

Радиоволна

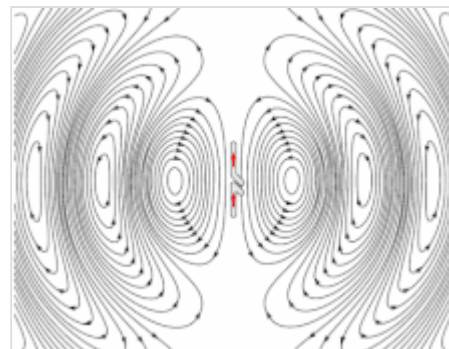
Радиоволны — это тип электромагнитного излучения с самыми низкими частотами и самыми длинными длинами волн в электромагнитном спектре , обычно с частотами ниже $300 \cdot 10^3$ гигагерц (ГГц) и длиной волны более 1 миллиметра ($\frac{1}{64}$ дюйма), что примерно равно диаметру зерна рис. Как и все электромагнитные волны, радиоволны в вакууме распространяются со скоростью света , а в атмосфере Земли — с несколько меньшей скоростью. Радиоволны генерируются заряженными частицами, подвергающимися ускорению , например, изменяющимися во времени электрическими токами .^[1] Естественные радиоволны испускаются молниями и астрономическими объектами и являются частью излучения черного тела , излучаемого всеми теплыми объектами.

Радиоволны генерируются искусственно электронным устройством, называемым передатчиком , которое подключено к антенне , излучающей волны. Их принимает другая антенна, подключенная к радиоприемнику , который обрабатывает принятый сигнал. Радиоволны очень широко используются в современных технологиях фиксированной и мобильной радиосвязи , радиовещании , радиолокационных и радионавигационных системах, спутниках связи , беспроводных компьютерных сетях и во многих других приложениях. Различные частоты радиоволн имеют разные характеристики распространения в атмосфере Земли; длинные волны могут дифрагировать вокруг препятствий, таких как горы, и следовать контуру Земли (земные волны), более короткие волны могут отражаться от ионосферы и возвращаться на Землю за горизонт (небесные волны), в то время как гораздо более короткие волны очень мало изгибаются или дифрагируют и распространяются прямой видимости , поэтому расстояние их распространения ограничено визуальным горизонтом.

Чтобы предотвратить помехи между различными пользователями, искусственное генерирование и использование радиоволн строго регулируется законом и координируется международным органом, называемым Международным союзом электросвязи (ITU), который определяет радиоволны как « электромагнитные волны с частотами произвольно ниже 3000 ГГц», , распространяющийся в космосе без искусственного проводника». ^[2] Радиоспектр разделен на ряд радиодиапазонов в зависимости от частоты, выделенных для различных целей .

И

Радиоволны были впервые предсказаны теорией электромагнетизма , предложенной в 1867 году шотландским физиком-математиком Джеймсом Клерком Максвеллом .^[3] Его математическая теория, которая теперь называется уравнениями Максвелла , предсказала, что связанное электрическое и магнитное поле может распространяться в пространстве как « электромагнитная волна ». Максвелл



Анимация полуволновой дипольной антенны, излучающей радиоволны, с изображением линий электрического поля . Антенна в центре представляет собой два вертикальных металлических стержня, соединенных с радиопередатчиком (не показан). Передатчик подает на стержни переменный электрический ток , который заряжает их поочередно положительно (+) и отрицательно (-). Петли электрического поля покидают антенну и уносятся со скоростью света ; это радиоволны. В этой анимации действие показано сильно замедленным.

предположил, что свет состоит из электромагнитных волн очень короткой длины. В 1887 году немецкий физик Генрих Герц продемонстрировал реальность электромагнитных волн Максвелла, экспериментально генерируя радиоволны в своей лаборатории, ^[4] показав, что они обладают теми же волновыми свойствами, что и свет: стоячие волны, преломление, дифракция и поляризация. Итальянский изобретатель Гульельмо Маркони разработал первые практические радиопередатчики и приемники примерно в 1894–1895 годах. Он получил Нобелевскую премию по физике 1909 года за свои работы в области радио. Радиосвязь начала использоваться в коммерческих целях примерно в 1900 году. Современный термин «*радиоволна*» заменил первоначальное название «*волна Герца*» примерно в 1912 году.

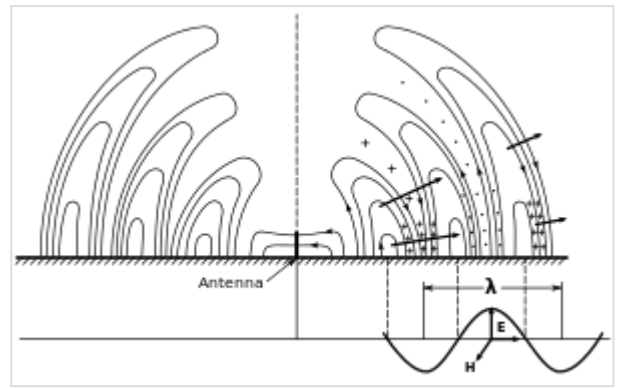
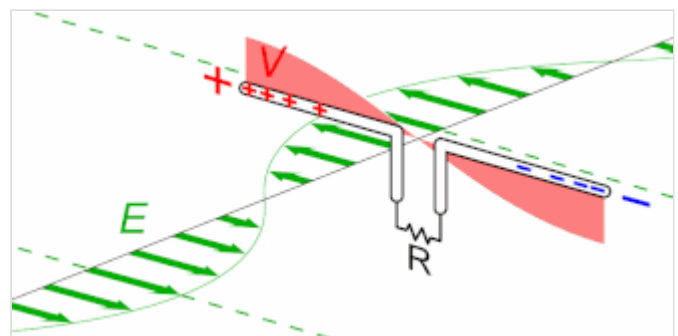


Схема электрических полей (E) и магнитных полей (H) радиоволн, излучаемых монополярной радиопередающей антенной (маленькая темная вертикальная линия в центре). Поля E и H перпендикулярны, как следует из фазовой диаграммы в правом нижнем углу.

Генерация и прием

Радиоволны излучаются заряженными частицами, когда они ускоряются. Естественные источники радиоволн включают радиосум, создаваемый молниями и другими естественными процессами в атмосфере Земли, а также астрономические радиоисточники в космосе, такие как Солнце, галактики и туманности. Все теплые объекты излучают высокочастотные радиоволны (микроволны) как часть излучения черного тела.

Радиоволны создаются искусственно изменяющимися во времени электрическими токами, состоящими из электронов, текущих взад и вперед в металлическом проводнике особой формы, называемом антенной. Электронное устройство, называемое радиопередатчиком, подает на антенну колеблющийся электрический ток, а антенна излучает энергию в виде радиоволн. Радиоволны принимаются другой антенной, прикрепленной к радиоприемнику. Когда радиоволны попадают на приемную антенну, они толкают электроны в металле взад и вперед, создавая крошечные колебательные токи, которые регистрируются приемником.



Анимированная схема полуволновой дипольной антенны, принимающей радиоволны. Антенна состоит из двух металлических стержней, соединенных с приемником *R*. Электрическое поле (*E*, зеленые стрелки) проходящей волны толкает электроны в стержнях взад и вперед, заряжая концы попеременно положительными (+) и отрицательными (-). Поскольку длина антенны составляет половину длины волны, колеблющееся поле индуцирует стоячие волны напряжения (*V*, обозначенные красной полосой) и тока в стержнях. Колебательные токи (черные стрелки) текут по линии передачи и через приемник (представлен сопротивлением *R*).

С точки зрения квантовой механики, как и другие электромагнитные излучения, такие как свет, радиоволны можно альтернативно рассматривать как потоки незаряженных элементарных частиц, называемых фотонами. ^[5] В антенне, передающей радиоволны, электроны в антенне излучают

энергию дискретными пакетами, называемыми радиофотонами, а в приемной антенне электроны поглощают энергию в виде радиофотонов. Антенна — это когерентный излучатель фотонов, подобно лазеру , поэтому все радиофотоны находятся в фазе . ^[6] ^[5] Однако из соотношения Планка $E = h\nu$ энергия отдельных радиофотонов чрезвычайно мала, ^[5] от 10^{-22} до 10^{-30} джоулей . Таким образом, антенна даже передатчика очень малой мощности излучает огромное количество фотонов в секунду. Поэтому, за исключением некоторых процессов молекулярного перехода электронов, таких как атомы в мазере , испускающие микроволновые фотоны, излучение и поглощение радиоволн обычно рассматривается как непрерывный классический процесс, управляемый уравнениями Максвелла .

Свойства

Радиоволны в вакууме распространяются со скоростью света c . ^[7] ^[8] При прохождении через материальную среду они замедляются в зависимости от проницаемости и диэлектрической проницаемости среды . Воздух настолько разрежен, что в атмосфере Земли радиоволны распространяются очень близко к скорости света.

Длина волны λ - это расстояние от одного пика (гребня) электрического поля волны до другого, и оно обратно пропорционально частоте f волны. Отношение частоты и длины волны радиоволны, распространяющейся в вакууме или воздухе, равно

$$\lambda = \frac{c}{f} ,$$

где

$$c \approx 299.79 \times 10^6 \text{ m/s} .$$

Эквивалентно, c Расстояние, которое радиоволна проходит в вакууме за одну секунду, составляет 299 792 458 метров (983 571 056 футов), что соответствует длине волны радиосигнала частотой 1 Герц . Радиоволна частотой 1 мегагерц (средний диапазон АМ) имеет длину волны 299,79 метра (983,6 фута).

Поляризация

Как и другие электромагнитные волны, радиоволна обладает свойством, называемым поляризацией , которое определяется как направление колеблющегося электрического поля волны , перпендикулярное направлению движения. Плоскополяризованная радиоволна имеет электрическое поле, которое колеблется в плоскости вдоль направления движения. В горизонтально поляризованной радиоволне электрическое поле колеблется в горизонтальном направлении. В вертикально поляризованной волне электрическое поле колеблется в вертикальном направлении. В волне с круговой поляризацией электрическое поле в любой точке вращается вокруг направления движения один раз за цикл. Волна с правой круговой поляризацией вращается вправо относительно направления движения, а волна с левой круговой поляризацией вращается в противоположном направлении. Магнитное поле волны перпендикулярно электрическому полю, а электрическое и магнитное поля ориентированы вправо относительно направления излучения.

Антенна излучает поляризованные радиоволны, поляризация которых определяется направлением металлических элементов антенны. Например, дипольная антенна состоит из двух коллинеарных металлических стержней. Если стержни расположены горизонтально, они излучают радиоволны с горизонтальной поляризацией, а если стержни расположены вертикально, они излучают волны с

вертикальной поляризацией. Антенна, принимающая радиоволны, должна иметь ту же поляризацию, что и передающая антенна, иначе произойдет серьезная потеря приема. Многие естественные источники радиоволн, такие как солнце, звезды и излучение абсолютно черного тела от теплых объектов, излучают неполяризованные волны, состоящие из некогерентных коротких волновых цугов в равной смеси состояний поляризации.

Поляризация радиоволн определяется квантово-механическим свойством фотонов, называемым их спином . Фотон может иметь одно из двух возможных значений спина; он может вращаться вправо относительно направления своего движения или влево. Радиоволны с правой круговой поляризацией состоят из фотонов, вращающихся в правом направлении. Радиоволны с левой круговой поляризацией состоят из фотонов, вращающихся в левом направлении. Плоскополяризованные радиоволны состоят из фотонов в квантовой суперпозиции правого и левого спиновых состояний. Электрическое поле состоит из суперпозиции правого и левого вращающихся полей, что приводит к плоскому колебанию.

распространения

Радиоволны более широко используются для связи, чем другие электромагнитные волны, главным образом из-за их желательных свойств распространения , обусловленных их большой длиной волны .^[9] Радиоволны обладают способностью проходить через атмосферу в любую погоду, через листву и большинство строительных материалов, а за счет дифракции более длинные волны могут огибать препятствия, и в отличие от других электромагнитных волн они имеют тенденцию рассеиваться, а не поглощаться более крупными объектами. чем их длина волны.

Изучение распространения радиоволн , того, как радиоволны движутся в открытом космосе и над поверхностью Земли, жизненно важно при проектировании практических радиосистем. Радиоволны, проходя через различные среды, испытывают отражение , преломление , поляризацию , дифракцию и поглощение . На разных частотах в атмосфере Земли наблюдаются разные комбинации этих явлений, что делает определенные радиодиапазоны более полезными для конкретных целей, чем другие. В практических радиосистемах для связи в основном используются три различных метода распространения радиосигнала:^[10]

- Прямая видимость : это относится к радиоволнам, которые распространяются по прямой линии от передающей антенны к приемной антенне. Это не обязательно требует свободного обзора; на более низких частотах радиоволны могут проходить сквозь здания, листву и другие препятствия. Это единственный возможный метод распространения на частотах выше 30 МГц. На поверхности Земли распространение прямой видимости ограничено визуальным горизонтом примерно до 64 км (40 миль). Этот метод используется в сотовых телефонах , FM , телевещании и радарх . Используя тарелочные антенны для передачи микроволновых лучей, двухточечные микроволновые ретрансляционные линии передают телефонные и телевизионные сигналы на большие расстояния, вплоть до визуального горизонта. Наземные станции могут связываться со спутниками и космическими кораблями, находящимися за миллиарды миль от Земли.
- Косвенное распространение : радиоволны могут достигать точек за пределами прямой видимости за счет дифракции и отражения .^[10] Дифракция заставляет радиоволны огибать препятствия, такие как край здания, автомобиль или поворот в коридоре. Радиоволны также частично отражаются от таких поверхностей, как стены, полы, потолки, транспортные средства и земля. Эти методы распространения применяются в системах радиосвязи ближнего действия, таких как сотовые телефоны , беспроводные телефоны , рации и беспроводные сети . Недостатком этого режима является многолучевое распространение , при котором радиоволны передаются от

передающей антенны к приемной по нескольким путям. Волны мешают , часто вызывая замирания и другие проблемы с приемом.

- Земные волны : на более низких частотах ниже 2 МГц, в средневолновых и длинноволновых диапазонах, из-за дифракции вертикально поляризованные радиоволны могут огибать холмы и горы и распространяться за горизонт, путешествуя как поверхностные волны , повторяющие контур Земли. Это позволяет средневолновым и длинноволновым радиовещательным станциям иметь зону покрытия за горизонтом, на сотни миль. С падением частоты потери уменьшаются, а достижимая дальность увеличивается. Военные системы связи очень низкой частоты (VLF) и крайне низкой частоты (ELF) могут поддерживать связь на большей части Земли. Радиоволны VLF и ELF также могут проникать в воду на глубину сотен метров, поэтому они используются для связи с затопленными подводными лодками .
- Небесные волны : на средних и коротких волнах радиоволны отражаются от проводящих слоев заряженных частиц (ионов) в части атмосферы, называемой ионосферой . Так радиоволны, направленные под углом в небо, могут вернуться на Землю за горизонт; это называется распространением «пропуском» или «небесной волной». Используя несколько пропусков, можно обеспечить связь на межконтинентальных расстояниях. Распространение небесной волны является переменным и зависит от атмосферных условий; наиболее надежен ночью и зимой. Широко использовался в первой половине 20-го века, но из-за его ненадежности от связи по небесным волнам в основном отказались. Остальные виды использования - военные загоризонтные радиолокационные системы (OTH), некоторые автоматизированные системы, радиолюбители и коротковолновые радиовещательные станции для вещания на другие страны.

На микроволновых частотах атмосферные газы начинают поглощать радиоволны, поэтому дальность действия практических систем радиосвязи уменьшается с увеличением частоты. Затухание в атмосфере ниже примерно 20 ГГц происходит главным образом из-за водяного пара. Выше 20 ГГц, в диапазоне миллиметровых волн , другие атмосферные газы начинают поглощать волны, ограничивая практическое расстояние передачи до километра или меньше. Выше 300 ГГц, в терагерцовом диапазоне , практически вся мощность поглощается в пределах нескольких метров, поэтому атмосфера фактически непрозрачна. ^[11] ^[12]

Радиосвязь

В системах радиосвязи информация передается в пространстве с помощью радиоволн. На передающей стороне информация, подлежащая отправке, в виде изменяющегося во времени электрического сигнала подается на радиопередатчик . ^[13] Информация, называемая сигналом модуляции , может быть аудиосигналом , представляющим звук из микрофона , видеосигналом , представляющим движущиеся изображения с видеокамеры , или цифровым сигналом , представляющим данные с компьютера . В передатчике электронный генератор генерирует переменный ток , колеблющийся на радиочастоте , называемый несущей волной , поскольку он создает радиоволны, которые «переносят» информацию по воздуху. Информационный сигнал используется для модуляции несущей, изменения некоторых ее аспектов, кодирования информации на несущей. Модулированная несущая усиливается и подается на антенну . Колебательный ток толкает электроны в антенне вперед и назад, создавая колеблющиеся электрические и магнитные поля , которые излучают энергию от антенны в виде радиоволн. Радиоволны передают информацию к месту расположения приемника.

В приемнике колеблющиеся электрические и магнитные поля проходящей радиоволны толкают электроны в приемной антенне взад и вперед, создавая крошечное колебательное напряжение, которое является более слабой копией тока в передающей антенне. ^[13] Это напряжение подается на радиоприемник , который извлекает информационный сигнал. Приемник сначала использует

полосовой фильтр, чтобы отделить радиосигнал нужной радиостанции от всех других радиосигналов, принимаемых антенной, затем усиливает сигнал, чтобы он стал сильнее, а затем, наконец, извлекает информационный сигнал модуляции в демодуляторе. Восстановленный сигнал отправляется на громкоговоритель или наушники для воспроизведения звука, на экран телевизора для создания видимого изображения или на другие устройства. Сигнал цифровых данных подается на компьютер или микропроцессор, который взаимодействует с пользователем-человеком.

Радиоволны от многих передатчиков проходят по воздуху одновременно, не мешая друг другу. Их можно разделить в приемнике, поскольку радиоволны каждого передатчика колеблются с разной скоростью, другими словами, каждый передатчик имеет разную частоту, измеряемую в килогерцах (кГц), мегагерцах (МГц) или гигагерцах (ГГц). Полосовой фильтр в приемнике состоит из одного или нескольких настроенных контуров, которые действуют как резонатор, подобно камертону. ^[13] Настроенный контур имеет собственную резонансную частоту, на которой он колеблется. Резонансная частота устанавливается равной частоте нужной радиостанции. Колеблющийся радиосигнал от нужной станции заставляет настроенную схему колебаться в соответствии с ней, и она передает сигнал остальной части приемника. Радиосигналы на других частотах блокируются настроенной схемой и не передаются дальше.

И

Радиоволны являются неионизирующим излучением, а это означает, что им не хватает энергии, чтобы отделить электроны от атомов или молекул, ионизировать их или разорвать химические связи, вызывая химические реакции или повреждение ДНК. Основным эффектом поглощения радиоволн материалами является их нагревание, подобно инфракрасным волнам, излучаемым источниками тепла, такими как обогреватель или дровяной камин. Колеблущееся электрическое поле волны заставляет полярные молекулы вибрировать вперед и назад, повышая температуру; вот как микроволновая печь готовит еду. Радиоволны воздействуют на тело уже 100 лет в медицинской терапии диатермией для глубокого нагрева тканей тела, чтобы способствовать увеличению кровотока и заживлению. Совсем недавно их стали использовать для создания более высоких температур при гипертермической терапии и для уничтожения раковых клеток.

Однако в отличие от инфракрасных волн, которые в основном поглощаются поверхностью объектов и вызывают нагрев поверхности, радиоволны способны проникать через поверхность и откладывать свою энергию внутри материалов и биологических тканей. Глубина проникновения радиоволн уменьшается с увеличением их частоты, а также зависит от удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости материала; он задается параметром, называемым глубиной скин-слоя материала, то есть глубиной, на которой выделяется 63% энергии. Например, радиоволны (микроволны) 2,45 ГГц в микроволновой печи проникают в большинство пищевых продуктов примерно на 2,5–3,8 см (1–1,5 дюйма).

Глядя на источник радиоволн с близкого расстояния, например на волновод работающего радиопередатчика, можно вызвать повреждение хрусталика глаза из-за нагрева. Достаточно сильный луч радиоволн может проникнуть в глаз и нагреть хрусталик настолько, что может вызвать катаракту. ^{[14] [15] [16] [17] [18]} Тем не менее, поскольку эффект нагрева в принципе не отличается от других источников тепла, большинство исследований возможных опасностей для здоровья от воздействия радиоволн были сосредоточены на «нетепловых» эффектах. ; оказывают ли радиоволны какое-либо воздействие на ткани, кроме вызванного нагреванием. Радиочастотные электромагнитные поля были классифицированы Международным агентством по исследованию рака (IARC) как имеющие

«ограниченные доказательства» их воздействия на людей и животных. ^[19] ^[20] Имеются слабые механистические доказательства риска развития рака при личном воздействии РЧ-ЭМП от мобильных телефонов. ^[21]

Радиоволны могут быть экранированы проводящим металлическим листом или экраном; оболочка из листа или экрана называется клеткой Фарадея . Металлический экран защищает от радиоволн так же , как сплошной лист , если отверстия в экране меньше примерно ^{1/20} длины волны волн. ^[22]

Измерение

Поскольку радиочастотное излучение имеет как электрическую, так и магнитную составляющую, часто бывает удобно выразить интенсивность поля излучения в единицах, специфичных для каждого компонента. Единица *измерения вольт на метр* (В/м) используется для электрической составляющей, а единица *ампер на метр* (А/м) — для магнитной составляющей. Можно говорить об электромагнитном поле , и эти единицы используются для предоставления информации об уровнях напряженности электрического и магнитного поля в месте измерения.

Другой широко используемой единицей измерения радиочастотного электромагнитного поля является *плотность мощности* . Плотность мощности наиболее точно используется, когда точка измерения находится достаточно далеко от ВЧ-излучателя и находится в так называемой дальней зоне диаграммы направленности. ^[23] В непосредственной близости от передатчика, т. е. в зоне «ближнего поля», физические взаимоотношения между электрическими и магнитными компонентами поля могут быть сложными, и лучше всего использовать единицы измерения напряженности поля, рассмотренные выше. Плотность мощности измеряется в единицах мощности на единицу площади, например, в милливаттах на квадратный сантиметр (мВт/см²). Говоря о частотах микроволнового диапазона и выше, плотность мощности обычно используется для выражения интенсивности, поскольку возможное воздействие, скорее всего, будет в дальней зоне поля.

См. также

- Радиоастрономия
- Телевизионный передатчик

Ссылки

- Эллингсон, Стивен В. (2016). *Радиосистемная инженерия* (<https://books.google.com/books?id=QMKSDQAAQBAJ&q=%22radio+wave%22+time+varying+electric+current&pg=PA16>) . Издательство Кембриджского университета. стр. 16–17. ISBN 978-1316785164.
- «Глава 1: Терминология и технические характеристики - Термины и определения». *Регламент радиосвязи* (<http://search.itu.int/history/HistoryDigitalCollectionDocLibrary/1.43.48.en.101.pdf>) (PDF) . Женева, Швейцария: МСЭ . 2016. с. 7. ISBN (<http://search.itu.int/history/HistoryDigitalCollectionDocLibrary/1.43.48.en.101.pdf>) 9789261191214. Архивировано (<http://web.archive.org/web/20170829072058/http://search.itu.int/history/HistoryDigitalCollectionDocLibrary/1.43.48.en.101.pdf>) (PDF) из оригинала 29 августа 2017 г.
- Харман, Питер Майкл (1998). *Естественная философия Джеймса Клерка Максвелла* . Кембридж, Великобритания: Издательство Кембриджского университета. п. 6. ISBN 0-521-00585-X.

4. Эдвардс, Стивен А. «Генрих Герц и электромагнитное излучение» (<https://www.aaas.org/heinrich-hertz-and-electromagnetic-radiation>) . Американская ассоциация содействия развитию науки . Проверено 13 апреля 2021 г. (<https://www.aaas.org/heinrich-hertz-and-electromagnetic-radiation>)
5. Гослинг, Уильям (1998). *Радиоантенны и распространение* (<http://nvhrbiblio.nl/biblio/boek/Gosling%20-%20Radio%20antennas%20and%20propagation.pdf>) (PDF). Ньюнес. стр. 2, 12. ISBN (<http://nvhrbiblio.nl/biblio/boek/Gosling%20-%20Radio%20antennas%20and%20propagation.pdf>) 0750637412.
6. Шор, Брюс В. (2020). *Наши меняющиеся взгляды на фотоны: Учебные мемуары* (<https://books.google.com/books?id=4Gr8DwAAQBAJ&dq=coherent&pg=PA54>) . Издательство Оксфордского университета. п. 54. ISBN (<https://books.google.com/books?id=4Gr8DwAAQBAJ&dq=coherent&pg=PA54>) 9780192607645.
7. *Ультракалькулятор* (<http://www.1728.org/freqwave.htm>) электромагнитной частоты, длины волны и энергии (<http://www.1728.org/freqwave.htm>)» (<http://www.1728.org/freqwave.htm>) . 1728.org . 1728 Системы программного обеспечения . Проверено 15 января 2018 г. (<http://www.1728.org/freqwave.htm>)
8. «Как генерируются радиоволны» (<https://web.archive.org/web/20140328011153/http://www.nrao.edu/index.php/learn/radioastronomy/radiowaves>) . НРАО . Архивировано из оригинала (<http://www.nrao.edu/index.php/learn/radioastronomy/radiowaves>) 28 марта 2014 года . Проверено 15 января 2018 г. (<https://web.archive.org/web/20140328011153/http://www.nrao.edu/index.php/learn/radioastronomy/radiowaves>) (<http://www.nrao.edu/index.php/learn/radioastronomy/radiowaves>)
9. Эллингсон, Стивен В. (2016). *Радиосистемная инженерия* (<https://books.google.com/books?id=QMKSDQAAQBAJ&q=%22radio+wave%22&pg=PA16>) . Издательство Кембриджского университета. стр. 16–17. ISBN (<https://books.google.com/books?id=QMKSDQAAQBAJ&q=%22radio+wave%22&pg=PA16>) 978-1316785164.
10. Сейболд, Джон С. (2005). «1.2 Способы распространения» (<https://books.google.com/books?id=4LtmjGNwOPIC&pg=PA6>). *Введение в распространение радиочастот*. Джон Уайли и сыновья. стр. 3–10. ISBN (<https://books.google.com/books?id=4LtmjGNwOPIC&pg=PA6>) 0471743682.
11. Кутаз, Жан-Луи; Гарет, Фредерик; Уоллес, Винсент П. (2018). *Принципы терагерцовой спектроскопии во временной области: вводный учебник* (<https://books.google.com/books?id=zah8DwAAQBAJ&pg=PA18>) . ЦРК Пресс. п. 18. ISBN (<https://books.google.com/books?id=zah8DwAAQBAJ&pg=PA18>) 9781351356367.
12. Сигел, Питер (2002). «Изучение энергии Вселенной» (https://web.archive.org/web/20210620092047/https://www.nasa.gov/audience/foreducators/k-4/features/Peter_Siegel.html) . Учебные материалы . Сайт НАСА. Архивировано из оригинала (https://www.nasa.gov/audience/foreducators/k-4/features/Peter_Siegel.html) 20 июня 2021 года . Проверено 19 мая 2021 г. (https://web.archive.org/web/20210620092047/https://www.nasa.gov/audience/foreducators/k-4/features/Peter_Siegel.html) (https://www.nasa.gov/audience/foreducators/k-4/features/Peter_Siegel.html)
13. Брэйн, М. (7 декабря 2000 г.). «Как работает радио» (<http://electronics.howstuffworks.com/radio8.htm>). *HowStuffWorks.com*. Проверено 11 сентября 2009 г. (<http://electronics.howstuffworks.com/radio8.htm>)
14. Кухня, Рональд (2001). *Справочник по безопасности при радиочастотном и микроволновом излучении* (<https://archive.org/details/rfmicrowaveradia0000kitc>) (2-е изд.). Ньюнес. стр. 64–65 (<https://archive.org/details/rfmicrowaveradia0000kitc/page/64>) . ISBN (<https://archive.org/details/rfmicrowaveradia0000kitc>) (<https://archive.org/details/rfmicrowaveradia0000kitc/page/64>) 0750643552.
15. ван дер Ворст, Андре; Розен, Арье; Коцука, Ёдзи (2006). *Радиочастотное/микроволновое взаимодействие с биологическими тканями* (<https://books.google.com/books?id=IV3FPLJoyzMC&pg=PA121>) . Джон Уайли и сыновья. стр. 121–122. ISBN (<https://books.google.com/books?id=IV3FPLJoyzMC&pg=PA121>) 0471752045.

16. Граф, Рудольф Ф.; Шитс, Уильям (2001). *Создайте свои собственные маломощные передатчики: проекты для экспериментаторов в области электроники* (https://books.google.com/books?id=Tc_ACUbCqqQC&pg=PA234) . Ньюнес. п. 234. ISBN (https://books.google.com/books?id=Tc_ACUbCqqQC&pg=PA234) 0750672447.
 17. Старейшина, Джо Аллен; Кэхилл, Дэниел Ф. (1984). «Биологическое действие радиочастотного излучения» (<https://books.google.com/books?id=TKIKAQAAMAAJ&pg=SA5-PA116>) . *Биологическое действие радиочастотного излучения* . Агентство по охране окружающей среды США . стр. 5.116–5.119. (<https://books.google.com/books?id=TKIKAQAAMAAJ&pg=SA5-PA116>)
 18. Хичкок, Р. Тимоти; Паттерсон, Роберт М. (1995). *Радиочастота и электромагнитная энергия СНЧ: Справочник для медицинских работников* (https://books.google.com/books?id=IOMWHnZ4h_cC&pg=PA178) . Серия «Промышленное здоровье и безопасность». Джон Уайли и сыновья. стр. 177–179. ISBN (https://books.google.com/books?id=IOMWHnZ4h_cC&pg=PA178) 9780471284543.
 19. «МАИР классифицирует радиочастотные электромагнитные поля как возможно канцерогенные для человека» (https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr208_E.pdf) (PDF) . www.iarc.fr (пресс-релиз). ВОЗ . 31 мая 2011 г. Архивировано (https://web.archive.org/web/20181212062859/https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr208_E.pdf) (PDF) из оригинала 12 декабря 2018 г. Проверено 9 января 2019 г. (https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr208_E.pdf) (https://web.archive.org/web/20181212062859/https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr208_E.pdf)
 20. «Агенты, классифицированные монографиями IARC» (<https://monographs.iarc.fr/agents-classified-by-the-iarc/>) . monographs.iarc.fr . Тома 1–123. МАИР . 9 ноября 2018 г. Проверено 9 января 2019 г. (<https://monographs.iarc.fr/agents-classified-by-the-iarc/>)
 21. Баан, Р.; Гросс, Ю.; Лауби-Секретан, Б.; Эль Гиссасси, Ф. (2014). «Радиочастотные электромагнитные поля: оценка опасности рака» (https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/06/REF_Poster2012.pdf) (PDF) . monographs.iarc.fr (афиша конференции). МАИР . Архивировано (https://web.archive.org/web/20181210154717/https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/06/REF_Poster2012.pdf) (PDF) из оригинала 10 декабря 2018 г. Проверено 9 января 2019 г. (https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/06/REF_Poster2012.pdf) (https://web.archive.org/web/20181210154717/https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/06/REF_Poster2012.pdf)
 22. Киммел, Уильям Д.; Герке, Дэрил (2018). *Электромагнитная совместимость в медицинском оборудовании: Руководство для проектировщиков и монтажников* (<https://books.google.com/books?id=9PIKDwAAQBAJ&pg=SA6-PA67>) . Рутледж. п. 6.67. ISBN (<https://books.google.com/books?id=9PIKDwAAQBAJ&pg=SA6-PA67>) 9781351453370.
 23. Национальная ассоциация вещателей (1996). *Справочник по регулированию антенн и вышек* (https://books.google.com/books?id=5u_iAAAAMAAJ&q=power+density+commonly+used+unit+for+characterizing+an+RF+electromagnetic+field+is) . Департамент науки и технологий. НАБ . п. 186. ISBN (https://books.google.com/books?id=5u_iAAAAMAAJ&q=power+density+commonly+used+unit+for+characterizing+an+RF+electromagnetic+field+is) 9780893242367. Архивировано (https://web.archive.org/web/20180501015942/https://books.google.com/books?id=5u_iAAAAMAAJ&q=power+density+commonly+used+unit+for+characterizing+an+RF+electromagnetic+field+is&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwj967xl6fVAhVG0FQKHTgTDh0Q6AEILDAB) из оригинала 1 мая 2018 года.
- Максвелл, Джеймс Клерк (1865). «VIII. Динамическая теория электромагнитного поля» . *Философские труды Лондонского королевского общества* . **155** : 459–512. doi : 10.1098/rstl.1865.0008 (<https://doi.org/10.1098/rstl.1865.0008>) . S2CID 186207827 (<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:186207827>) .
 - Герц, Генрих Рудольф (1893). *Электрические волны: исследования распространения электрического действия с конечной скоростью в пространстве* (<http://ebooks.library.ornell.edu/cgi/t/text/text-idx?c=cdl;cc=cdl;view=toc;subview=short;idno=cdl334>) . Библиотека

Корнеллского университета. Итака, Нью-Йорк: Корнельский университет . ISBN 9781429740364.

- Ровер, Карл (1993). *Распространение волн в ионосфере* . Серия «Разработки в области электромагнитной теории и приложений». Дордрехт: Клювер Академик. ISBN 9780792307754. OCLC 26257685 (<https://www.worldcat.org/oclc/26257685>) .

Внешние ссылки

- "Радиоволны" (https://science.nasa.gov/ems/05_radiowaves) . Управление научной миссии. NASA .
-

Retrieved from "https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Radio_wave&oldid=1221234672"

■