

Чувашский государственный университет
Раритетная лаборатория физики
raritet.chuvsu.ru

Электромагнитного волны.
Лекция 30 (СПО)



Лекцию подготовил
доцент кафедры общей физики
Сорокин Геннадий Михайлович

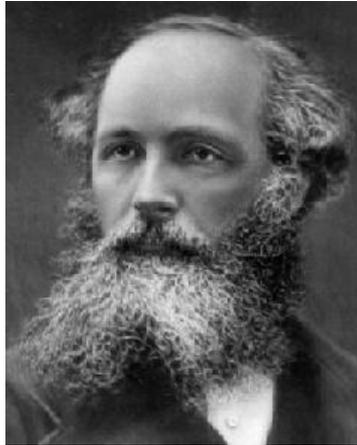
2025 год

Содержание

Историческая справка и опыт с сотовым телефоном.

1. Электромагнитные волны и их свойства.
2. Открытия Герца и Попова.
3. Основы радио теле и спутниковой связи.

Историческая справка и опыт с сотовым телефоном



**Джеймс Клерк
Максвелл (1831–
1879)**



**Генрих Рудольф Герц
(1857 – 1894)**

Максвелл был глубоко убежден в реальности электромагнитных волн, но не дожидаясь их экспериментального обнаружения. Лишь в 1889 году через 10 лет после его смерти электромагнитные волны экспериментально получены Герцем.

7 мая в 1895 году Попов продемонстрировал практическое применение электромагнитных волн для радиосвязи.



Александр Степанович Попов (16.03.1859 - 13.01.1906 гг.) – великий русский ученый, изобретатель радио.

Гаусс Карл Фридрих (1777 – 1855) *немецкий математик, астроном и физик.*



- Исследования посвящены многим разделам физики.
- В 1832 г. создал абсолютную систему мер (СГС), введя три основных единицы: единицу времени – 1 с, единицу длины – 1 мм, единицу массы – 1 мг.
- В 1833 г. совместно с В. Вебером построил первый в Германии электромагнитный телеграф.
- Еще в 1845 г. пришел к мысли о конечной скорости распространения электромагнитных взаимодействий.

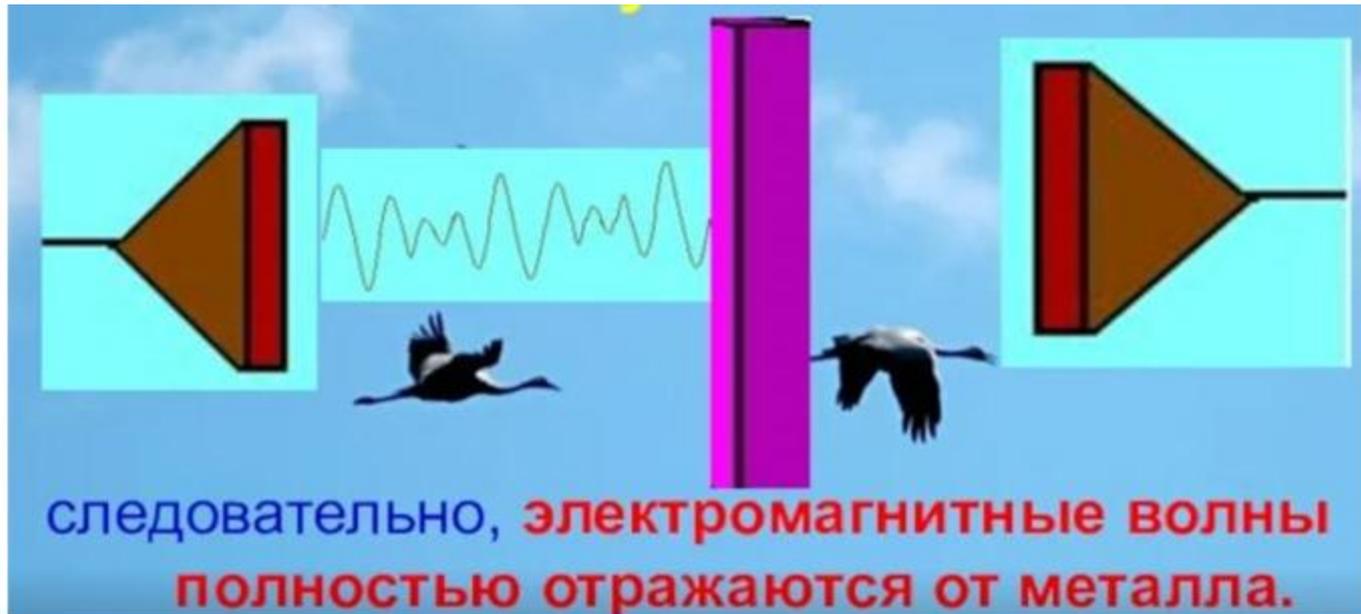


• **Остроградский Михаил Васильевич** (1801 – 1862)

- отечественный математик и механик. Учился в Харьковском ун-те (1816 – 1820), совершенствовал знания в Париже (1822 – 1827).
- Основные работы в области математического анализа, математической физики, теоретической механики. Решил ряд важных задач гидродинамики, теории теплоты, упругости, баллистики, электростатики, в частности задачу распространения волн на поверхности жидкости (1826 г.). Получил дифференциальное уравнение распространения тепла в твердых телах и жидкостях. Известен теоремой Остроградского-Гаусса в электростатике (1828 г.).

$$\oint_S E_n dS = \frac{\sum q}{\epsilon_0}$$

Опыт с сотовым телефоном, который поместить в металлическую коробку



1. Электромагнитные волны и их свойства.

Уравнения Максвелла.

Теория Максвелла рассматривает электромагнитное поле, как неразрывную связь электрического и магнитных полей, которые могут превращаться друг в друга и распространяться в пространстве.

Первое уравнение Максвелла является обобщением закона электромагнитной индукции Фарадея.

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Четыре уравнения Максвелла для электромагнитного поля в интегральной и дифференциальной форме.

№	Получено на основе	Интегральная форма	Дифференциальная форма
1	закон электромагнитной индукции Фарадея	$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \oint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$	$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
2	закон полного тока для магнитного поля в веществе	$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \oint_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}$	$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$
3	теоремы Остроградского-Гаусса для электростатического поля в диэлектрике	$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho(V) dV$	$\text{div } \vec{D} = \rho(V)$
4	теоремы Остроградского-Гаусса для МП в вакууме	$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$	$\text{div } \vec{B} = 0$

Семь уравнений Максвелла

$$1. \oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \oint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}_n$$

$$4. \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

$$2. \oint_L \vec{H} d\vec{l} = \oint_S \left(\vec{j}_{\text{мп}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}_n$$

$$5. \vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}.$$

$$3. \oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV,$$

$$6. \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}.$$

$$7. \vec{j} = \gamma \vec{E}.$$

Уравнения (1-7) составляют систему уравнений Максвелла. Они являются наиболее общими для электрических и магнитных полей в покоящихся средах. Уравнения Максвелла – инварианты относительно преобразований Лоренца.

Различие в знаках первого уравнения Максвелла соответствует закону сохранения энергии и правилу Ленца.

Если бы знаки при $\frac{d\vec{B}}{dt}$ и $\frac{d\vec{D}}{dt}$ были одинаковы. То бесконечно малое увеличение одного из полей вызвало бы неограниченное увеличение обоих полей, а бесконечно малое уменьшение одного из полей приводило бы к полному исчезновению обоих полей. То есть различие в знаках является необходимым условием существования устойчивого ЭМП.

Выводы по уравнениям Максвелла

1. Теорией Максвелла называется последовательная теория единого поля ЭМП, создаваемого произвольной системой зарядов и токов. В этой теории решается основная задача электродинамики – по заданному распределению зарядов и токов отыскиваются характеристики электрического и магнитного полей. Эта теория явилась обобщением важнейших законов, описывающих электрические и магнитные явления (аналогично уравнениям Ньютона и началам термодинамики).

2. В теории Максвелла рассматриваются макроскопические поля, которые создаются макрозарядами и макротоками. Расстояния от источников полей до рассматриваемых точек много больше размеров атомов. Периоды изменения переменных электрических и магнитных полей много больше периодов внутренних процессов.

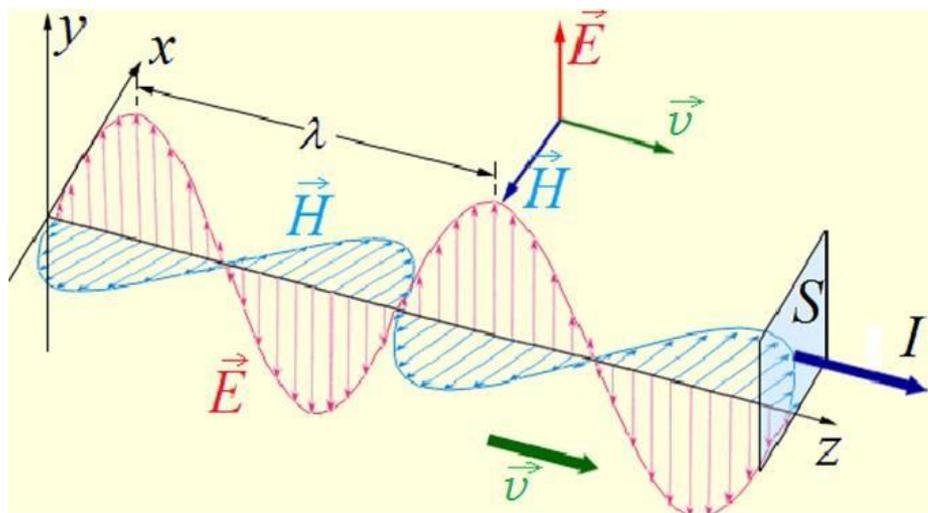
3. Теория Максвелла имеет феноменологический характер. В ней не рассматриваются внутренние механизмы явлений в среде. Среда описывается с помощью трёх величин ϵ , μ и σ .

4. Теория Максвелла является теорией близкодействия, согласно которой электрические и магнитные взаимодействия происходят в электрических и магнитных полях.

Свойства электромагнитных волн.

1. В электромагнитной волне, распространяющейся со скоростью v , векторы E и H всегда колеблются в одинаковых фазах, и

$$\sqrt{\epsilon_0 \epsilon} E = \sqrt{\mu_0 \mu} H.$$



2. Скорость электромагнитных волн в вакууме равна

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}.$$

3. Скорость электромагнитной волны в диэлектрике

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}.$$

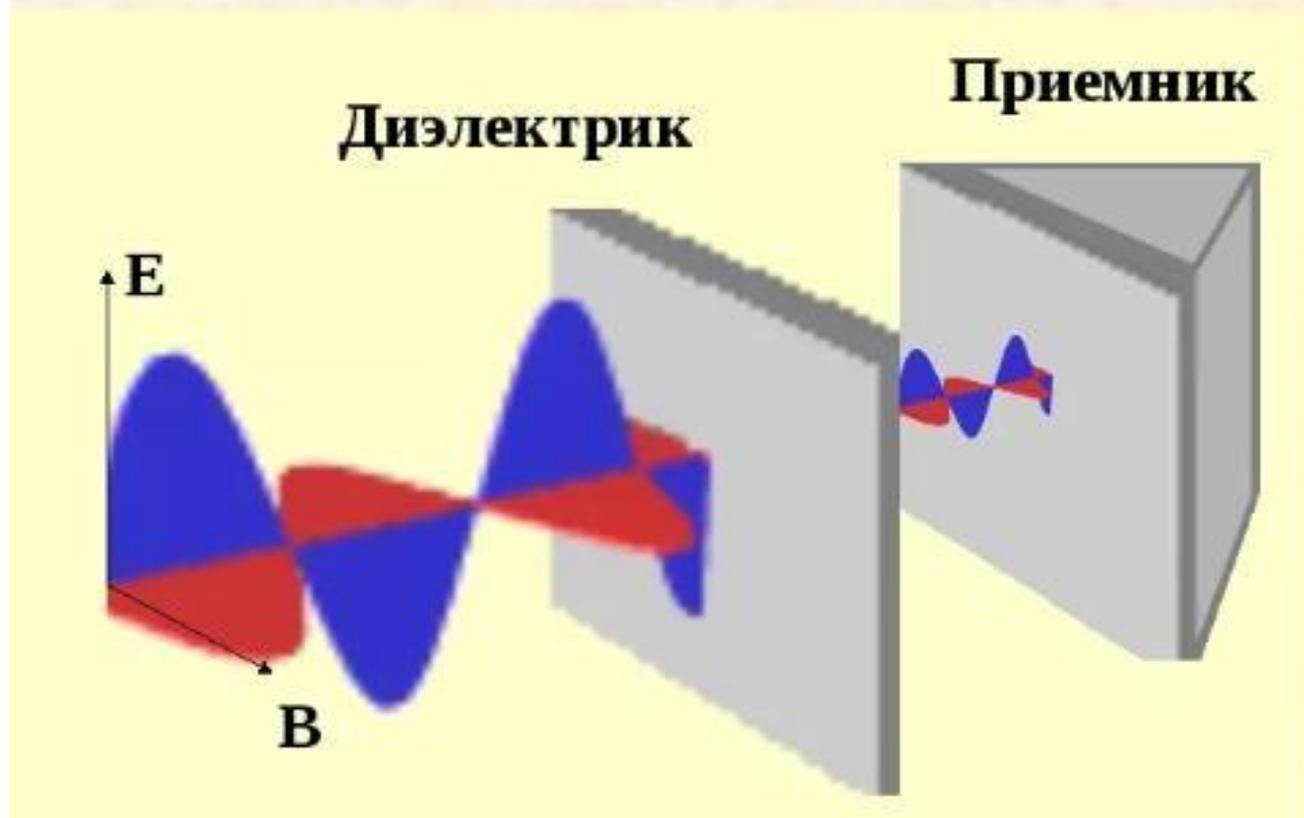
4. Электромагнитные волны поперечные, векторы E , H и v взаимно перпендикулярны и образуют правовинтовую систему.

5. При переходе электромагнитной волны из одной среды в другую частота волны не изменяется.

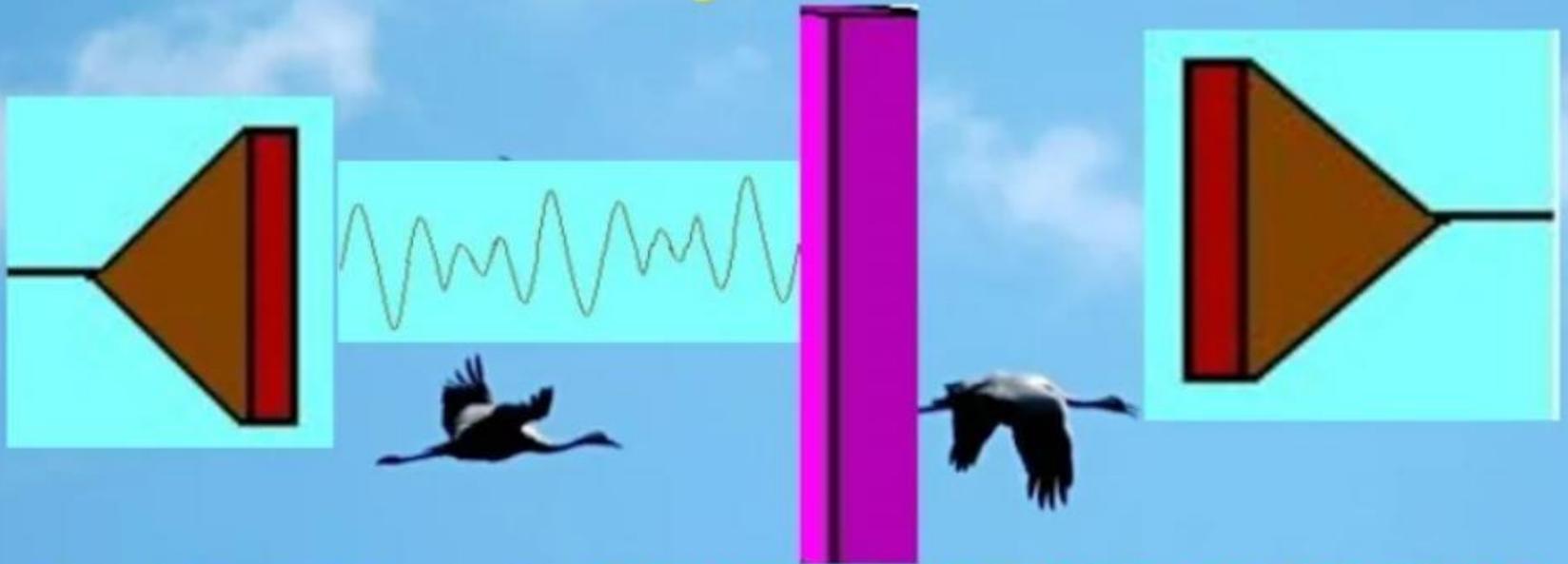
6. Электромагнитные волны проходят через диэлектрики и отражаются от металлов.

В диэлектриках электромагнитные волны распространяются без затухания, в хороших же проводниках — металлах — электромагнитные волны затухают настолько быстро, что даже тонкие слои металлов оказываются непрозрачными для волн. Объясняется это, конечно, тем, что энергия волны переходит по мере ее распространения в джоулево тепло, выделяемое возбуждаемыми полем волны токами проводимости.

уменьшение амплитуды



Заменим диэлектрик металлической пластиной – звук совсем исчез.



следовательно, электромагнитные волны полностью отражаются от металла.

Опыт с сотовым телефоном, который поместить в металлическую коробку....

7. Распространение электромагнитной волны в однородной и изотропной среде описывается волновыми уравнениями для вектора напряженности электрического и магнитного поля :

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}.$$

$$\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}$$

$$v = \frac{c}{n} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}},$$

где: v - фазовая скорость

Этим уравнениям удовлетворяют плоские монохроматические волны, описываемые уравнениями:

$$E = E_0 \cos(\omega t - kz + \varphi), \quad H = H_0 \cos(\omega t - kz + \varphi).$$

В этих уравнениях:

$k = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon \mu}$ – волновое число;

ω – циклическая частота волны;

E_0 и H_0 – амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей волны;

φ – начальная фаза колебаний волны в точке $z = 0$.

8. Электромагнитные волны, например , в виде света оказывают давление на твердые тела и газы.

Максвелл на основе электромагнитной теории света предсказал, что свет должен оказывать давление на препятствие.

Под действием электрического поля волны электроны в телах совершают колебания – образуется электрический ток.

Этот ток направлен вдоль напряженности электрического поля. На упорядоченно движущиеся электроны действует сила Лоренца со стороны магнитного поля, направленная в сторону распространения волны – это и есть *сила светового давления*.

2. Открытия Герца и Попова.

Колебательный контур Герца.

Уравнения Максвелла связывают друг с другом пространственные и временные производные напряженностей электрического и магнитных полей.

Это означает, что меняющийся во времени электромагнитный процесс в данном месте, должен вызвать изменения в другом месте с некоторым запаздыванием, т.е. процесс передачи электромагнитных взаимодействий должен происходить с конечной скоростью.

При распространении ЭМП в среде

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}},$$

а т.к. $\epsilon > 1$ и $\mu > 1$, то всегда $v < c$.

В отличие от других форм материи ЭМП не может находиться в состоянии покоя. Оно всегда движется, причем в вакууме скорость распространения ЭМП всегда равна c , независимо от системы отчёта.

Отсюда Максвелл заключил возможность существования электромагнитных волн – переменного электромагнитного поля, распространяющегося в пространстве с конечной скоростью.

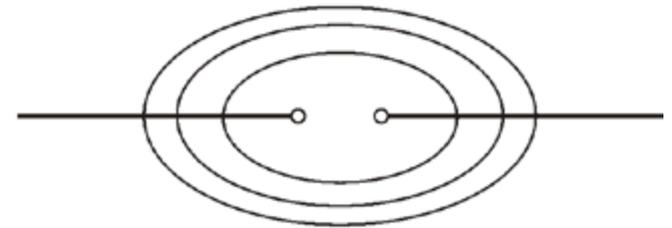
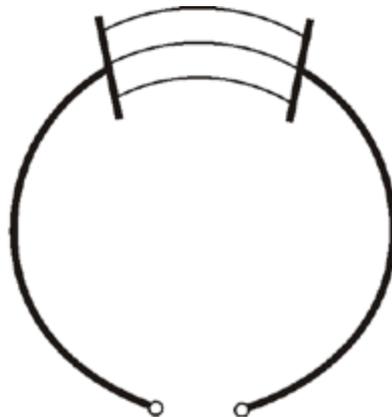
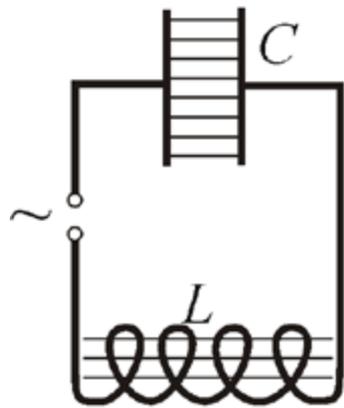
$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = c, \text{ скорость света.}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{8,85 \cdot 10^{-12} \times 4\pi \cdot 10^{-7}}} = 2,9994 \cdot 10^8 \text{ м/с} \text{ это и есть скорость распространения}$$

ЭМП в вакууме.

Впервые электромагнитные волны были обнаружены в 1887 г. Генрихом Герцем, который в качестве источника электромагнитных колебаний использовал колебательный контур. Источником электромагнитных волн может быть любой колебательный контур или проводник, по которому течет переменный электрический ток, так как для возбуждения электромагнитных волн необходимо создать в пространстве переменное электрическое поле (ток смещения) или соответственно переменное магнитное поле.

Излучающая способность источника ЭМВ определяется его формой, размерами и частотой колебаний. Для получения электромагнитных волн Герц использовал открытый колебательный контур, принцип построения которого показан на рисунке.



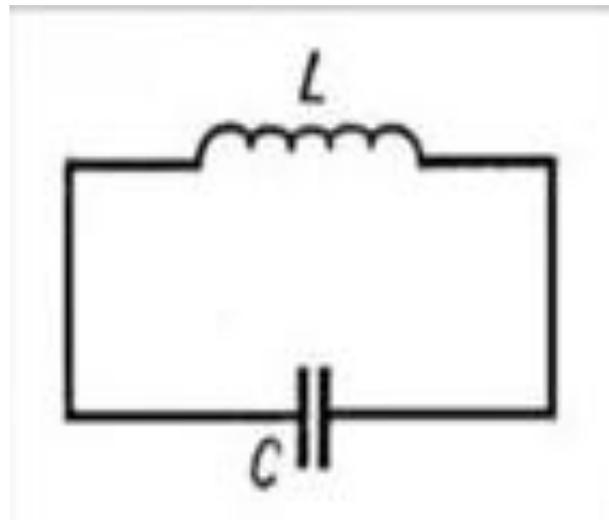
Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью L и конденсатора емкостью C .

Период колебания: $T = 2\pi\sqrt{LC}$,

Циклическая частота: $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

Энергия:

$$W = \frac{LI_{max}^2}{2} = \frac{CU_{max}^2}{2} = \frac{Li^2}{2} + \frac{Cu^2}{2}$$



Усовершенствовав вибратор Герца и применив свой приемник, профессор Петербургского электротехнического института А.С. Попов 1896 г. впервые в мире наладил опытную радиотелеграфную связь и осуществил с помощью электромагнитных волн передачу сообщения на расстояние около 250 м (были переданы слова «Генрих Герц»). Тем самым было положено основание радиотехнике. В 1899 г. Попов довел расстояние беспроводной передачи сигналов до 50 км.

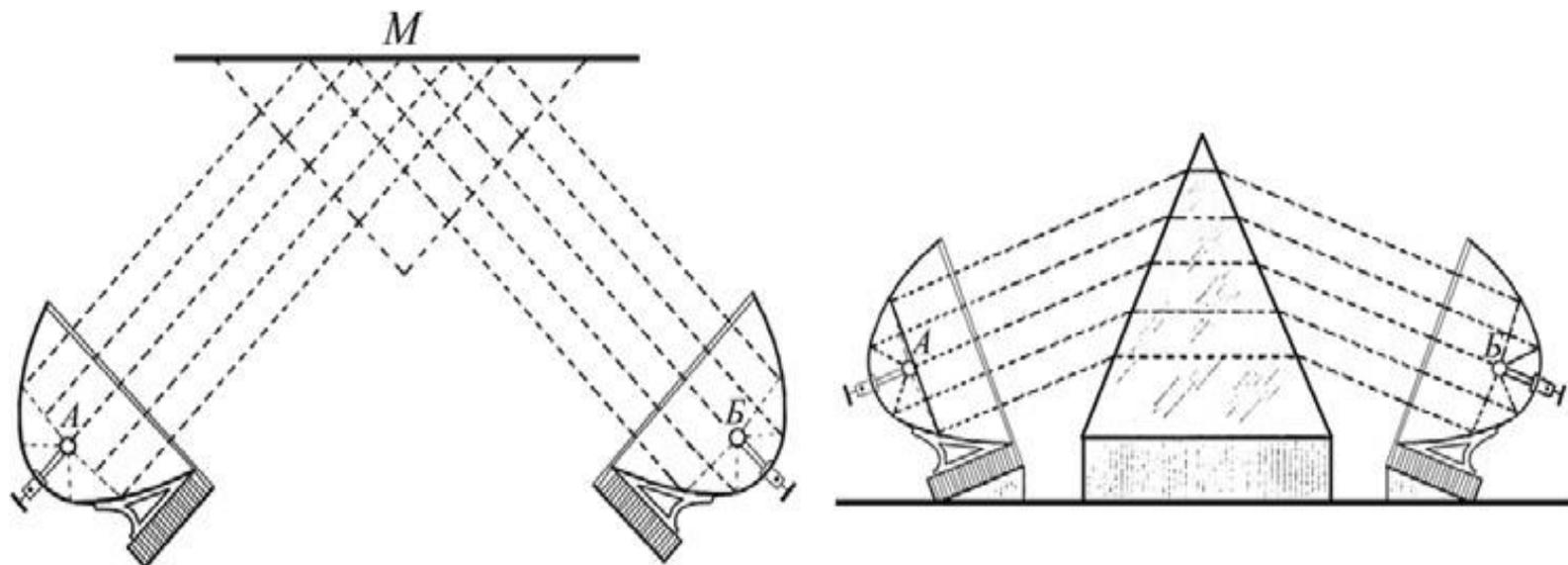
В 1901 г. была осуществлена радиотелеграфная связь через Атлантический океан. Изобретение электронных ламп (1904 – 1907) и применение их для генерирования незатухающих колебаний (1913 г.) сделали возможным развитие радиотелеграфии и радиовещания. В 20 – 30-ых гг. весь мир покрылся сетью мощных радиопередающих станций.

Человечество вступило в новую эру коммуникационных отношений. Эффективность и невиданная до сих пор скорость прогресса в этой области были обеспечены фундаментальной теоретической базой, созданной

Максвеллом и развитой в исследованиях Герца, Попова, Маркони и многих других ученых и инженеров.

Генрих Герц (1888 г.) экспериментально доказал существование электромагнитных волн.

Для исследования свойств электромагнитных волн Герц использовал металлические параболические зеркала и большую призму из твердой смолы — асфальта с основанием 1,2 м и высотой 1,5 м с преломляющим углом 30° .



В своих опытах Герц установил полную аналогию электромагнитных и световых волн. Было показано, что для электромагнитных волн справедлив закон отражения и преломления. Отражающими поверхностями для электромагнитных волн служили металлические листы, а закон Снелла был проверен на призмах из диэлектриков.

Кроме того, опыты Герца подтвердили соотношение , следующее из теории Максвелла. $\epsilon\mu=n$

Поместив излучающий вибратор в фокусе вогнутого зеркала, Герц получил направленную плоскую волну. На ее пути он расположил плоское зеркало и получил, таким образом, стоячую волну. Измерив расстояние между узлами и пучностями волны, Герц нашел длину волны λ . Произведение λ на частоту колебаний вибратора ν дало скорость ЭМВ, которая оказалась близкой к скорости света c .

Объёмная плотность энергии

Объёмная плотность энергии в электромагнитной волне в каждой точке и в любой момент времени равна сумме объёмной плотности энергии электрического поля и магнитного поля:

$$W = W_{\text{э}} + W_{\text{м}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}$$

С учетом связи индукции и напряженности электрического и магнитных полей

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}.$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}.$$

$$w = \frac{\vec{E} \cdot \vec{D}}{2} + \frac{\vec{H} \cdot \vec{B}}{2}$$

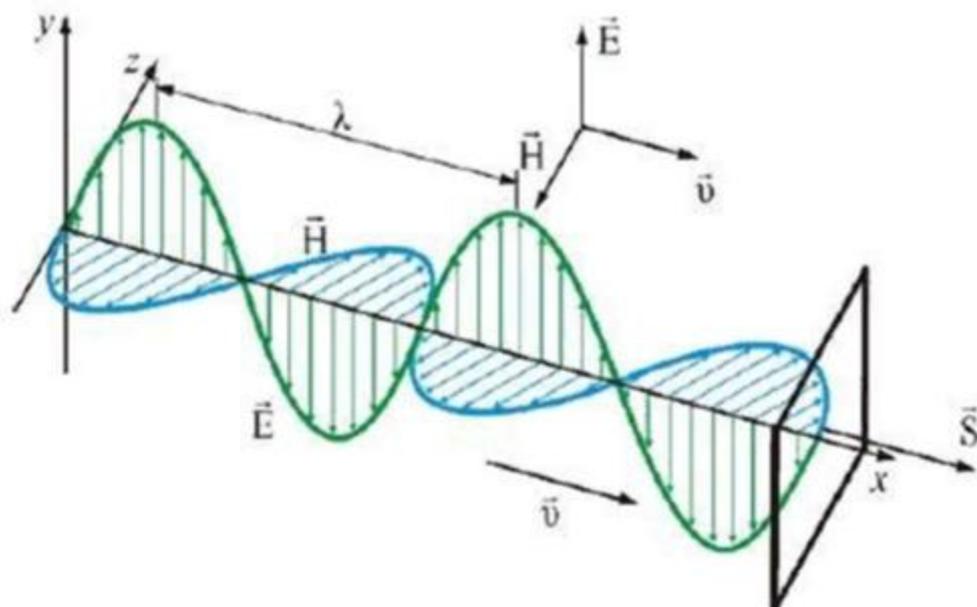
Первое слагаемое в равенстве представляет собой объёмную плотность электрической энергии в среде, второе — объёмную плотность магнитной энергии, т.е.

$$w = w_{\text{эл}} + w_{\text{м}}.$$

Вектор Умова-Пойтинга

Распространение электромагнитных волн связано с переносом энергии (подобно тому, как распространение упругих волн в веществе связано с переносом механической энергии). Сама возможность обнаружения ЭМВ указывает на то, что они переносят энергию.

Для характеристики переносимой волной энергии русским ученым Н.А Умовым были введены понятия о скорости и направлении движения энергии, о потоке энергии. Спустя десять лет после этого, в 1884 г. английский ученый Джон Пойнтинг описал процесс переноса энергии с *помощью вектора плотности потока энергии*.



Векторы \vec{E} и \vec{H} взаимно перпендикулярны и образуют с направлением распространения волны \vec{v} правовинтовую систему. Поэтому направление вектора $[\vec{E}\vec{H}]$ совпадает с направлением скорости v переноса энергии, а модуль этого вектора равен EH . Следовательно, вектор плотности потока электромагнитной энергии можно представить как векторное произведение \vec{E} и \vec{H} :

$$\vec{S} = [\vec{E}\vec{H}], S = \omega\vartheta$$

3. Основы радио теле и спутниковой связи.

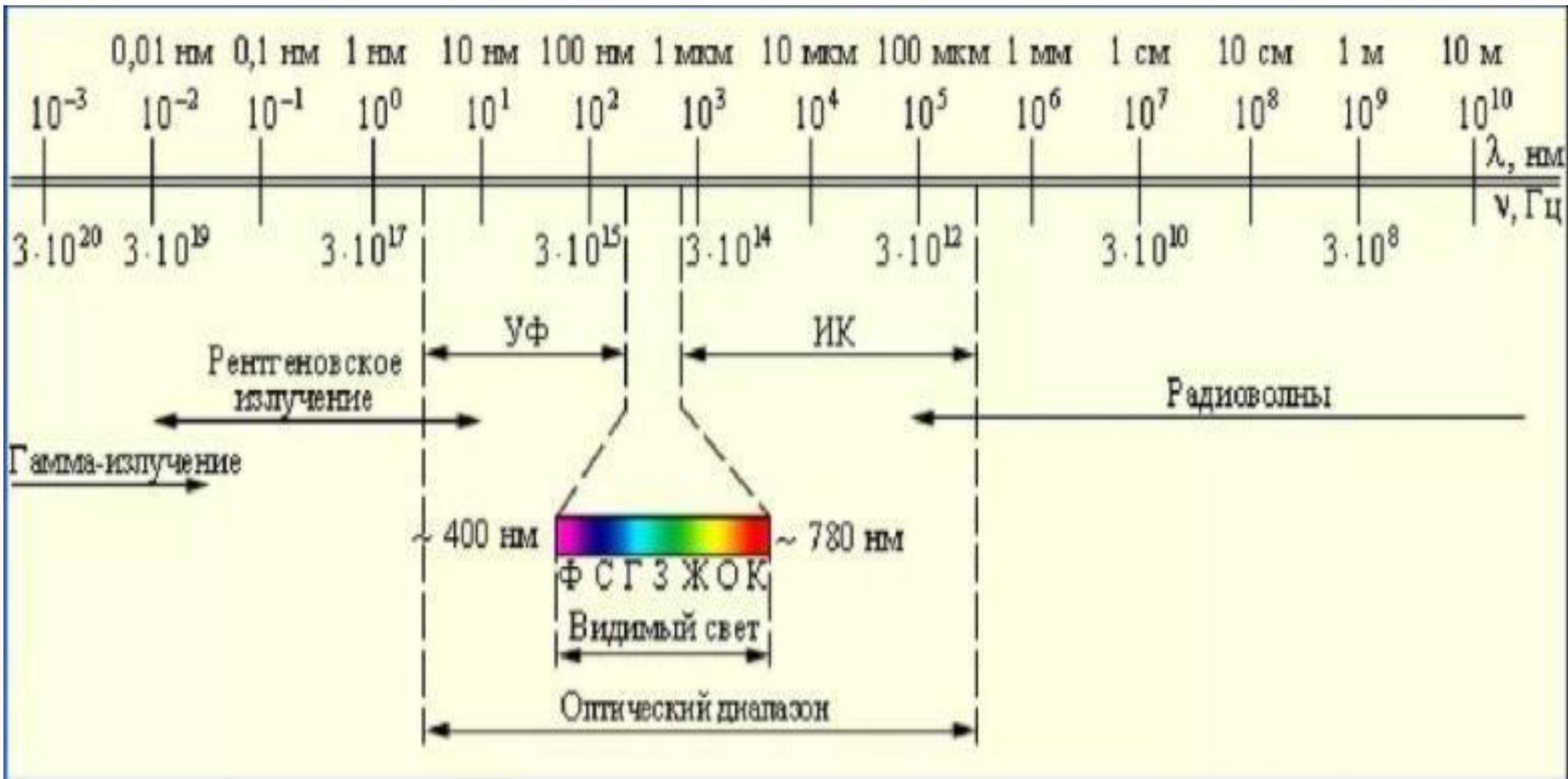
Шкала электромагнитных волн

Мы живем в мире электромагнитных волн. Радиоволны и волны видимого диапазона, инфракрасные и ультрафиолетовые волны, рентгеновские и γ – лучи – все это электромагнитные волны различного диапазона частоты.

Особое место в этом многообразии занимают волны видимого света. Хотя на шкале электромагнитных волн они занимают не слишком много места, именно с помощью света мы получаем подавляющее количество информации об окружающем мире, о многообразии форм, красок, оттенков, воспринимаемой нами с помощью глаза.

Из теории Максвелла вытекает, что различные электромагнитные волны, в том числе и световые, имеют общую природу. В связи с этим целесообразно представить всевозможные электромагнитные волны в виде единой шкалы.

ЭМВ отличаются друг от друга по способам генерации и регистрации, а также по своим свойствам. По этим признакам их делят на несколько видов: радиоволны, световые волны, рентгеновское и γ -излучение. Шкала ЭМВ изображена на рисунке.



Шкала электромагнитных волн

РАДИОДИАПАЗОН		Сверхдлинные	более 10 000 м
		Длинные	10 000-1000 м
		Средние	1 000-100 м
		Короткие	100-10 м
		Ультракороткие:	менее 10 м
		метровые	10-1 м
		дециметровые	10-1 дм
		сантиметровые	10-1 см
		миллиметровые	10-1 мм
			субмиллиметровые
ОПТИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН	Инфракрасные		0,4 мм-0,76 мкм
		дальний	10 мкм-0,4 мм
		средний	1,5 мкм-10 мкм
		ближний	0,76 мкм-1,5 мкм
	Видимые:		0,76-0,36 мкм
		красные	0,76-0,62 мкм
		оранжевые	0,62-0,59 мкм
		желтые	0,59-0,56 мкм
		зеленые	0,56-0,5 мкм
		голубые	0,5-0,48 мкм
		синие	0,48-0,45 мкм
фиолетовые		0,45-0,36 мкм	
Ультрафиолетовые		400-5 нм	
РЕНТГЕНОВСКИЙ ДИАПАЗОН			5-0,004 нм
γ-ИЗЛУЧЕНИЕ			менее 0,004 нм

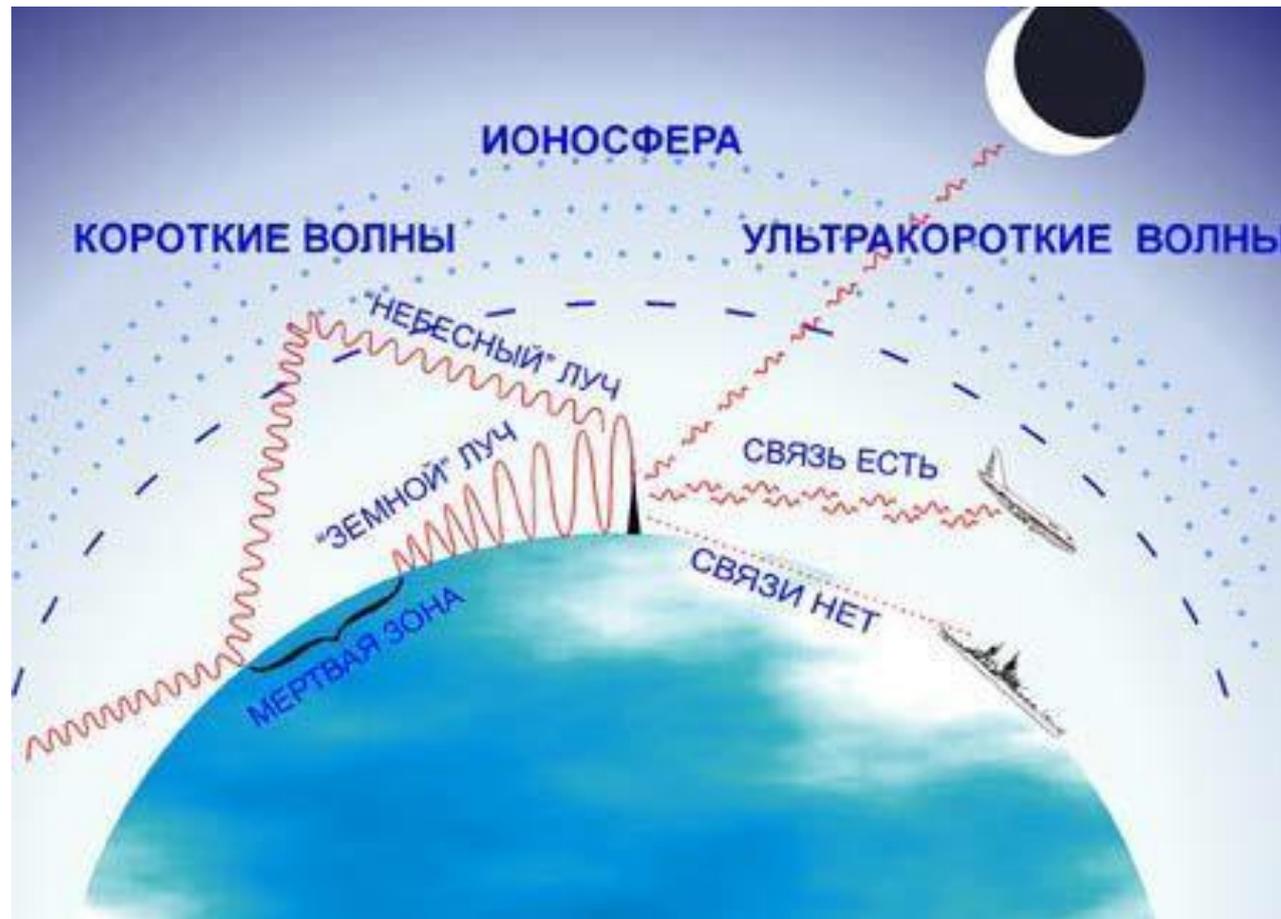
Принципы радиосвязи.

Передача информации на расстоянии с помощью электромагнитных сигналов часто осуществляется по проводам (радиотрансляционная, телеграфная, телефонная связь). Это оказывается энергетически выгодным, кроме того такой способ связи обеспечивает высокое качество передачи информации.

Однако значительные затраты на прокладку линий связи (особенно под водой или в условиях сложного рельефа местности) заставляют отдавать предпочтение беспроводной связи.

Такая связь оказывается единственно возможной при информационном обмене между космическими и военными объектами, самолетами, кораблями, альпинистами, спасателями и т.д. Для передачи и приема информации с помощью электромагнитных волн, распространяющихся в пространстве, используют радиоволны.

Следует отметить, что границы между различными типами электромагнитных волн в значительной степени условны, т.к. при пограничных значениях ν и λ эти волны мало, чем отличаются друг от друга.



Диапазон частот	Наименование диапазона (сокращенное наименование)	Наименование диапазона волн	Длина волны
3–30 кГц	Очень низкие частоты (ОНЧ)	Мириаметровые	100–10 км

30–300 кГц	Низкие частоты (НЧ)	Километровые	10–1 км
300–3000 кГц	Средние частоты (СЧ)	Гектометровые	1–0.1 км
3–30 МГц	Высокие частоты (ВЧ)	Декаметровые	100–10 м
30–300 МГц	Очень высокие частоты (ОВЧ)	Метровые	10–1 м
300–3000 МГц	Ультра высокие частоты (УВЧ)	Дециметровые	1–0.1 м
3–30 ГГц	Сверхвысокие частоты (СВЧ)	Сантиметровые	10–1 см
30–300 ГГц	Крайне высокие частоты (КВЧ)	Миллиметровые	10–1 мм
300–3000 ГГц	Гипервысокие частоты (ГВЧ)	Децимиллиметровые	1–0.1 мм

*То, что я что-то сказал -
Не значит почти ничего.
Действительно важно лишь то,
Что ты, при этом, понял...*

Спасибо за внимание!

