



Лекция №5

Общие сведения о направляющих системах

Устройства, в которых происходит образование и распространение направляемых электромагнитных волн называют **линиями передачи**.

Выделяют 2 основные группы линий передач:

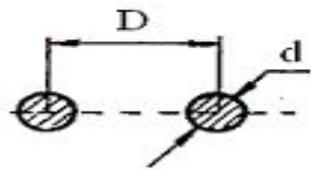
Открытые линии передачи — в них поле не экранировано снаружи и частично существует в пространстве, окружающем линию.

Волноводные (закрытые) линии передачи имеют одну или несколько проводящих поверхностей с поперечным сечением в виде замкнутого проводящего контура, охватывающего область распространения электромагнитной волны. Поле в волноводе полностью экранировано его внешней оболочкой.



Линии передачи

Открытые линии передачи



а)



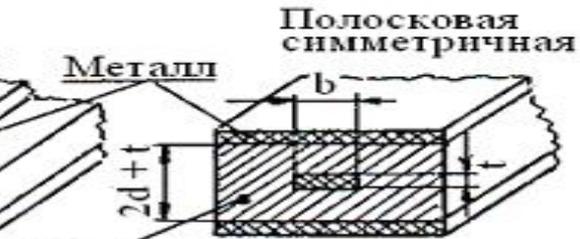
б)



в)

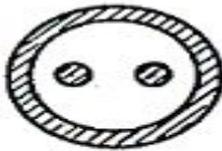


Диэлектрик

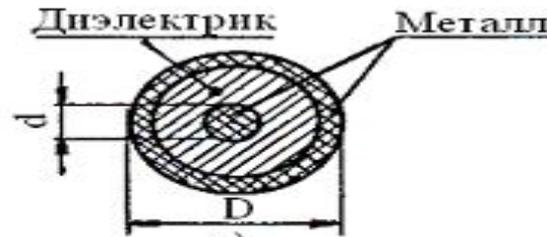


Диэлектрик

Закрытые линии передачи



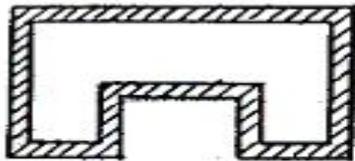
д)



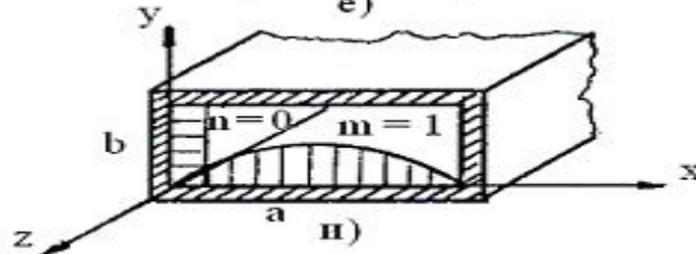
е)



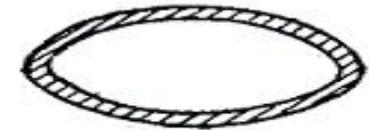
ж)



з)



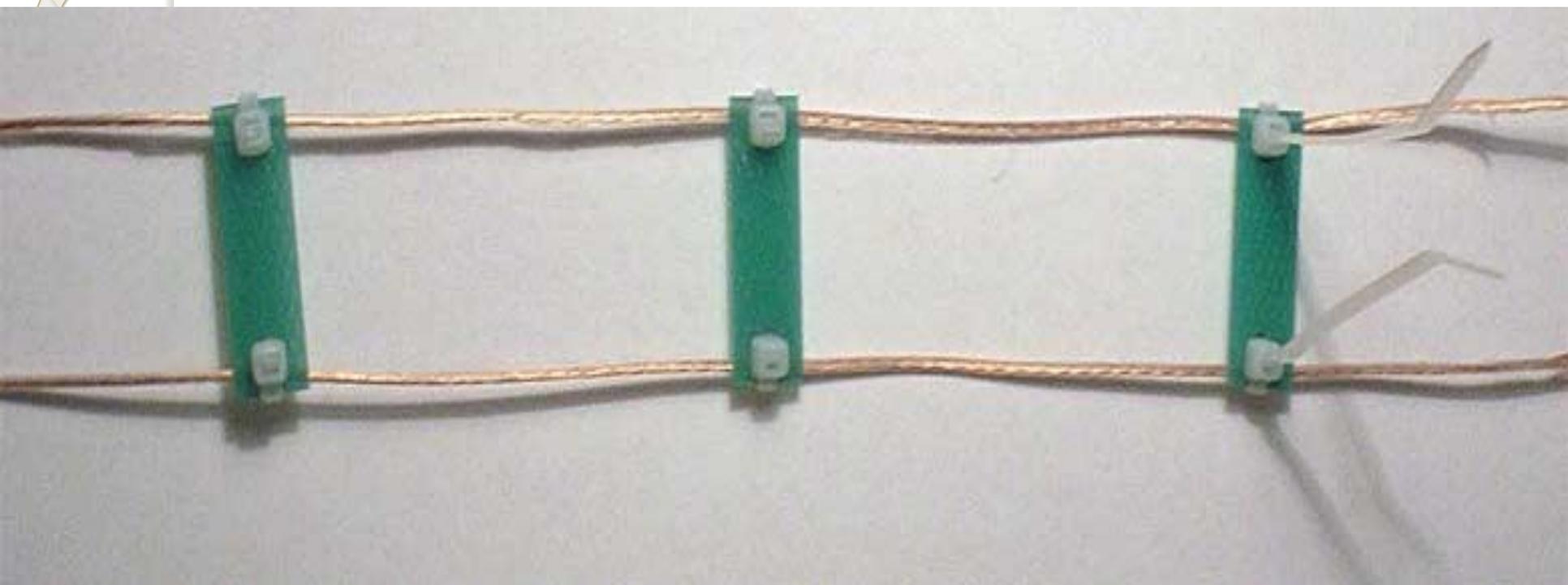
и)



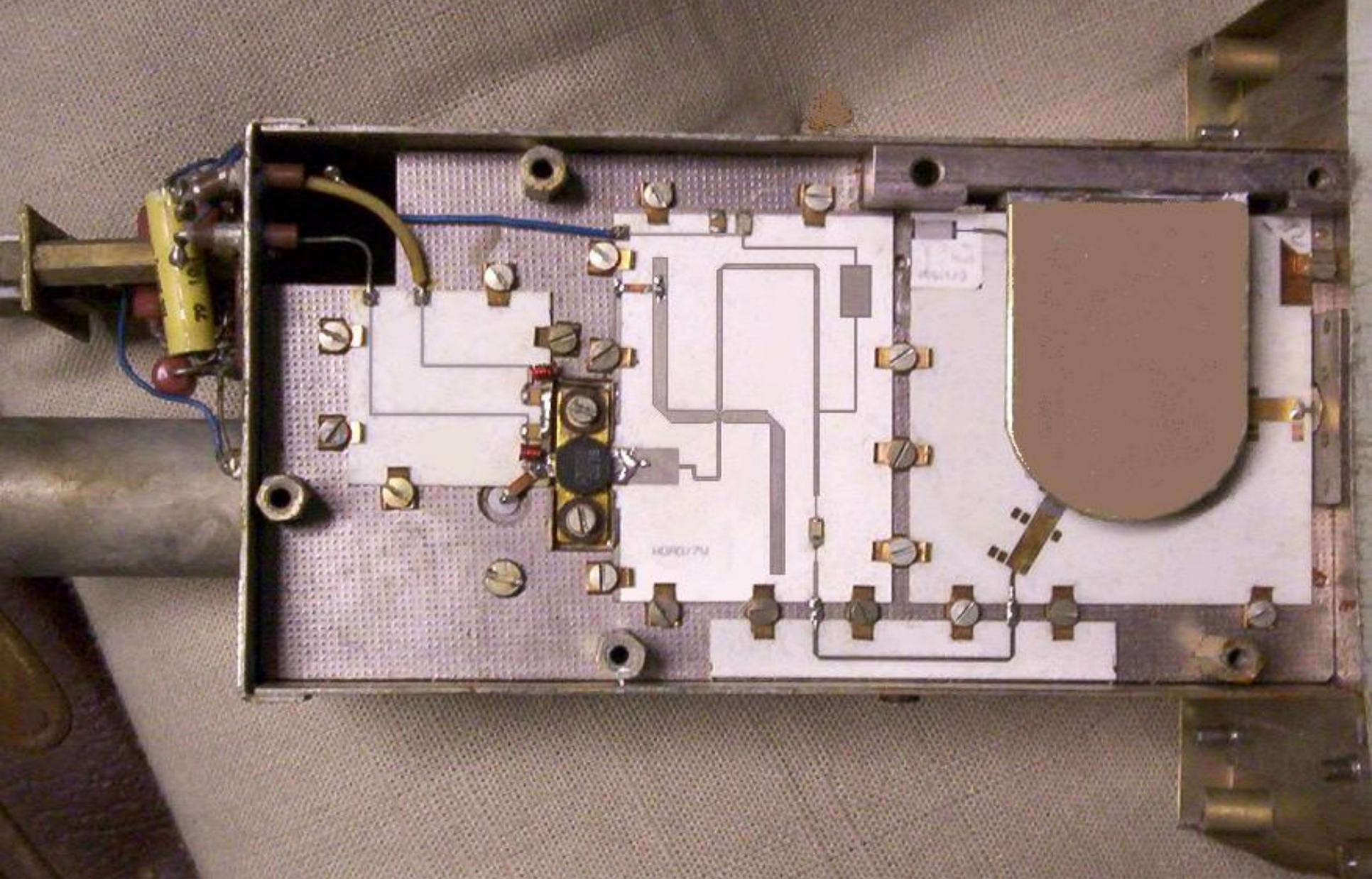
к)

Рис.1 Поперечные сечения линий передачи:

а - двухпроводной линии; б - диэлектрического волновода; в - однопроводной линии; г - полосковой линии; д - экранированной двухпроводной линии; е - коаксиальной линии; ж - круглого волновода; з - п-образного волновода; и - прямоугольного волновода; к - эллиптического волновода.

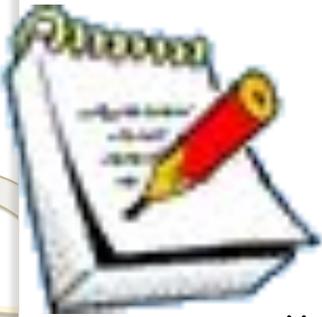


двухпроводная линия



ПОЛОСКОВЫЕ ЛИНИИ





Требования предъявляемые к линиям передачи:

- высокий коэффициент полезного действия;
- малые потери в проводнике и диэлектрике;
- малые отражения;
- достаточная для передаваемой мощности электрическая прочность, -широкополосность;
- отсутствие заметных амплитудных и фазовых искажений в рабочем спектре частот;
- отсутствие излучения в окружающее пространство;
- малые габариты в сочетании с простотой конструкции и эксплуатации;
- обладать достаточной жесткостью и виброустойчивостью.



Передача энергии высокой частоты по обычным двухпроводным линиям передачи **невозможна по двум причинам:**

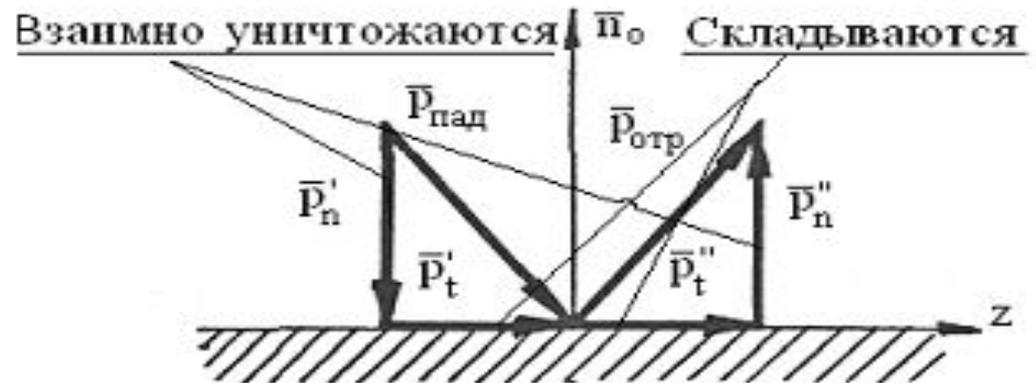
Провода линии играют роль антенн и излучают электромагнитную энергию в окружающее пространство (этот эффект сильно проявляется уже при дециметровых волнах).

Активное сопротивление проводов линии резко возрастает из-за сильного поверхностного эффекта. Поэтому большая часть энергии затрачивается на нагрев. Двухпроводные линии применяют для передачи энергии на частоте до 50 Гц .

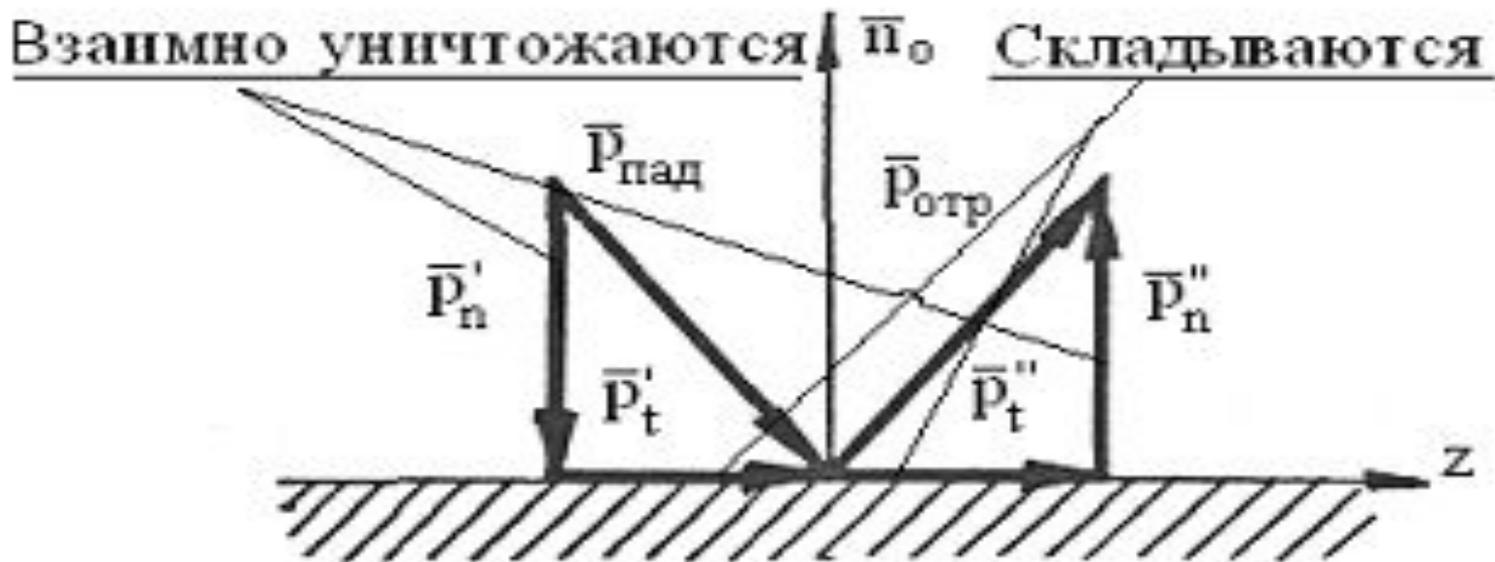
Структура поля над проводящей плоскостью.

Для локализации электромагнитного поля и направления его в желаемую сторону часто используют металлические плоскости различных конфигураций

Когда плоская волна падает на металлическую (хорошо проводящую) поверхность, она почти полностью отражается. Благодаря тому, что поле падающей и отраженной волн в одной и той же точке пространства имеют разные фазы и разные направления, то суммарное поле имеет сложную структуру, значительно отличающуюся от структуры плоских однородных падающей и отраженной волн. Если плоская однородная волна при наклонном падении на границу раздела сред полностью отражается, то отраженная волна несет такую же энергию, как и падающая.

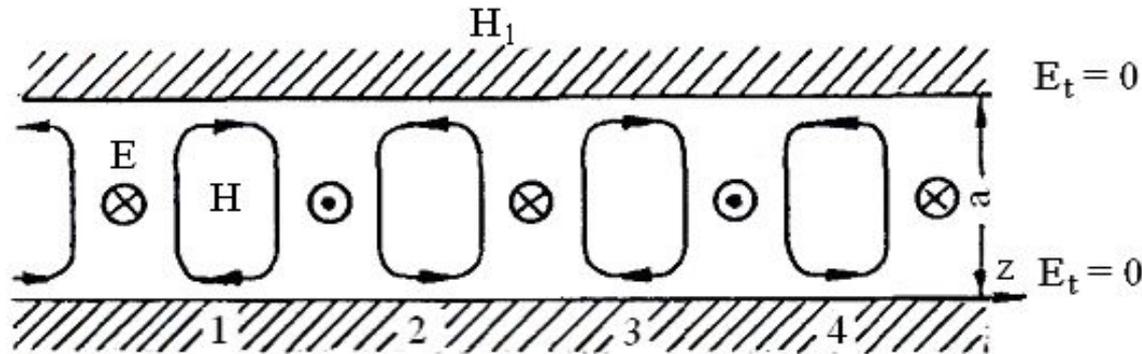


На рис. показана векторная диаграмма, на которой средние значения вектора Пойнтинга падающей и отраженной волн, $\bar{\mathbf{P}}_{\text{пад}}$ и $\bar{\mathbf{P}}_{\text{отр}}$ разложены на нормальные ($\bar{\mathbf{P}}'_n, \bar{\mathbf{P}}''_n$) и тангенциальные ($\bar{\mathbf{P}}'_t, \bar{\mathbf{P}}''_t$) к границе раздела компоненты. Поскольку **нормальные компоненты взаимно уничтожаются, а тангенциальные складываются, поток энергии переносится вдоль границы.** Из рис. мы видим, что при этом устанавливается особый волновой процесс, направляемый границей раздела сред.



Двухплоскостной волновод.

Поместим выше первой металлической плоскости вторую бесконечную плоскость из идеального металла таким образом, чтобы не нарушить имеющейся картины поля. Для этого вторую плоскость следует разместить на расстояниях



$$a = n\lambda,$$

где $n=1,2,3,\dots$ - ряд целых чисел.

$$a = n\lambda = n \cdot \frac{\lambda}{2 \cos \theta_{\text{пад}}}.$$

Поля различных типов волн в волноводах

Волны распространяющиеся в волноводах делятся на два типа:

- **TE (Transverse Electric) или H-волны (магнитного типа)**, у которых есть продольная компонента магнитного поля H_z и равна нулю продольная компонента электрического поля E_z ;

$$H_z \neq 0, E_z \equiv 0 \quad \text{Transverse-поперечный}$$

- **TM (Transverse Magnetic) или E-волны (электрического типа)**, у которых есть продольная компонента электрического поля E_z и равна нулю продольная компонента магнитного поля H_z .

$$E_z \neq 0, H_z \equiv 0$$

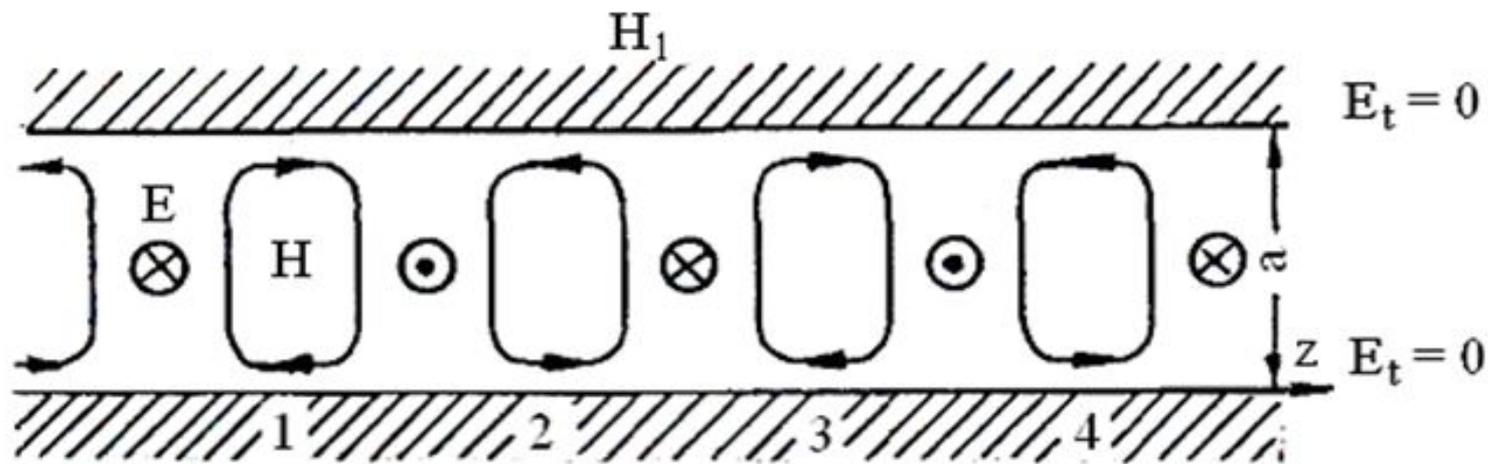
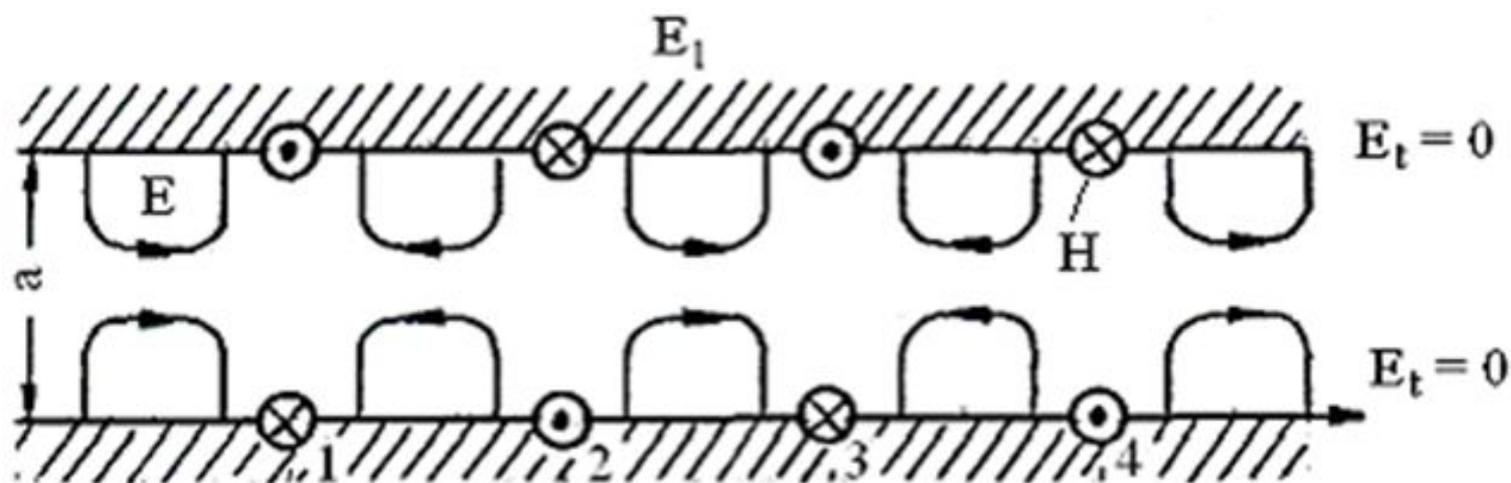


Рис. Картина поля при $n = 1$ и волне типа H



Картина поля при $n = 1$ и волне типа E

В волноводах могут наблюдаться
бегущие,
стоячие,
смешанные волны

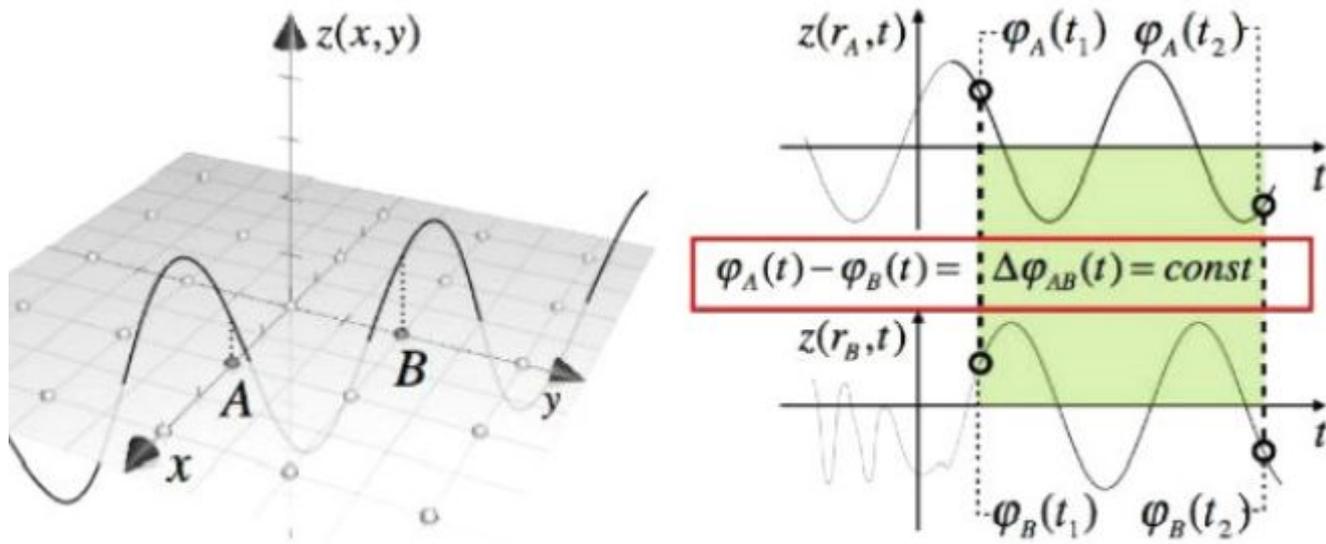
в зависимости от наличия большего или меньшего отражения на конце волновода.



Режим работы линии характеризует **коэффициент бегущей волны**, $K_{БВ} = E_{\text{мин}} / E_{\text{макс}}$,
где $E_{\text{мин}}$ и $E_{\text{макс}}$ - наименьшая и наибольшая величины действующего значения напряженности электрического поля, измеренные при перемещении вдоль волновода какого-либо индикатора поля.

Бегущая волна – волна, которая при распространении в среде переносит энергию (в отличие от стоячей волны).

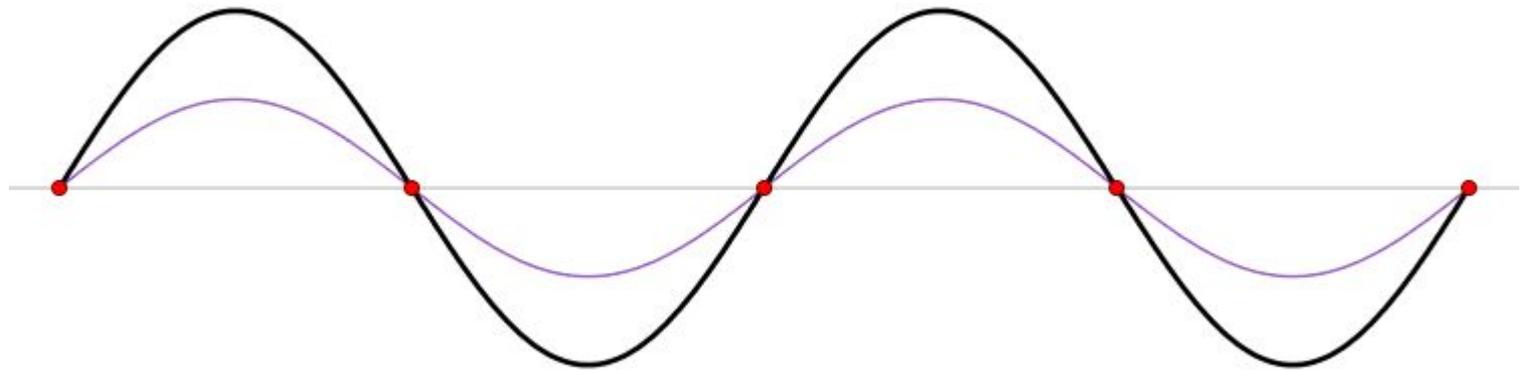
Бегущая волна, волновое движение, при котором поверхность равных фаз (фазовые волн, фронты) перемещается с конечной скоростью. С бегущей волной, групповая скорость которой отлична от нуля, связан перенос энергии, импульса или других характеристик.



$\varphi_A(t)$ — фаза колебаний в точке A в момент времени t

Стоячая волна́ — явление интерференции волн, распространяющихся в противоположных направлениях, при котором перенос энергии ослаблен или отсутствует.

Стоячая волна (электромагнитная) — периодическое изменение *амплитуды* напряженности электрического и магнитного полей вдоль направления распространения, вызванное интерференцией падающей и отраженной волн



Частный случай бегущей волны - **стоячая волна**, при которой фазовая скорость равна нулю (две одинаковые периодические бегущие волны, распространяются в противоположных направлениях гася друг друга).

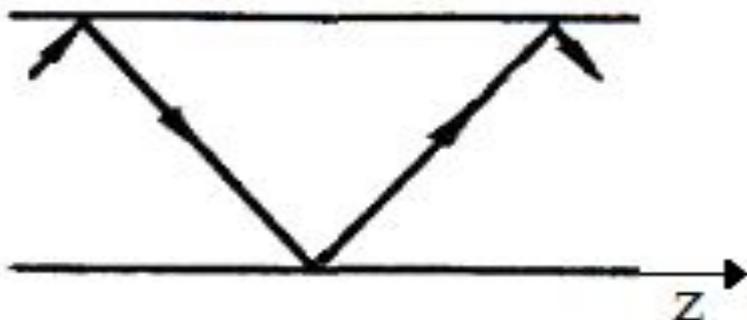
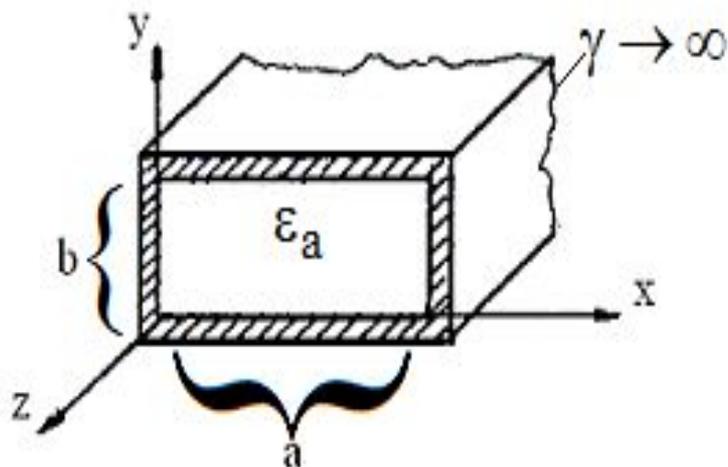


Смешанными волнами называется совокупность бегущих и стоячих волн.

Режим смешанных волн (частично стоячих волн) возникает при неполном отражении на конце линии. Суммарная волна при этом образуется в результате интерференции падающих и отраженных волн неравных амплитуд.

Такое соотношение амплитуд возможно в том случае, когда часть энергии, переносимая падающей волной, расходуется в нагрузочном сопротивлении на конце. Относительная величина амплитуд падающей и отраженной волн характеризует эффективность передачи мощности в нагрузку: чем меньше амплитуда отраженной волны, чем больше мощность передается в нагрузку.

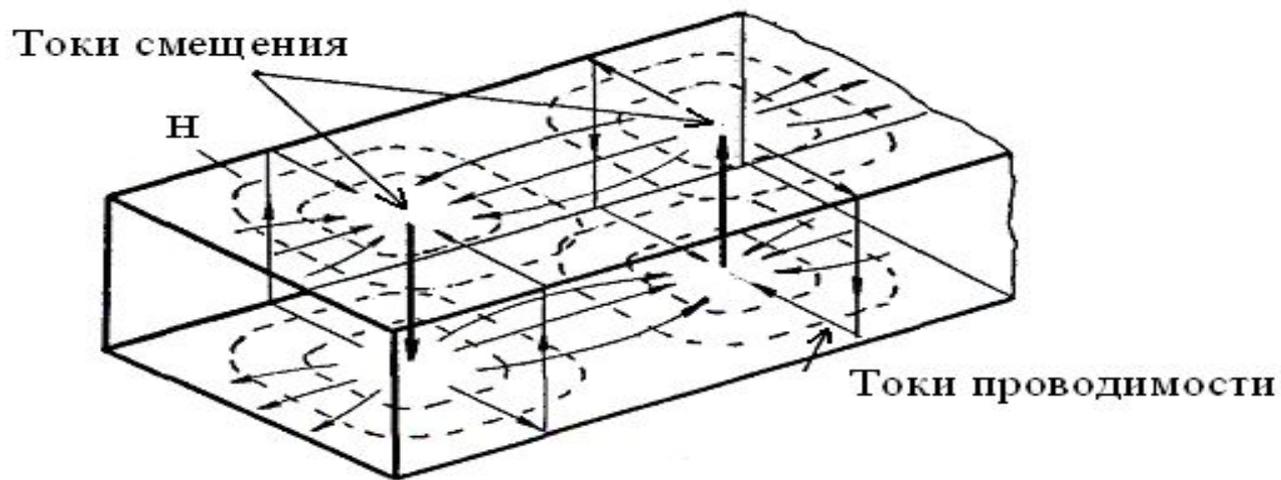
Процесс распространения волн в прямоугольном волноводе



Отражение волны вдоль стенок волновода

Распространяющиеся в волноводе электромагнитные волны являются волнами, бегущими вдоль оси волновода (оси Z) и стоячими в двух остальных направлениях. Стоячие волны в направлениях X и Y образуются вследствие многократных отражений волн от стенок волновода. Энергия электромагнитного поля в волноводе может быть разделена на два вида:

1. активную энергию, переносимую вдоль оси Z (рис.2);
2. реактивную (запасенную) энергию, связанную с образованием поперечных стоячих волн вдоль осей X и Y .

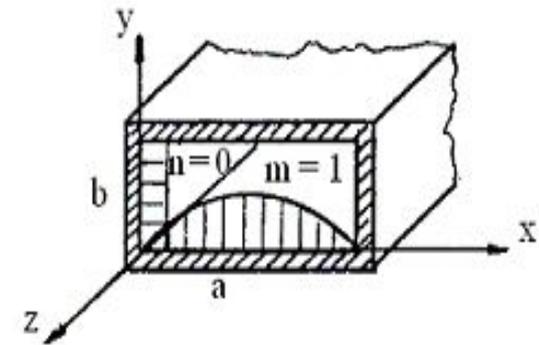


Физический смысл отражения волн от проводника заключается в том, что падающая волна создает в поверхностном слое проводника токи, которые, в свою очередь, дают излучение новых электромагнитных волн, т.е. отраженных волн.

Если проводник идеальный, то возникшие токи совершенно не расходуют энергию на его нагрев и энергия отраженной волны равна энергии падающей волны. Практически каждый проводник не является идеальным, в нем происходит некоторая потеря энергии на нагревание, и энергия у отраженной волны всегда несколько меньше, чем у падающей.

В волноводе может существовать бесконечно большое число волн как типа H_{mn} , так и типа E_{mn} , отличающихся друг от друга структурой поля. Это различие отмечается в названии волны индексами m и n , которые ставятся около названия волны: H_{mn} и E_{mn} , где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

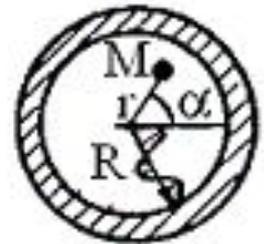
$n = 0, 1, 2, 3$.



В прямоугольных волноводах эти индексы указывают:

m - число стоячих полуволн поля, укладываемых вдоль большего поперечного размера волновода "**a**",
индекс **n** - число стоячих полуволн вдоль меньшего поперечного размера волновода "**b**".

В круглом волноводе индекс **m** показывает число стоячих полуволн поля, укладываемых вдоль окружности поперечного сечения волновода, а индекс **n** - число переходов поля через нулевые значения вдоль радиуса **r** волновода, не считая нулевого значения при $r = 0$.



Индекс, равный нулю означает, что поле вдоль соответствующего размера не меняется по величине.

3. Режимы работы в волноводах

Волновод, возбуждаемый частотой ω , может находиться относительно каждого типа волны в одном из трех режимов:

- докритическом;
- критическом;
- закритическом.

Режим определяется соотношением частоты возбуждения (частоты генератора) ω и так называемой критической частоты $\omega_{\text{кр}}$ данного типа волны. Так как электромагнитные волны распространяются в волноводе за счет многократного переотражения, это приводит к дисперсии, т.е. зависимость фазовой и групповой скоростей от частоты возбуждения. В свою очередь, наличие дисперсии приводит к существованию в волноводе **критической частоты**.

$$\omega_{\text{кр}} = v_0 \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2},$$

$$v_0 = 1/\sqrt{\epsilon_a \mu_a} = c/\sqrt{\epsilon \mu} \quad - \text{ скорость света в данном диэлектрике}$$

Как видно из (1), число критических частот бесконечно, а каждая из них зависит от поперечных размеров волновода "a" и "b", от параметров диэлектрика (ϵ_a и μ_a) и, конечно, от типа волны (значений индексов **m** и **n**). Иногда вместо критической частоты вводится понятие **критической длины волны**, которая связана с критической частотой через скорость света в данном диэлектрике

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{v_0}{K_{\text{кр}}} = \frac{2a}{\epsilon_{\text{кр}} \mu_{\text{кр}} \sqrt{f_a^2}} = \frac{2a}{\epsilon_{\text{кр}} \mu_{\text{кр}} \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}}$$

Основной волной называют в волноводе ту волну, у которой критическая длина волны ($\lambda_{\text{кр}}$) самая большая по сравнению с критическими длинами волн других типов. В прямоугольном волноводе основной волной является волна H_{10} ($\lambda_{\text{кр}} = 2a$). Критическая длина волны совпадает с длиной волны генератора, возбуждающей волновод в критическом режиме, только при воздушном заполнении, когда $v_0 = c$.

Докритический режим (основной режим)

Если $\omega > \omega_{кр}$ (частота возбуждения выше критической частоты) для данного типа волны, то режим называется докритическим.

В докритическом режиме поперечные поля E_x, E_y, H_x, H_y - в прямоугольном и - в круглом волноводах) синфазны ($\varphi_E - \varphi_H = 0$) во времени (см. таб.1) и **вектор Пойнтинга усредненный за период отличен от нуля и максимален.**

$$\bar{p}_{ср} = \frac{1}{2} \cdot [E_{\perp} H_{\perp}] \cdot \cos(\varphi_E - \varphi_H)$$

Следовательно, в докритическом режиме в волноводе возможно распространение энергии электромагнитной волны. Энергия и фаза волны распространяются вдоль волновода с конечными скоростями

Критический режим

Если $\omega = \omega_{кр}$ для данного типа волновода, то режим называется критическим. Поэтому, поле носит реактивный характер, и передача энергии вдоль волновода отсутствует: **вектор Пойнтинга** и скорость движения энергии поля **равны нулю**

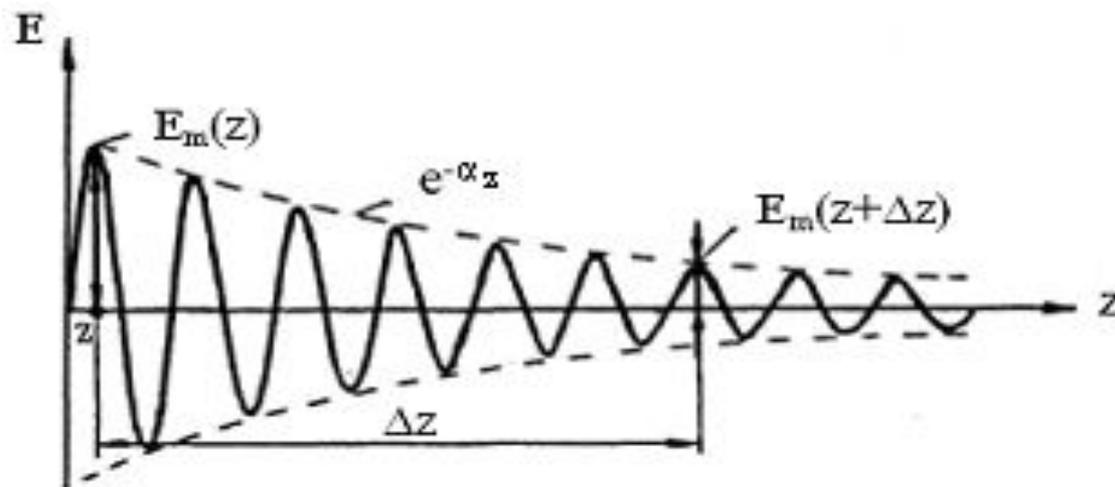


Зависимость длины волны в волноводе , фазовой и групповой скоростей от частоты возбуждения

Закритический режим

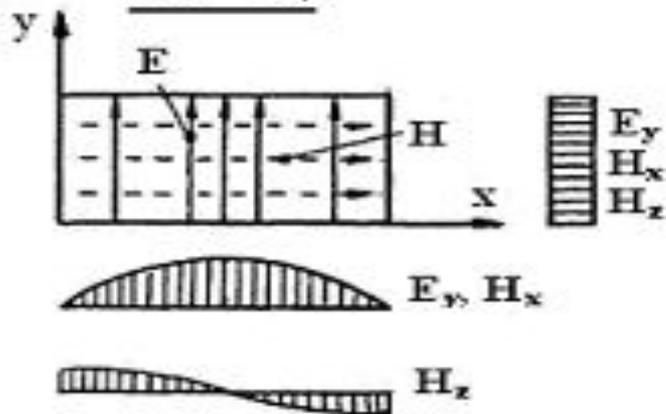
Если $\omega < \omega_{кр}$ для данного типа волновода, то режим называется закритическим.

В отличие от критического режима амплитуда поля вдоль волновода неодинакова и меняется, убывая по экспоненциальному закону. Это убывание поля имеет место даже тогда, когда потери в стенках и диэлектрике отсутствуют, т.е. $\alpha=0$. Этим оно обязано интерференционным явлениям, а не потерям. Естественно, что при мнимом коэффициенте фазы понятия длины волны в волноводе и фазовой скорости теряют смысл.



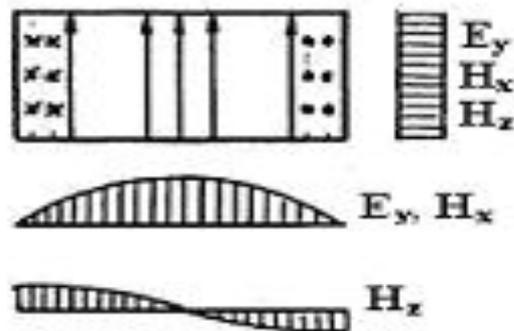
Докритический режим

$$\omega_1 > \omega_{\text{кр}}$$



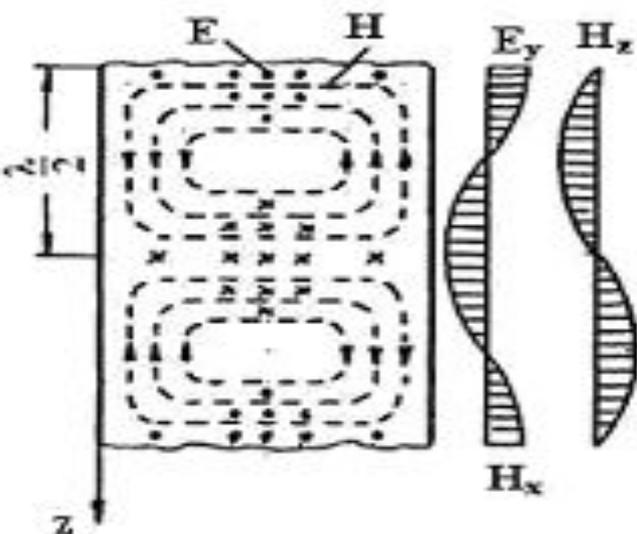
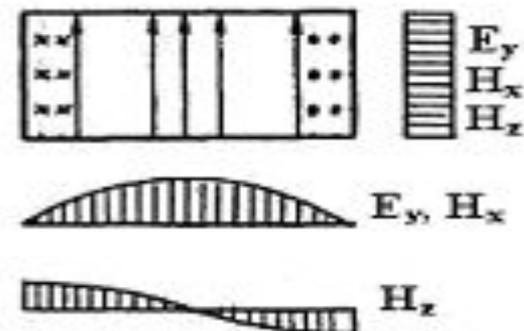
Критический режим

$$\omega_2 = \omega_{\text{кр}}$$

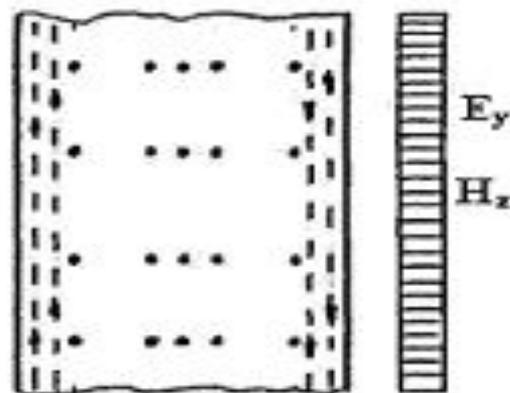


Закритический режим

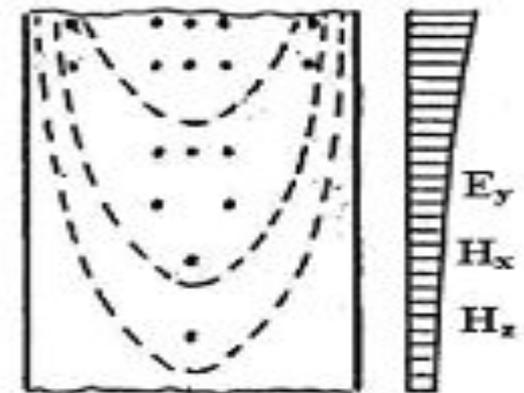
$$\omega_3 < \omega_{\text{кр}}$$



а)



б)



в)

Структура поля волны в прямоугольном волноводе в трех режимах: а - докритическом; б- критическом; в- закритическом



Рассматриваемые вопросы

1. Распространение мириаметровых, километровых и гектометровых волн
2. Распространение дециметровых и метровых волн.
3. Распространение сантиметровых и миллиметровых волн.

1. Распространение мириаметровых, километровых и гектометровых волн

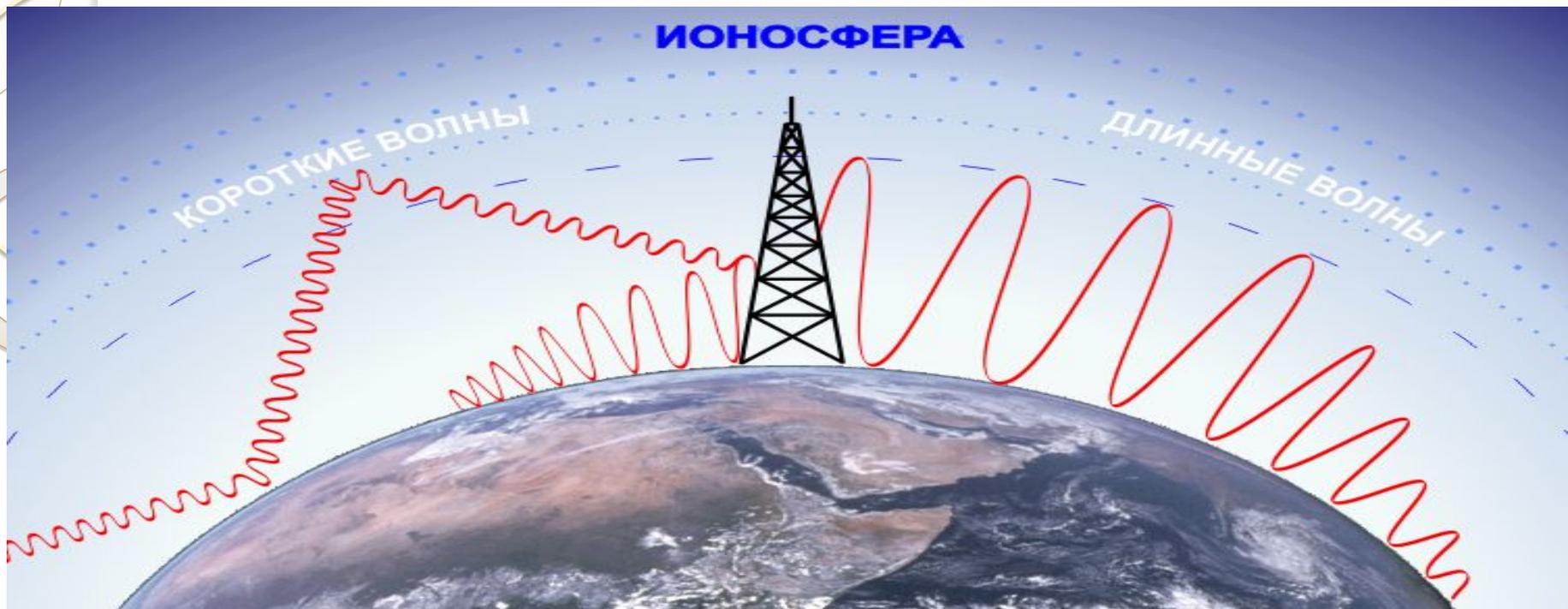
Распространение мириаметровых, километровые

Наименование диапазона волн	упрощенная классификация	Граница диапазона, м	Граница диапазона, Гц
Мириаметровые	сверхдлинные волны (СДВ)	$10^5 - 10^4$	$3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$
Километровые	длинные волны (ДВ)	$10^4 - 10^3$	$3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$

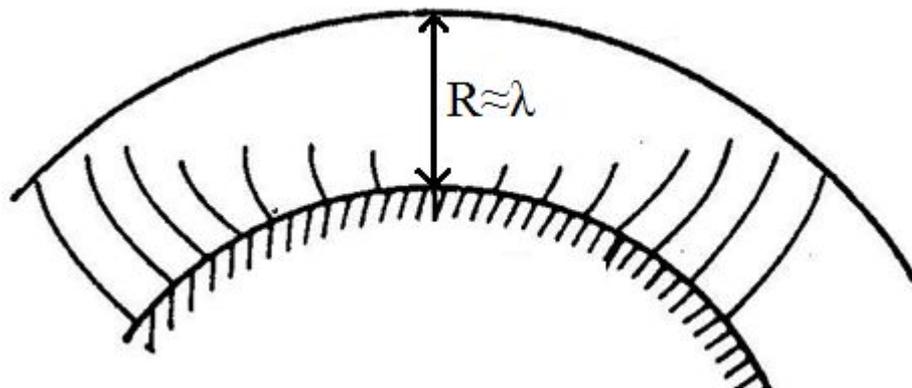
Радиотехнические средства работающие в СДВ, ДВ диапазонах:

- радиотехнические системы дальней навигации;
- системы связи (радиотелеграфная);
- наблюдения за грозами.

Для диапазонов СДВ и ДВ для всех видов земной поверхности (незначительное проникновение энергии в глубь Земли). ДВ способствует хорошему огибанию земного шара благодаря дифракции. Незначительные потери и огибание земной поверхности обусловили возможность ДВ и СДВ распространяться земной волной на расстояние до 3 тыс км.



Начиная с расстояния 300—400 км помимо земной волны присутствует волна, отраженная от ионосферы (для ДВ). С увеличением расстояния напряженность электрического поля отраженной от ионосферы волны увеличивается, и на расстояниях 700—1000 км поля земной и ионосферной волн становятся примерно равными. Суперпозиция этих двух волн дает **интерференционную картину поля.**



Распространение ДВ и СДВ в волноводе Земля – ионосфера

Для волновода, образованного Землей и ионосферой, оптимальными являются волны длиной 25—35 км, а критической — волна длиной 100 км

Длинные и особенно сверхдлинные волны мало поглощаются при прохождении в толщу суши или моря. Так, волны длиной 20—30 км могут проникать в глубину моря на несколько десятков метров и, следовательно, могут быть использованы для связи с погруженными подводными лодками, а также для подземной радиосвязи.



Основным преимуществами ДВ:

-большая устойчивость напряженности электрического поля, сила сигнала мало меняется в течение суток и в течение года и не подвержена случайным изменениям

-независимость интенсивности поля СДВ от высоты над земной поверхностью, т. е. данные волны могут приниматься на всех высотах полета ВС;

-слабое затухание СДВ в процессе распространения, что позволяет принимать их на расстояниях до 8-10 тыс. км от передающей станции;

-фазовая скорость СДВ в атмосферном волноводе превышает скорость света в вакууме, что связано с особенностями волноводного распространения.

Недостатком диапазонов ДВ и СДВ:

-невозможность применения их для передачи высококачественной разговорной речи или музыки и тем более изображений, так как для этого необходима широкая полоса частот;

-основным источником помех являются грозы, возникающие во время грозового разряда, распространяются подобно волнам соответствующих диапазонов.

Распространение гектометровых волн

Наименование диапазона волн	упрощенная классификация	Граница диапазона, м	Граница диапазона, Гц
Гектометровые	средние волны (СВ)	$10^3 - 10^2$	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$

Радиотехнические средства работающие в СВ диапазоне:
-радионавигации (автоматический радиокompас АРК);
-Устройства радиотелеграфной и радиотелефонной связи.

СВ испытывают значительное поглощение в полупроводящей поверхности Земли, поэтому дальность распространения земной волны ограничена расстоянием 1000 км.



Особенности распространения:

- способность проникать в область радиотени;
- возможность приема поверхностных волн на всех высотах полета ВС;
- высокая стабильность направления распространения поверхностных волн в горизонтальной плоскости;
- низкая стабильность скорости распространения поверхностных волн из-за влияния электрических свойств подстилающей поверхности вдоль трассы распространения;
- зависимость скорости распространения и глубины проникновения пространственной волны в ионосферу от состояния ионосферных слоев
- сезонное влияние ионосферы (в зимнее время влияние меньше).

Распространение декаметровых волн

Наименование диапазона волн	упрощенная классификация	Граница диапазона, м	Граница диапазона, Гц
декаметровые	Короткие волны (КВ)	$10^2 - 10$	$3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$

Достоинство: направленные антенны, по сравнению при работе в длинных волнах

Радиотехнические средства работающие в КВ диапазоне:

-Устройства радиотелеграфной и радиотелефонной связи (дальняя связь).

Волны КВ диапазона распространяются земной волной на расстояние не более 100 км (сильное поглощение в земной поверхности и плохих условий дифракции). Ионосферной волной КВ распространяются на многие тысячи километров. При этом можно применять направленные антенны и передатчики не очень большой мощности.

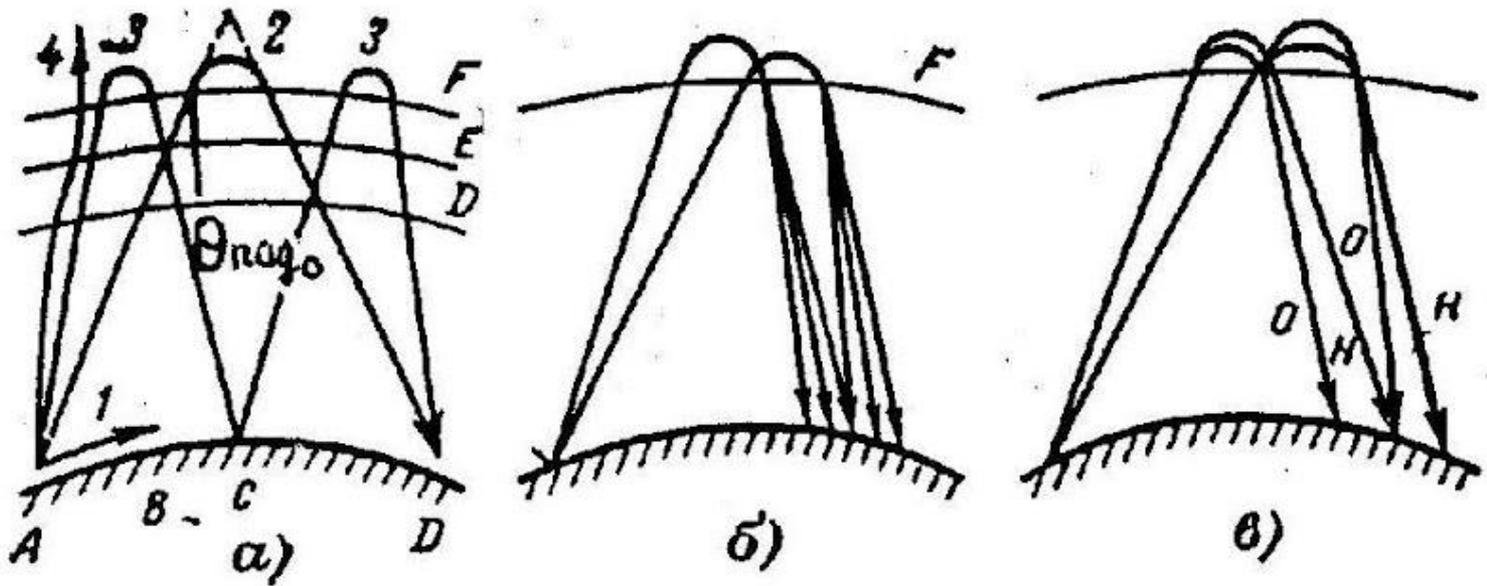


Схема распространения КВ на большие расстояния:

а– интерференция волн, отраженных однократно и двукратно от ионосферы: 1 – поверхностная волна; 2 – волна, распространяющаяся путём одного отражения от ионосферы; 3 – волна, распространяющаяся путём двух отражений от ионосферы; 4 – волна, рабочая частота которой больше максимально допустимой; б – интерференция рассеянных волн; в – интерференция магниторасщеплённых составляющих волн

Для борьбы с замираниями применяется прием на разнесенные антенны.

Для осуществления радиосвязи на КВ должны быть выполнены два условия:

- волны должны отражаться от ионосферы ;
- напряженность электромагнитного поля в данном месте должна быть достаточной для приема, т. е. поглощение волны в слоях ионосферы не должно быть слишком большим.

Изменение электронной плотности ионосферы в течение суток и в течение года приводит, к изменению границы рабочего диапазона, соответственно это приводит к необходимости изменения рабочей длины волны в течение суток: днем работают на волнах 10—25 м, а ночью на волнах 35—100 м.

При благоприятных условиях распространения КВ могут огибать земной шар один и несколько раз. Тогда помимо основного сигнала может быть принят второй сигнал, запаздывающий примерно на 0,1 с и называемый радиоэхо. Радиоэхо оказывает мешающее действие на линиях меридионального направления.

Недостатки КВ :

- Нарушения связи(явления ионосферно-магнитных бурь в приполярных районах , разрушение слоя F);
- внезапные поглощения (наблюдаются только на освещенной части земного шара), которые длятся от нескольких минут до нескольких часов.

Часто оба вида нарушений связи возникают одновременно.

Распространение УКВ метровых, дециметровых, сантиметровых, миллиметровых волн

Наименование диапазона волн	упрощенная классификация	Граница диапазона, м	Граница диапазона, Гц
ультракороткие	УКВ	10 – 1мм	$3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^{11}$

Диапазон УКВ делится на поддиапазоны метровых, дециметровых, сантиметровых, миллиметровых волн, каждый из которых имеет свои особенности распространения, но основные положения свойственны всему диапазону УКВ

В УКВ-диапазоне работают радиовысотомеры, доплеровские измерители скорости и угла сноса, спутниковые радионавигационные системы, угломерно-дальномерные системы ближней навигации, радиотехнические системы посадки, радиопеленгаторы, системы связи, радиолокационные станции, спутниковые системы связи.



Особенности распространения радиоволн УКВ-диапазона:

- прямолинейность траекторий распространения в однородных средах;
- высокая стабильность скорости и направления распространения;
- способность проникать сквозь слои ионосферы;
- распространение в пределах дальности прямой видимости;
- тропосферная и ионосферная рефракция;
- неспособность проходить через естественные или искусственные препятствия на земной поверхности (здания, горы и т.п.)
- необходимо учитывать сферичность земли при $R > r_0$.

Влияние атмосферы на распространение УКВ (ДМВ,СМВ) радиоволн

Поскольку ДМВ и СМВ проходят сквозь ионосферу практически без потерь, то они используются в космической связи как прямые волны. Волны дециметрового диапазона при распространении в тропосфере не испытывают ни молекулярного поглощения, ни поглощения в гидрометеорах. Поглощение сантиметровых волн в гидрометеорах становится заметным при длине волны меньше 5 см. а в парах воды - только на волне 1.35 см. Из-за неоднородности радиофизических свойств тропосферы, при распространении дециметровых и сантиметровых волн наблюдаются все виды рефракции (искривление траектории движения волны).

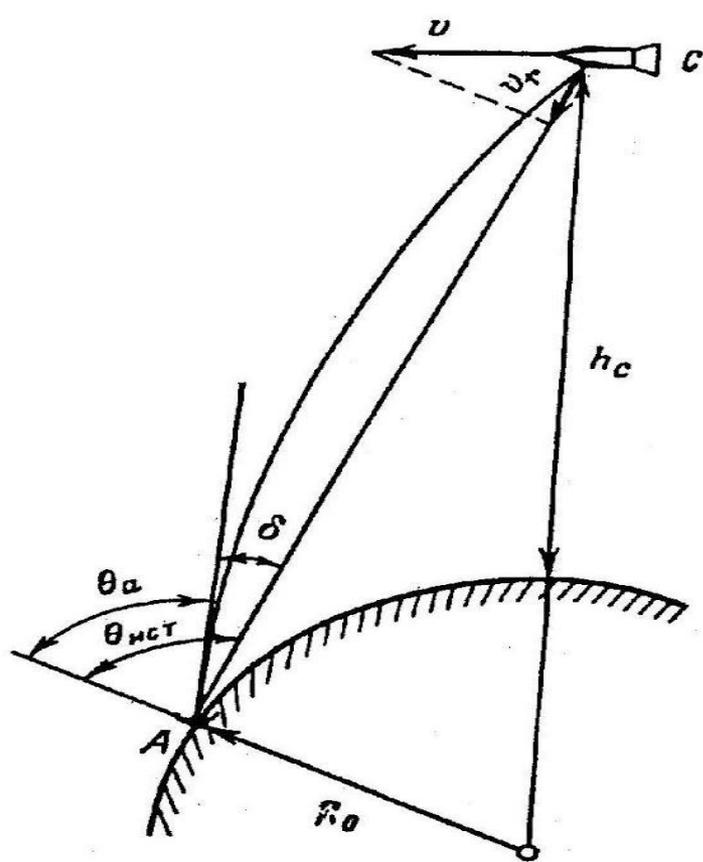


Схема радиолинии Земля - космос:
 A – наземная антенна; C - спутник

Разница в значениях принятой и переданной частот f_D называется доплеровским смещением частоты:

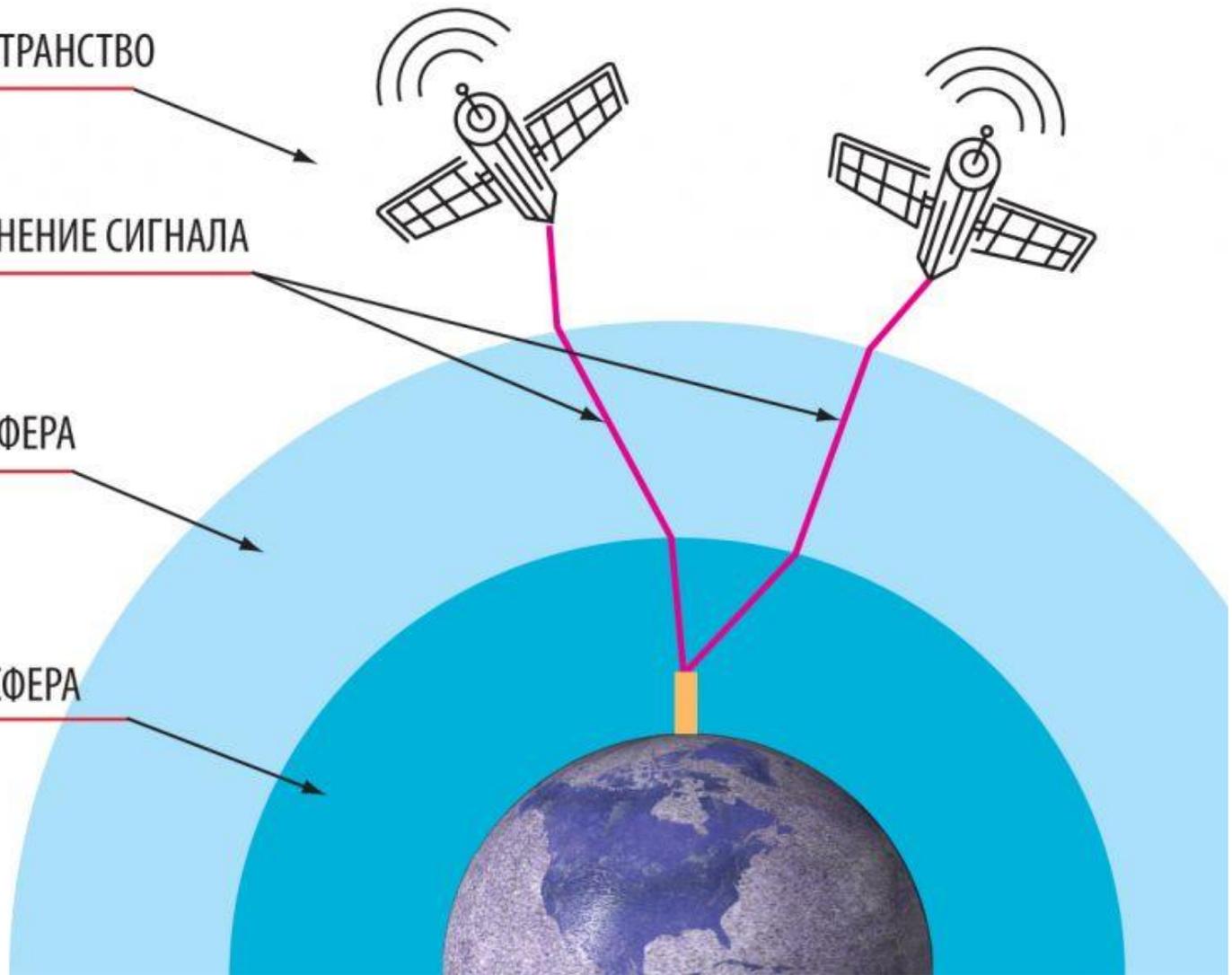
$$\Delta f_D = f_D - f = \sqrt{\frac{v_r}{c}}$$

БЕЗВОЗДУШНОЕ ПРОСТРАНСТВО

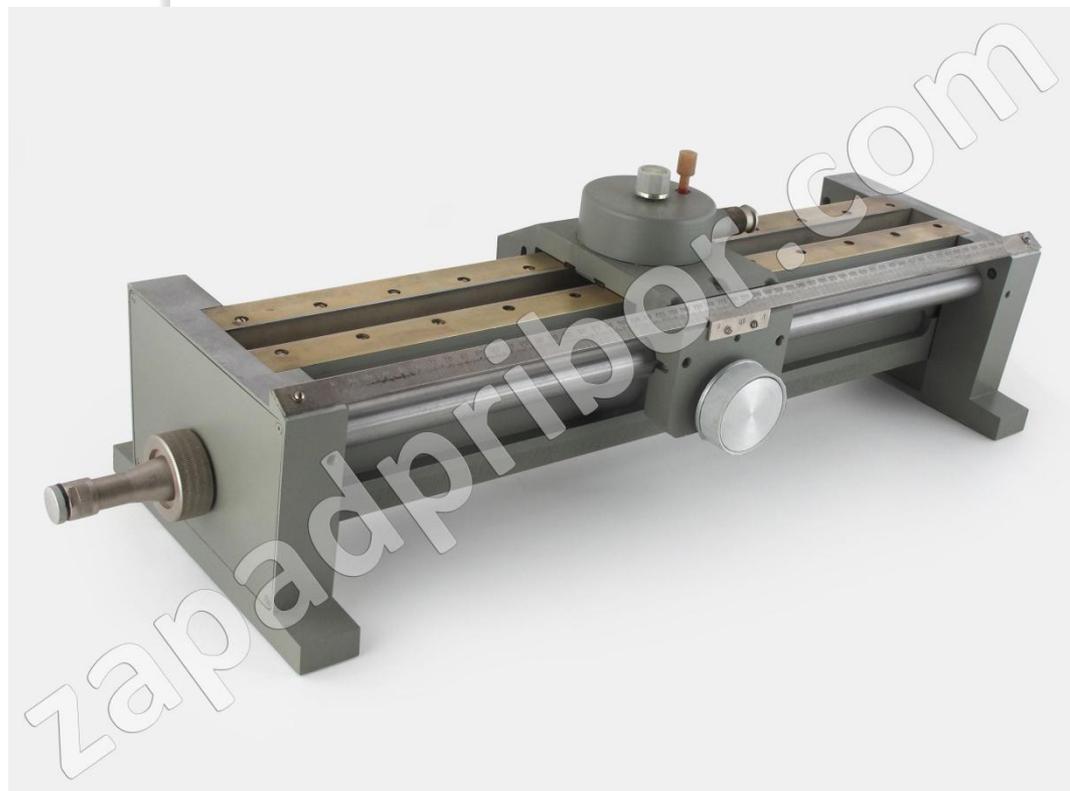
РАСПРОСТРАНЕНИЕ СИГНАЛА

ИОНОСФЕРА

ТРОПОСФЕРА

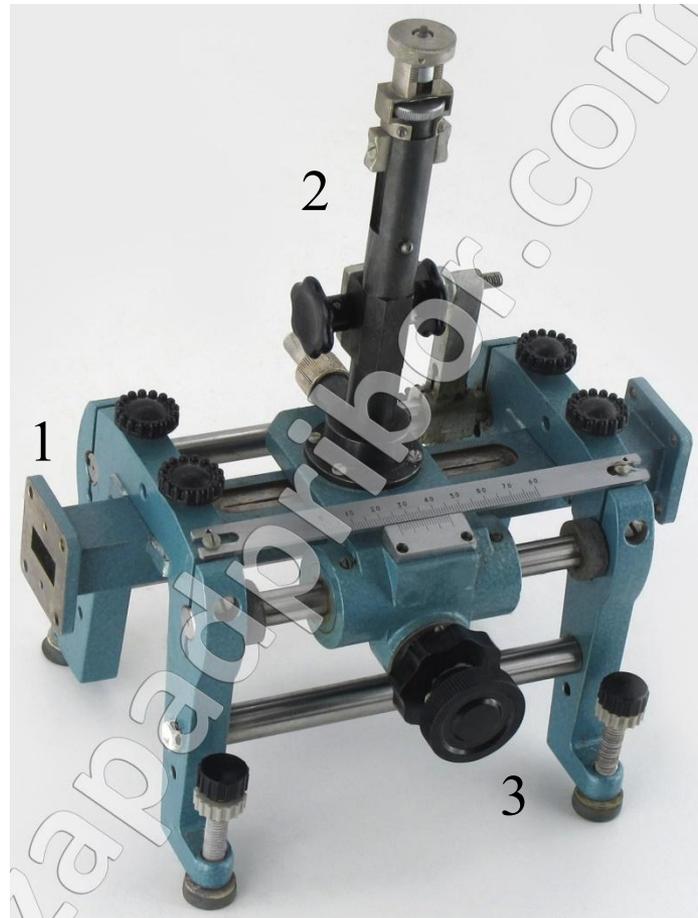


Измерительная линия — устройство для исследования распределения электрического поля вдоль СВЧ-линии передачи. Представляет собой отрезок волновода с перемещающимся вдоль него индикатором, отмечающим узлы (пучности) электрического поля.



Линия состоит из трёх основных узлов:

1. отрезка передающей линии с продольной узкой щелью,
2. зондовой головки и
3. каретки с механизмом для перемещения зондовой головки вдоль линии.





Зондовая головка представляет собой резонатор, возбуждаемый зондом — тонкой проволокой, погружённой через щель во внутреннюю полость волновода. Внутри резонатора помещён полупроводниковый детектор, связанный с индикаторным прибором. При перемещении зонда вдоль линии, внутри которой имеется электромагнитное поле, в зонде наводится электродвижущая сила, пропорциональная напряжённости поля в сечении расположения зонда. Эта э. д. с. возбуждает резонатор, создавая в нём электромагнитные колебания. Для уменьшения искажающего действия зонда на электромагнитное поле в линии и повышения чувствительности линии объёмный резонатор зондовой головки настраивают в резонанс с частотой электромагнитных колебаний.



Big
Thank
You!