**Лекция – Волноводы**

**Волново́д** — искусственный или естественный направляющий канал, в котором может распространяться волна.  
 При этом поток мощности, переносимый волной, сосредоточен внутри этого канала или в области пространства, непосредственно примыкающей к каналу.

По природе распространяющихся волн различают **электромагнитные** и **акустические** волноводы.  
Частным случаем первых являются **оптоволоконные линии передачи.**Наиболее часто под термином **«волновод»** подразумеваются металлические трубки, предназначенные для передачи энергии электромагнитных волн диапазонов СВЧ и КВЧ. Такой **волново́д** — линия передачи, имеющая одну или несколько проводящих поверхностей, с поперечным сечением в виде замкнутого проводящего контура, охватывающего область распространения электромагнитной энергии.

**Волновод** (англ. [waveguide](http://eng.thesaurus.rusnano.com/wiki/article635)) — канал естественного или искусственного происхождения, обеспечивающий распространение волны определенной природы вдоль некоторой осевой линии или осевой [поверхности](http://thesaurus.rusnano.com/wiki/article1513) с относительно малым затуханием и ограничивающий эту волну в области пространства вблизи оси или осевой поверхности.

### Описание

Локализация волны в пределах канала распространения достигается за счет отражения от границ волновода, либо за счет фокусирующих свойств волновода.   
К волноводам относят также **системы с поверхностными волнами**, направляемыми границами раздела сред.

По происхождению волноводы делятся на две группы:  
  
\* волноводы естественного происхождения и  
\* волноводы искусственного происхождения.

К волноводам **естественного происхождения** относятся, в частности, **ионосферный волновод** и **подводные звуковые каналы**.

Волноводы **искусственного происхождения** применяются **для передачи** волнами различной природы (акустическими и электромагнитными разных диапазонов) **энергии** или **информации (сигналов**).

Особенность волноводов — существование в них дискретного (при не очень сильном поглощении) набора волноводных мод (нормальных волн), распространяющихся без изменения своей структуры.

Каждая волноводная мода характеризуется **предельной частотой**, называемой **критической:** **волноводная мода существует только при** **частотах, превышающих критическую частоту**. В некоторых типах волноводов существуют моды с критической частотой равной нулю.

## 1.1. Типы волноводов

### Экранированные

Графическое представление напряжённости магнитного поля распространяющейся электромагнитной волны внутри прямоугольного металлического волновода.

Экранированные волноводы имеют хорошо отражающие стенки для распространяющейся в нем волны, благодаря чему поток мощности волны сосредоточен внутри волновода. Как правило, такие волноводы выполнены в виде полых или заполненных средой со специально подобранными параметрами трубок. Поперечное сечение этих трубок имеет форму окружности, эллипса, прямоугольника, что связано с большей конструктивной простотой, хотя для специальных целей используются волноводы и с другими формами поперечного сечения. Чтобы волна по мере распространения в волноводе не отражалась в обратном направлении, волновод выполняют регулярным: форма и размеры поперечного сечения, а также физические свойства материалов должны быть постоянны вдоль длины волновода. Поскольку волна отражается от стенок экранированного волновода, то в поперечном направлении возникает [стоячая волна](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%BE%D1%8F%D1%87%D0%B0%D1%8F_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%B0) с определенным составом [мод](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D1%8B).

Для передачи электромагнитных волн используются металлические трубки, полые или заполненные диэлектриком. Также используются [коаксиальные](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BA%D0%B0%D0%B1%D0%B5%D0%BB%D1%8C) и многожильные экранированные кабели, которые относят к [проводным линиям передачи](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%B1%D0%B5%D0%BB%D1%8C). Термин «радиочастотный волновод» (англ. *radiofrequency guide*, обозначение RG) подчёркивает назначение и отличие от проводных линий передачи постоянного тока и тока промышленной частоты, а также от низкочастотных коммуникационных кабелей. Металлические волноводы и коаксиальные кабели со сквозными отверстиями-щелями в экране служат для построения [волноводно-щелевых антенн](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A9%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%B0) и излучающих кабелей.

К экранированным волноводам относят также [акустические волноводы](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BA%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4), это трубы с достаточно жёсткими стенками, например, металлические или пластмассовые. В таких волноводах акустические колебания распространяются в газе, наполняющем волновод, как правило, в воздухе. Ранее широко применялись на судах и кораблях под названием «переговорные трубы».

Практически все типы волноводов можно рассматривать как разновидности [**длинных линий**](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%8F) передачи, то есть **таких, длина которых** **существенно превышает длину распространяющейся в них волны.**

### 1.2. Неэкранированные

В открытых (неэкранированных) волноводах локализация поля обычно обусловлена явлением [полного внутреннего отражения](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BD%D1%83%D1%82%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%B5%D0%B5_%D0%BE%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) от границ раздела двух сред (**в волноводах**[**диэлектрических**](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4)**и оптоволоконных [световодах](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B2%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4" \o "Световод)**), либо от областей с плавно изменяющимися параметрами среды (например, [**ионосферный волновод**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%98%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4&action=edit&redlink=1)**,** [**атмосферный волновод**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%90%D1%82%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4&action=edit&redlink=1)**,**[**подводный звуковой канал**](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%B4%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB)**, градиентное оптоволокно)**. Поле локализуется преимущественно внутри специально предназначенной для этого области поперечного сечения волновода и быстро убывает за пределами этой области. Благодаря этому волна канализируется в волноводе. Открытые планарные волноводы оптического диапазона используются для построения различных интегральных оптоэлектронных устройств.

Акустические открытые волноводы служат основой устройств на [поверхностных акустических волнах](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%85%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%B0%D0%BA%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D1%8B), в таких волноводах ультразвуковая волна распространяется вдоль границы раздела сред с различными акустическими свойствами.

## 2. Свойства волноводов

В волноводах, как в системах с распределёнными параметрами, возможно существование в нём дискретного (при не очень сильном поглощении) набора (ансамбля) типов колебаний ([мод](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D0%B4%D0%B0_(%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B0))), каждый тип колебаний распространяется со своими [фазовыми](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C) и [групповыми](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D1%83%D0%BF%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C) скоростями. Все моды обладают [дисперсией](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D1%81%D0%BF%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%B8%D1%8F_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD), то есть их фазовые скорости зависят от частоты и отличаются от групповых скоростей.

В экранированном волноводе фазовые скорости обычно превышают скорость распространения плоской однородной волны в заполняющей среде ([скорость света](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C_%D1%81%D0%B2%D0%B5%D1%82%D0%B0), [скорость звука](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA%D0%B0)), эти волны называются *быстрыми*. При неполном экранировании они могут просачиваться сквозь стенки волновода, переизлучаясь в окружающее пространство. Это так называемые *утекающие волны*. В открытых волноводах, как правило, распространяются медленные волны, амплитуды которых быстро убывают при удалении от направляющего канала.

Каждая мода характеризуется предельной частотой ~\omega_k , называемой *критической*; мода может распространяться и переносить вдоль волновода поток энергии только на частотах ~\omega, превышающих ~\omega_{kr}. Однако в некоторых случаях (многопроводные линии передачи, полые акустические волноводы) существуют моды, для которых ~\omega_{kr}=0, их называют главными или квазистатическими.

При больших ~\omega волновод становится сверхразмерным (поперечные размеры волновода значительно превышают [длину волны](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B0_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D1%8B)): тогда в нём одновременно распространяется множество мод, которые при определённых соотношениях между [амплитудами](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BC%D0%BF%D0%BB%D0%B8%D1%82%D1%83%D0%B4%D0%B0) и [фазами](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B7%D0%B0%D0%BD%D1%8B) могут группироваться в бегущие вдоль волновода сгустки. В предельном случае, в волноводе образуется [стоячая волна](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%BE%D1%8F%D1%87%D0%B0%D1%8F_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%B0) с узлами и пучностями, например, для акустических волноводов — узлы акустического давления. В узлах стенки можно убрать, заменив сплошную трубу последовательно расставленными отражателями. Такие, а также аналогичные им линзовые системы классифицируют как квазиоптические волноводы или квазиоптические линии передачи.

[**Металлический волновод**](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4)

**Металлический волновод** (дальше сокращенно – МВ) — радиоволновод или просто [волновод](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4), изготавливается из меди, латуни или алюминия и покрываются изнутри [серебром](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B1%D1%80%D0%BE) или другим хорошо проводящим металлом.

МВ в сечении **могут быть круглыми, прямоугольными, эллиптическими.** Возможно, проводить изгибы волноводов.

Сечение МВ зависит от используемого диапазона частот   
(например, сечение 16×8 мм для Ku-диапазона).   
МВ с 2-х сторон имеют [фланцы](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%B5%D1%86) для их крепления к другим элементам волноводной техники.

Фланцы имеют отверстия для [винтов](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B8%D0%BD%D1%82_(%D0%B4%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%8C)) и могут быть **круглыми** или **прямоугольными.**

МВ используют в СВЧ диапазоне частот. В более низком диапазоне частот используют **кабели**, что связано с непомерно большим сечением волноводов в ВЧ диапазоне частот.

При соединении отрезков волноводов друг с другом для уменьшения потерь [СВЧ](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B8%D0%BA%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B5_%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) энергии используют металлические прокладки, во фланцах делают резонансные четвертьволновые канавки.

Качество передачи энергии волноводом характеризуется следующими параметрами: Кз — затухание энергии, КСВ ([коэффициент стоячей волны](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%B5%D0%BD%D1%82_%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D1%87%D0%B5%D0%B9_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D1%8B)) или КБВ (коэффициент бегущей волны).

МВ могут быть переменного сечения — для передачи определенных волн и затухания других.

Металлические волноводы широко используют в космической технике. Они отличаются малыми потерями на СВЧ. Это происходит потому, что в них отсутствуют потери на излучение энергии в окружающую среду

Существуют и другие типы радиоволноводов. Например – **диэлектрический -** это направленный диэлектрический канал, с помощью которого передаются и распространяются радиоволны. Боковая поверхность канала одновременно выступает в роли границы раздела двух сред. Магнитная и диэлектрическая проницаемость и электропроводность, переходя через границу РВ, резко изменяются. Боковая поверхность канала изготавливается в форме цилиндра с прямоугольными, круглыми или другими сечениями.

РВ используются при передаче энергии в СВЧ-трактах, таких как передача энергии от передатчика к антенне. СВЧ-тракт составляют разнообразные по своим размерам и формам РВ.

Вдоль оси РВ распределяется волновое поле, образующееся в результате интерференции отраженных волн от внутренних стенок волновода.

В **радиолокационных станциях** РВ выполняют функцию направляющих систем. Они передают энергию от приемной антенны к [**радиоприемнику**](http://enciklopediya-tehniki.ru/promyshlennost-na-r/radiopriemnik.html) и от передатчика в передающую антенну. Отрезки РВ составляют волновой тракт, т. е. направляющую систему СВЧ.  
В отрезках РВ могут иметь разнообразные по формам и размерам поперечные сечения, угловые изгибы, вращающиеся соединения и другие волноводные узлы.

Недостатком РВ является то, что в нем имеется нижний предел пропускаемых частот, на дециметровых волнах конструкция волновода весьма громоздка, возникают сложности при проведении монтажа. Кроме того, при изготовлении РВ требуется высокая точность и чистота в процессе обработки внутренних поверхностей стенок канала.

В **диэлектрических** РВ поверхность раздела направляет волну.  
В качестве поверхности раздела выступает поверхность диэлектрического стержня. Из-за того, что диэлектрические РВ чувствительны к внешним воздействиям и в них возникают дополнительные потери, практическое применение их затрудняется. Потери возникают при просачивании энергии за пределы поверхности диэлектрического РВ.  
Подобные диэлектрические РВ служат для передачи сантиметровых и миллиметровых волн.

**РВ с** **поверхностной волной** представляются как металлическая лента или как проводник в форме цилиндра. На РВ находятся покрытие с диэлектриком или ребристая структура. В отличие от металлических РВ - радиоволновод с поверхностной волной прост по своей конструкции, с его помощью передаются большие мощности в диапазоне разных частот. Электромагнитное поле поверхностной волны РВ окружает его снаружи, при этом деформации крепления, соединения и другие неоднородности приводят к потере энергии.

Возбудителями поля в РВ являются **линейный проводник со штырем**, **петля - виток с током**, а также возбуждение поля возможно еще и с **помощью отверстия в торце РВ.**  
**Электрические силовые линии и штырь располагаются параллельно друг другу.   
Плоскость витка находится перпендикулярно магнитным силовым линиям.**Отверстие делается в металлической поверхности по направлению магнитных силовых линий.

Для канализации электромагнитных волн **миллиметрового и субмиллиметрового диапазона применяются особый тип волновода** – квазиоптическая линия передачи **- лучевод** , а для еще более коротких волн применяются **Световоды.**

**Световод -**[волновод оптический](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/394/%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4) (далее сокращено **- С**) закрытое устройство для направленной передачи света.   
В открытом пространстве передача света возможна только в пределах  прямой видимости и ограничивается начальной расходимостью излучения, поглощением и рассеянием в атмосфере.  
Переход к **С** позволяет значительно уменьшить потери световой   
энергии при её передаче на большие расстояния, а также передавать  световую энергию по криволинейным трассам.

Наиболее перспективный и широко применяемый в настоящее [время](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/420)  (1990 гг.) тип **С -** гибкий диэлектрический волоконный С. с низкими оптическими потерями (***Волоконная оптика****),* позволяющий  передавать свет на большие расстояния.