую направленность, то есть малый угол раствора диаграммы излучения антенны θ , размер зеркала D должен быть достаточно большим по сравнению с длиной волны, поскольку $\theta = q\lambda/D$, где q – величина порядка единицы, θ измеряется в радианах (1 радиан $\approx 57^\circ$). Радиорелейные линии используются в диапазонах дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн, поэтому размер зеркала оказывается порядка одного или нескольких метров. Радиорелейные линии сейчас широко применяются. Мачты радиорелейных линий

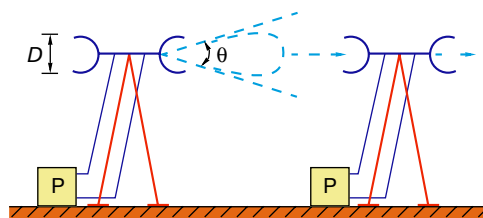


Рис. 3. Радиорелейная линия с диаграммой излучения антенны. θ – угол раствора диаграммы

можно увидеть вдоль магистральных шоссе и железнодорожных линий.

Лучеводная линия

В коротковолновой части миллиметрового диапазона волн, субмиллиметровом диапазоне (длина волны меньше миллиметра) и вплоть до светового диапазона используются лучеводные линии передачи (рис. 4). Линия представляет собой ряд линз на подставках в свободном пространстве или помещенных в трубу, выполняющую роль механической защиты. Расстояния между линзами таковы, что при распространении волн между линзами проявляется два конкурирующих эффекта: фокусировка пучка волн линзами, сужающая пучок, и дифракционное расширение пучка вследствие конечности размеров линз. При этом в линии, как в волноводе, при интерференции волн в пучке образуются волновые структуры, подобные волноводным модам [2]. Возможен одномодовый режим работы линии, если выполняются соотношения

$$\lambda \ll d \ll l, \quad d^2 \approx \lambda l,$$

где d – размер линзы, l – расстояния между линзами. Наименьшие дифракционные потери, то есть потери мощности из-за того, что часть поля моды не попадает на следующую линзу вследствие дифракционного расширения, наблюдаются, когда расстояние между линзами l равно двойному фокусному расстоянию линзы. Это условие существенно отличается от того, которое получается при расчете распространения лучей между линзами по законам геометрической оптики (без учета дифракции). Из такого расчета следует, что распространение лучей вдоль линии с наименьшими потерями должно быть, когда расстояние l равно четырем фокусным расстояниям. Поэтому лучеводные линии называются еще квазиоптическими линиями, то есть почти (не совсем) оптическими.

Другими вариантами лучеводных линий являются линии из фокусирующих зеркал. Как и волноводные, лучеводные линии не нашли широкого применения в качестве магистральных линий дальней связи, прежде всего по экономическим причинам. Слишком дорого обходится прокладка таких линий из-за требований к точности установки линз (или зеркал). Земля “дышит”, и линзы смещаются.

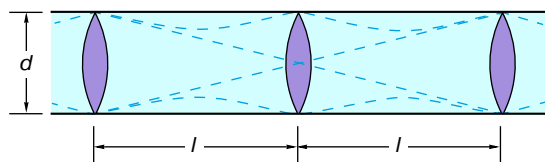


Рис. 4. Линзовая лучеводная квазиоптическая линия

Автоматическая же подстройка линз требует разработки специальных методов и дорогостоящих устройств. Построенные линии, однако, нашли применение в качестве измерительных линий для миллиметровых и субмиллиметровых спектрометров (измерителей спектров), а также в качестве индикаторов перемещений земной поверхности при фиксации землетрясений.

Волоконно-оптическая линия

Основу волоконно-оптической линии составляет волоконно-оптический кабель, главным элементом которого является волоконный световод [3]. Волоконный световод – это стеклянное волокно из высококачественного оптического стекла. Наиболее широкое применение в настоящее время получили волокна из кварцевого стекла. Исследуются также прозрачные если не в оптическом, то в инфракрасном диапазоне волн полимерные волокна. Надо отметить, что и стекла оказались более прозрачны именно в инфракрасном диапазоне.

С точки зрения электромагнитной теории волоконный световод представляет собой диэлектрический волновод оптического или инфракрасного диапазонов волн [4, 5] с длинами волн порядка одного или нескольких микрометров ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$). Волновод неоднороден в поперечном сечении. Центральная часть волокна – сердцевина оптически более плотная, то есть имеет коэффициент преломления больший, чем окружающая часть – оптическая оболочка. Распространяющаяся по сердцевине волна отражается от границы сердцевины и оболочки под углом полного внутреннего отражения (рис. 5). Одномодовый режим работы волоконного световода реализуется, если выполняется соотношение

$$d(n_c^2 - n_o^2)^{1/2} \leq 0,8\lambda,$$

где d – диаметр сердцевины, n_c и n_o – показатели преломления сердцевины и оптической оболочки, λ – длина волны в свободном пространстве (не в веществе), при этом $\lambda \ll d$, $n_c - n_o \ll n_o$. Распределение поля основной моды в поперечном сечении является функцией радиуса. Поле сосредоточено в сердцевине и резко спадает в оболочке [4, 5].

Конструктивно оптическое волокно – это многослойная структура, включающая сердцевину, оптическую оболочку, технологическую оболочку, слой защитного лака. Волокно помещают в защитную

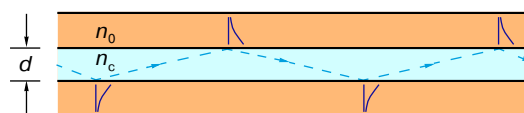


Рис. 5. Волоконный световод, n_c и n_o – показатели преломления сердцевины и оптической оболочки

оболочку. Роль последней – защита оптической части от механического и химического влияния внешней среды. Эта оболочка делается обычно из полимера, в особых случаях используется также металлическое покрытие. Описанная конструкция – стеклянное волокно с защитной оболочкой – называется оптическим модулем, то есть по существу это одноволоконный оптический кабель. Как и электрические, оптические кабели могут быть одножильными (одномодульными) и многожильными (многомодульными), последние с дополнительной жесткой полимерной или металлической центральной жилой и дополнительным общим защитным покрытием.

Технология изготовления оптического волокна удивительна, и о ней стоит рассказать более подробно. Для передачи сигнала по волоконному световоду на большое расстояние необходимо особо чистое стекло. В 1966 году ученые подсчитали, что если поглощение света в стекле будет таково, что, пройдя по волокну расстояние в 1 км, мощность света уменьшится до 1% начальной мощности, то такое волокно можно использовать в качестве волоконного световода для передачи сигнала. Соответствующий коэффициент передачи по мощности $K = 10^{-2} \text{ км}^{-1}$ или в используемых в технике единицах – децибелах коэффициент $\alpha = 10 \lg K = -20 \text{ дБ/км}$. В этом случае говорят, что при прохождении сигнала имеют место потери мощности в 20 дБ/км. При таких потерях усилительные ретрансляторы можно ставить через один или несколько километров, и оптический кабель уже сможет конкурировать с электрическим кабелем. Однако самые чистые оптические стекла того времени могли дать потери лишь в несколько тысяч децибел на километр. Попытки очистить стекло в процессе варки различными известными методами позволили уменьшить потери до нескольких сот децибел на километр. Основные потери мощности приходились на содержащиеся в стекле ионы металлов несмотря на их микроскопическое количество. Казалось, это был предел возможного.

Но вот в 1970 году специалисты американской фирмы “Корнинг гласс” получили волокно с потерями 20 дБ/км и даже несколько меньше. Используя идеи получения сверхчистых материалов, применяемые в полупроводниковой технологии, они разработали метод получения сверхчистого кварцевого стекла из газа – газовой фазы (метод парофазного осаждения стекла), причем непосредственно в процессе изготовления волокна, точнее, заготовки для оптического волокна. На рис. 6 схематически показан процесс получения сверхчистой сердцевины в кварцевой трубке. В трубку из кварцевого стекла вдвигаются газы: хлористый кремний (SiCl_4) и кислород (O_2). Трубка подогревается движущейся вдоль нее горелкой. В результате окисления кремния на стенках трубки осаждается расплавленный кварц (SiO_2). После образования слоя чистого кварца в

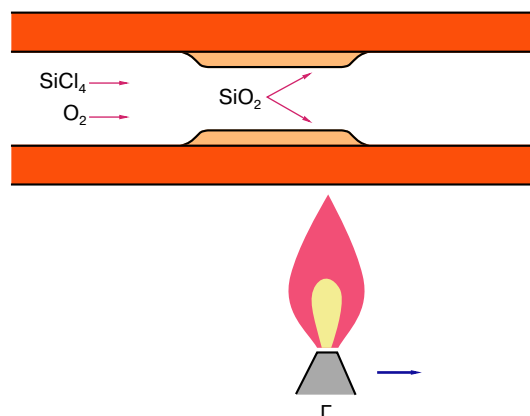


Рис. 6. Процесс осаждения расплавленного кварца (SiO_2) внутри кварцевой (стеклянной) трубки при окислении (O_2) газообразного хлористого кремния (SiCl_4), Г – горелка

трубку добавляется хлористый германий (GeCl_4). В результате образуется слой, содержащий SiO_2 с небольшой добавкой GeO_2 , что несколько увеличивает показатель преломления по сравнению с чистым кварцем. Затем процесс осаждения кварца прекращается, а трубка нагревается до плавления и схлопывается. Образуется стержень – заготовка со сверхчистой сердцевиной и оптической оболочкой. Исходная часть трубки называется технологической оболочкой, к ней не предъявляются требования особой оптической чистоты. Полученная заготовка плавится в особой печи, и из нее вытягивается оптическое волокно нужных поперечных размеров, которое в процессе вытяжки сразу покрывается слоем защитного лака, чтобы при затвердении на поверхности стекла не образовывались микротрещины, которые существенно ухудшают механическую прочность и надежность оптического волокна.

В дальнейшем и за рубежом и в нашей стране в научно-исследовательских институтах Академии наук (Институте общей физики, Институте химии высокочистых веществ, Институте радиотехники и электроники) и промышленных научно-исследовательских институтах начали производить оптические кварцевые волокна с потерями порядка нескольких и даже одного децибела на километр на длинах волн $\lambda = 0,8; 1,3$ и $1,5 \text{ мкм}$. Длины волн определялись спектрами поглощения в стекле и наличием соответствующих генераторов – лазеров. Рекордное значение составило 0,2 дБ/км на длине волны 1,5 мкм, что близко к теоретическому пределу (0,18 дБ/км) на данной длине волны. Этот предел определяется уже не чистотой стекла, а его естественной структурной неоднородностью, приводящей к рассеянию света (рэлеевское рассеяние, названное так по имени известного английского

физика Рэлея, впервые исследовавшего рассеяние волн в веществе).

Чтобы лучше представить себе прогресс в получении высокочистых оптических волокон, проведем сравнение потерь в волокнах до возникновения волоконной оптики как средства связи с потерями, достигнутыми в настоящее время. Как уже говорилось, для применения прозрачных волокон в качестве волоконных световодов достаточно иметь потери в 20 дБ/км. Получаемые при обычной очистке стекла потери, например, в 2000 дБ/км соответствовали потерям в 20 дБ при длине световода в 10 м, а достигнутые потери в 0,2 дБ/км дают потери в 20 дБ уже при длине световода в 100 км. Таким образом, если в магистральной волоконно-оптической линии и требуются ретрансляторы-усилители, то их надо ставить через 100 км или более.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, мы рассмотрели линии передачи сигнала, которые применяются: 1) как средства связи в виде магистральных линий связи на дальние расстояния, то есть в качестве междугородних линий: двухпроводные линии, электрические кабели, радиорелейные линии, волоконно-оптические линии, 2) в качестве линий внутригородской связи и во внутриобъектовой (внутри зданий) распределительной сети: электрические и волоконно-оптические кабели — и 3) в виде линий связи антенн с передатчиком и приемником, в частности антенны с ретранслятором в радиорелейной линии. В последнем случае кроме

электрического кабеля применяются волноводы и лучеводы, которые используются также в качестве измерительных линий, с помощью которых измеряют и изучают спектры излучений и поглощений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Миллер М.А., Смирнов А.И.* Линии передачи // Физическая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1990. Т. 2. С. 596.
2. *Вайнштейн Л.А.* Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988.
3. *Дианов Е.М.* Волоконная оптика // Физическая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1988. Т. 1. С. 333.
4. *Маркузе Д.* Оптические волноводы. М.: Мир, 1974.
5. *Снайдер А., Лав Дж.* Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987.

* * *

Виктор Васильевич Шевченко, доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики Российского университета дружбы народов, главный научный сотрудник Института радиотехники и электроники РАН. Область научных интересов: радиофизика и оптика – прикладная электродинамика, квазиоптика, волоконная и интегральная оптика. Автор и соавтор более 130 научных работ, в том числе двух монографий, шести изобретений.