16 Волны

16.1 Основные понятия

В данной главе изучим механические и электромагнитные волны. Закономерности, относящиеся к механическим и электромагнитным волнам, одинаковые, поэтому свойства волн и основные понятия изучим на примере механических волн.

Что такое волна или волновой процесс? Самый простой пример волны это волна на поверхности воды. Если бросить камень в воду, то мы увидим, как от места падения камня расходятся концентрические круги. При этом если на поверхности воды есть плавающие тела, например, поплавок, то когда волна дойдет до поплавка, он начнет совершать колебательные движения. Из этого простого примера можно увидеть, что из себя представляет волна.

Def. Волной называется распространение в пространстве колебаний вещества или поля. Колебания вещества порождают упругую волну, колебания напряженности и индукции электромагнитного поля - электромагнитную волну.

Далее пока будем рассматривать механические волны. **NB!**

Как образуется механическая волна? Рассмотрим пример с волной на поверхности воды.

Образование механической волны объясняется наличием силовых связей между частицами. Т.к. частицы обладают инертной массой, то они приходят в колебание с некоторым запаздыванием. Каждая последующая частица вступает в процесс с запаздыванием по фазе. Следовательно, волна в любой материальной среде распространяется не мгновенно, а с некоторой конечной скоростью.

16.1.1 Характеристики волн

Скорость распространения

Опыт показывает, что скорость распространения упругой волны волны зависит от агрегатного состояния вещества. От чего при этом будет зависеть скорость волны в данном агрегатном состоянии?

$$v_{\text{ТТ}} = f(\text{плотность}, \text{модуль Юнга})$$

В твердых телах скорость будет определяться плотностью: чем больше плотность, тем ближе расположены молекулы, тем быстрее будет происходить изменение в межмолекулярных силах. И скорость будет зависеть от упругих свойств среды, которые описываются модулем Юнга.

$$v_{\text{Газ}} = f(\text{температура}, \text{молярная масса})$$

В газе, где взаимодействие молекул мало, скорость будет определяться температурой, т.е. средней квадратичной скоростью движения молекул и молярной массой, т.е. в итоге массой молекул. Чем больше температура, тем больше скорость распространения волны, чем больше молярная масса, тем меньше скорость распространения волны.

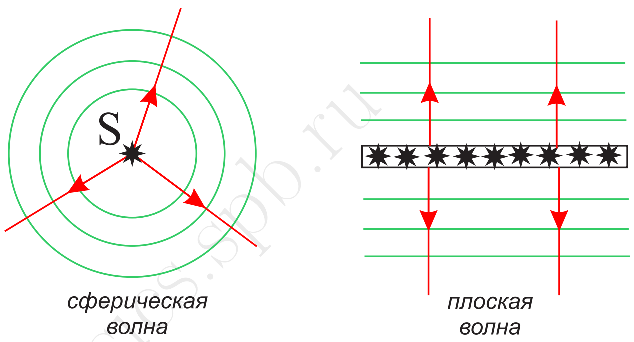
Фронт волны.

Def. Фронт волны это множество точек колеблющихся одинаково, т.е. в одной фазе.

Как можно разделить волны по виду волнового фронта?

Волны по виду волнового фронта делятся на плоские и сферические.

Сферические волны обычно порождают точечные источники, при условии однородности среды, в которой происходит распространение волны. А плоскую волну порождает либо протяженный источник, либо точечный, если мы находимся от него на очень большом расстоянии.

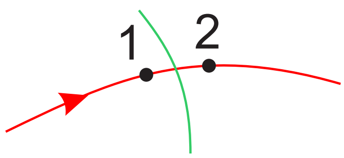


Луч

Def. Луч - линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением распространения волны.

В однородной среде лучом будет прямая, как в случае плоской волны, так и в случае сферической.

Несложно заметить, что *луч будет всегда перпендикулярен фронту волны.*



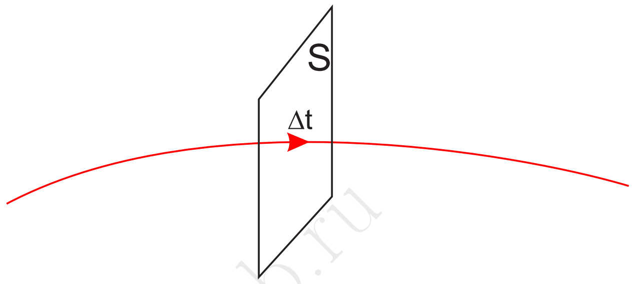
Для любых двух точек, находящихся на луче, разность фаз будет отлична от нуля.

Плотность потока энергии

В опыте с волной на поверхности воды и поплавком можно заметить, что при распространении волны поплавок не увлекается волной, а совершает колебания приблизительно в том месте, в котором он находился.

Таким образом

St. *При распространении волны не происходит переноса вещества, а происходит перенос энергии.*



Пусть волна переносит через перпендикулярную площадку S за время Δt энергию величиной ΔE, тогда для того, чтобы описать этот перенос энергии , вводится понятие *плотности потока энергии.*

$$\boxed{I = \frac{\Delta E}{S\Delta t}}$$

Def. Плотность потока энергии показывает, какая энергия проходит через единичное поперечное сечение за единицу времени.

Размерность плотности потока энергии

$$[I] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot c} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Для сферической волны: $I = \frac{E}{4\pi r^2 \Delta t}$

Можно заметить, что для сферической волны плотность потока энергии убывает с удалением от источника, поэтому на поверхности воды чем дальше от места падения камня, тем меньше амплитуда колебаний. А для плоской волны, поскольку площадь фронта волны не меняется(без учета краевых эффектов), то и плотность потока энергии остается постоянной.

16.1.2 Классификация волн

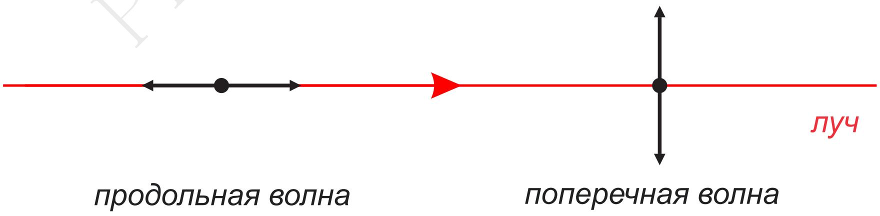
По среде: упругие - в веществе, электромагнитные, гравитационные - в поле.
По форме фронта - плоские, сферические
По воздействию на человеческие органы чувств:

1. в среде
   - ν<20 Гц - инфразвук
   - 20 Гц<ν<20000 Гц - звук
   - ν>20000 Гц - ультразвук
2. в поле
   - $\nu < 4 \cdot 10^{14}$ Гц - инфракрасные волны
   - $4 \cdot 10^{14}$ Гц< $\nu < 8 \cdot 10^{14}$ Гц - видимый свет
   - $\nu > 8 \cdot 10^{14}$ Гц - ультрафиолетовые волны

По характеру колебаний относительно луча:

1. Поперечные - частицы колеблются перпендикулярно лучу;
2. Продольные - частицы колеблются вдоль луча.

   (Видеоэксперимент)



Жидкости и газы обладают только объемной упругостью, поэтому в них в объеме могут возникать только продольные волны (звук - продольная волна).

Твердые тела и поверхность жидкости (не в критическом состоянии) обладают не только объемной упругостью, но и упругостью формы, поэтому в них возможны как продольные, так и поперечные волны.

Пример: Земная кора $v_{\text{прод}} = 10$ км/с, $v_{\text{попереч}} = 4,5$ км/с.

Для всех волн характерны - интерференция, дифракция и для поперечных - поляризация.

16.2 Механизм образования волн

16.2.1 Механизм образования поперечной волны

Рассмотрим механизм образования поперечной волны. Для этого возьмем девять частиц на равном расстоянии. Будем считать, что первая в начальный момент времени $t = 0$ приобретает скорость, направленную вертикально вверх.

Т.к. изначально она находится в положении равновесия, уравнение ее гармонических колебаний будет выглядеть следующим образом

$$x_1(t) = x_m \sin \omega t$$

Все остальные частицы вступят в колебания с задержкой по времени, т.к. на то, чтобы до них дошла волна, потребуется некоторое время.

Поскольку частиц девять, они на равном расстоянии и мы хотим, чтобы на этих частицах уложилась целая волна, следовательно, первая и девятая частица должны совершать колебания с запаздыванием по фазе в 2π. Тогда разность фаз между любыми соседними частицами будет

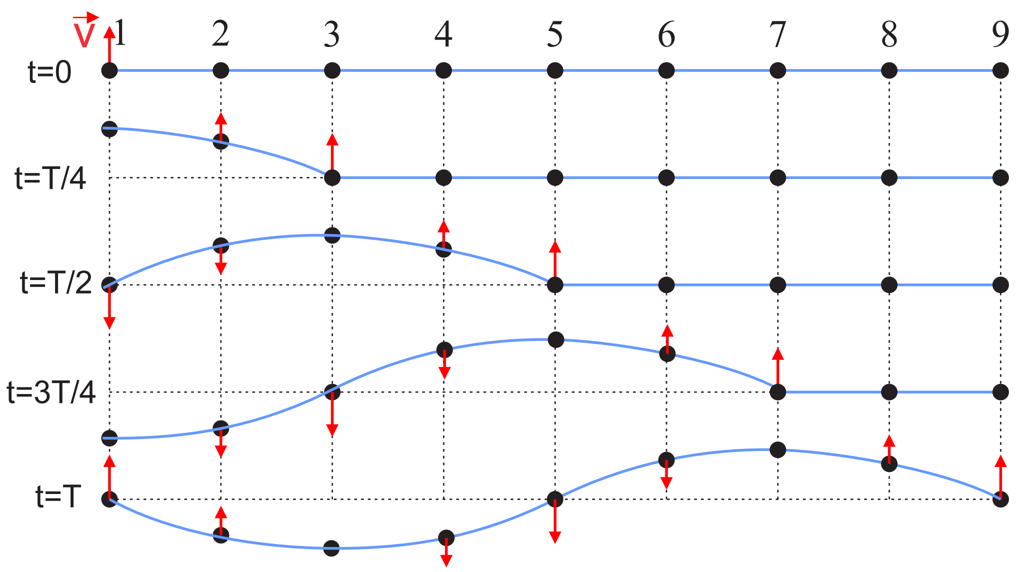
$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_2 - \varphi_3 = ... = \varphi_8 - \varphi_9 = \frac{2\pi}{8} = \frac{\pi}{4}$$

Тогда уравнения колебаний частиц с номером два и далее будут выглядеть следующим образом

$$x_2(t) = x_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{4})$$

$$x_3(t) = x_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{4})$$

$$x_4(t) = x_m \sin(\omega t - \frac{3\pi}{4})$$



Для примера посчитаем состояние частицы №2 в момент времени $t = \frac{T}{2}$.

$$x_2(\frac{T}{2}) = x_m \sin(\omega\frac{T}{2} - \frac{\pi}{4}) = x_m \sin(\frac{2\pi}{T}\frac{T}{2} - \frac{\pi}{4}) = x_m \sin(\pi - \frac{\pi}{4}) = x_m \sin\frac{3\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2}x_m$$

На диаграмме видим, что частица №4 смещена вверх, но не до максимального положения. Найдем теперь скорость и ускорение частицы.

$$v_2(t) = x_2'(t) = \omega x_m \cos(\omega t - \frac{\pi}{4})$$

$$a_2(t) = v_2'(t) = -\omega^2 x_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{4})$$

Подставив в эти уравнения $t = \frac{T}{2}$, получим

$$v_2(\frac{T}{2}) = \omega x_m \cos(\frac{2\pi}{T}\frac{T}{2} - \frac{\pi}{4}) = \omega x_m \cos(\pi - \frac{\pi}{4}) = \omega x_m \cos(\frac{3\pi}{4}) = -\frac{\sqrt{2}}{2}\omega x_m = -\frac{\sqrt{2}}{2}v_m$$

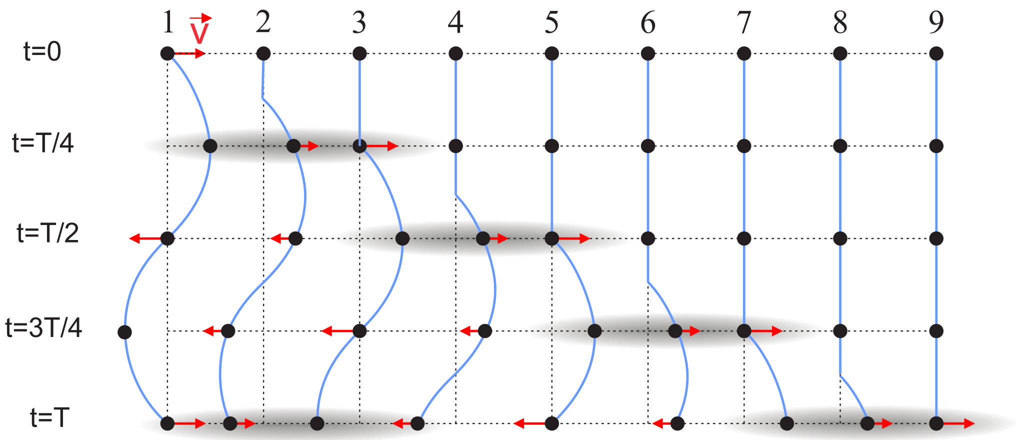
$$a_2(\frac{T}{2}) = -\omega^2 x_m \sin(\frac{2\pi}{T}\frac{T}{2} - \frac{\pi}{4}) = -\omega^2 x_m \sin(\pi - \frac{\pi}{4}) = -\omega^2 x_m \sin(\frac{3\pi}{4}) = -\frac{\sqrt{2}}{2}\omega^2 x_m = -\frac{\sqrt{2}}{2}a_m$$

Данные значения скорости и ускорения соответствуют диаграмме. Действуя аналогично, можно посчитать кинематические характеристики для любой частицы с любым сдвигом фаз.

Стоит отметить, что на диаграмме было взято девять частиц только из соображения удобства, чтобы сдвиг фаз между соседними частицами был $\pi/4$. Если частиц было бы меньше то диаграмма механизма образования волны была бы недостаточной (не наглядной), а если бы больше, то перегруженной.

16.2.2 Механизм образования продольной волны

Посмотрим теперь на продольную волну. Аналогично можно построить механизм для продольной волны.



В продольной волне частицы смещаются вдоль луча, в результате продольную волну можно представить, как чередование областей повышенной и пониженной плотности.

Используя уравнение колебаний с учетом отставания по фазе можно рассчитать положение любой частицы в любой момент времени. NB!

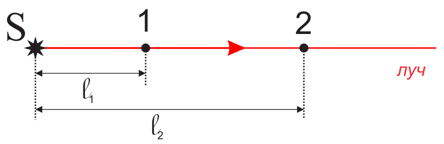
16.3 Длина волны

Определим еще одну характеристику волны - длину волны. Можно дать два определения.

Def. Длиной волны называется расстояние которое проходит волна за период колебаний источника.

$$\boxed{\lambda = v \cdot T}$$

Def. Длина волны – это кратчайшее расстояние между частицами, находящимися на одном луче и совершающими колебания со сдвигом фаз в 2π.



Рассмотрим две точки, находящиеся на расстоянии l_1 и l_2 от источника. В первую точку волна придет через время $t_1 = \frac{l_1}{v}$, во вторую через время $t_2 = \frac{l_2}{v}$. Следовательно, в точке 2 колебания возникнут позже, чем в точке 1 на время

$$\Delta t = \frac{l_2 - l_1}{v}$$

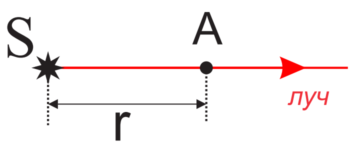
Соответственно, разность фаз колебаний будет

$$\Delta\varphi = \omega\Delta t = \frac{\omega(l_2 - l_1)}{v} = \frac{2\pi(l_2 - l_1)}{vT}$$

Из это формулы видно, что $l_2 - l_1$ будет равно $\lambda = vT$, если $\Delta\varphi = 2\pi$. Обратное тоже справедливо. Таким образом, два определения длины волны эквивалентны.

16.4 Уравнение плоской волны

Рассмотрим плоскую волну. Основное отличие плоской волны от сферической – это отсутствие затухания, т.к. площадь фронта волны не меняется. При распространении волны в пространстве смещение частиц будет зависеть от двух величин: от времени от начала наблюдения(начала колебаний источника) и от расстояния до источника.



Пусть источник колеблется согласно уравнению:

$$x(t) = x_m \cos(\omega t + \varphi_0)$$

Рассмотрим точку A на расстоянии r от источника:

Колебания точки будет запаздывать на некоторую фазу $\Delta\varphi$, но известно, что если $r = \lambda \quad \Rightarrow \quad \Delta\varphi = 2\pi$. Составим пропорцию.

$$\begin{matrix} \lambda - 2\pi \\ r - \Delta\varphi \end{matrix} \quad \Rightarrow \quad \Delta\varphi = 2\pi\frac{r}{\lambda}$$

В результате получим уравнение плоской волны.

$$\boxed{x_A(t,r) = x_m\cos(\omega t + \varphi_0 - 2\pi\frac{r}{\lambda})}$$

Здесь смещение – это функция двух переменных: времени и расстояния до источника. «Минус» перед $2\pi\frac{r}{\lambda}$ означает, что в точку A колебания приходят с запаздыванием относительно источника.

Уравнение волны в дифференциальной форме.

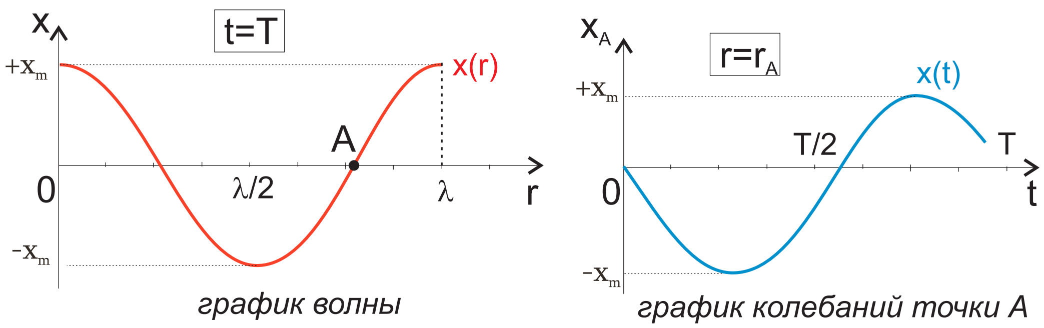
Если взять вторую частную производную по времени от уравнения плоской волны и вторую частную производную по расстоянию, то можно заметить, что эти функции связаны друг с другом уравнением, очень похожим на одно из уравнений Максвелла, описывающее распространение электромагнитных волн в одномерном случае.

$$\begin{matrix} \frac{\partial^2 x(t,r)}{\partial t^2} = -\omega^2 x_m\cos(\omega t + \varphi_0 - \frac{\omega r}{v}) \\ \frac{\partial^2 x(t,r)}{\partial r^2} = -\frac{\omega^2}{v^2} x_m\cos(\omega t + \varphi_0 - \frac{\omega r}{v}) \end{matrix} \Rightarrow \boxed{\frac{\partial^2 x(t,r)}{\partial r^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 x(t,r)}{\partial t^2}}$$

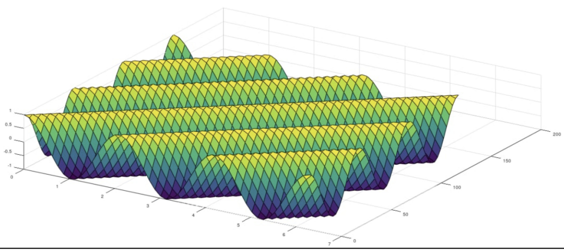
16.5 Графическое описание волн

Из уравнения плоской волны вытекает два графических способа описать волну. В первом случае можно зафиксировать расстояние до источника и построить график $x(t)$, который будет описывать смещения точки, находящейся на определенном расстоянии от источника в зависимости от времени.

Второй способ, это зафиксировать время и построить график $x(r)$, который будет показывать смещение всех частиц в пространстве в данный момент времени. Такой график принято называть **графиком волны**.



При этом, конечно, можно построить график в координатах x, t, r, который будет описывать положение всех частиц в пространстве во все моменты времени.



16.6 Интерференция волн

Вспомним мысленный эксперимент. Бросим в воду один камень, а затем другой. Волны проходят друг сквозь друга, то есть волны не взаимодействуют.

Def. Опыт показывает, что для волн выполняется **принцип суперпозиции:** волны не взаимодействуют друг с другом, а распространяются независимо от наличия или отсутствия других волн.

Когда в данную точку пространства приходят две волны, они создают в ней колебания вещества. В результате происходит сложение двух колебаний. *И колебания будут гармоническими, если будут складываться колебания одинаковых частот.* Поэтому особый интерес представляет ситуация, когда в пространстве есть два источника волн одинаковой частоты.

Результат сложения колебаний в данной точке пространства зависит от сдвига фаз между колебаниями, который определяется расстоянием до каждого источника и сдвигом фаз в колебаниях источников. Если сдвиг фаз в колебаниях источников не изменяется со временем, то в данной точке пространства сдвиг фаз колебаний, вызванный двумя волнами, также будет оставаться постоянным. Поэтому далее мы будем рассматривать именно такие источники волн, у которых сдвиг фаз не зависит от времени и является постоянным.

Def. Если частота колебаний двух источников волн совпадает и сдвиг фаз их колебаний не зависит от времени, то такие источники называются когерентными.

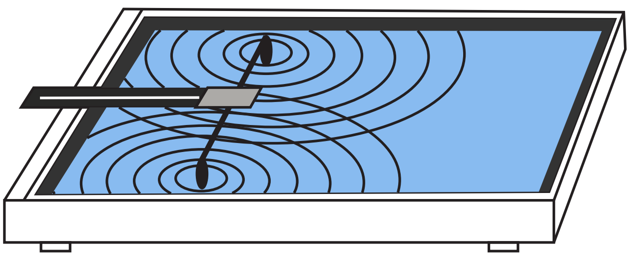
$$\boxed{\nu_1 = \nu_2 = \nu, \quad \Delta\varphi = const}$$

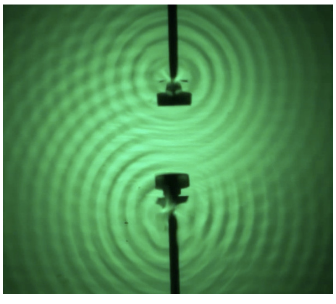
Если когерентные источники находятся в однородной среде, то волны, которые они порождают, будут распространяться с одинаковой скоростью. Поэтому длины этих волн будут одинаковыми.

$$\boxed{\lambda_1 = \lambda_2 = v \cdot T = \frac{v}{\nu}}$$

Def. Когерентные источники порождают в однородной среде когерентные волны.

Давайте рассмотрим эксперимент с волновой ванной. На краю ванны закреплена пластина с двумя выступами. В процессе колебаний выступы синфазно касаются поверхности воды. В результате получаем два когерентных источника, у которых частоты одинаковы и сдвиг фаз равен нулю. По периметру ванны расположены волногасители, которые предотвращают отражение волн от бортов.



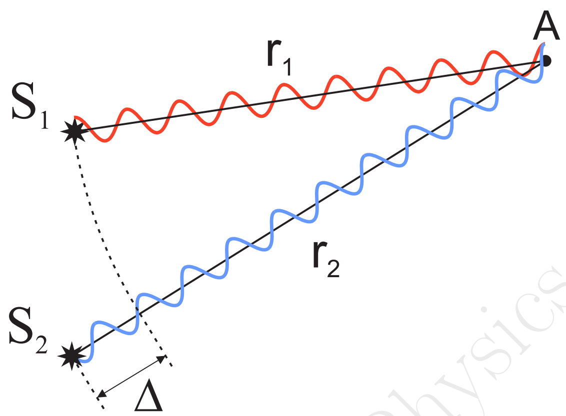


В опыте можно будет заметить, что в пространстве образуются области, где колебания не происходят. В этих областях волны, пришедшие от разных источников, приносят свои колебания, и если у них одинаковая амплитуда, и они будут в противофазе, то они «погасят» друг друга, и в этих точках колебаний не будет.

А если колебания, принесенные от двух источников, будут синфазны, то в результате сложения получим колебания с наибольшей амплитудой.

Def. Интерференция – это явление наложения когерентных волн, в результате которого образуются постоянные во времени области усиления и ослабления колебаний.

Стоит отметить, что такая картина будет постоянной во времени только тогда, когда в каждой точке пространства установлена постоянная амплитуда колебаний. NB!



Рассмотрим два когерентных источника S_1, S_2.

Каждая волна принесет в точку A колебания, которые можно описать уравнениями:

$$x_1(t) = x_{1m}\cos(\omega t + \varphi_1 - 2\pi\frac{r_1}{\lambda})$$

$$x_2(t) = x_{2m}\cos(\omega t + \varphi_2 - 2\pi\frac{r_2}{\lambda})$$

Разность хода волн будет равна: $\Delta = |r_2 - r_1|$

Если волны приходят в фазе, то в результате сложения колебаний получаем усиление, а если в противофазе – ослабление.

$$\begin{matrix} \varphi_{1A} = \omega t + \varphi_1 - 2\pi\frac{r_1}{\lambda} \\ \varphi_{2A} = \omega t + \varphi_2 - 2\pi\frac{r_2}{\lambda} \end{matrix} \quad \Rightarrow \quad \varphi_{1A} - \varphi_{2A} = (\varphi_1 - \varphi_2) + 2\pi\frac{r_2 - r_1}{\lambda}$$

Пусть источники колеблются синфазно, тогда $\varphi_1 - \varphi_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad \varphi_{1A} - \varphi_{2A} = 2\pi\frac{r_2 - r_1}{\lambda}$

Условие максимума

Для получения колебаний максимальной амплитуды, сдвиг фаз должен быть равен $2\pi k, k \in \mathbb{Z}$

$$\varphi_{1A} - \varphi_{2A} = 2\pi\frac{r_2 - r_1}{\lambda} = 2\pi\frac{\Delta}{\lambda} = 2\pi k, k \in \mathbb{Z}$$

$$\boxed{\Delta = k\lambda = 2k\frac{\lambda}{2}, \quad k \in \mathbb{Z}}$$

Максимум интерференции при синфазных источниках будет наблюдаться в тех точках, для которых разность хода двух волн будет равна четному числу полуволн.

Условие минимума

Минимум («гашение» волн), происходит когда волны приходят в противофазе.

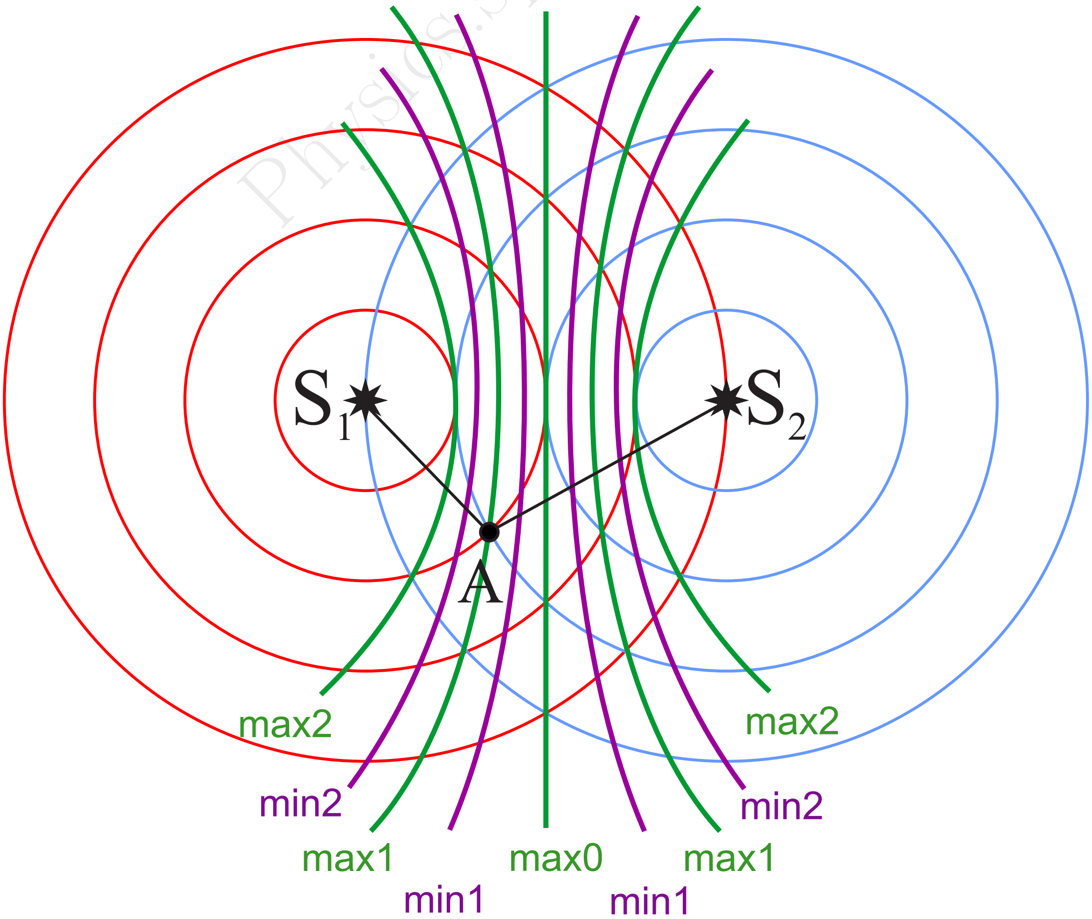
$$\Rightarrow \quad \varphi_{1A} - \varphi_{2A} = 2\pi\frac{\Delta}{\lambda} = (2k+1)\pi, \quad k \in \mathbb{Z}$$

$$\boxed{\Delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2}}$$

Def. Минимум интерференции при синфазных источниках будет наблюдаться в тех точках, для которых разность хода двух волн будет равна нечетному числу полуволн.

Если источники не синфазные, то условия меняются. Например, если источники колеблются в противофазе, условия максимума и минимума меняются местами. NB!

Рассмотрим теперь графическое изображение интерференционной картины для синфазных когерентных источников.



На серединном перпендикуляре отрезка S_1S_2 лежит множество точек, разность хода двух волн для которых равна нулю, то есть $\Delta = 0$. Поэтому серединный перпендикуляр - это максимум нулевого порядка.

Также можно выделить множество точек, разность хода для которых равна одной длине волны (двум полуволнам) $\Delta = \lambda = 2\frac{\lambda}{2}$. В этих точках также наблюдается максимум. Например, до точки A от первого источника укладываются две волны, а от второго - три, и разность хода составляет $\Delta = \lambda = 2\frac{\lambda}{2}$. Соответственно, множество таких точек называется максимумом первого порядка. Причем таких кривых уже две. И так далее.

В итоге, зеленым на рисунке выделены максимумы различных порядков в зависимости от разности хода.

Аналогично для минимумов. Единственное отличие в том, что нет минимума нулевого порядка. Минимум первого порядка - это множество точек, разность хода которых равна половине длины волны $\Delta = \frac{\lambda}{2}$. На рисунке минимумы различных порядков - фиолетового цвета.

Не существует минимума нулевого порядка. **NB!**

Поскольку гипербола - геометрическое место точек, разность расстояний от которых до двух произвольных точек (фокусов) постоянна, получается, что кривые максимумов и минимумов образуют семейство гипербол, фокусы которых совпадают с источниками волн.

Def. Кривые максимумов и минимумов образуют семейство гипербол, фокусами которых являются источники S_1, S_2

Семейство гипербол максимумов и минимумов хорошо наблюдается на эксперименте в виде соответствующих полос вблизи источников. **NB!**

16.6.1 Границы применимости интерференции

Из интерференционной картины видно, что, помимо когерентности источников и однородности среды, необходимо, чтобы расстояние между источниками было таким, чтобы можно было наблюдать хотя бы один минимум, то есть минимум первого порядка. Это будет возможно только в том случае, если расстояние между источниками больше половины длины волны.

$$\boxed{\begin{gathered}\nu_1 = \nu_2 = \nu \\ \varphi_1 - \varphi_2 = const \neq f(t) \\ v_1 = v_2 = v(\text{однородная среда}) \\ d_{S_1S_2} \geqslant \frac{\lambda}{2}\end{gathered}}$$

16.6.2 Энергия при интерференции

Энергия при колебаниях пропорциональна квадрату амплитуды колебаний. Соответственно, первая и вторая волны несут энергию, пропорциональную амплитудам колебаний первого и второго источников соответственно.

$$E_1 \sim x_{1m}^2 \qquad E_2 \sim x_{2m}^2$$

Рассмотрим максимум интерференции. Поскольку волны приходят в максимум синфазно, амплитуда в результате сложения колебаний будет равна

$$x_m = x_{1m} + x_{2m}$$

Тогда энергия в максимуме интерференции будет

$$E_{max} \sim x_m^2 = (x_{1m} + x_{2m})^2 = x_{1m}^2 + x_{2m}^2 + 2x_{1m}x_{2m} > x_{1m}^2 + x_{2m}^2$$

Получается, что в максимуме энергия больше, чем принесли две волны в сумме. Парадокс? Откуда появился избыток энергии?

Если посмотреть на минимум интерференции, то аналогично получится

$$x_m = |x_{1m} - x_{2m}|$$

$$E_{min} \sim x_m^2 = (x_{1m} - x_{2m})^2 = x_{1m}^2 + x_{2m}^2 - 2x_{1m}x_{2m} < x_{1m}^2 + x_{2m}^2$$

Видно, что ровно на столько же меньше энергии в минимуме интерференции. Следовательно

St. ➜ ***При интерференции имеет место перераспределение энергии между максимумами и минимумами.***

16.7 Принцип Гюйгенса-Френеля

В 1678 году, строя предположение о том, как распространяется волна, голландский физик Христиан Гюйгенс предложил постулат, который позволил описать основные законы геометрической оптики:

St. ➜ ***Каждая точка среды, до которой дошла волна, сама становится источником вторичных сферических волн. Новый волновой фронт - огибающая всех сферических волн.***

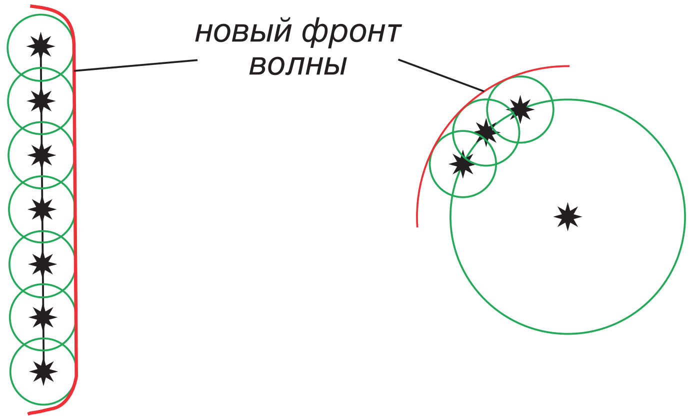
В 1815 году французский физик Огюстен Жан Френель дополнил этот принцип. Это было необходимо, поскольку возникал вопрос, почему волна не распространяется назад?

St. ➜ ***Новый волновой фронт является результатом интерференции всех существующих вторичных волн.***

А почему можно говорить об интерференции вторичных волн? Вторичные волны - когерентны!

Итак, модель распространения волны на сегодняшний день представляется такой:

Пусть волна распространяется в пространстве со скоростью v. За время Δt вторичные сферические волны успевают убежать на расстояние $v\Delta t$



На основе этого принципа доказываются законы отражения и преломления волн.

16.8 Отражение волн.

Def. Отражение волн - изменение направления распространения волны при падении на границу раздела двух сред, в результате чего волна продолжает распространяться в той же среде.

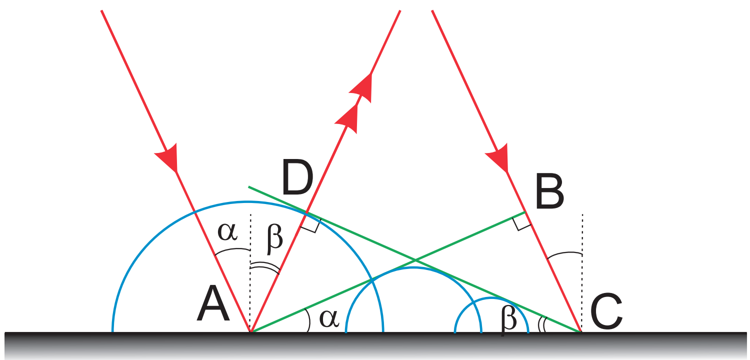
16.8.1 Закон отражения

Law *Луч падающий, луч отраженный лежат в одной плоскости с перпендикуляром, восстановленным из точки падения луча к поверхности, от которой происходит отражение, при этом угол падения равен углу отражения.*

$$\boxed{\alpha = \beta}$$

Доказательство:

Рассмотрим плоскую волну, падающую на границу раздела двух сред. На границе одновременно будет происходит отражение и преломление. Рассмотрим пока только механизм отражения.



AB- фронт падающей волны, $l = |AB| >> \lambda$, α - угол падения.

Def. Угол падения – это угол между падающим лучом и нормалью, проведенной в точке падения.

Как только фронт волны дошел до точки A, в ней возникла вторичная волна, которая распространяется с той же скоростью. Пусть для того, чтобы падающая волна достигла точки C, необходимо время Δt. За это время сферическая волна от точки A успеет распространится на то же расстояние и достигнет точки D.

Точку D можно построить, проведя касательную из точки C к фронту вторичной волны, распространившейся из точки A за время Δt.

CD - фронт отраженной волны, β - угол отражения.

Def. Угол отражения – это угол между отраженным лучом и нормалью к поверхности, проведенной в точке отражения.

Лучи падающий,отраженный и нормаль в точке падения лежат в одной плоскости, т.к. вторичные волны, появляющиеся на линии отражения, будут сферически симметричными при условии однородности среды, в которой распространяется падающая и отраженная волны.

А равенство углов получается из равенства треугольников:

$$\triangle ABC = \triangle ADC \quad \text{по катетам и общей гипотенузе}$$

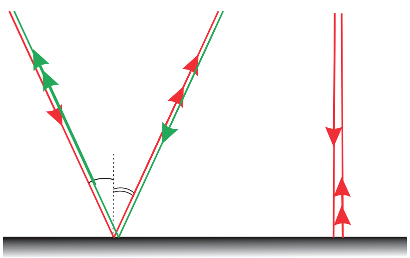
$$\Rightarrow \quad \widehat{BAC} = \widehat{DCA} \quad \Rightarrow \quad \alpha = \beta$$

16.8.2 Следствия закона отражения.

Обратимость лучей

Если падающий луч пустить по отраженному, то отраженный пойдет по падающему.

$$\sqsupset \alpha_1 = \beta \quad \beta_1 = \alpha_1 \quad \beta = \alpha \quad \Rightarrow \quad \beta_1 = \alpha$$



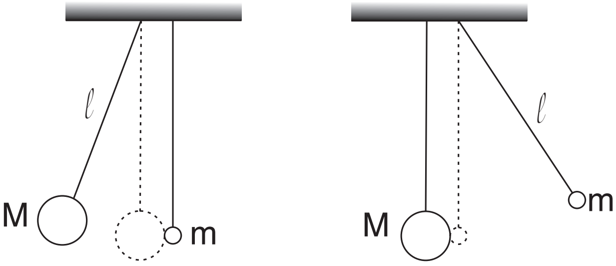
Отражение по нормали

Если луч пустить по нормали, то он отразится по нормали.

$$\alpha = \beta \quad \alpha = 0 \quad \Rightarrow \quad \beta = 0$$

16.9 Стоячие волны

Одним из самых интересных явлений, которое возникает при отражении волн, является образование стоячих волн. Для того, чтобы объяснить, что может происходить при отражении, рассмотрим такой пример:



Рассмотрим два шарика на подвесах, таких что

$$M >> m$$

В первом случае отведем массивный груз и отпустим. При столкновении с легким шариком он не изменит своей скорости и продолжит движение, как если бы легкого шарика не было. Поэтому в первом случае период колебаний будет равен

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

Во втором случае отведем в сторону легкий шарик. Учитывая соотношение масс, при абсолютно упругом столкновении он отскочит назад, при этом период его колебаний уменьшится вдвое, т.е. будет потеряна половина колебания.

$$T_2 = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

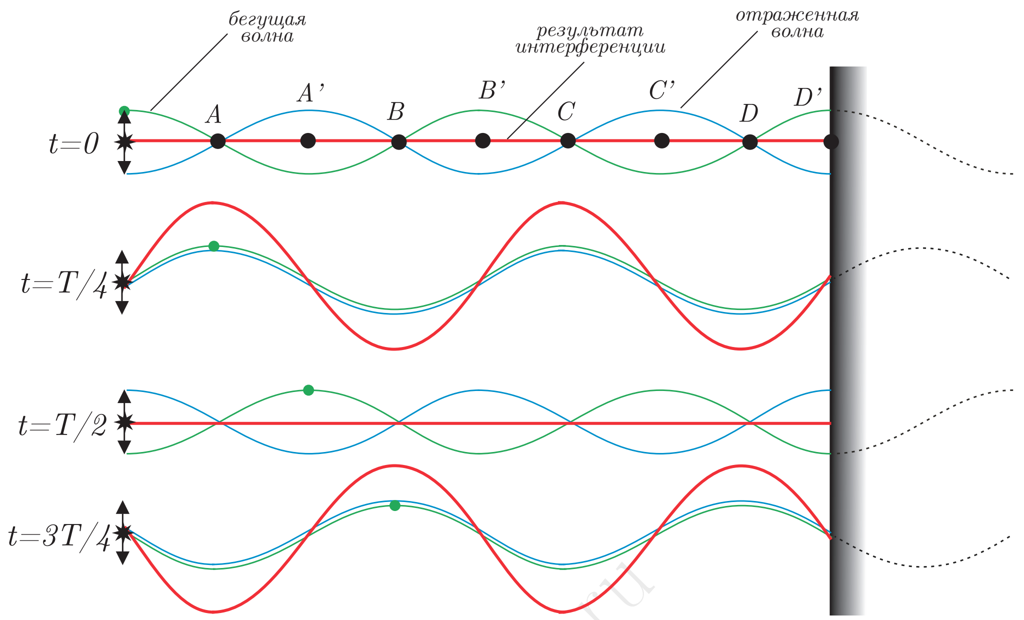
Первый случай аналогичен тому, что происходит при отражении от менее плотной среды. В этом случае потери полуволны не происходит. Второй же случай аналогичен отражению от более плотной среды (самый распространенный вариант), и в этом случае происходит потеря половины колебания, т.е. потеря полуволны.

St. ➡ ***Если отражение происходит от более плотной среды, то фаза колебаний граничных точек меняется на π, т.е. имеет место потеря «полуволны»***

Особый случай интерференции - вибратор один, но имеется преграда, и отраженная волна накладывается на бегущую. Бегущая и отраженная волна - когерентны и при малом затухании имеют равные амплитуды.

St. ➡ ***В результате интерференции бегущей и отраженной волны образуется стоячая волна.***

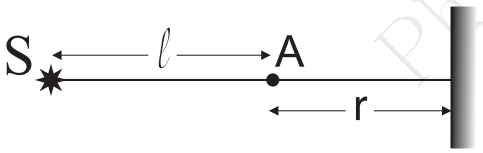
Рассмотрим случай отражения от более плотной преграды. (Видеоэксперимент)



Def. Точки, совершающие колебания с наибольшей амплитудой называют пучностями (ABCD). Точки, остающиеся в положении равновесия - узлами (A'B'C'D')

Как найти координаты узлов и пучностей,от чего они будут зависеть? Они будут зависеть от длины волны, свойств вещества и типа отражения.

Рассмотрим стоячую волну, отраженную от более плотной преграды.



Пусть колебания в точке A, вызванные бегущей волной, происходят по закону:

$$x_{\text{бег}}(t) = x_m \cos(\omega t + \varphi_0)$$

После отражения от более плотной среды в точке появятся колебания, вызванные отраженной волной:

$$x_{\text{отр}}(t) = x_m \cos(\omega t + \varphi_0 - 2\pi\frac{2r}{\lambda} + \pi)$$

здесь λ - длина бегущей волны, а сдвиг фазы, равный π, появляется в результате потери полуволны при отражении от более плотной среды.

В результате в точке A будут присутствовать колебания одинаковой частоты, вызванные бегущей и отраженной волнами.Тогда результат сложения колебаний в точке A будет определяться только разностью фаз бегущей и отраженной волн:

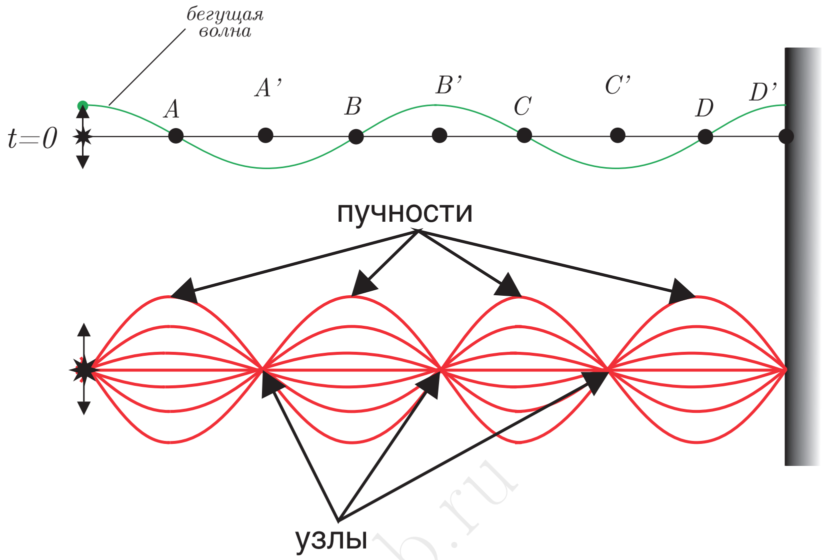
$$\Delta\varphi = 2\pi\frac{2r}{\lambda} - \pi$$

В данной точке A будут происходить колебания с наибольшей амплитудой, если разность фаз будет кратна 2π

$$\Delta\varphi = 2\pi\frac{2r}{\lambda} - \pi = 2\pi k, k \in \mathbb{Z} \quad \Rightarrow \quad r_k = (2k+1)\frac{\lambda}{4}$$

и с наименьшей амплитудой, если разность фаз будет равна нечетному числу π

$$\Delta\varphi = 2\pi\frac{2r}{\lambda} - \pi = (2k-1)\pi, k \in \mathbb{Z} \quad \Rightarrow \quad r_k = k\frac{\lambda}{2}$$



Def. Длина стоячей волны – это кратчайшее расстояние между узлами (пучностями).

Найдем расстояние между соседними узлами:

$$\lambda_{\text{ст}} = r_{k+1} - r_k = (k+1)\frac{\lambda}{2} - k\frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\lambda_{\text{ст}} = \frac{\lambda}{2}}$$

Самостоятельно рассмотрите нахождение узлов и пучностей при отражении волны от менее плотной среды. **NB!**

Все точки между двумя узлами колеблются с разными амплитудами, но в одинаковых фазах. В ближайших пучностях сдвиг фаз - π

Переносится ли стоячей волной энергия?

Название стоячей волне дано вследствие того, что в ней не происходит переноса энергии. Энергия распределяется в стоячей волне так: в областях, близких к узлам сосредотачивается главным образом потенциальная энергия, в областях близких к пучностям - кинетическая энергия.

Это связано с тем, что области вблизи узлов наиболее деформированы, а области вблизи пучностей движутся с максимальной скоростью.

St. ➡ ***В стоячей волне происходят непрерывные превращения и перераспределения энергии, а переноса энергии в такой волне нет.***

16.10 Преломление волн

Def. Преломление волн это изменение направления распространения волн при переходе из одной среды в другую.

16.10.1 Закон преломления

Для того, чтобы сформулировать закон преломления, введем понятие угла преломления.

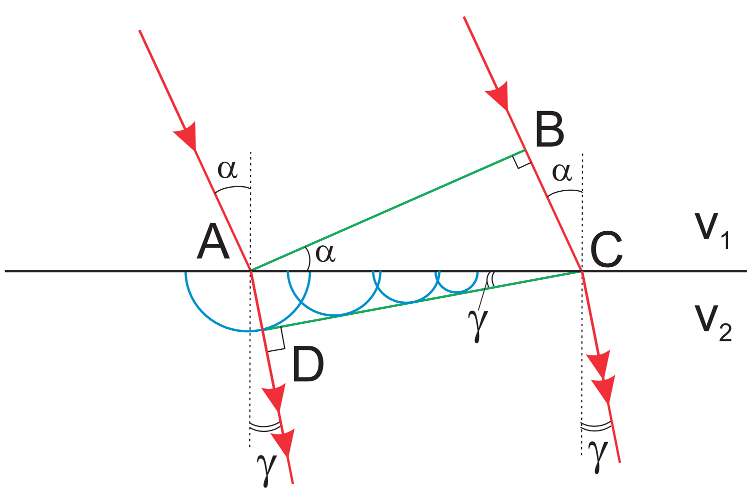
Def. Угол преломления это угол между преломленным лучом и нормалью к поверхности раздела двух сред, проведенной в точке преломления.

Law *Луч падающий, луч преломленный лежат в одной плоскости с перпендикуляром, восстановленным из точки падения луча к поверхности, в которой происходит преломление, при этом синус угла падения относится к синусу угла преломления как скорость распространения волны в первой среде, к скорости во второй среде.*

$$\boxed{\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{v_1}{v_2}}$$

Доказательство:

Возьмем плоскую волну, падающую на границу раздела двух сред. На границе одновременно будет происходит отражение и преломление. Рассмотрим ту часть волны, которая преломляется на границе раздела двух сред.



AB- фронт падающей волны, $l = |AB| >> \lambda$, α - угол падения.

Как только фронт волны доходит до точки A, в ней согласно принципу Гюйгенса-Френеля возникает вторичная волна, которая распространяется с другой скоростью во второй среде. Если для того, чтобы падающая волна достигла точки C, необходимо время $\Delta t > 0$, т.е. $|BC| = v_1 \Delta t$, то за это время сферическая волна от точки A успеет распространится во второй среде на расстояние $|AD| = v_2 \Delta t$.

Точку D можно построить проведя касательную из точки C к фронту вторичной сферической волны, распространившейся из точки A за время Δt.

CD - фронт преломленной волны, γ - угол преломления.

Лучи падающий,преломленный и нормаль в точке падения лежат в одной плоскости, т.к. вторичные волны, появляющиеся на линии преломления будут сферически симметричными при условии однородности сред, в которых распространяются падающая и преломленная волны.

$$\sqsupset v_2 < v_1 \quad \Rightarrow \quad \sin\alpha = \frac{|BC|}{|AC|} = \frac{v_1 \Delta t}{|AC|}$$

$$\sin\gamma = \frac{|AD|}{|AC|} = \frac{v_2 \Delta t}{|AC|}$$

$$\boxed{\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n_{2,1}}$$

$n_{2,1}$ - показатель преломления второй среды относительно первой

Def. Относительный показатель преломления показывает, во сколько раз скорость распространения волны в первой среде больше, чем во второй.

16.10.2 Следствия закона преломления

Обратимость лучей

Если падающий луч пустить по преломленному, то преломленный пойдет по падающему.

Преломление по нормали

Если луч пустить по нормали, то он преломится по нормали.

Доказательство следствий абсолютно аналогично доказательству следствий закона отражения.

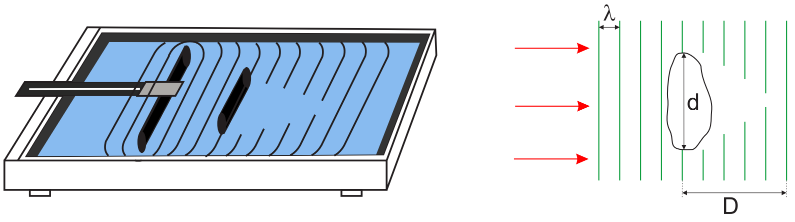
16.11 Дифракция волн

Мы можем услышать звук автомобиля, подъезжающего к повороту(перекрестку) задолго до того, как мы его увидим. Но если бы волна распространялась строго прямолинейно,то звук на «завернул бы» в узенькую улочку.

Вспомним еще, как распространяются волны на поверхности воды. Если на пути камень, то за ним затишье, а потом волна «смыкается», и никто не сможет сказать, был камень или нет.

Def. Явление огибания волнами препятствий и загибания в области геометрической тени называется дифракцией.

Рассмотрим плоскую волну и препятствие на ее пути.



Если рассматривать геометрический принцип распространения волн, то за камнем волны быть не должно. Как объяснить, что она там появляется?

Объяснение дифракции - принцип Гюйгенса-Френеля

На краю разорванного фронта волны в соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля, появляются источники вторичных сферических волн, которые распространяются не только в направлении распространения исходной волны, но и в область геометрической тени.

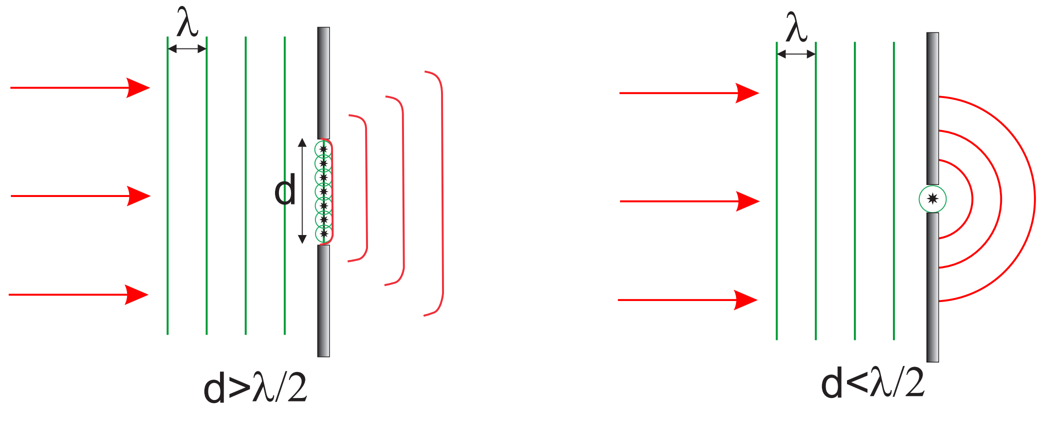
Условие наблюдения дифракции:

$$\boxed{\begin{array}{c} d << \lambda \\ D >> \lambda \end{array}}$$

Дифракция тем заметнее, чем меньше размеры препятствия и щелей по сравнению с длиной волны, и чем дальше от препятствия находится точка наблюдения. NB!

Дифракция также возможна не только на препятствиях, но и на отверстиях в препятствиях. Если отверстие большое, то в результате дифракции плоской волны, на большом расстоянии от отверстия фронт волны восстановится, и дальше будет распространяться плоская волна. Если же размер препятствия мал, то мы получим источник сферических волн.

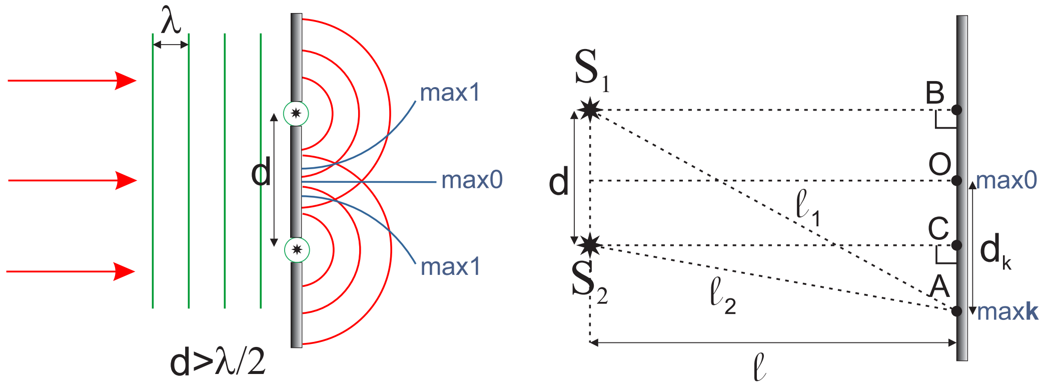
Т.к. новый фронт волны это результат интерференции вторичных волн, то размер препятствия должен быть меньше полуволны, чтобы вторичные волны от краев отверстия слились в одну сферическую волну (условие наблюдения интерференции).



Дифракция обычно сопровождается интерференцией

16.11.1 Задача о щелях Юнга.

Дифракция на двух отверстиях - удобный способ получить когерентные источники. Данную идею для демонстрации интерференции световых волн предложил английский ученый Томас Юнг в 1803 году.



В опыте мы можем измерить: d-расстояние между щелями, l, $l >> d$ - расстояние до экрана (наблюдателя), d_k - расстояние от центрального максимума до максимума к-ого порядка. Определим длину волны по этим данным.

$$\begin{cases} l_1^2 = l^2 + (d_k + \frac{d}{2})^2 \\ l_2^2 = l^2 + (d_k - \frac{d}{2})^2 \end{cases} \quad \Rightarrow$$

$$l_1^2 - l_2^2 = 2dd_k \Leftrightarrow \underbrace{(l_1 - l_2)}_{\Delta}\underbrace{(l_1 + l_2)}_{\approx 2l} = 2dd_k$$

$$\Delta 2l = 2dd_k \quad \Rightarrow \quad \Delta = \frac{dd_k}{l} = k\lambda \quad \Rightarrow$$

$$\boxed{\lambda = \frac{dd_k}{kl}}$$

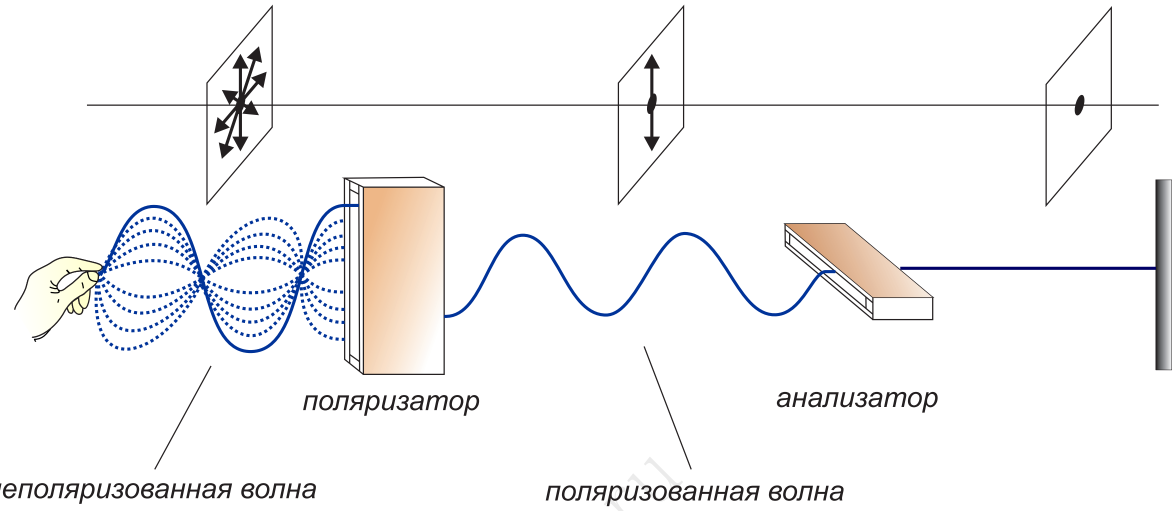
Эксперимент с щелями Юнга позволяет опытно определить длину волны. NB!

16.12 Поляризация волн

Рассмотрим свойство, являющееся характеристическим только для поперечных волн. В поперечной волне колебания совершаются в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. При этом в этой плоскости направление колебаний может оставаться постоянным, и такую волну принято называть поляризованной. Или направление колебаний может меняться, оставаясь в плоскости, перпендикулярной направлению распространения, в этом случае говорят о неполяризованной волне.

Def. Если направление колебаний меняется в плоскости перпендикулярной направлению распространения волны, то волна называется неполяризованной. Если же направление колебаний остается постоянным, то волна называется поляризованной.

Явление поляризации наблюдается только у поперечных волн. NB!



Если неполяризованную волну пропустить через устройство, называемое поляризатором, то отсекутся все направления колебаний, кроме одного. (Видеоэксперимент)

Def. Явление, при котором неполяризованная волна становится поляризованной, называется поляризацией.

Как проверить, поляризована волна или нет? Если после поляризатора поставить еще один, который принято называть анализатором, и при определенном положении после него не будет распространяться волна, то это означает, что исходная волна была поляризована.

Плоскость поляризации при этом будет перпендикулярна положению анализатора.

Свойство поляризации играет большую роль в применении в части оптических явлений. NB!

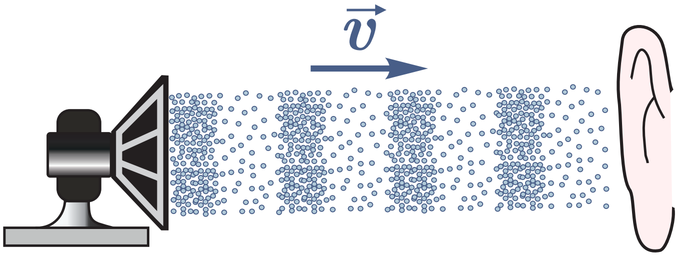
16.13 Звуковые волны

Def. Звук это продольная механическая волна, распространяющая колебания со звуковой частотой в вещественной среде.

К звуковым частотам обычно относят следующий диапазон

$$20 \text{ Гц} < \nu < 20000 \text{ Гц}$$

Именно эти частоты способно воспринимать человеческое ухо. При распространении звука в воздухе чередуются области с повышенным и пониженным давлением (плотностью), которые, попадая на барабанную перепонку, вызывают ее колебания с соответствующей частотой, что приводит к звуковым ощущениям у человека. Если в звуковой волне передается какая-то информация, то мозг человека ее обрабатывает в соответствии с колебаниями барабанной перепонки.



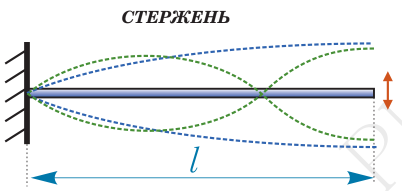
Def. Слух – это способность человека воспринимать звуковые волны.

Def. Звуковые волны, способ их возбуждения, распространения и взаимодействие со средой изучает отдельный раздел физики – акустика.

16.13.1 Источники звука

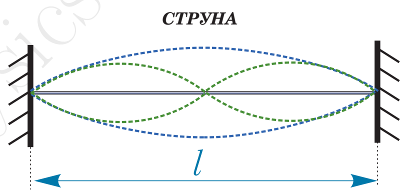
Def. Всякое тело, колеблющиеся со звуковой частотой, помещенное в упругую вещественную среду, является источником звука.

Рассмотрим в качестве источников звука колеблющиеся протяженные тела: стержень и струну. В них возникают стоячие волны, длины которых соотносятся с длиной стержня и струны следующим образом:



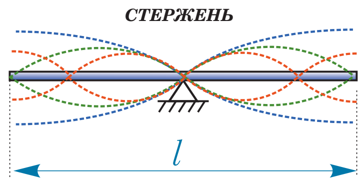
$$l = \frac{\lambda_{ст}}{2} = \frac{\lambda}{4} \Rightarrow \lambda = 4l$$
$$l = \frac{3\lambda_{ст}}{2} = \frac{3\lambda}{4} \Rightarrow \lambda = \frac{4l}{3}$$

$$\boxed{\lambda = \frac{4l}{(2n+1)}, n \in \mathbb{N}_0}$$



$$l = \lambda_{ст} \Rightarrow \lambda = 2l$$
$$l = 2\lambda_{ст} \Rightarrow \lambda = \frac{2l}{2} = l$$

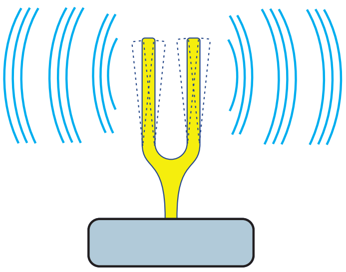
$$\boxed{\lambda = \frac{2l}{n}, n \in \mathbb{N}}$$



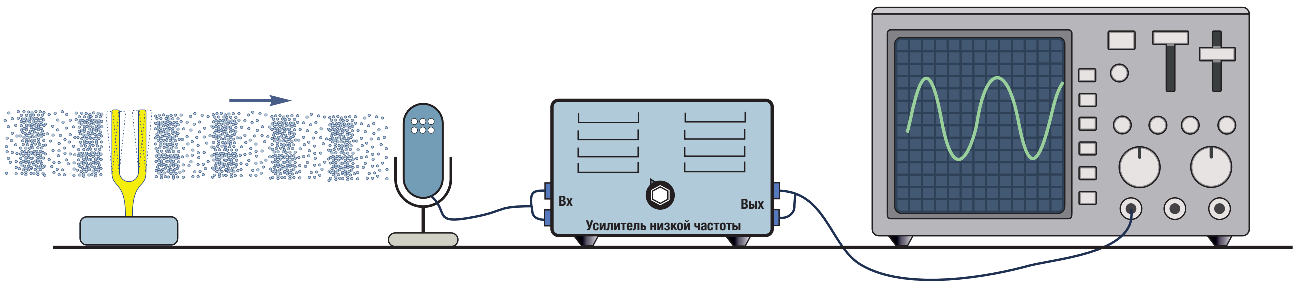
$$l = \lambda_{ст} = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = 2l$$
$$l = 3\lambda_{ст} = \frac{3\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = \frac{2l}{3}$$

$$\boxed{\lambda = \frac{2l}{(2n+1)}, n \in \mathbb{N}_0}$$

Среди всех источников звука можно выделить камертон. Камертон излучает звуковые волны строго определенной частоты.



Камертон представляет собой металлическую «рогатку» укрепленную на ящике, у которого нет сбоку одной стенки. Если специальным резиновым молоточком ударить по ветвям ("ножкам") камертона, то он будет издавать звук строго определенной частоты, называемый музыкальным тоном. При этом, частота звука, излучаемого камертоном, зависит от длины его ветвей. Камертон изобретен в 18 веке для настройки музыкальных инструментов.



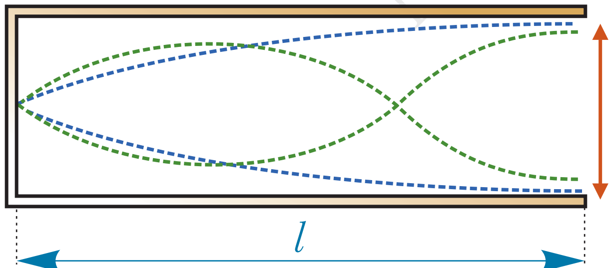
Если собрать установку, как на рисунке, и принимать звук от камертона с помощью микрофона и получившийся сигнал через усилитель низкой частоты вывести на осциллограф, то мы увидим, что сигнал будет чистой синусоидой, то есть колебания, вызванные камертоном, будут строго определенной частоты.

16.13.2 Резонаторы

Сам по себе камертон испускает слабый звук, т.к. он небольшого размера и его ножки колеблются в противофазе.

Для хорошего излучения размеры тела должны быть не малы по сравнению с длиной волны в окружающей среде.

Чтобы усилить звук, испускаемый камертоном, используют резонатор. Резонатор для камертона – это деревянный ящик определенной длины, открытый с одной стороны. При звучании камертона колебания передаются ящику. В ящике начинает распространяться звук, отражающийся от стенок ящика. В результате в ящике возникают стоячие волны, и усиливаться данным резонатором будут те волны, которые имеют пучность на выходе из резонатора.



$$l = \frac{\lambda_{\text{ст}}}{2} = \frac{\lambda}{4}$$

$$l = \frac{3\lambda_{\text{ст}}}{2} = \frac{3\lambda}{4} \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{4l}{3}$$

$$\boxed{\lambda = \frac{4l}{(2n+1)}, n \in \mathbb{N}_0}$$

Резонаторы камертонов для хорошего звучания делают такими, что $\boxed{l = \frac{\lambda}{4}}$

В музыкальных инструментах, когда требуется увеличить громкость звука не одной частоты, а целого спектра частот, форма резонатора будет уже очень сложной. Примером является корпус любого струнного инструмента.

16.13.3 Характеристики звука

Скорость звука.

Еще Аристотель пытался измерить скорость, с которой звук распространяется в воздухе. Он решил, что эта скорость должна сильно зависеть от высоты тона (то есть от частоты звука). Аристотель считал, что чем выше тон, тем быстрее распространяется звук. Но он ошибся.

Впервые же скорость звука измерил французский философ, математик и астроном Пьер Гассенди (1592 - 1655). В 1630-е годы Гассенди поставил специальные опыты. Было известно, что звук выстрела из пушки более низкий, чем из ружья. На некотором расстоянии от наблюдателя одновременно стреляли пушка и ружье. Звук доходил до наблюдателя одновременно. Заодно, увидев вспышку пороха, можно было определить и скорость звука. Гассенди наблюдал также, что удар языка по отдаленному колоколу виден намного раньше, чем слышен звук от него. На основании таких экспериментов Гассенди посчитал, что звук в воздухе распространяется со скоростью (в пересчете на современные меры) 449 метров в секунду. Это не такой плохой для того времени результат с учетом отсутствия часов.

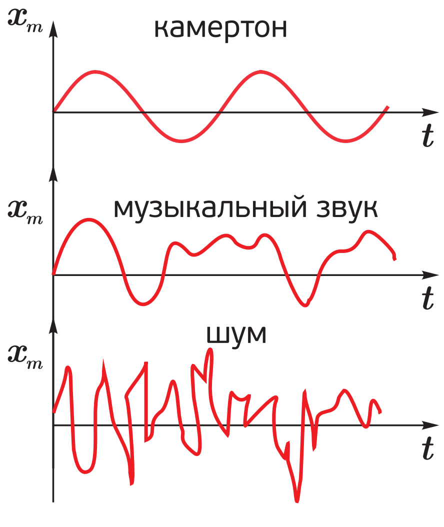
Скорость звука зависит от среды и температуры, так как взаимодействие между молекулами и определяет быстроту вовлечения в колебания последующих частиц: чем сильнее взаимодействуют молекулы среды, тем выше в ней скорость звука.

$$v_{\text{воздух}} = 340\text{м/с}$$
$$v_{\text{сталь}} = 5000\text{м/с}$$
$$v_{\text{вода}} = 1400\text{м/с}$$

Объективные и субъективные характеристики звука.

Объективные характеристики.	**Субъективные характеристики.**	**Связь характеристик.**
Частота	Высота звука.	Чем больше частота, тем выше звук.
Амплитуда	Громкость звук.	Чем больше амплитуда, тем громче звук. На громкость так же влияет частота, т.к. на разных частотах человеческое ухо по разному воспринимает звук.
Количество и интенсивность обертонов (доп. частот)	Тембр.	Одну у ту же мелодию можно исполнить на разных музыкальных инструментах. Мелодия будет легко узнаваема, так же как и инструмент.

Музыкальные звуки обладают линейчатым спектром с кратными частотами, следовательно это не гармонические периодические колебания. Шумы обладают сплошным спектром, то есть набор частот непрерывно заполняет некоторый интервал, поэтому шумы являются не гармоническими непериодическими колебаниями.

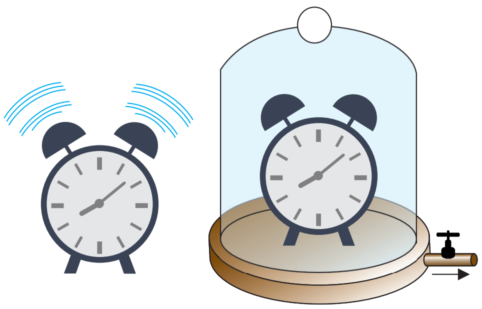


Обертона (нем. Ober — высокий, Ton — звук) в акустике — призвуки, входящие в спектр музыкального звука. Высота обертонов выше основного тона (отсюда название). Наличие обертонов обусловлено сложной картиной колебаний источника звука (струны, столба воздуха, мембраны, голосовых связок и т.д.): частоты обертонов соответствуют частотам колебания его частей.

Обертоны бывают гармоническими и негармоническими. Частоты гармонических обертонов больше частоты основного тона в 2, 3, 4, 5 и т.д. раз (кратность равна натуральному числу). Гармонические обертоны вместе с основным тоном называются гармониками и образуют натуральный звукоряд:

16.13.4 Свойства звуковых волн

Необходимость вещественной среды.



Звук может распространяться только в вещественной среде. Если будильник поставить под воздушный колокол и откачать воздух, то звука от будильника практически не будет (часть звука будет передаваться через корпус). Если же запустить воздух в воздушный колокол, то звук от будильника будет слышен очень хорошо.

Звук при этом может распространяться в веществе с разным агрегатным состоянием. Выше уже было отмечено, что от этого зависит скорость распространения звуковой волны.

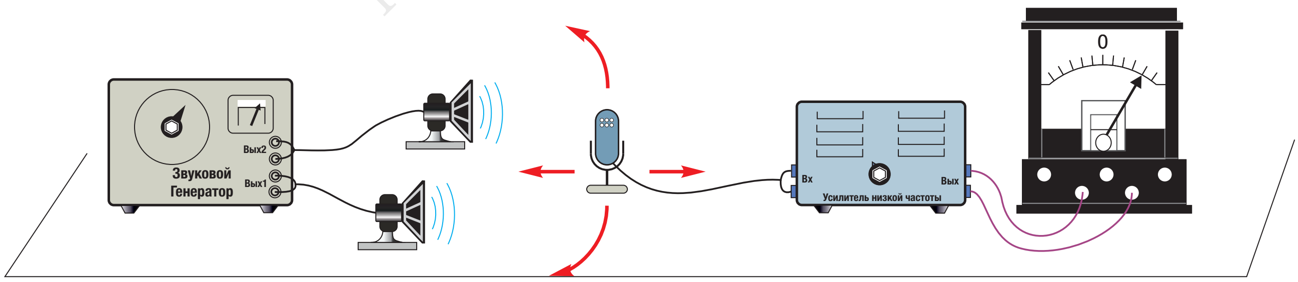
Если звук пропустить через полую коробочку, открытую с двух сторон, то он не изменится. Соответственно, звук нельзя поляризовать. Поэтому звук является продольной волной.

Для возникновения поперечных волн необходима упругость формы, а звук распространяется и в глазах и жидкостях, обладающих лишь упругостью объема. В таких средах может распространяться лишь продольная волна, а значит, звук именно ею и является.

Звук не может распространяться в вакууме и не может быть поляризован. NB!

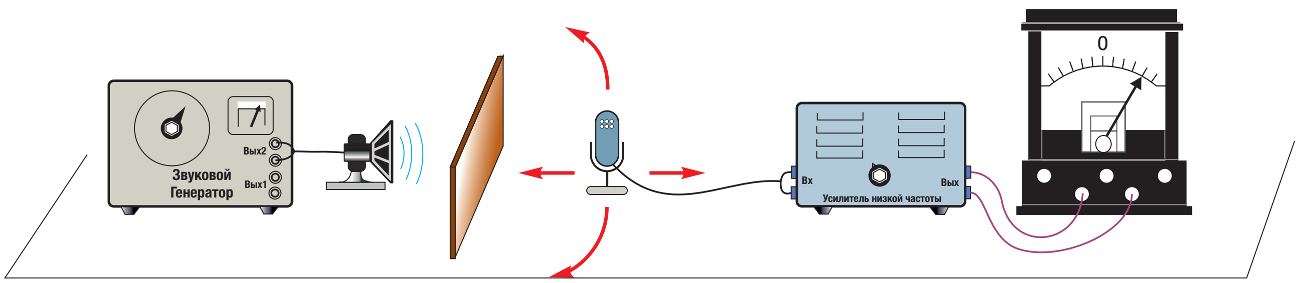
Интерференция звука.

Для демонстрации интерференции подключим два динамика к звуковому генератору. Для регистрации будем использовать микрофон, подключенный к усилителю низкой частоты (УНЧ), к выходу которого подключим гальванометр. Если микрофон начать перемещать перед двумя динамиками, то мы будем регистрировать при помощи гальванометра области усиления и ослабления звука.



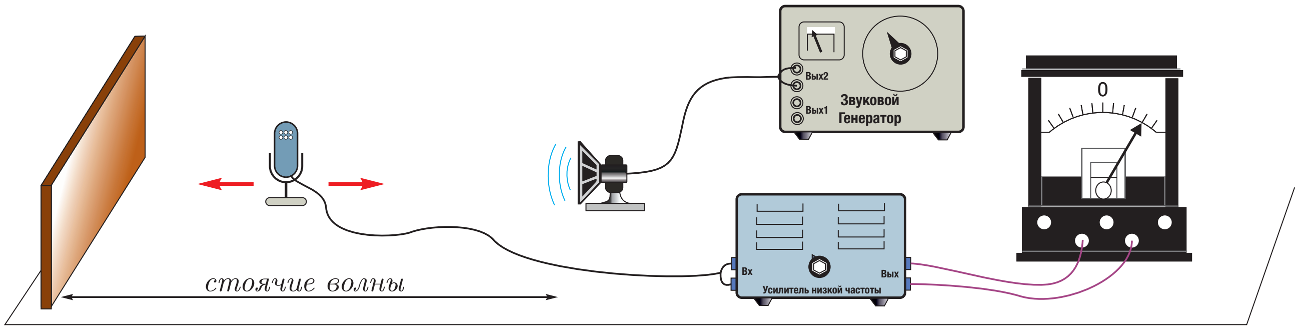
Дифракция звука.

Если перед динамиком поставить преграду из пористого материала, то сразу за преградой звука практически не будет. При этом на некотором расстоянии, звук будет регистрироваться. Таким образом звук может огибать препятствие и заходить в область геометрической тени.



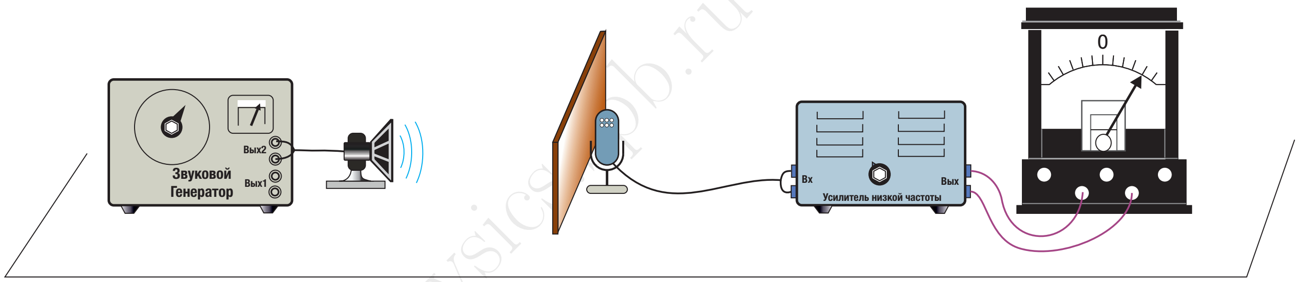
Отражение звука.

Если один динамик и микрофон расположить с одной стороны от преграды, то звук будет от нее отражаться и в результате интерференции бегущей и отраженной волны, будут образовываться стоячие звуковые волны. Это можно будет увидеть, зарегистрировав узлы и пучности



Преломление звука.

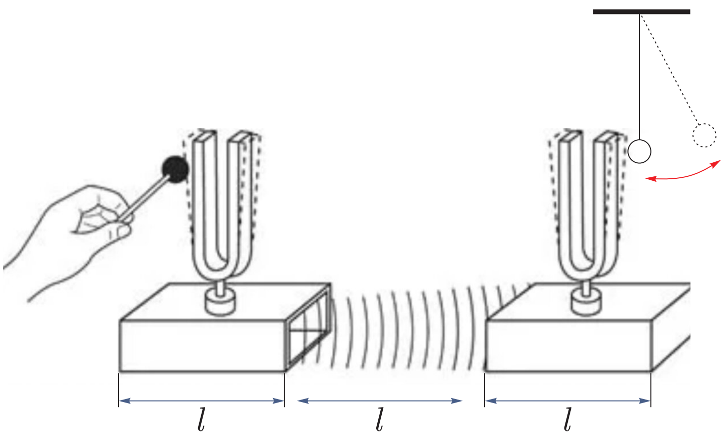
Если сразу перед динамиком поставить преграду, то за ней будет регестрироваться слабый звук, громкость которого будет ниже из-за преломления.



Акустический резонанс.

Если поставить рядом два одинаковых камертона (см. рисунок), так чтобы расстояние между ними было равно длине резонатора, то при ударе по одному из камертонов, второй так же начнет колебания. Эти колебания можно будет увидеть по колебаниям маленького шарика, подвешенного рядом с одной из ветвей второго камертона.

Колебания второго камертона будут вызваны звуковой волной, испускаемой резонатором первого камертона. Максимальная амплитуда будет достигаться за счет явления резонанса, так как частота звуковой волны будет соответствовать основному тону колебаний второго камертона.



16.14 Эффект Доплера

До сих пор мы считали, что частота колебаний источника, волны и регистрируемая приемником равны между собой. Оказывается, что это справедливо лишь в том случае, когда источник и приемник неподвижны относительно среды, в которой распространяется волна.

Если же источник или приемник движутся относительно среды, то эти частоты не совпадают.

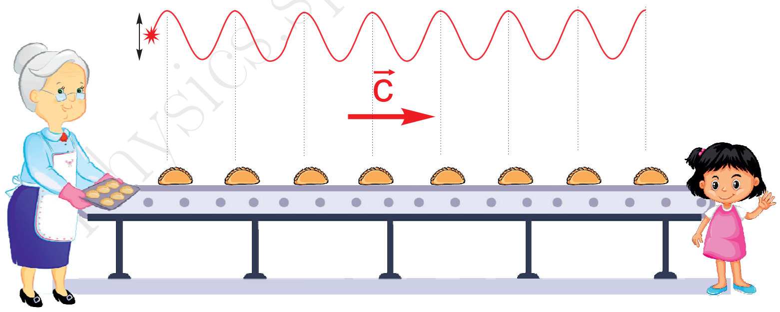
*В **1842** Кристиан Доплер (Doppler) (1803–1853), австрийский физик и астроном, теоретически обосновал зависимость частоты колебаний, воспринимаемых наблюдателем, от скорости и направления движения наблюдателя относительно источника колебаний или источника относительно наблюдателя.*

NB!

Рассмотрим простой пример: пусть лодка в первом случае двигалась в направлении распространения волны, а во втором случае против. Когда мы насчитаем большее количество гребней за одинаковое время? (двигаясь против волны). Т.е. из лодки нам будет казаться, что частота волны зависит от того, куда мы движемся.

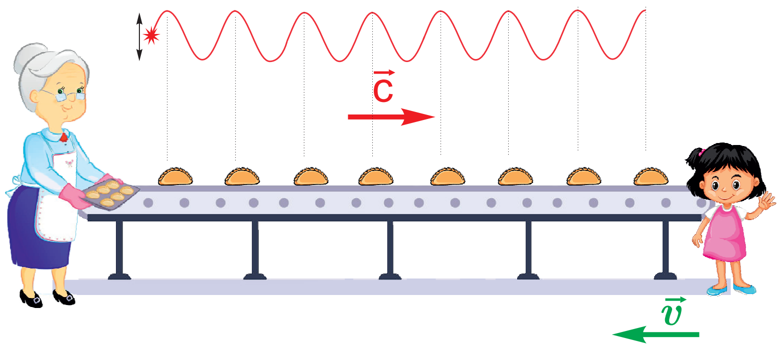
Рассмотрим другой пример.

Бабушка ("источник волны") каждую секунду кладет на конвейер ("среда с определенной скоростью распространения волн") пирожок("гребень волны"), а внучка, находясь на некотором расстоянии, их снимает. Пусть конвейер движется со скоростью c.



Если бабушка и внучка стоят на месте относительно конвейера, то внучка будет снимать пирожки с той же частотой, с которой их будет туда укладывать бабушка. Таким образом, частота волны, которую будет регистрировать приемник, будет совпадать с частотой источника.

Если внучка пойдет навстречу бабушке со скоростью $v < c$, то она будет чаще снимать пирожки. Если от бабушки - реже, если скорости $v = c$, то снимет либо один пирожок, либо ни одного.



Найдем связь между частотой источника волны и частотой, которую будет регистрировать приемник, движущийся по направлению к неподвижному источнику.

Пусть время, за которое бабушка печет очередной пирожок (период колебаний источника волн) равно T_0. Тогда расстояние между пирожками на конвейере (длина волны) будет равно

$$\lambda = cT_0$$

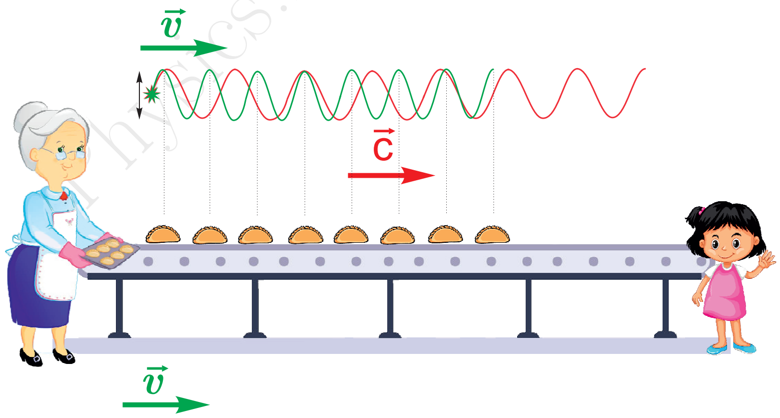
Время, за которое очередной пирожок будет достигать внучки (т.е. период колебаний у приемника), будет равен

$$T = \frac{\lambda}{v+c} = \frac{cT_0}{v+c} = \frac{T_0}{1+\frac{v}{c}} < T_0$$

Отсюда получим выражение для частоты. Учтем, что если внучка идет от бабушки (т.е. приемник удаляется от источника волн), то скорости будут не складываться, а вычитаться.

$$\boxed{\nu = \nu_0 \cdot \left(1 \pm \frac{v}{c}\right)}$$

Теперь рассмотрим случай, когда внучка неподвижна относительно конвейера, а бабушка идет к ней навстречу и продолжает выкладывать пирожки (т.е. приемник неподвижен, а источник волн движется относительно приемника так, что между ними меняется расстояние). Такой случай на практике встречается немного чаще.



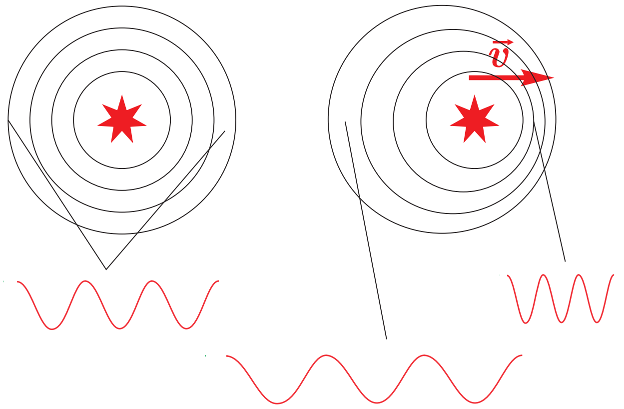
Принципиальное отличие от предыдущего случая будет заключаться в том, что тут изменение частоты связано с изменением длины волны. NB!

Будем учитывать, что скорость источника волн $v < c$.

$$\lambda = T_0(c - v)$$

$$T = \frac{\lambda}{c} = \frac{T_0(c-v)}{c} = T_0(1 - \frac{v}{c}) \quad \Rightarrow \quad \boxed{\nu = \frac{\nu_0}{1 \mp \frac{v}{c}}}$$

Интересно рассмотреть приближение для случая, когда $v << c$. Из математики известно, что при малых x $\frac{1}{1 \pm x} \approx 1 \mp x$, тогда получим $\nu = \nu_0 \cdot \left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$, что соответствует случаю, когда источник неподвижен, а приемник движется.



Таким образом, при перемещении источника и приемника относительно друг друга, будет происходить изменение частоты, регистрируемой приемником. В случае перемещения приемника это будет связано с тем, что мы чаще или реже будем встречаться с "гребнем"волны, а в случае с перемещение источника волн это будет связано с изменением длины волны.

Эффект Доплера часто используется в технике для определения скорости движения объекта. Объект облучают ультразвуковой или электромагнитной волной известной частоты. При отражении от движущегося объекта происходит изменение частоты волны. По этому изменению можно определить радиальную скорость движения объекта, т.е. с какой скоростью объект приближается или удаляется от приемника.

16.15 Гипотеза Максвелла. Токи смещения

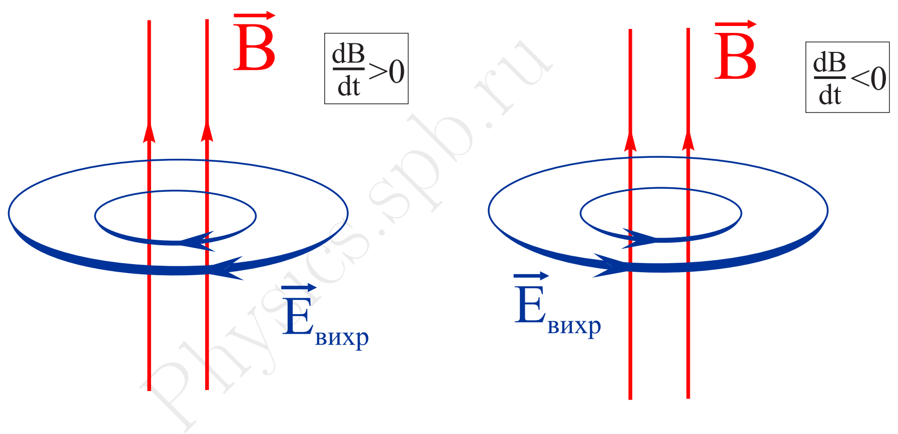
16.15.1 Идеи Фарадея-Максвелла

К середине XIX века в науке было принято считать истиной теорию **дальнодействия**. Она была крепко поддерживаема физиками. Ее основателями были Ньютон, Кулон, Кавендиш.

Оценивая тот период, Роберт Милликен писал "Когда Фарадей подтвердил свои гениальные физические идеи гениальными открытиями в области электромагнетизма, он этим не завоевал своим идеям даже минимального признания. Формалисты школы Ампера-Вебера, с тайным, а иногда и явным презрением смотрели на «грубые материальные» силовые линии, порожденные плебейской фантазией переплетчика и лабораторного сторожа Фарадея."

Вспомним, что главное в явлении электромагнитной индукции Фарадея.

St. *Фарадей-Максвелл: Всякое изменяющееся магнитное поле порождает вихревое электрическое*



Вспомним, чем отличается вихревое электрическое поле от электростатического:

1. не связано с зарядами
2. не потенциально, силовые линии замкнуты.

Эту идею хорошо воспринял Максвелл (1834-1879), тогда ему было 25 лет. Он переписал фарадеевский закон электромагнитной индукции в виде следующего дифференциального уравнения:

$$\boxed{rot\vec{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}}$$

Ротор (rot) - физически - вихрь электрического поля. Математически ротор определяется через частные производные следующим образом:

$$rot\vec{E} = \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}\right)\vec{i} + \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}\right)\vec{j} + \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}\right)\vec{k}$$

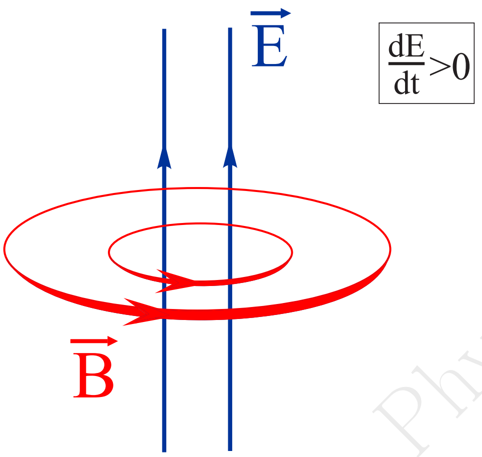
16.15.2 Гипотеза Максвелла

Еще Ампер опытно доказал, что электрический ток, идущий по проводнику порождает в окружающем пространстве магнитное поле. Максвелл предполагает, что если меняющееся магнитное поле может породить вихревое электрическое, то почему невозможно обратное?

St. *Гипотеза Максвелла:* *Всякое меняющееся электрическое поле(а не ток!) порождает вокруг себя магнитное поле.*

NB! *Стоит заметить, что магнитное поле по своей природе является вихревым, его линии замкнуты. Поэтому в гипотезе на это нет отдельного указания.*

Def. Переменное электрическое поле в вакууме или диэлектрике Максвелл назвал током смещения.

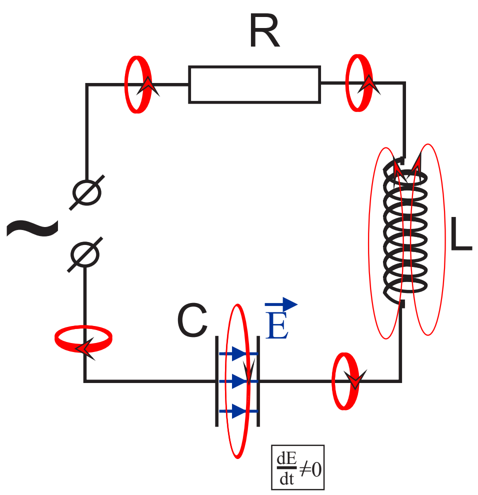


Максвелл составляет все правила для направлений магнитных полей, порождаемых токами, в частности, правило правой руки.

$$\boxed{rot\vec{B} = \frac{1}{c}\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c}\vec{j}}$$

где $\vec{j}$ – плотность тока проводимости.
Для магнитного поля Максвелл пишет уравнение аналогичное уравнению для вихревого электрического. В нем он учитывает, что магнитное поле может порождаться и меняющимся электрическим полем, и током проводимости.

Переменное магнитное поле возникает вокруг зазора конденсатора, хотя никакого тока проводимости в зазоре конденсатора нет.

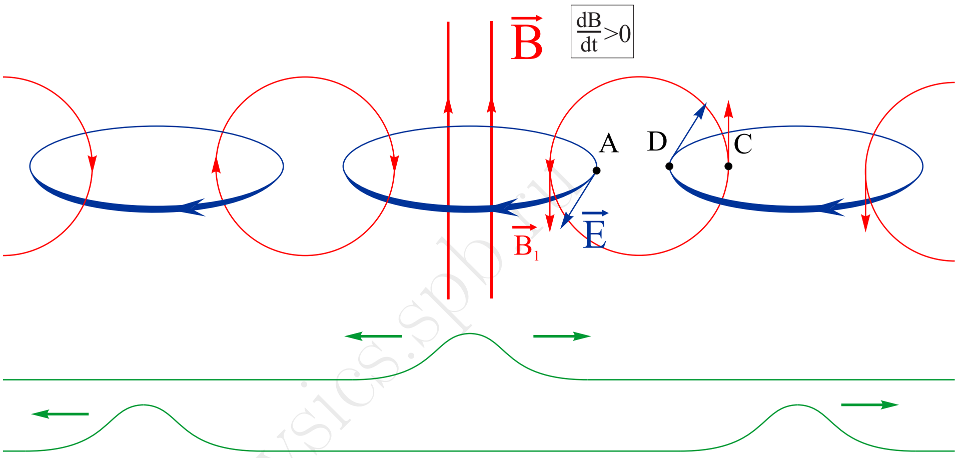


Вывод:

Цепи любых не постоянных токов замкнуты. Их замкнутость обеспечивается токами смещения, которые существуют на тех участках, где нет проводников.

16.16 Механизм распространения электромагнитного поля. Электромагнитная волна.

Пусть в некоторой области пространства существует магнитное поле, увеличивающееся с течением времени. Оно создаст в окружающем пространстве вихревое электрическое поле. В точке A электрического поля изначально не было, и вот оно появляется. Соответственно, электрическое поле в точке A будет расти. Это меняющееся электрическое поле породит магнитное B_1, направление которого будет определяться правилом правой руки. В исходной области оно будет направлено противоположено исходному полю и будет компенсировать его увеличение, а в точке C магнитного поля не было, и оно появилось. Меняющееся магнитное поле в точке C породит следующий виток вихревого электрического поля, которое в точке D будет направлено противоположно электрическому полю в точке A, и будет его компенсировать. И так далее...



При однократном нарастании исходного магнитного поля в пространстве начнет распространяться "всплеск"электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля. Если же исходное поле будет совершать колебания, то в окружающем пространстве будет распространяться электромагнитная волна.

Def. Электромагнитная волна это процесс распространения в пространстве колебаний напряженности электрического поля и индукции магнитного поля.

Распространение электромагнитного поля в виде электромагнитной волны было описано Максвеллом.

NB! *Интересно, что к такому же выводу пришел Фарадей, но из-за непризнания его теорий при жизни он записал свои идеи (1832 г, Максвеллу 1 год) и оставил на хранение в архивах Королевского общества. Через 106 лет в 1938 году конверт вскрыли ... «Я пришел к заключению, что на распространение магнитного воздействия требуется время, которое, очевидно, окажется весьма незначительным. Я полагаю также, что электрическая индукция распространяется точно таким же образом. Я полагаю, что распространение магнитных сил от магнитного полюса похоже на колебания взволнованной водной поверхности... По аналогии я считаю возможным применить теорию колебаний к распространению электрической индукции». Фарадей писал, что хотел «закрепить открытие за собой определенной датой и таким образом иметь право, в случае экспериментального подтверждения, объявить эту дату – датой моего открытия. В настоящее время, насколько мне известно, никто из ученых, кроме меня, не имеет подобных взглядов»*

Система уравнений в дифференциальной или интегральной форме описывающих электромагнитное поле и его связь с электрическими зарядами и токами в вакууме и сплошных средах, вместе с выражением для силы Лоренца, задающим меру воздействия электромагнитного поля на заряженные частицы, образуют полную систему уравнений классической электродинамики, называемую иногда уравнениями Максвелла.

$$\boxed{\begin{array}{rcll} rot\vec{E} & = & -\dfrac{1}{c}\dfrac{\partial\vec{B}}{\partial t} & (1)\\ div\vec{E} & = & 4\pi\rho & (2)\\ rot\vec{B} & = & \dfrac{1}{c}\dfrac{\partial\vec{E}}{\partial t}+\dfrac{4\pi}{c}\vec{j} & (3)\\ div\vec{B} & = & 0 & (4)\end{array}}$$

Дивергенция (div) - физически - характеризует поток данного поля через малую поверхность. Математически дивергенция определяется через частные производные следующим образом:

$$div\vec{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial E_y}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial E_z}{\partial z}\vec{k}$$

Второе уравнение Максвелла является теоремой Гаусса для электрического поля, а четвертое уравнение указывает на то, что магнитное поле имеет вихревую природу и его магнитные линии замкнуты.

Из уравнений Максвелла следует, что

- Электромагнитная волна порождается ускоренно движущимся зарядом.
- Если источник волны совершает гармонические колебания, то волна будет описываться уравнением плоской волны (см. дифференциальное уравнение плоской волны).

$$x(t,r) = x_m\cos(\omega t - 2\pi\frac{r}{\lambda})$$

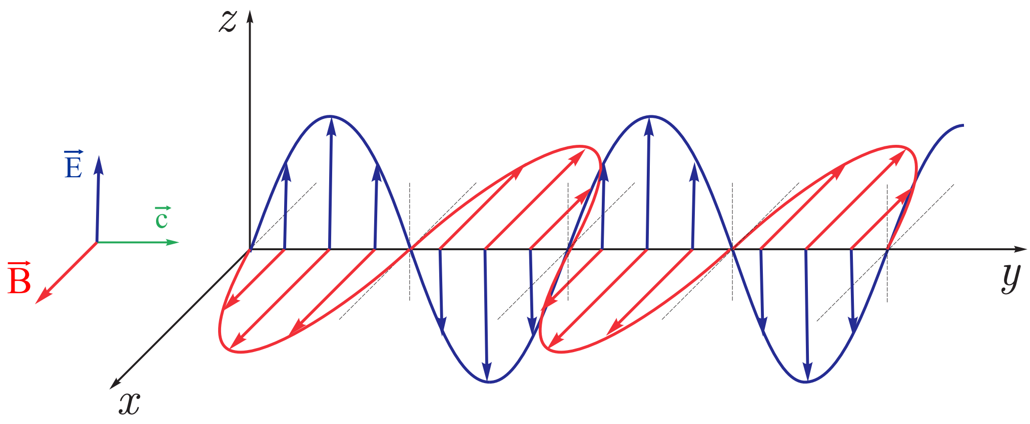
$$\frac{\partial x}{\partial t} = -\omega x_m\sin(\omega t - 2\pi\frac{r}{\lambda}) \qquad \frac{\partial x}{\partial r} = \frac{2\pi}{\lambda}x_m\sin(\omega t - 2\pi\frac{r}{\lambda})$$

$$\Rightarrow \quad \frac{\partial x}{\partial r} = -\frac{1}{\omega}\frac{2\pi}{\lambda}\frac{\partial x}{\partial t} = -\frac{\nu}{\lambda}\frac{\partial x}{\partial t} = -\frac{1}{v}\frac{\partial x}{\partial t}$$

Получившееся уравнение является полным аналогом первого уравнения Максвелла, только для одномерного случая. Поэтому для напряженности электрического поля и индукции магнитного поля можно записать следующие выражения:

$$E_z = E_{zm}\cos(\omega t - 2\pi\frac{y}{\lambda})$$

$$B_x = B_{xm}\cos(\omega t - 2\pi\frac{y}{\lambda})$$



- *Векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ перпендикулярны друг другу и направлению распространения, следовательно, электромагнитная волна является поперечной волной.*

- Если волна свободная, т.е. ушла от источника на расстояние, много большее длины волны, то напряженность электрического поля и индукция магнитного поля будут меняться синфазно.

- Векторы $(\vec{E}, \vec{B}, \vec{c})$ образуют правую тройку векторов.

- Электромагнитные волны распространяются с конечной скоростью

  В вакууме $\boxed{c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}}$

  В среде $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0\mu\varepsilon}}$

- Длина электромагнитной волны одной и той же частоты, будет разной в вакууме и среде.

$$\lambda = \frac{v}{\nu} = vT$$

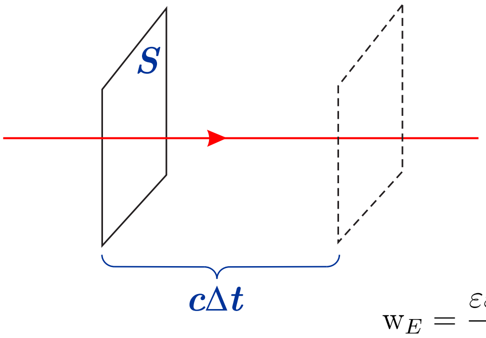
$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu} = cT$$

16.16.1 Плотность потока энергии электромагнитной волны

Распространение электромагнитной волны в пространстве сопровождается переносом энергии.

$$\boxed{I = \frac{\Delta E}{S\Delta t}} \quad [I] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Плотность потока излучения показывает, какая мощность переносится через единичную перпендикулярную площадку.



$$\mathrm{w} = \frac{\Delta E}{\Delta V}$$

w - объемная плотность энергии
Вспоминаем:

$$\mathrm{w}_E = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}; \quad \mathrm{w}_B = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}; \quad \mathrm{w} = \mathrm{w}_E + \mathrm{w}_B$$

$$I = \frac{\Delta E}{S\Delta t} = \frac{\mathrm{w}\Delta V}{S\Delta t} = \frac{\mathrm{w}c\cancel{\Delta t S}}{\cancel{S\Delta t}} = \mathrm{w}c \quad \Rightarrow \quad \boxed{I = \mathrm{w}\cdot c}$$

Связь объемной плотности энергии с частотой.

$$E_\perp \sim \frac{1}{r}; \quad I \sim E^2 \quad \Rightarrow \quad \boxed{I \sim \tfrac{1}{r^2}}$$

$$\mathrm{w} \sim E^2; \quad E_\perp \sim \omega^2 \quad \Rightarrow \quad \mathrm{w} \sim w^4$$

$$I = \mathrm{w}c \sim w^4 \quad \Rightarrow \quad \boxed{I \sim w^4}$$

Плотность потока энергии прямо пропорциональна четвертой степени ее частоты и обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника. NB!

Инвариант в классической электродинамике при переходе между ИСО.

$$\mathrm{w}_E = \mathrm{w}_B \quad \Rightarrow \quad \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}$$

$$\mu\mu_0\varepsilon\varepsilon_0 E^2 - B^2 = 0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{E^2 - v^2 B^2 = 0} \text{ – инвариант в ИСО}$$

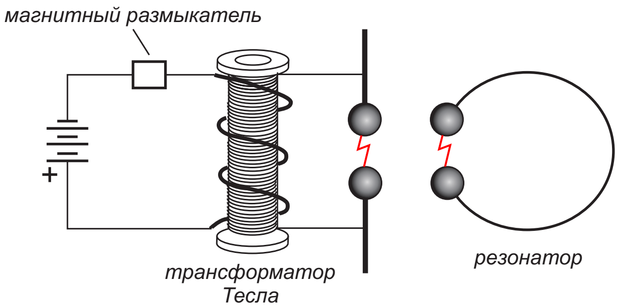
16.17 Экспериментальное подтверждение существования электромагнитной волны. Свойства электромагнитных волн.

За годы жизни Максвелла так и не удалось опытно подтвердить его теорию, хотя уже многие ученые к семидесятым годам XIX столетия были убеждены в справедливости этих уравнений.

Немецкий физик Больцман, потрясенный красотой этих уравнений, как внешней, так и внутренней, выразил свой восторг стихами, начинавшимися *"Не Бог ли эти знаки начертал?"*

Только почти через 10 лет после смерти Максвелла, в 1887 году, немецкий физик Генрих Герц представил установку для демонстрации электромагнитных волн.

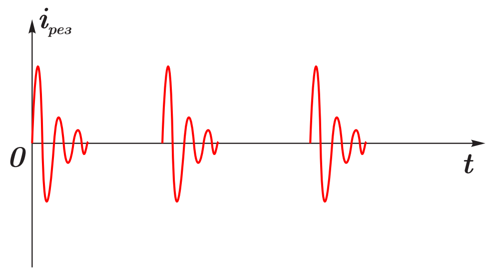
16.17.1 Опыт Герца



Этот эксперимент подтвердил существование электромагнитных волн. Трансформатор Тесла помогал получить большой заряд, накапливание которого на шариках приводило к пробою, т.е. проскакиванию искры.

Существование электромагнитной волны доказывалось тем, что в резонаторе между шариками тоже проскакивал заряд.

Искровой разряд - колебательный процесс, при котором в течение одной секунды миллионы раз происходит перезарядка конденсатора, и столько же раз меняется направление тока в контуре



Каждый проводник обладает емкостью и индуктивностью, поэтому, меняя форму резонатора интенсивность искры можно менять, подбирая параметры в резонанс с вибратором.

Г.Герц экспериментально оценил скорость э-м волны, используя свойство стоячих волн. Он перемещал резонатор по комнате, оценивая интенсивность искры. По расстоянию между пучностями он оценил длину стоячей волны. А, зная из параметров колебательного контура частоту колебаний, нашел скорость волны, которая оказалась близка к скорости света.

16.17.2 Излучение электромагнитных волн

Поскольку электромагнитная волна излучается при ускоренно движущемся электрическом заряде, для постоянного излучения проще всего использовать колебательное движение электронов в проводнике. При этом частота этих колебаний должна быть достаточно большой, так как плотность потока энергии пропорциональна частоте в четвертой степени, чтобы волна смогла распространиться на значительное расстояние от источника.

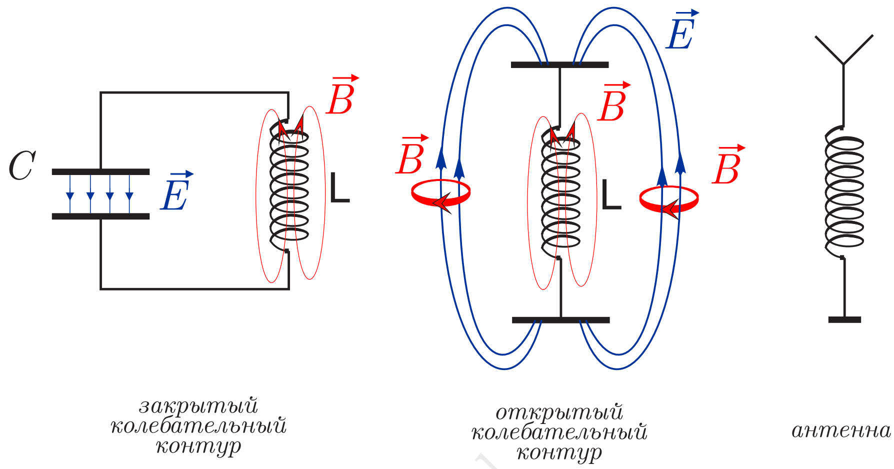
Таким образом, для излучения электромагнитных волн необходимо:

1. *Колебание зарядов с достаточно большой частотой.*

$$I \sim \omega^4 \quad \Rightarrow \quad I \sim \nu^4$$

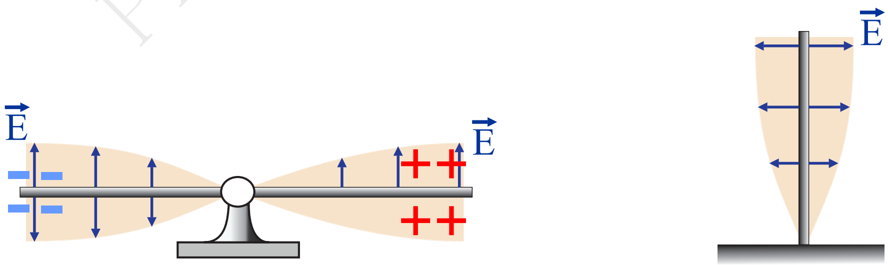
$$10^4 \text{ Гц} < \nu < 10^9 \text{ Гц}$$

2. *Форма излучателя должна быть такой, чтобы отдельные части не мешали излучать.*



Открытый колебательный контур, предназначенный для излучения энергии называется антенной(лат.- усики)

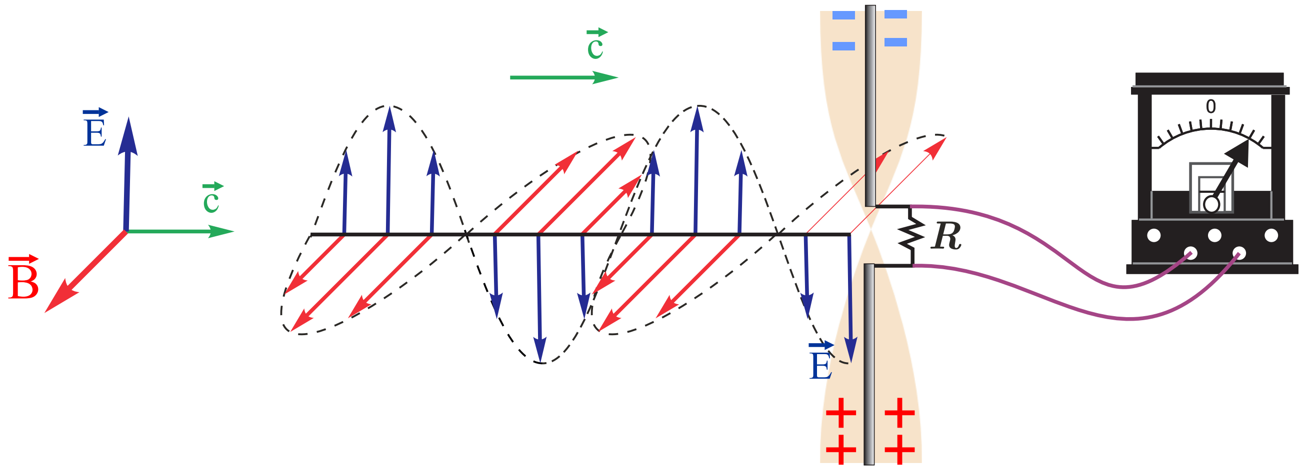
3. *Процесс излучения проходит хорошо, когда антенна имеет длину близкую: незаземленна - $\lambda/2$, заземленная - $\lambda/4$*



Как и в резонаторе со звуковыми волнами в антенне будет образовываться стоячие волны. Наибольшая амплитуда колебаний электронов должна быть на концах антенны, что соответствует пучности. Поэтому на концах антенны будет максимальная амплитуда колебаний напряженности электрического поля.

16.17.3 Прием электромагнитных волн

Пришедшая электромагинитная волна в принимающей антенне вызывает колебания свободных электронов вследствие явления электромагнитной индукции. Электроны будут совершать вынужденные колебания с частотой волны.



Так как в окружающем пространстве одновременно присутствуют большое количество электромагнитных волн с разной частотой и амплитудой, каждая из них будет действовать на свободные электроны. В результате электроны будут совершать сложные негармонические вынужденные колебания. В результате явления резонанса амплитуда будет наибольшей у тех колебаний для которых будет выполняться условие, что для например заземленной антенны будет выполнено следующее условие:

$$l = \frac{\lambda}{4}$$

Пример зависимости приема электромагнитной волны от длины принимающей антенны можно посмотреть на следующем опыте. (Видеоэксперимент) В опыте можно наблюдать источник электромагнитных волн и принимающую антенну, где в качестве индикатора используется лампочка, замыкающая две ветви антенны. При большой амплитуде колебаний свободных электронов, лампочка начинает светиться. Меняя положение антенны, ее длины, можем наблюдать, как прием электромагнитных волн и соответственно амплитуда колебаний свободных электронов будет изменяться.

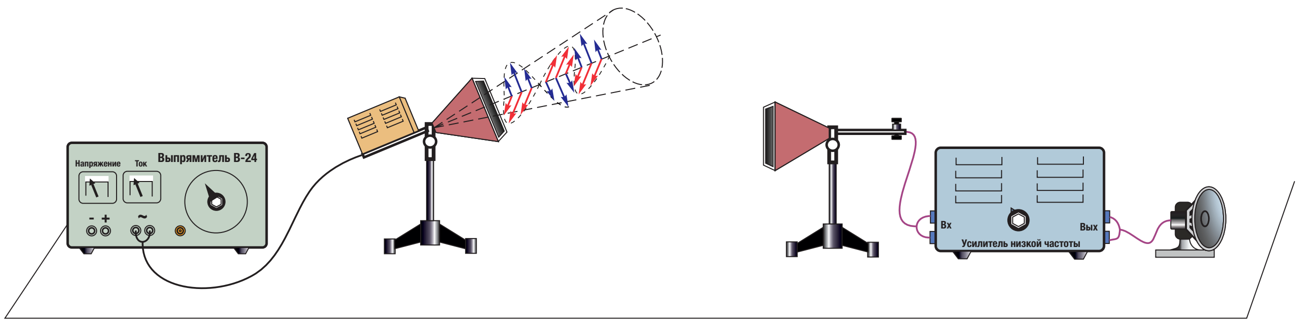
В основе приема электромагнитных волн лежит явление электромагнитной индукции и резонанса

16.17.4 Свойства электромагнитных волн

Рассмотрим свойства электромагнитных волн на примере волн с длиной $\lambda = 3$ см. Для фокусировки волны будем использовать металлический раструб, как на источнике волн, так и на приемнике. Для регистрации волн, принятый сигнал в виде переменного тока преобразуем при помощи усилителя низких частот (УНЧ) в звуковые колебания, которые будем излучать при помощи динамика.

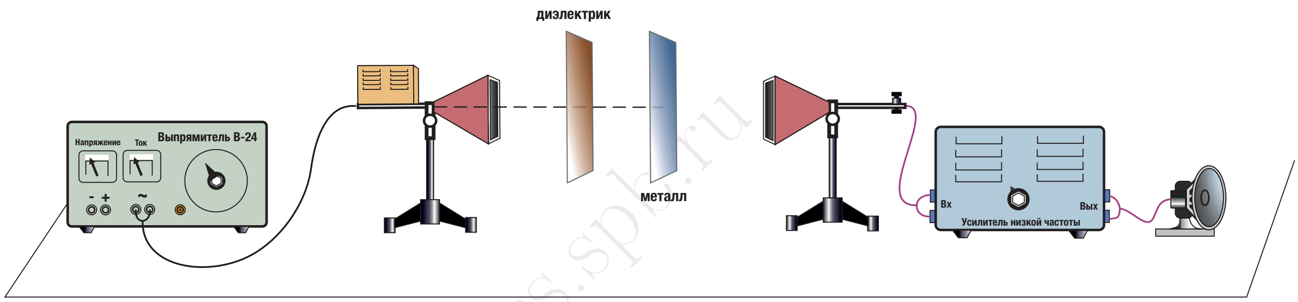
Прямолинейность распространения

Если раструб излучающей антенны направить вверх или в сторону, то в принимающей антенне не возникнет колебаний. Это говорит о прямолинейности распространения электромагнитных волн.



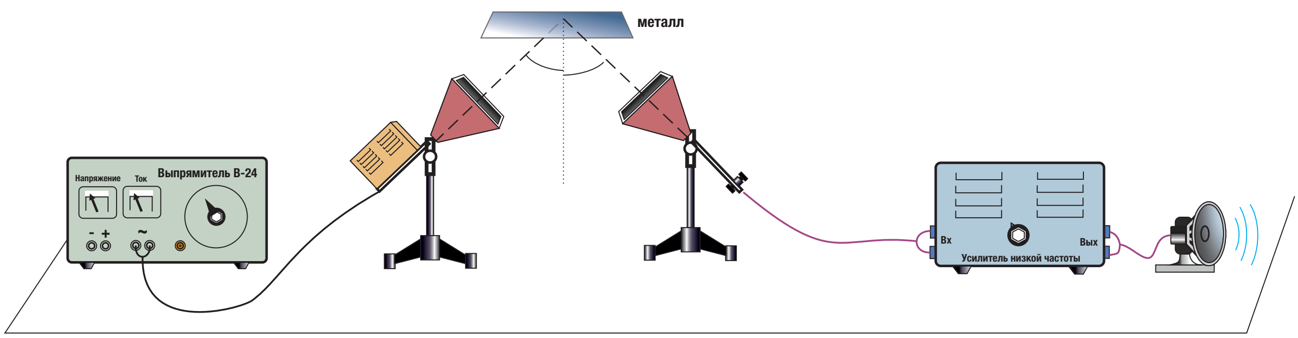
Отражение волн

Для демонстрации отражения электромагнитной волны поставим на ее пути пластину из диэлектрика и из проводника. Опыт показывает, что волна без изменений проходит через диэлектрик и отражается от проводника.



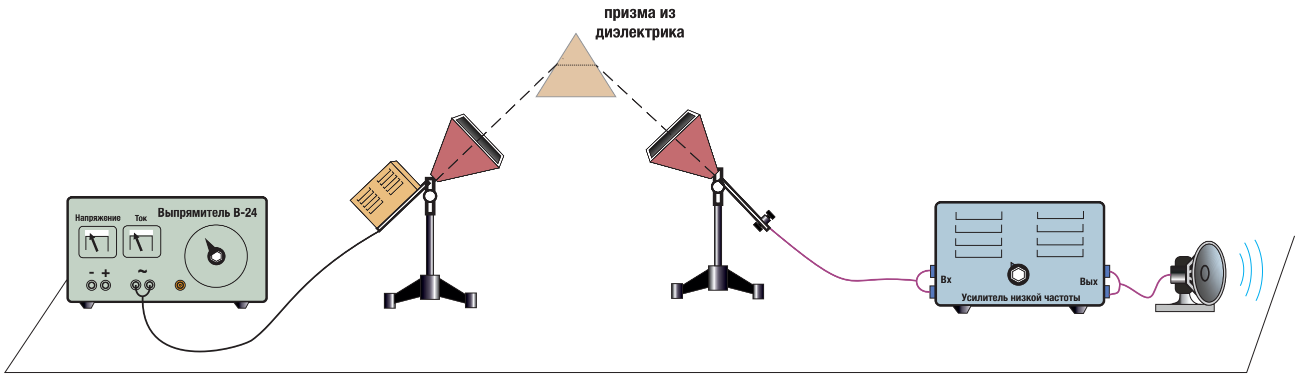
Причина в том, что при попадании электромагнитной волны на проводник, ее энергия переходит в энергию колебаний свободных электронов, а так как их концентрация в проводниках составляет 10^{21-23} 1/см^3, то вся энергия волны тратится на то, чтобы "раскачать"электроны. При этом эти электроны находятся в поверхностном слое и совершая колебания, двигаются с ускорением, поэтому они начинают излучать электромагнитную волну волну в обратном направлении.

Если направить волну под углом к проводнику, то можно убедится, что для электромагнитных волн будет выполняться закон отражения.



Преломление волн

Если направить электромагнитную волну на диэлектрическую призму, то она подобно свету в стеклянной призме, притомился. При этом для нее будет так же выполняться закон преломления.



В отличие от волн в вещественной среде, для электромагнитных волн, изменение скорости распространения при попадании в среду, принято сравнивать со скоростью распространения в вакууме. Поэтому для данной среды определяют абсолютный показатель преломления.

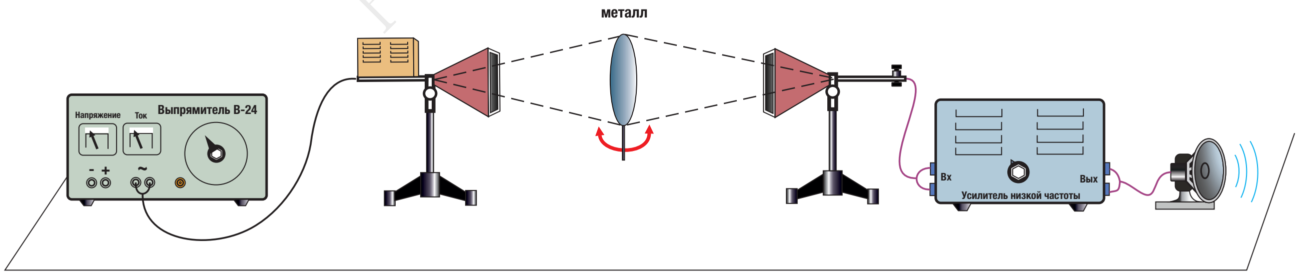
Абсолютный показатель преломления - отношение скорости э-м волны в вакууме к скорости волны в среде

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{c}{v} = n$$

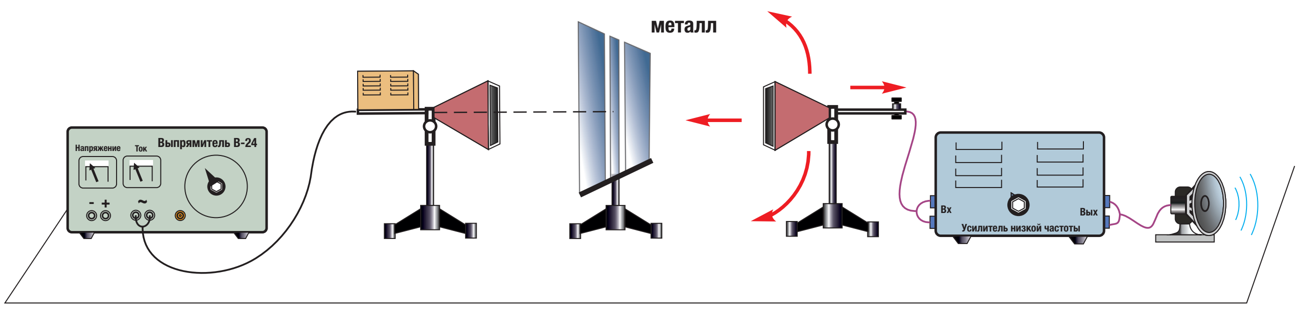
Относительный показатель преломления - скорость в одной среде к скорости в другой среде(не в к вакууму)

Дифракция и интерференция

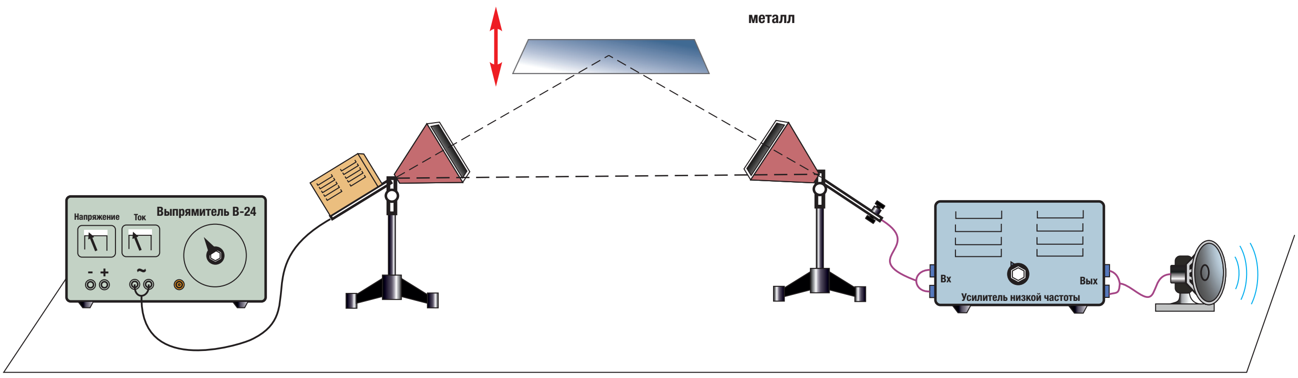
Если на пути волны поставить препятствие сопоставимое по размерам с раструбом, то за препятствием можно будет регестрировать волну, т.е. она будет заходить в область геометрической тени.



Если в качестве препятствия взять две щели в металлической пластине, то в пространстве за препятствием будем регистрировать области усиления и ослабления колебаний электромагнитного поля. Таким образом электромагнитные волны интерферируют.



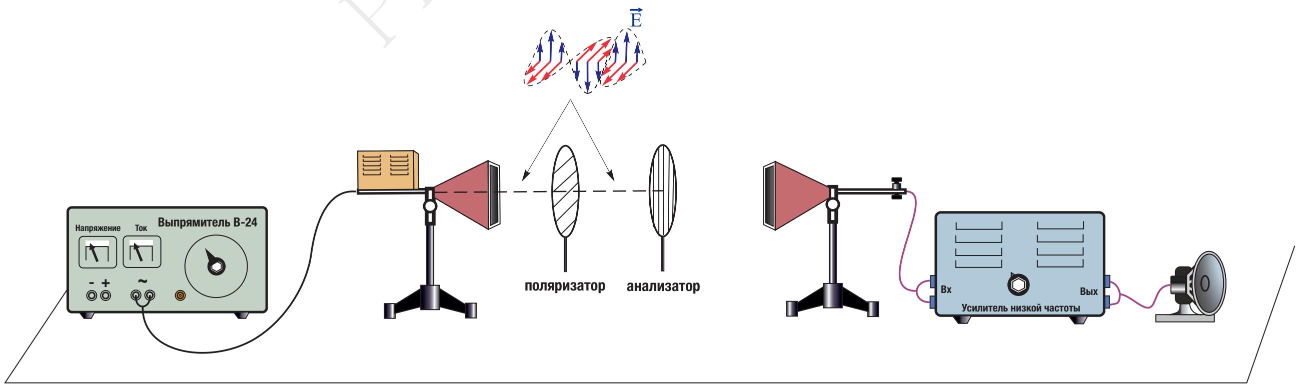
Если повернуть раструб так, чтобы часть волны попадал в принимающую антенну напрямую, а часть в результате отражения от пластины (см. рисунок), то принимающая антенна будет регистрировать чередующиеся максимумы и минимумы, при перемещении пластины сверху вниз. Перемещение пластины будет менять разность хода двух волн, в итоге они складываясь будут давать либо максимум либо минимум.



Поляризация

Если на пути волны поставить поляризатор, в виде набора металлических стержней с промежутками, и вращать его вокруг луча распространения волны, то можно убедиться, что при определенном положении волна не будет проходить через поляризатор. Следователь исходная волна поляризована.

Плоскость поляризации будет такой, что вектор напряженности электрического поля будет совершать колебания вдоль стержней. при таком положении поляризатора, когда волна не проходит.



Поляризация электромагнитных волн подтверждает, что они являются поперечными.

16.18 Принципы радиосвязи

Опыты Герца подтвердили идеи Максвелла о существовании электромагнитных волн. Встал вопрос, как их можно использовать. Основное – это передача информации беспроводным способом.

Одним из первых, кто смог передать информацию(в виде азбуки Морзе) был русский инженер Александр Степанович Попов(1859-1905). Усовершенствовав резонатор Герца, он демонстрировал искру большой аудитории. Возникла цель: создать удобный приемник.

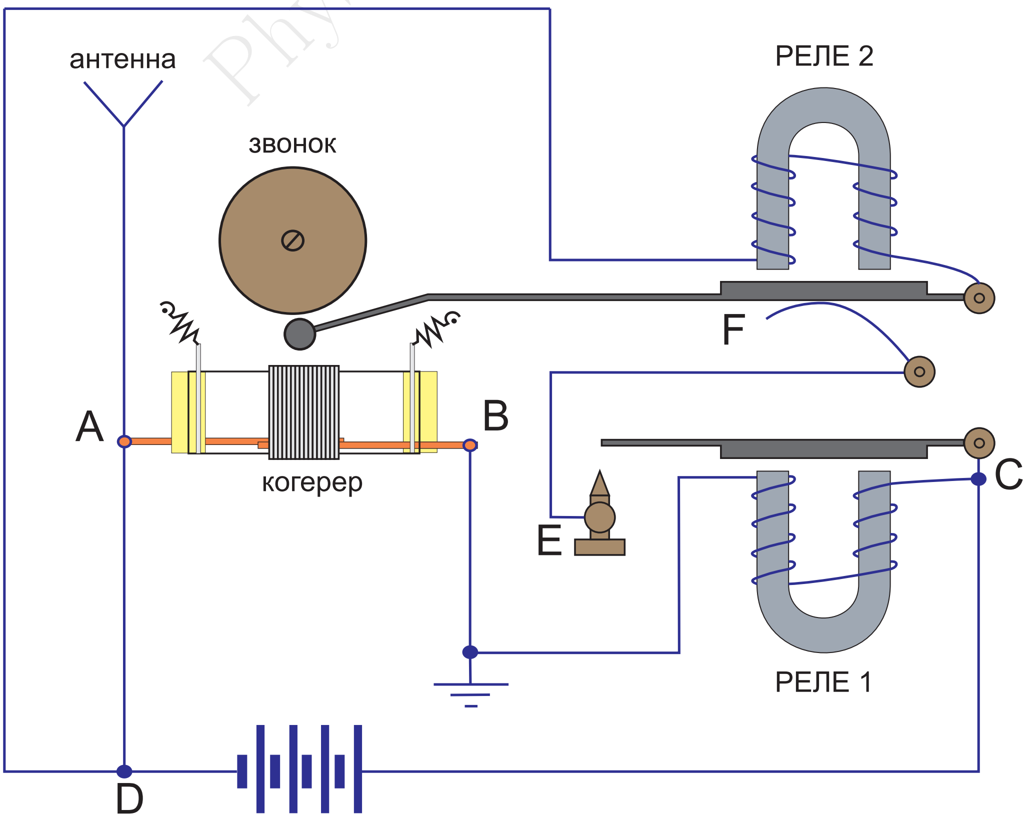
7 мая (День радио) 1895 года демонстрация первой радиопередачи. При помощи азбуки Морзе Попов передал два слова - "Генрих Герц". NB!

16.18.1 Грозоотметчик Попова

7 мая 1895 года в ходе лекции на заседании Русского физико-химического общества (РФХО) в Санкт-Петербургском университете А. С. Попов представил новый созданный прибор, который получил название «прибор для обнаружения и регистрирования электрических колебаний». Позже данный прибор был назван грозоотметчиком. Тема лекции была: «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям».

7 мая в нашей стране отмечается как день радио. NB!

Схема грозоотметчика приведена ниже.



При приходе электромагнитной волны, в принимающей антенне, которой является антенна, когерер (участок A-B) и дальше до точки заземления, возникают высокочастотные колебания электронов. Поскольку когерер исходно обладает большим сопротивлением, т.к. порошок состоит из металлических опилок с большими промежутками, опилки нагреваются и начинают спекаться. В результате сопротивление когерера падает и цепь: A-B-Реле1-источник-D-A замыкается и через первое реле начинает течь ток.

Реле 1 притягивает пластину и в точке E замыкается вторичная цепь: Источник-C-E-F-Реле2-D-Источник. Через второе реле начинает течь ток и оно притягивает к себе пластину с бойком, который бьет по звонку. В этот момент происходит разрыв вторичной цепи в точке F, ток через второе реле прекращается и пластина начинает падать вниз, под действием силы тяжести. При этом боек бьет по когереру и встряхивает его. Опилки рассыпаются, сопротивление когерера резко возрастает и первичная цепь размыкается. В итоге система возвращается в исходное состояние.

Таким образом, энергия пришедшей электромагнитной волны используется только для управления первичной цепью. Вся сложность установки заключалась в опилках, которые использовались в когерере. Их сопротивление в двух состояниях должно было быть таким, что первичную цепь можно было считать в одном положении замкнутой, а во втором - разомкнутой.

Вывод - ничтожная энергия, принятая антенной, используется не прямо для приема, а управляет источником энергии. Так же в приемнике появилась обратная связь, которая позволяла вернуть систему в исходное состояние.

NB!

24 марта 1896 года на ученом собрании Русского физико-химического общества (РФХО), происходившем в физическом кабинете Санкт-Петербургского университета, Александр Попов совместно со своим постоянным ассистентом Петром Рыбкиным организовали беспроволочную передачу текстового сообщения из двух слов. Рыбкин находился на расстоянии 250 метров в здании химического факультета и передавал кодированные сигналы. В качестве источника электромагнитных колебаний Попов использовал генератор Герца с катушкой Румкорфа (источником импульсов высокого напряжения).

Уже весной 1897 года в опытах в Кронштадской гавани (Попов тогда преподавал в Техническом училище морского ведомства) - была достигнута дальность радиопередач - 600 м, а летом того же года 6 км (радиосвязь двух крейсеров в Финском заливе)

В конце жизни Попов возглавил русский электротехнический институт(ЛЭТИ) и в 1901 году он избирается почетным членом русского технического общества.

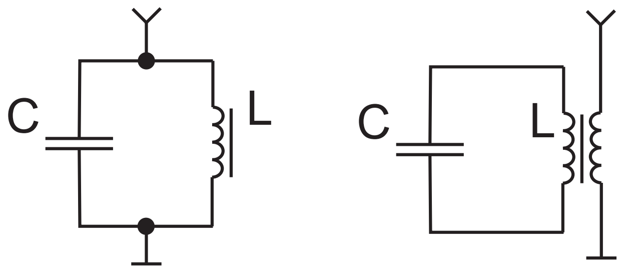
16.19 Физические основы радиопередачи

Что необходимо, чтобы осуществить радиопередачу, т.е. осуществить передачу голосовой информации при помощи электромагнитных волн?

1.Высокочастотные колебания $\nu > 10^5 Hz$. Как их можно получить?

Получают в закрытом колебательном контуре с помощью генератора

2.*Открытый колебательный контур - антенна.*



$$l_{\text{заз}} = \frac{\lambda}{4}, \quad l = \frac{\lambda}{2}$$

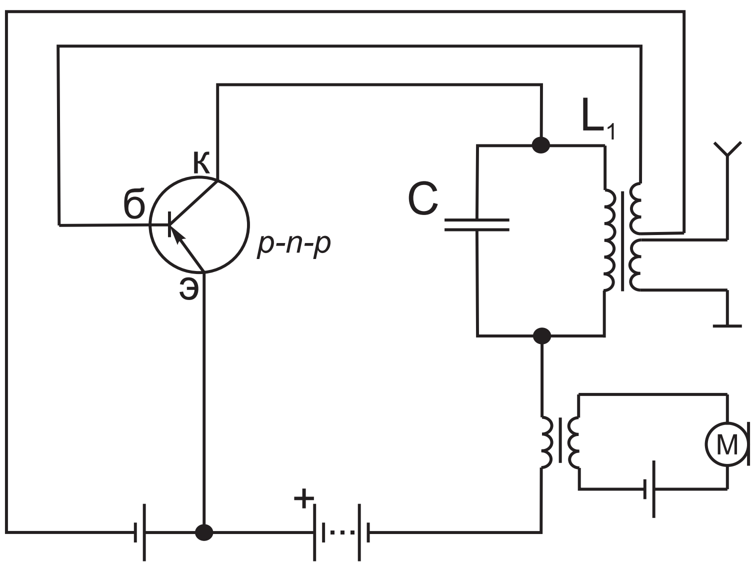
3.*Строго фиксированная несущая частота*

4.*Модулирование - воздействие на несущую частоту звуковой частотой, при котором изменяется одна из характеристик несущей частоты (амплитуда, частота , фаза)*

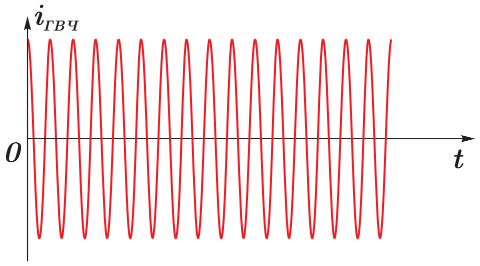
Как передать с помощью э-м волны информацию. Ее можно зашифровать в амплитуде, частоте и фазе колебаний. Рассмотрим подробно, как это делается при помощи изменения амплитуды колебаний.

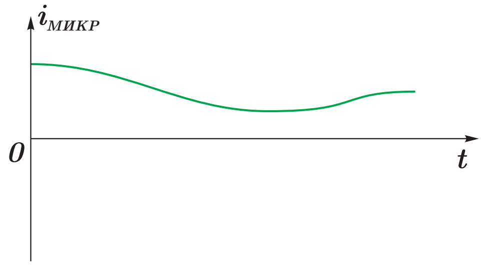
Амплитудная модуляция - изменение амплитуды колебаний несущей частоты в соответствии с амплитудой звуковой частоты

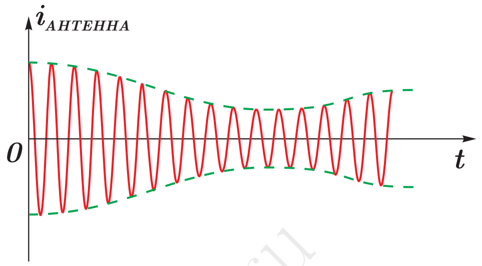
Схема передатчика:



Как это сделать? Вспомним устройство микрофонов. Угольный и электродинамический.
Что кроме микрофона должно входить в схему передатчика? ГВЧ.







Ток в цепи микрофона наводит $\varepsilon_{\text{инд}}$ в цепи к-э генератора. Это приводит к ограничению амплитуды тока в этой цепи.

Пусть ГВЧ дает сигнал с несущей частотой ω и амплитудой, которая зависит от времени:

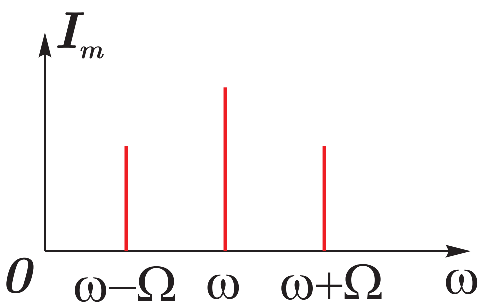
$$i(t) = I_0(t)\cos\omega t$$

Амплитуда будет складываться из постоянного значения I_{01}, которое дает ГВЧ и модулированной части, которая создается в цепи микрофона (меняется со звуковой частотой Ω) и воздействует на амплитуду ГВЧ:

$$I_0(t) = \underbrace{I_{01}}_{\text{ГВЧ}} + \underbrace{I_{02}\cos\Omega t}_{\text{микрофон}}, \qquad \Omega << \omega$$

$$\Rightarrow \quad i(t) = I_{01}\cos\omega t + I_{02}\cos\omega t\cos\Omega t = I_{01}\cos\omega t + \frac{1}{2}I_{02}\cos(\omega+\Omega)t + \frac{1}{2}I_{02}\cos(\omega-\Omega)t$$

Таким образом, для передачи при помощи несущей частоты ω, строго определенной звуковой частоты Ω требуется занять в эфире три частоты: ω, $\omega+\Omega$ и $\omega-\Omega$. Для передачи более сложных звуков, потребуется занять диапазон частот. И если максимальная звуковая частота составляет 20 кГц, то полосу частот. которую будет занимать в эфире радиопередатчик, составит 20 кГц.



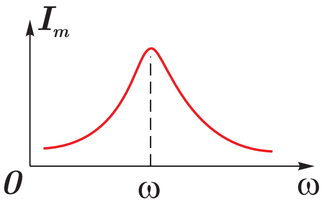
16.20 Физические основы радиоприема

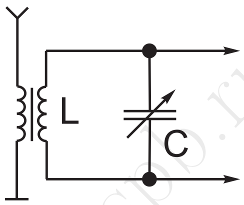
16.20.1 Детекторный радиоприемник

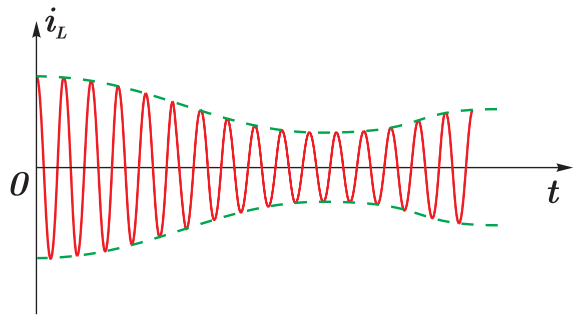
Для осуществления радиоприема необходимо выполнить следующие действия:

1. Принять высокочастотные колебания. Для этого служит приемная антенна. Какие сигналы возникают в приемной антенне? Всех радиостанции! Что необходимо для настройки на какую-либо радиостанцию?

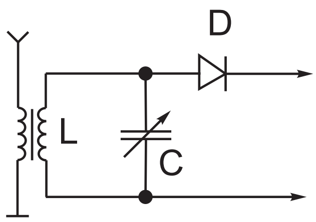
2. *Для выделения из принятых колебаний высокой частот колебаний интересующей нас станции(ω_0) используется явление резонанса.*

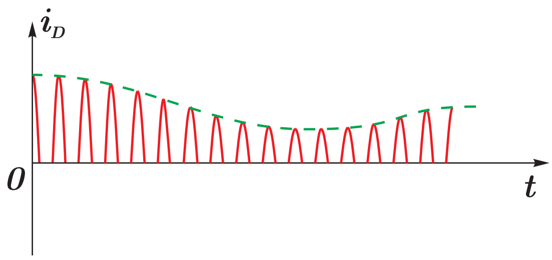






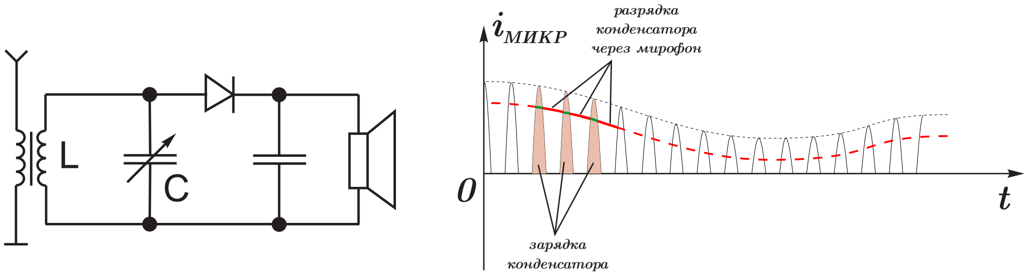
3. *Выделение звуковой частоты из высокочастотных, модулированных колебаний называется детектированием или демодуляцией*





Формально: сигнал можно представить в виде двух ВЧ и НЧ. Сопротивление конденсатора $x_c = \frac{1}{\omega_0 c}$ по низкой частоте достаточно велико, зато сопротивление динамика(катушки) $x_L = \omega L$ - мало, тогда НЧ направляется в динамик, а высокая частота через конденсатор.

Иначе: При протекании положительного полупериода тока (только в одном направлении) конденсатор заряжается и часть тока идет через динамик. В следующем полупериоде (когда тока нет) и обратный ток пойти не может, конденсатор разряжается через динамик. Т.о. ток через динамик течет непрерывно, амплитуда не зависит от амплитуды пришедших колебаний.



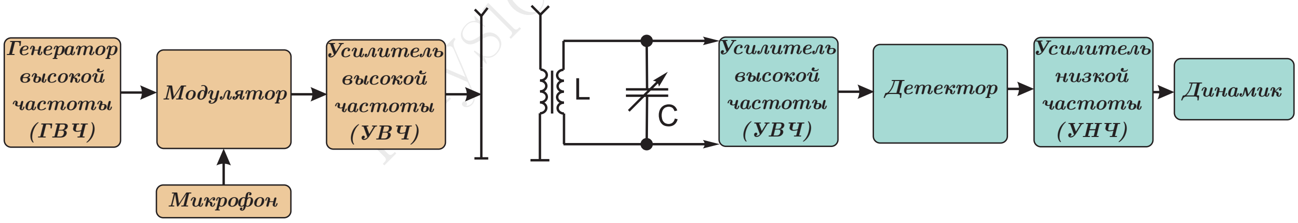
Def. Получившаяся схема называется детекторным радиоприемником.

Особенностью работы детекторного радиоприемника, является отсутствие источника ЭДС. Приемник работает за счет энергии пришедшей электромагнитной волны. NB!

4. В более сложных радиоприемниках, после детектирования, сигнал пропускаю через усилитель звуковой или низкой частоты (УНЧ).

5. *Воспроизведение звука - динамик, телефон*

16.20.2 Блок-схема радиовещательного тракта

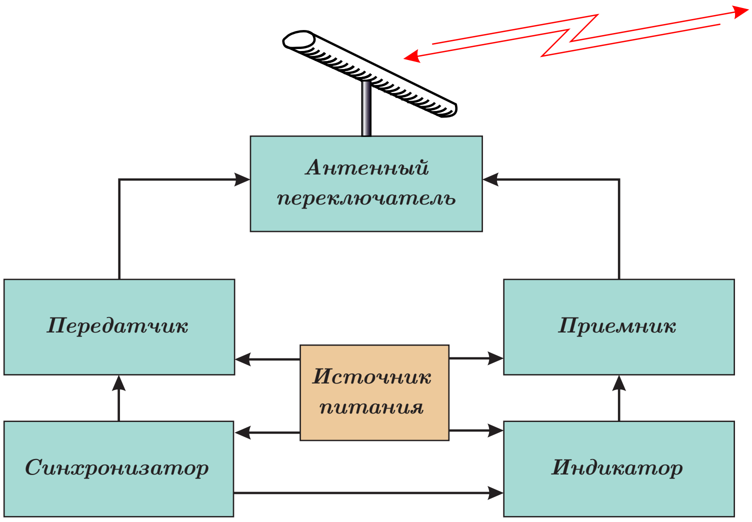


16.21 Радиолокация

Def. Радиолокация – это обнаружение местонахождения предметов с помощью радиоволн. Установка - радар.

Особенности радиолокации:

1. $I \sim \omega^4$, тогда для возвращения обратно "обозримого сигнала" $10^8 < \nu < 10^{11} Hz$ - СВЧ диапазон.



2. Антенна направленного действия.

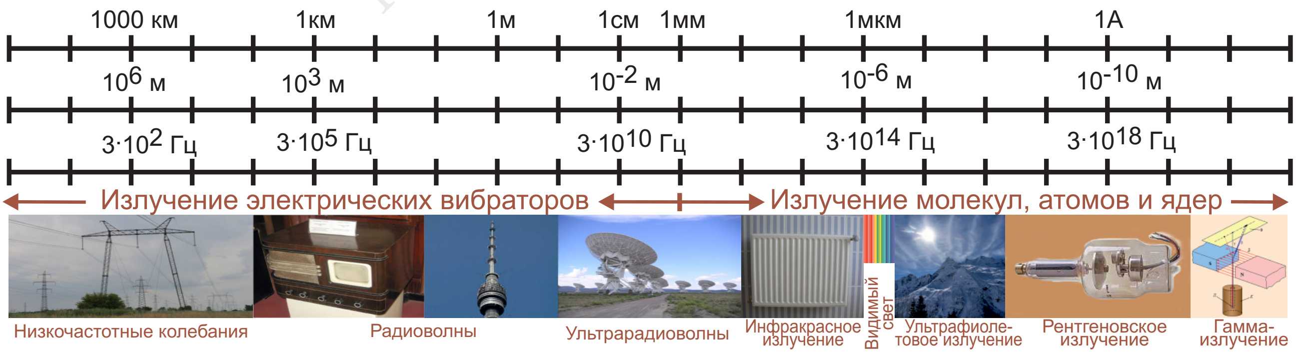
3. Молчание станции для возвращения отраженного сигнала.

4. Длина волны меньше размеров предмета.

С помощью радиолокации было проведено уточнение расстояния от Земли до Луны. Радиолокация используется в военных целях.

16.22 Шкала электромагнитных волн

Рассмотрим шкалу электромагнитных волн. Все ли она одинаковы по свойствам?



Начиная с опытов Герца пытались получить волны все большей и большей частоты. Длина волны, соответственно, становилась все меньше. Придумывали хитроумные машины, и дошли до диапазона инфракрасного излучения. Чем оно отлично? Почему это важно. Фундаментальным оказался факт, что излучение, получаемые вибраторами или нагретыми телами имеют одну природу - это показало "смыкание"областей волн.

Все волны имеют одну электромагнитную природу и распространяются в вакууме. Все э-м волны обладают свойствами: отражения, преломления, интерференции, дифракции, поляризации.

$$c = 299792456,2 \pm 1,1\text{м}/c$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

ν - не меняется при переходе из одной среды в другую (принцип Г-Ф)
Но есть и отличия:

- сверхдлинные λ>10 км
- длинные 10 км<λ<10 км - распространяются за горизонт, дифракция, отражение от ионосферы
- средние 100 м<λ<1 км - хуже подвержены дифракции, распространяются на меньшие расстояния
- короткие 10 м<λ<100 м - дифракции нет, но хорошо отражаются от ионосферы
- ультракороткие λ<10 м проходят сквозь ионосферу, только в пределах видимости, применяют ретрансляторы

С увеличением частоты увеличивается проникающая способность. Например, рентгеновское излучение проходит сквозь человека, а γ - лучи через 1 см слой свинца, проходят так, что их интенсивность убывает лишь вдвое.

Интересно, что для более коротких длин волн (больших частот) начинают преобладать свойства частиц, эти нельзя пренебречь уже для света.

Цвет видимого света, различная проникающая способность, способность вызывать люминесценцию, биологическая активность, - все эти различия связаны с частотой.