

Лекция № 2 ФИЗИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ И ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ.

Самостоятельно!

1. Виды физических линий связи.

Физические линии связи предназначены для передачи материальных носителей информации – сигналов в пространстве и времени.

При передаче сигналов в пространстве линия связи обеспечивает соединение передатчика и приёмника. Очень часто понятие физической линии связи (ЛС) отождествляется с понятием физический канал связи (КС). Поэтому будем использовать оба термина.

Классификация пространственных ЛС по типу физической среды распространения сигналов рассматривалась нами на прошлой лекции. Напомним (см. рис. предыдущей лекции), что физическая линия может быть: - двухпроводной (электрический сигнал); - оптоволокну (модулированный световой луч); - звуковым каналом (акустический сигнал в водной или воздушной среде); - свободным пространством (радиосигнал).

При передаче сигналов во времени в качестве физических линий выступают средства хранения данных, такие как магнитная лента, магнитные и оптические диски и т.д.

Также было отмечено, что общей проблемой при передаче сигнала через любую линию в пространстве и времени является наличие искажений, источниками которых выступают:

- естественные помехи;
- шумы электронных приборов (тепловые шумы);
- взаимные влияния различных линий;
- детерминированные искажения;
- размножение сигналов при их распространении по нескольким маршрутам;
- механические повреждения носителей данных и сбои записывающих и считывающих устройств (при передаче во времени).

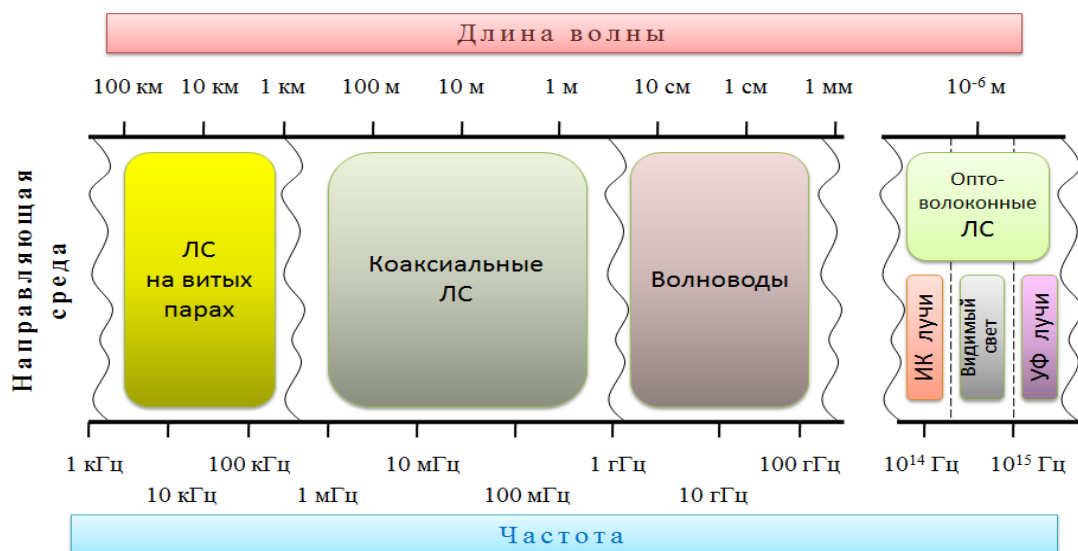
Практические ограничения на физические линии связи:

- ограничение мощности передатчика;
- ограничение на ширину полосы частот (в связи с колебательной природой сигналов).

Эти два обстоятельства приводят к ограничению количества данных, которые могут быть надёжно переданы (*с заданной ошибкой*) по любому КС. В теории информации максимально достижимую скорость передачи принято называть пропускной способностью КС.

Кратко рассмотрим некоторые из важных характеристик конкретных типов линий связи.

Проводные ЛС или каналы в основе физической природы которых, лежат направляющие системы. Частотные диапазоны используемых сигналов, соответствующие длины волн и физическая природа проводных ЛС иллюстрируются ниже, на рис. 1 (слайд 1).



(Рис. 1)

Витые проводные пары имеют ширину полосы несколько сотен килогерц и электромагнитный канал, который обеспечивает прохождение относительно умеренной ширины полосы частот.

Коаксиальный кабель имеет обычно используемую ширину полосы частот несколько мегагерц.

Волноводы обеспечивают распространение электромагнитной волны в замкнутой отражающей оболочке.

Волоконно-оптические ЛС реализуются на основе стекловолокна и обеспечивают ширину полосы частот на несколько порядков больше, чем у каналов с коаксиальным кабелем.

В течение прошедшего десятилетия были разработаны оптические кабели, которые имеют относительно низкое затухание для сигнала, и высоконадёжные оптические устройства для генерирования и детектирования сигнала. Эти технологические достижения привели к быстрому освоению таких каналов как для внутренних систем электросвязи, так и для трансатлантических и мировых систем связи. С учётом большой ширины полосы частот, доступной на волоконно-оптических каналах, стало возможно для телефонных компаний предложить абонентам широкий диапазон услуг электросвязи, включая передачу речи, данных, факсимильных и видеосигналов.

В настоящее время проводные каналы составляют достаточно большой процент каналов связи по всему миру. Волоконно-оптические ЛС (*ВОЛС*) постепенно вытесняют узкополосные ЛС.

Беспроводные (радио) каналы. В системах беспроводной связи (радиосвязи) электромагнитная энергия передается в среду распространения антенной, которая служит излучателем. Физические размеры и структура антенны зависят прежде всего от рабочей частоты. Чтобы получить эффективное излучение электромагнитной энергии, размеры антенны должны быть больше чем $1/10$ длины волны. Следовательно, передача радиостанции на частоте, допустим, $f = 1$ МГц, соответствующей длине волны $\lambda = 300$ м, требует антенны с размером, по крайней мере, 30 м.

Рисунок 2 (слайд 2) поясняет различные диапазоны частот для радиосвязи.

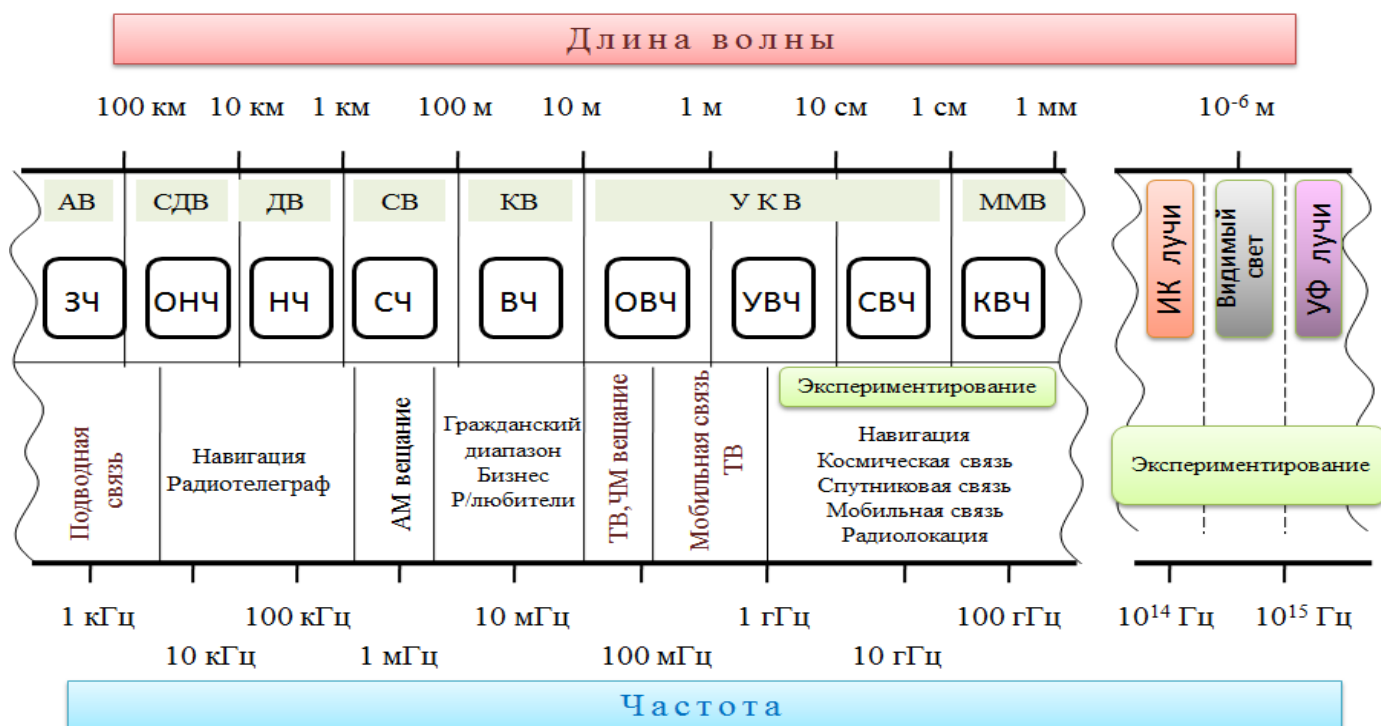


Рис. 2 - Частотные диапазоны для беспроводных ЛС.

Способы распространения электромагнитных волн (*ЭМВ*) в атмосфере и в свободном пространстве можно условно разделить на три основные категории:

- распространение поверхностной (земной) волной;

- распространение пространственной волной;
- распространение прямой волной.

В диапазоне звуковых (ЗЧ) и очень низких частот (ОНЧ), в которых длины волн превышают 10 км, земля и ионосфера образуют волновод для распространения электромагнитных волн. В этих частотных диапазонах сигналы связи фактически распространяются вокруг всего земного шара. По этой причине эти диапазоны частот прежде всего используются во всём мире для решения навигационных задач (например, для кораблей).

Ширина полосы частот канала связи, доступной в этих диапазонах, относительно мала (обычно составляет 1... 10 % центральной частоты), и, следовательно, информация, которая передаётся через эти каналы, имеет относительно низкую скорость передачи и обычно неприемлема для передачи больших объемов информации.

Помехи!!! - Доминирующий тип шума на этих частотах обусловлен грозовой деятельностью вокруг земного шара, особенно в тропических областях. Помехи возникают из-за большого числа станций в этих диапазонах частот.

Распространение земной волной, как иллюстрируется на рис. 3а (слайд 3), является основным видом распространения для сигналов в полосе средних частот (на рис.1 - 0,3...3 МГц). Это-диапазон частот, используемый для радиовещания с АМ (амплитудной модуляцией) и морского радиовещания. При АМ радиовещании и распространении земной волной дальность связи (передачи данных), даже при использовании мощных радиостанций, ограничена **150 км**.

Помехи!!! - Атмосферные шумы, промышленные шумы и тепловые шумы от электронных компонентов приёмника являются основными причинами искажений сигналов, передаваемых в диапазоне средних частот (земной волной).

Частным случаем распространения пространственной волны является ионосферное распространение, иллюстрируемое рис. 3б. Оно сводится к отражению (отклонение или рефракция волны) передаваемого сигнала от ионосферы, которая состоит из нескольких слоев заряженных частиц, расположенных на высоте 50...400 км от поверхности земли.

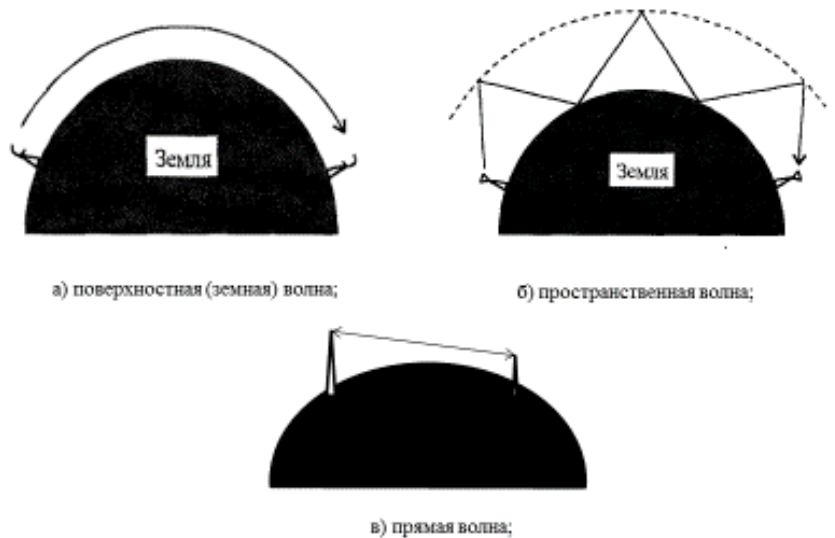
В дневное время суток разогрев нижних слоев атмосферы солнцем обуславливает появление нижнего слоя на высоте ниже 120 км. Эти нижние слои вызывают поглощение частот ниже 2 МГц, таким образом, ограничивая распространение ионосферной волной радиопередач АМ радиовещания.

Однако в ночные часы электронная концентрация частиц в нижних слоях ионосферы резко падает, и частотное поглощение, которое встречается в дневное время, значительно сокращается. Как следствие, мощные радиовещательные сигналы с АМ могут распространяться на большие расстояния посредством отражения от ионосферных слоев (которые располагаются на высоте от 140 до 400 км над поверхностью земли), и земной поверхности.

Часто возникающая проблема при ионосферном распространении электромагнитной волны в частотном диапазоне ВЧ - это **многолучевость**. Это обычно приводит к межсимвольной интерференции в системе цифровой связи. Более того, сигнальные компоненты, прибывающие по различным путям распространения, могут суммироваться таким образом, что это приводит к явлению, названному замираниями (аналогично эффектам при использовании **Wi-Fi**, использование технологии **MIMO**).

Помехи!!! - Аддитивный шум в ВЧ диапазоне – это комбинация атмосферных помех и теплового шума.

Распространение ионосферной волны прекращается на частотах выше 30 МГц, что является границей диапазона ВЧ (см. рис. 2).



Однако возможно ионосферно-тропосферное распространение на частотах в диапазоне от 30 до 60 МГц, обусловленное рассеянием сигналов от нижних слоев ионосферы!!!

Также можно организовать передачу данных на расстоянии нескольких сотен миль при помощи тропосферного рассеяния в диапазоне от 40 до 300 МГц. Тропосферное рассеяние обуславливается рассеянием сигнала благодаря частицам в атмосфере на высотах порядка 10 км.

Обычно ионосферное (1) и тропосферное (2) рассеяние вызывают большие сигнальные потери и требует большой мощности передатчика и относительно больших размеров антенн.

Частоты выше 30 МГц проходят через ионосферу с относительно малыми потерями и делают возможным спутниковую и космическую связь (с аппаратами на межпланетных траекториях).

Т.о., на частотах УВЧ диапазона и выше основным способом электромагнитного распространения волн является распространение в пределах прямой видимости (рис. 3 в). Для земных систем связи это означает, что передающая и приемная антенны должны быть в прямой видимости с относительно малой преградой (или ее отсутствием). По этой причине передача сигналов вышками операторов моб.связи и цифровых TV станций (в УВЧ и СВЧ) диапазонах частот для достижения широкой зоны охвата осуществляется антеннами на высоких опорах.

В общем случае, зона охвата для прямого распространения ограничена кривизной поверхности земли. Если передающая антенна установлена на высоте h м над поверхностью земли, расстояние до радиогоризонта, не принимая во внимание физические преграды, такие как горы, приблизительно как

$$d \approx \sqrt{15h} \text{ [км]}.$$

Например, прд. антенна телевидения, установленная на высоте 300 м, обеспечивает покрытие территории приблизительно в радиусе 67 км. Другой пример – релейные системы микроволновой радиосвязи, экстенсивно используемые для передачи телефонных и видеосигналов на частотах выше чем 1 МГц, имеют антенны, установленные на высоких опорах или на высоких зданиях.

Помехи!!! - Доминирующий шум, ограничивающий качество системы связи в ВЧ и УВЧ диапазонах, – тепловой шум, создаваемый во входных цепях приемника, и космические шумы, уловленные антенной. На частотах в диапазоне СВЧ выше чем 10 ГГц при распространения сигнала главную роль играют атмосферные условия. Например, на частоте 10 ГГц затухание меняется приблизительно от 0,003 дБ/км при лёгком дожде до 0.3 дБ/км при тяжёлом дожде. На частоте 100 ГГц затухание меняется приблизительно от 0,1 дБ/км при легком дожде до 6 дБ/км при тяжёлом дожде. Следовательно, в этом частотном диапазоне тяжёлый дождь вызывает чрезвычайно высокие потери при распространении, которые могут приводить к отказу системы обслуживания (полный обрыв в системе связи).

Характеристики электромагнитного поля:

- скорость распространения V . Волны, в зависимости от типа волны и параметров передающей среды, распространяются с различной скоростью. Звуковые волны в обычной атмосфере распространяются со скоростью примерно 330 м/с. Электромагнитные волны распространяются значительно быстрее. В свободном пространстве (вакууме) поперечные ЭМ волны распространяются со скоростью света $C = 299\,793\,000$ м/с, округленно равной $3 \cdot 10^8$ м/с. Однако в воздухе, в атмосфере Земли, эти волны движутся несколько медленней, а в линиях передачи электромагнитные волны распространяются существенно медленнее;
- частота f [Гц] – величина, обратная длительности одного периода колебания T [с]:
 $1 \text{ [Гц]} = 1 / (1 \text{ [с]}) = \text{с}^{-1}$;
- длина волны λ [м., см., мм. ...]. $\lambda = \frac{C}{f}$, где $C = 300\,000 \text{ [км/с]} = 3 \cdot 10^8 \text{ [м/с]}$.

!!! - На частотах выше КВЧ (крайне высокие частоты) полосы мы имеем диапазон инфракрасного (ИК) и видимого излучений - области электромагнитного спектра, который может использоваться для применения прямой оптической связи в свободном пространстве. До настоящего времени эти диа-

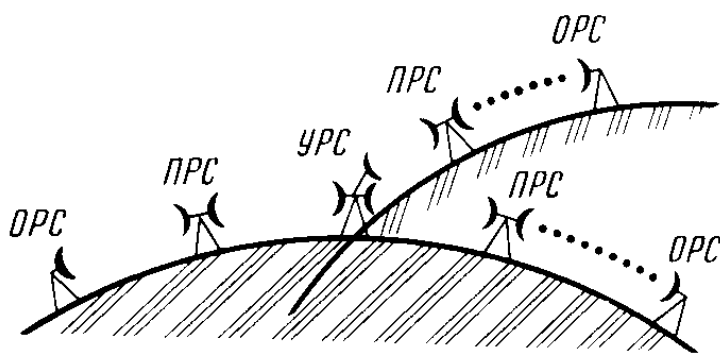
пазоны частот в большей степени использовались в экспериментальных системах связи и передачи данных.

Например: 1 - межспутниковая высокоскоростная связь во французской системе SPOT спектральной съемки поверхности земли; 2 - в Китайской спутниковой системе **интернета вещей** (разворачивается в рамках проекта "Синъюнь" - управляется компанией CASIC Xingyun Satellite Co.), состоящая из 80 спутников с трехэтапным формированием низкоорбитального созвездия в течение 3-х ближайших лет (до 2022 года)).

2. Виды физических радиолиний

Радиорелейные линии передачи.

Радиосистема передачи, в которой сигналы электросвязи передаются с помощью наземных ретрансляционных станций, называется *радиорелейной линией передачи* (РРЛ). Принцип релейной радиосвязи иллюстрируется на рисунке ниже.



ОРС – оконечная радиостанция; ПРС – промежуточная радиостанция; УРС – узловая радиостанция.

Радиорелейная связь организуется на частотах ОВЧ- и СВЧ-диапазона (см. рис. 2). Надежная связь с низким уровнем помех может быть получена только в условиях прямой видимости между антеннами, излучающими радиоволны. Расстояние между антеннами радиорелейных систем зависит от структуры земной поверхности и высоты антенн над

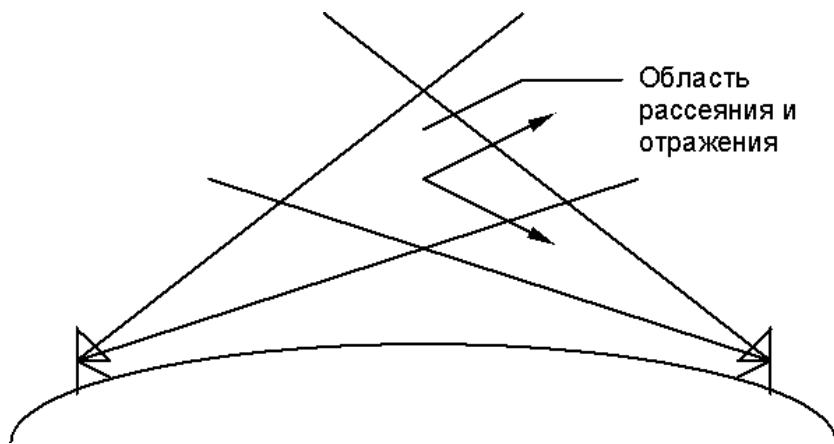
ней. Типичные расстояния составляют 40 - 50 км при высотах башен и мачт, на которых устанавливаются антенны, около 100 м.

Ограниченность расстояния прямой видимости не следует рассматривать как недостаток. Именно за счет невозможности свободного распространения радиоволн на большие расстояния устраняются взаимные помехи между радиорелейными системами передачи внутри одной страны и разных стран. Кроме того, в указанных диапазонах практически отсутствуют атмосферные и промышленные помехи. Антенны РРЛ могут работать в режиме передачи и приема для одновременной передачи в противоположных направлениях с использованием двух частот: f_1 и f_2 .

Тропосферные радиорелейные линии.

Тропосфера - нижняя часть атмосферы Земли. В тропосфере всегда есть локальные объемные неоднородности, вызванные различными физическими процессами, происходящими в ней. Волны диапазона 0,3..5 ГГц способны рассеиваться этими неоднородностями. Механизм образования тропосферных радиоволн условно показан на Рис. 7.

Учитывая, что неоднородности находятся на значительной высоте, нетрудно представить, что рассеянные ими радиоволны могут распространяться на сотни километров. Это дает возможность разнести станции на расстояние 200..400 км друг от друга, **что значительно больше расстояния прямой видимости**.



Коротковолновые линии связи.

Радиосистема передачи данных, в которой используется отражение декаметровых волн от ионосферы (частоты $3 - 30$ МГц), называется ионосферной системой передачи на декаметровых волнах.

В ионосфере происходит, строго говоря, не отражение радиоволны, а поворот ее траектории за счет неоднородности диэлектрических свойств вертикального профиля ионосферы.

Траектория распространения радиоволн от одной точки на поверхности Земли к другой с одним отражением от ионосферы называется ионосферным скачком.

Расстояние между пунктами приема и передачи, измеренное вдоль поверхности Земли, составляет, в среднем, около 2000 км. Траектория распространения радиоволн может быть образована несколькими ионосферными скачками (глобальное распространение).

!!! - Условия распространения радиоволн, а, следовательно, и качество связи зависят от состояния ионосферы, определяемого временем года, суток и циклом солнечной активности.

В результате ионосферные системы передачи на декаметровых волнах не позволяют организовать большого числа каналов, и обычно количество каналов не превышает одного-двух телефонных или нескольких телеграфных. Передача в таких линиях ведется, как правило, на низких скоростях.

Ионосферные и метеорные линии связи.

Радиосистема передачи данных, в которой используется рассеяние метровых волн на неоднородностях ионосферы, называется ионосферной линией передачи на метровых волнах.

Образование ионосферных волн в метровом диапазоне во многом сходно с образованием тропосферных волн. Разница заключается в том, что рассеяние происходит не в тропосфере, а в ионосфере на высоте 75..95 км. Предельная дальность связи в этом случае 2000..3000 км, а наиболее подходящие частоты 40..70 МГц.

В атмосферу Земли непрерывно проникают потоки мелких космических частиц - метеоров. Большинство из них сгорает на высоте 80..120 км, образуя ионизированные следы. Протяженность следа 10..25 км, а время существования от 5 мс до 20 с. Радиосистемы, использующие отражения от следов метеоров, работают в диапазоне 30..70 МГц. Время прохождения радиосигналов при метеорной связи составляет ТОЛЬКО 2-4 часа в сутки.

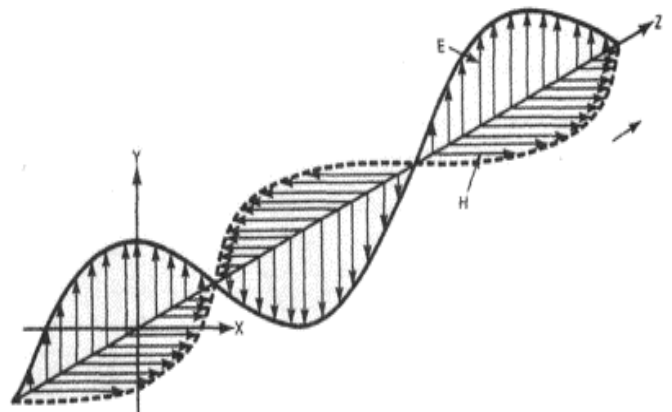
3. Волновые процессы в проводных линиях связи.

Линии передачи с металлическими проводниками используют электрический ток для передачи электрической энергии из одной точки в другую. Линии передачи состоят из двух или более электрических проводников, разделенных непроводящим изолятором (диэлектриком), как, например, пары проводов или системы из пар проводников (многожильные кабели). При передаче низкочастотных сигналов поведение линии передачи достаточно простое и вполне предсказуемо. Однако при передаче высокочастотных сигналов характеристики линий передачи становятся более сложными, и их поведение становится в некоторой мере трудно предсказуемо для представления схемами и системами с сосредоточенными параметрами.

Существует два основных типа волн:

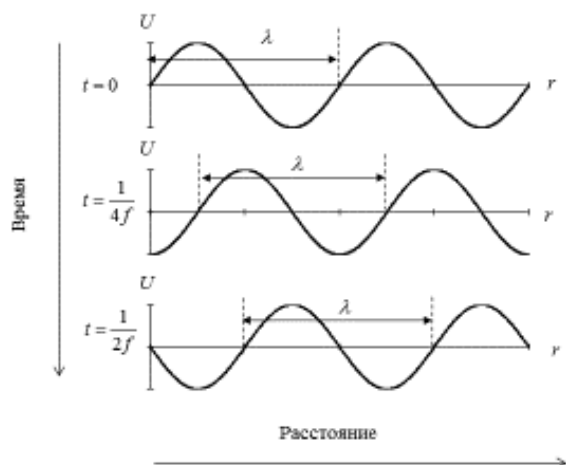
- *продольные* – смещения (изменения) происходят в направлении распространения (волны на поверхности воды, акустические волны);
- *поперечные* – направление смещения перпендикулярно направлению распространения (электромагнитные волны).

Распространение электрической энергии вдоль металлической линии передачи происходит в форме поперечных электромагнитных волн.



В металлическом проводнике протекающий ток всегда сопровождается появлением в окружающей среде электрического E и магнитного H поля, векторы напряженности которых, являются перпендикулярными друг к другу (см. рис. выше, *слайд*).

На рис. ниже показан график смещения и направление распространения поперечных электромагнитных волн при их распространении по линии передачи от источника к нагрузке.



Электромагнитные волны, распространяющиеся от источника к нагрузке, называют падающими (прямыми) волнами, а волны, распространяющиеся от нагрузки обратно к источнику, называются отраженными волнами.

Характеристика процесса передачи во многом определяется соотношением волнового сопротивления ЛС и сопротивления нагрузки.

Волновое сопротивление ЛС, в общем случае, является комплексной величиной:

$$Z_B = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}.$$

На низких частотах $\omega \approx 0 \rightarrow$
 $Z_B \approx \sqrt{\frac{R}{G}} = R$ – чисто активное;

а на высоких частотах $Z_B \approx \sqrt{\frac{L}{C}}$ – чисто реактивное.

Для двух разных типов проводных ЛС (рис. ниже) существуют эмпирические формулы для вычисления волнового сопротивления ЛС:

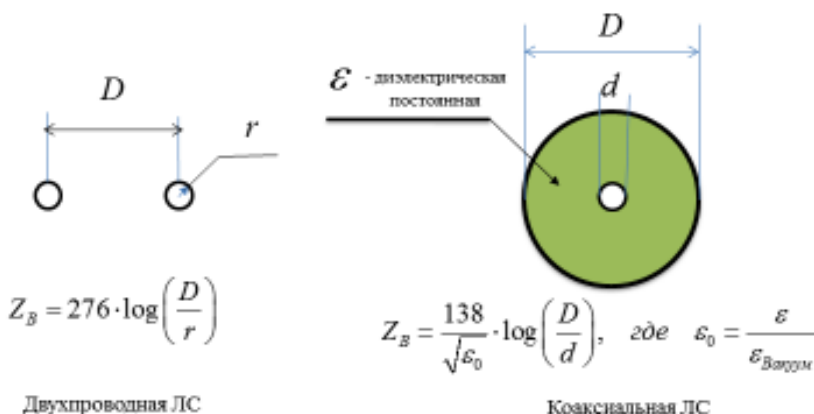
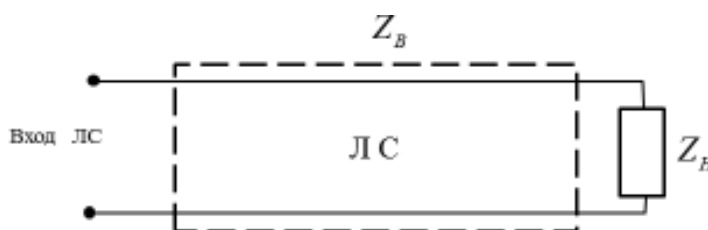
– для двухпроводной линии $Z_B = 276 \log \frac{D}{r}$;

– для коаксиальной линии $Z_B = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_0}} \log \frac{D}{d}$, где $\epsilon_0 = \frac{\epsilon}{\epsilon_B}$ – относительная диэлектрическая постоянная, ϵ_B – диэлектрическая постоянная для вакуума.

Качество проводной ЛС характеризуется коэффициентом отражения:

$$\Gamma = \frac{U_o}{U_{\Pi}},$$

где U_{Π}, U_o – амплитуда падающей и отраженной волны, соответственно. Для идеальной ЛС $\Gamma = 0$, а для самого худшего случая $\Gamma = 1$.



Степень согласованности волнового сопротивления и сопротивления нагрузки характеризуется, так называемым, коэффициентом стоячей волны (K_{CB}):

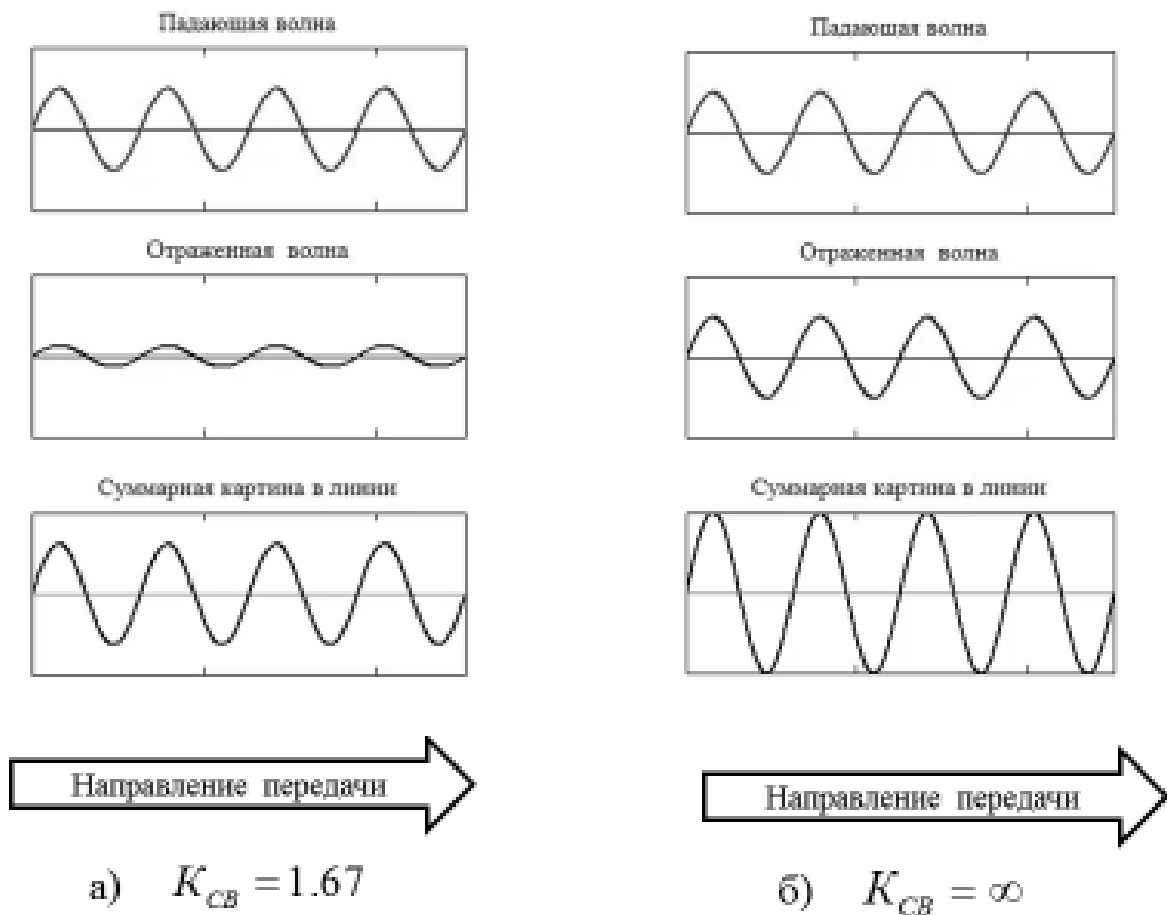
$$K_{CB} = \frac{U_{\Pi} + U_O}{U_{\Pi} - U_O} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}, \quad 1 \leq K_{CB} < \infty.$$

При $K_{CB} = \infty$ вся энергия теряется в ЛС и не доходит до нагрузки (см. рис. ниже).

K_{CB} может быть вычислен с использованием значений волнового сопротивления ЛС - Z_B и сопротивления нагрузки - Z_H :

$$K_{CB} = \begin{cases} \frac{Z_H}{Z_B} & \text{— если } Z_H > Z_B; \\ \frac{Z_B}{Z_H} & \text{— если } Z_B > Z_H. \end{cases} \quad \text{так как } K_{CB} \geq 1 \text{ по определению.}$$

Отсюда следует, что для наилучшего согласования необходимо добиваться, чтобы $K_{CB} = 1$, т.е., чтобы $Z_B = Z_H$!!!

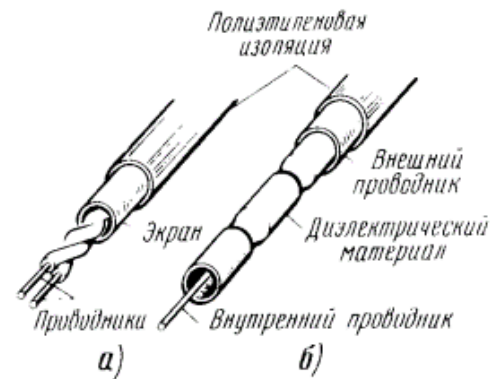


4. Металлические линии связи

В простейшем случае проводная ЛС – физическая цепь, образуемая парой металлических проводников. Кабельные ЛС (кабели связи) образованы проводниками с изоляционными покрытиями, помещенными в многослойные защитные оболочки.

По конструкции и взаимному расположению проводников различают:

- **симметричные** кабели (СК), иногда называемые *витыми парами*;
- **коаксиальные** кабели (КК) связи (см. рис., слайд).

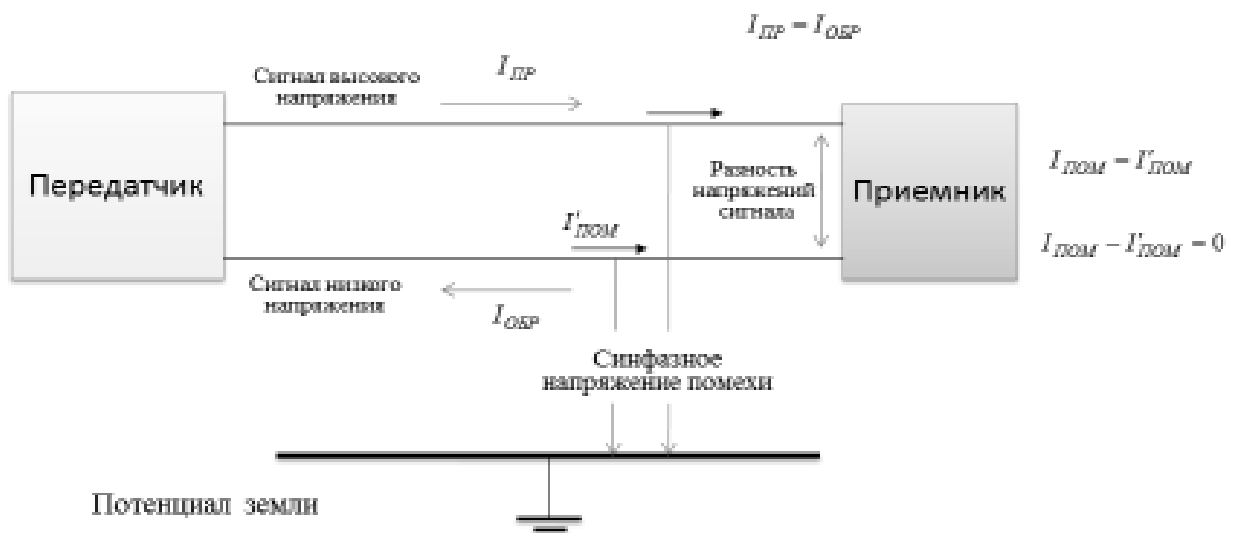


СК состоит из двух совершенно одинаковых в электрическом и конструктивном отношении изолированных проводников. Различают экранированные и неэкранированные СК. Диаметр жилы СК обычно составляет 0.4...1.2 мм. **СК используется для частотного диапазона < 10 МГц.**

КК представляет собой два цилиндра с совмещенной осью, причем один цилиндр – сплошной внутренний проводник, концентрически расположенный внутри другого полого цилиндра (*внешнего проводника*). Проводники изолированы друг от друга диэлектрическим материалом. **КК способен передавать электромагнитные колебания на частотах несколько сотен МГц.**

Симметричные системы передачи.

СК используются для организации, так называемых, симметричных систем передачи. Упрощенная схема таких систем показана на рис. ниже (слайд).



Преимуществом симметричной системы является то, что помеха от внешних источников приводит к появлению одинаковых токов в каждом из проводников, которые взаимно компенсируются в нагрузке ЛС.

Вторым преимуществом является то, что в силу противоположности сигнальных токов в проводах витой пары происходит взаимная компенсация электромагнитного поля, т.е. энергия не излучается в пространство. Этим объясняется, в частности, относительная широкополосность ЛС на витых парах, что позволяет передавать информацию с большой скоростью.

Несимметричные системы передачи.

У несимметричных линий один провод находится под потенциалом земли, а второй – под напряжением сигнала. Линии на основе коаксиальных кабелей – несимметричные, **внешний проводник обычно соединяется с землей**. Такой тип линий передачи называется *несимметричным* (или *несбалансированным*, *асимметричным*).

При передаче сигналов по такой ЛС **один** заземляющий провод может использоваться **сразу несколькими** сигнальными проводами (см. рис.). Иногда это создает проблемы из-за того, что с увеличением длины заземляющего провода (имеющего свои сопротивление, индуктивность и емкость) между двумя точками заземляющего провода создается незначительная разность потенциалов. В силу этого эффекта заземленный провод не представляет совершенную систему отсчета и содержит наведенные на него помехи. На рисунке показаны две несимметричных передающих системы. При этом разность потенциалов на каждом сигнальном проводе измеряется относительно общего заземляющего провода.



Достоинство несимметричных линий: - требуется только один провод для каждого сигнала и только одна заземленная линия независимо от числа использующих ее сигналов.

Недостаток таких линий – снижение защищенности к синфазным сигналам в виде шумов и других помех.

Совместное использование симметричных и несимметричных систем.

Симметричные и несимметричные линии передачи могут соединяться/взаимодействовать друг с другом с помощью специальных устройств, называемых *согласующими* (симметрирующими) устройствами или трансформаторами.

При работе на относительно низких частотах для развязки заземления и нагрузки может использоваться обычный трансформатор, показанный на рис. ниже (слайд).

Для снижения влияния паразитной емкости симметрирующее устройство должно иметь свой заземленный экран.

