

Электродинамика и распространение радиоволн

Лекция 14
18-22.05.2020

Русов Юрий Сергеевич

5. Распространение электромагнитных волн около Земли

Диапазоны электромагнитных волн

Как правило, термин «радиоволны» обозначает электромагнитные волны, принадлежащие тому или иному диапазону частот, применяемому в радиотехнике. Специальным решением Международного союза электросвязи (МСЭ) и Международной электротехнической комиссии (МЭК) принято различать следующие диапазоны радиочастот и соответствующих длин радиоволн:

Диапазоны радиочастот

Очень низкие частоты (ОНЧ) – от 3 до 30 кГц, или мириаметровые волны (длины волны от 100 до 10 км);

Низкие частоты (НЧ) – от 30 до 300 кГц, или километровые волны (длины волны от 10 до 1 км);

Средние частоты (СЧ) – от 300 кГц до 3 МГц, или гектометровые волны (длины волны от 1 км до 100 м);

Высокие частоты (ВЧ) – от 3 до 30 МГц, или декаметровые волны (длины волны от 100 до 10 м);

Очень высокие частоты (ОВЧ) – от 30 до 300 МГц, или метровые волны (длины волны от 10 до 1 м);

Ультравысокие частоты (УВЧ) – от 300 МГц до 3 ГГц, или дециметровые волны (длины волны от 1 м до 10 см);

Сверхвысокие частоты (СВЧ) – от 3 до 30 ГГц, или сантиметровые волны (длины волны от 10 до 1 см);

Крайне высокие частоты (КВЧ) – от 30 до 300 ГГц, или миллиметровые волны (длина волны от 1 см до 1 мм);

Диапазоны электромагнитных волн

Наименование волн	Длины волн	Частоты
Сверхдлинные (СДВ)	$>10\,000\text{ м}$	$<30\text{ кгц}$
Длинные (ДВ)	$10\,000\text{—}1\,000\text{ м}$	$30\text{—}300\text{ кгц}$
Средние (СВ)	$1\,000\text{—}100\text{ м}$	$300\text{—}3\,000\text{ кгц}$
Короткие (КВ)	$100\text{—}10\text{ м}$	$3\text{—}30\text{ Мгц}$
Ультракороткие (УКВ):		
метровые	$10\text{—}1\text{ м}$	$30\text{—}300\text{ Мгц}$
дециметровые	$10\text{—}1\text{ дм}$	$300\text{—}3\,000\text{ Мгц}$
сантиметровые	$10\text{—}1\text{ см}$	$3\text{—}30\text{ Ггц}$
миллиметровые	$10\text{—}1\text{ мм}$	$30\text{—}300\text{ Ггц}$
Субмиллиметровые	$1\text{—}0,4\text{ мм}$	$300\text{—}750\text{ Ггц}$
Инфракрасные (ИКЛ)	$0,4\text{ мм — }0,76\text{ мкм}$	$0,75\text{—}395\text{ Тгц}$
Световые	$0,76\text{ мкм — }0,4\text{ мкм}$	$395\text{—}750\text{ Тгц}$
Ультрафиолетовые		750 Тгц —
(УФЛ)	$0,4\text{ мкм — }20\text{ Å}$	$1,5 \cdot 10^5\text{ Тгц}$
Рентгеновские	$20\text{ Å—}0,06\text{ Å}$	$1,5 \cdot 10^5\text{ Тгц — }$
Гамма-лучи	$<0,06\text{ Å}$	$5 \cdot 10^7\text{ Тгц}$ $>5 \cdot 10^7\text{ Тгц}$

Диапазоны электромагнитных волн

Радиотехника исторически развивалась с неуклонной тенденцией к освоению все более высокочастотных диапазонов. Это было связано прежде всего с необходимостью создавать высокоэффективные антенные системы, концентрирующие энергию в пределах узких телесных углов. Дело в том, что антенна с узкой диаграммой направленности обязательно должна иметь поперечные размеры, существенно превышающие рабочую длину волны. Такое условие легко выполнить в метровом, а тем более в сантиметровом диапазоне, в то время как остронаправленная антенна для мириаметровых волн имела бы совершенно неприемлемые габариты.

Диапазоны электромагнитных волн

Вторым фактором, определяющим ценные свойства высокочастотных диапазонов, служит то обстоятельство, что здесь удастся реализовать большое число радиоканалов со взаимно не пересекающимися полосами частот. Это дает возможность, с одной стороны, широко использовать принцип частотного разделения каналов, а с другой - применять широкополосные системы модуляции, например, частотную модуляцию. При определенных условиях такие системы модуляции способны обеспечить высокую помехоустойчивость работы радиоканала.

Диапазоны электромагнитных волн

В практике радиовещания и телевидения сложилась также несколько упрощенная классификация диапазонов радиоволн. Согласно ей, мириаметровые волны называют сверхдлинными волнами (СДВ), километровые — длинными волнами (ДВ), гектометровые — средними волнами (СВ), декаметровые — короткими волнами (КВ), а все более высокочастотные колебания с длинами волн короче 10 м относят к ультракоротким волнам (УКВ). Волны сантиметрового и длинноволновой части миллиметрового диапазонов иногда называют также микроволнами (англ. Microwaves).

Атмосфера Земли и ее строение

Атмосфера Земли представляет собой смесь молекулярного азота (78 %) и молекулярного кислорода (21 %). На долю прочих компонентов, главным образом водяного пара и некоторых инертных газов, приходится лишь 1 % .

Физические параметры атмосферы Земли весьма сильно зависят от высоты. По этой причине общепринято рассматривать атмосферу как объединение двух областей: нижней атмосферы - области с высотами от нуля до 60 км, и верхней атмосферы, которая располагается в интервале высот от 60 до 20 000 км. В свою очередь, нижняя атмосфера делится на тропосферу (высоты до 15 км) и стратосферу (высоты от 15 до 60 км).

Атмосфера Земли и ее строение

Физические процессы в тропосфере и стратосфере определяют собой погодные и климатические явления на Земле. Они связаны с интенсивным массо- и теплообменом, а также переносом больших воздушных масс.

Верхняя атмосфера Земли, чаще называемая ионосферой, подвергается интенсивному облучению Солнца и других космических источников. За счет этого происходит ионизация атомов газов, что существенным образом влияет на характер распространения радиоволн в ионосфере.

Атмосфера Земли и ее строение

Следует заметить, что деление атмосферы на различные области носит условный характер и проводится лишь с тем, чтобы упростить раздельное изучение тех или иных физических явлений. Какие-либо четко очерченные границы между областями атмосферы, безусловно, отсутствуют.

Атмосфера удерживается за счет действия гравитационного поля Земли. Внутри атмосферы существует гидростатическое давление p , которое в средних широтах на уровне Мирового океана составляет около 0,1 МПа. С увеличением высоты в тропосфере давление воздуха падает приблизительно по линейному закону со скоростью 12 кПа/км. В ионосфере давление воздуха с ростом высоты падает по экспоненциальному закону, т. е. еще более резко.

Атмосфера Земли и ее строение

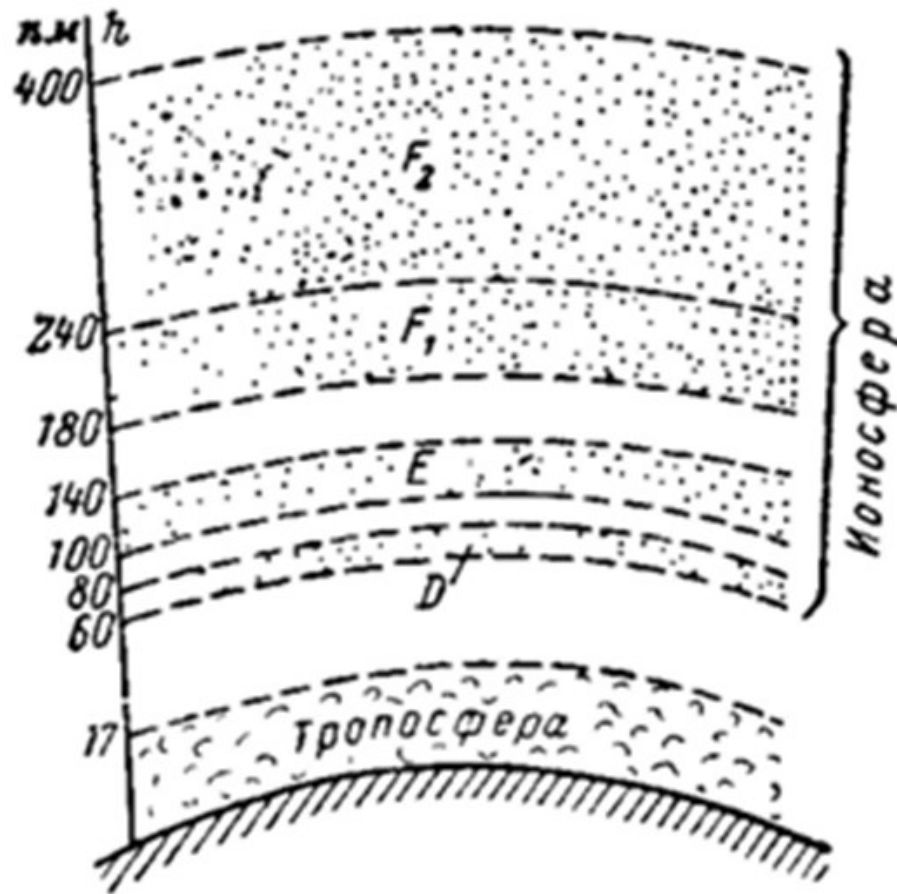
Вторым физическим параметром атмосферного воздуха служит его абсолютная температура T . Измерения показывают, что температура воздуха на поверхности Земли составляет в среднем 300 К. При увеличении высоты температура меняется по сложному немонотонному закону, падая до 200 К на верхней границе стратосферы. В ионосфере температура газа непрерывно растет, достигая 1200 К на высотах порядка 1000 км.

Атмосфера Земли и ее строение

Исключительно важную роль в формировании условий распространения радиоволн играет ионосфера Земли. Плотность газа в ионосфере очень мала, и поэтому жесткое электромагнитное излучение Солнца (в основном ультрафиолетовое и рентгеновское) оказывается здесь весьма интенсивным. Энергия квантов этого излучения достаточна не только для диссоциации молекул, приводящей к образованию атомарных газов, но и для отрыва электронов от атомов. В результате ионизации части атомов газ превращается в хаотическую смесь ионов, свободных электронов, нейтральных атомов, а также нейтральных молекул, не претерпевших диссоциации. Электродинамические свойства такой ионизированной среды, называемой газовой плазмой, рассматривались ранее.

Атмосфера Земли и ее строение

В высотном профиле распределения электронной концентрации принято выделять ряд более или менее выраженных слоев, получивших специальные буквенные символы:



Атмосфера Земли и ее строение

Слой D. Так называют самый нижний слой ионосферы, лежащий на высотах от 60 до 90 км. Слой D существует только днем. Электронная концентрация в нем изменяется во времени пропорционально угловой высоте Солнца над горизонтом и не превышает $10^3 - 10^4 \text{ см}^{-3}$. Ночью этот слой исчезает под действием рекомбинации.

Слой E. Располагается на высотах порядка 110 км. Днем значение N_e в данном слое достигает $1,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, а ночью падает до $5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$.

Слой F. Существует на высотах порядка 250 км днем и 320 км ночью. Данный слой характеризуется наивысшей электронной концентрацией, которая достигает $2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ в полуденные часы. Ночью значения N_e в слое F не превышают $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. Днем слой F разделяется на два подслоя F_1 и F_2 , которые ночью сливаются в единый слой.

Распространение волн около Земли

Электромагнитное поле распространяется около Земли в виде **земной** и **пространственной** волн. Под земной волной подразумевается электромагнитное поле, возникающее в результате отражения и дифракции у земной поверхности; под пространственной волной — поле, возникающее в результате преломления и рассеяния в различных слоях атмосферы.

Количественно эти явления определяются электромагнитными параметрами Земли и атмосферы, а также частотой электромагнитного поля. Поэтому условия распространения электромагнитных волн различных диапазонов весьма различны.

Распространение волн около Земли

Поле земной волны зависит от рельефа и электромагнитных параметров поверхности Земли.

Если $\operatorname{tg} \delta_{\omega} = \sigma / \omega \varepsilon_a > 1$, то земную поверхность в электромагнитном смысле можно считать проводником; наоборот, при $\sigma / \omega \varepsilon_a < 1$ ее можно считать диэлектриком. Подчеркнем, что одну и ту же поверхность можно рассматривать как «проводниковую» для относительно низких частот (более длинных волн) и как «диэлектрическую» при больших частотах (более коротких волнах).

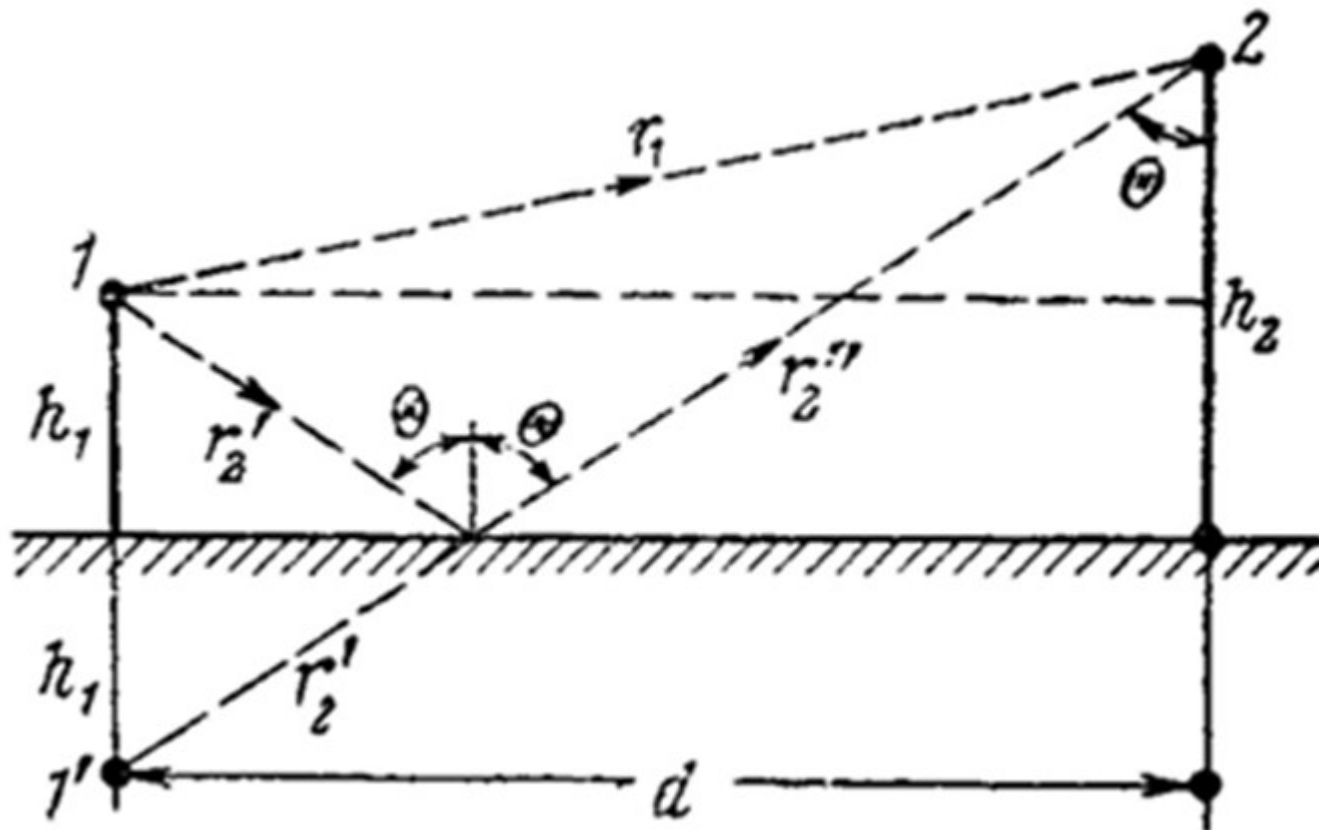
Распространение волн около Земли

Более или менее значительное проникновение электромагнитного поля вглубь земной поверхности происходит лишь при СДВ и ДВ. Вследствие этого подземная и подводная радиосвязь осуществима лишь на СДВ и ДВ.

Расчет характеристик поля, возникающего в результате отражения от земной поверхности, без учета влияния атмосферы может быть сделан на основе схемы, приведенной на рисунке.

Распространение волн около Земли

Расчет характеристик поля, возникающего в результате отражения от земной поверхности, без учета влияния атмосферы



Распространение волн около Земли

Поверхность Земли предполагается плоская, что допустимо для малых дистанций ($d \ll R_3$, где R_3 – радиус Земли), и $\lambda \ll h_1$ и h_2 ; последнее условие имеет место при наземной радиосвязи Земля – самолет на КВ.

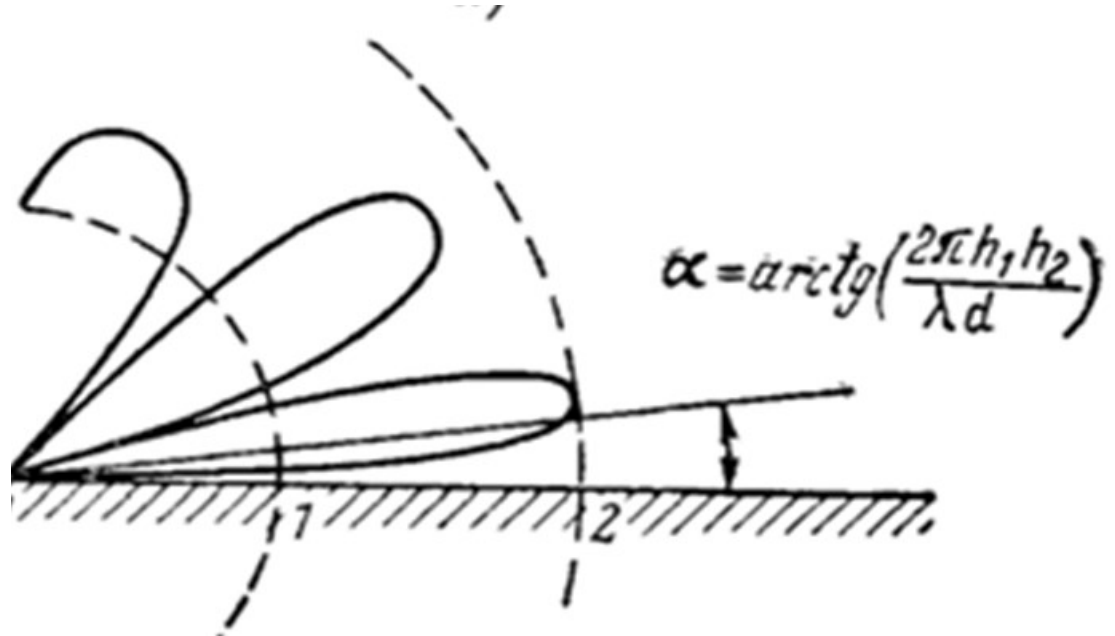
При этих условиях в приближении геометрической оптики напряженность поля в точке приема 2 можно считать суммарной напряженностью полей прямого луча r_1 и отраженного от поверхности Земли луча r_2 . Точка, в которой происходит отражение, находится у пересечения поверхности Земли линией 1'—2; при этом точка 1' является зеркальным отображением точки 1, в которой расположен источник поля.

Распространение волн около Земли

Если диаграмма излучения в вертикальной плоскости в отсутствии Земли представляет окружность, то напряженность поля в точке 2 определяется выражением:

$$\dot{E} = E_{\text{пр}} + E_{\text{отр}} = E_{\text{пр}} \left\{ 1 + \Gamma e^{i\left[\psi - \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)\right]} \right\}.$$

При наличии отражения от земной поверхности диаграмма излучения в вертикальной плоскости приобретает многолепестковую структуру; поле у поверхности Земли при этом отсутствует.



Распространение волн около Земли

В общем случае можно рассматривать три области земной поверхности (см. рисунок), параметры которых различным образом влияют на процесс радиосвязи между двумя наземными пунктами: 1) область возбуждения поля, в центре которой находится передающая антенна; 2) область радиоприема, в центре которой находится приемная антенна и 3) промежуточная область — область распространения поля.



Распространение волн около Земли

Электромагнитные параметры первой и второй областей влияют на величину сопротивления излучения соответствующих антенн и, следовательно, в большей степени определяют мощность сигнала на входе приемника. Параметры промежуточной области определяют затухание распространяющейся волны, однако их влияние на мощность принимаемого сигнала (при не очень больших расстояниях) меньше, чем параметров первой и второй областей. С увеличением расстояния между передающим и приемным пунктами влияние электромагнитных свойств земной поверхности промежуточной области на мощность принимаемого сигнала увеличивается.

Распространение волн около Земли

В пределах промежуточной области электромагнитное поле распространяющееся около земной поверхности, является поверхностной волной, а поле, распространяющееся в Земле, — однородной волной с амплитудой, быстро убывающей вглубь. Фронт волны, распространяющейся около земной поверхности, имеет наклон, т. е. угол $\Theta < \pi/2$; при этом *скорость распространения электромагнитной волны около земной поверхности меньше скорости в вакууме.*

Распространение волн около Земли

Задача о дифракции электромагнитных волн на поверхности Земли наиболее полно решена академиком В.А. Фоком. На основании этого решения напряженность электрического поля в месте приема

$$E_{\text{д}} = E_{\text{д}}^{(\text{и})} F_0,$$

$E_{\text{д}}^{(\text{и})}$ — поле того же источника для случая плоской идеально проводящей земной поверхности;

F_0 — множитель ослабления, обусловленный дифракцией и затуханием электромагнитных волн, распространяющихся у земной поверхности.

Распространение волн около Земли

Если передающая и приемная антенны расположены непосредственно у поверхности Земли, то коэффициент ослабления в области глубокой тени определяется формулой

$$F_0 = 2 \sqrt{\pi x \left| \frac{e^{ixp}}{p + q^2} \right|},$$

в которой

$$x = \frac{r}{R_3} \left(\frac{\pi R_3}{\lambda} \right)^{1/3};$$

Распространение волн около Земли

$$p = (2,34 \div 1,02)e^{i\frac{2\pi}{3}};$$

$$q^2 = \frac{\left(\frac{\pi R_3}{\lambda}\right)^{2/3}}{\varepsilon(tg \delta_3 - 1)}.$$

Распространение волн около Земли

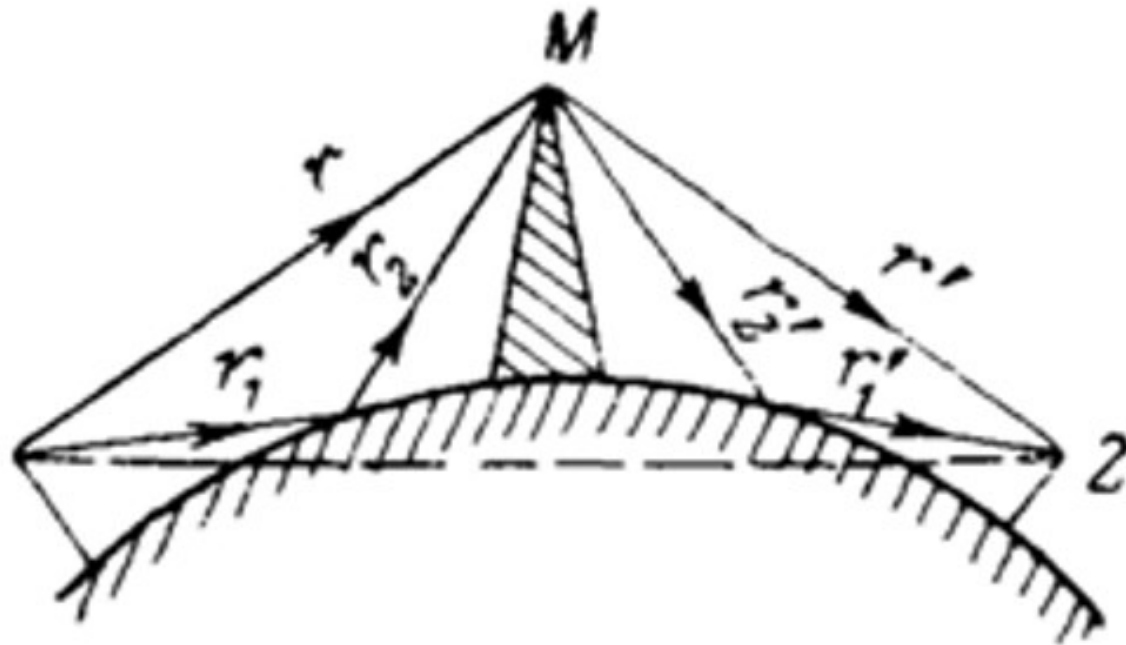
Эта формула содержит экспоненциальный множитель

$$F_0 \sim e^{-\left(\frac{R_3}{\lambda}\right)^{\frac{1}{3}}},$$

который характеризует быстрое убывание поля при укорочении длины волны.

Распространение волн около Земли

Рельеф земной поверхности, а также высокие искусственные сооружения увеличивают напряженность поля земной волны в области «тени», создаваемой сферической формой Земли. Это явление, называемое усилением за счет препятствий, особенно заметно в диапазонах КВ и УКВ, где множитель ослабления особенно мал ввиду малости λ/R_0 .



Распространение волн около Земли

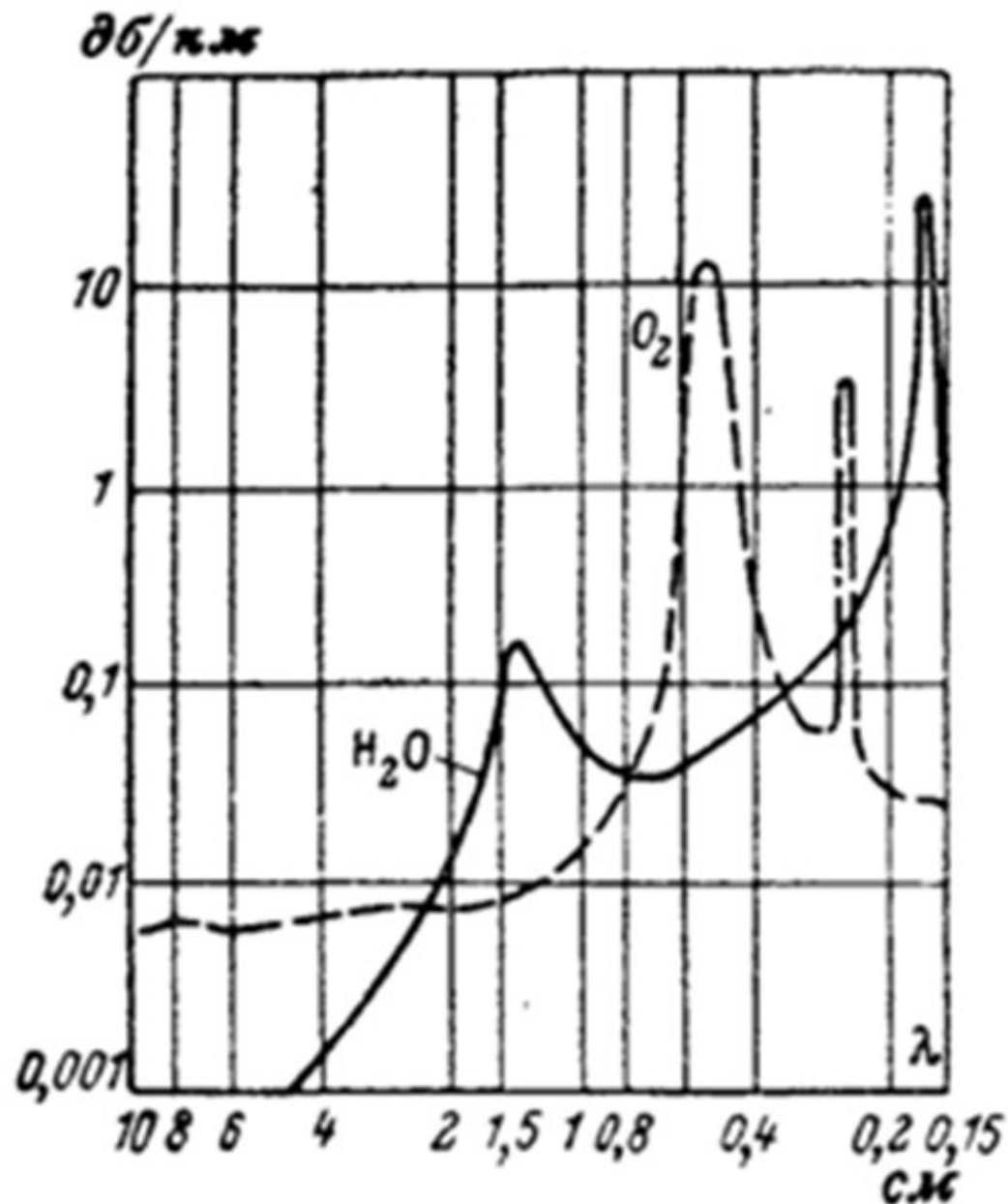
Поле пространственной волны определяется параметрами земной атмосферы. В связи с тем, что физические свойства последней сильно зависят от высоты, земная атмосфера делится на тропосферу, стратосферу и ионосферу.

Тропосфера содержит $4/5$ всей массы воздуха земной атмосферы. В этой области сосредоточены гидрометеоры: облака и другие образования из водяных паров. В тропосфере происходит заметное поглощение энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты.

Распространение волн около Земли

Поглощение электромагнитных волн в кислороде и водяных парах атмосферы

Имеются максимумы поглощения, вызванные резонансным поглощением в водяных парах на $\lambda \approx 1,3$ см, в кислороде на $\lambda \approx 0,5$ см и на других волнах. Эти волны непригодны для радиосвязи и радиолокации на больших расстояниях в нижних слоях атмосферы.



Распространение волн около Земли

Тропосфера является неоднородной средой в смысле диэлектрической проницаемости. Величина последней определяется плотностью атмосферы и присутствием водяных паров; у поверхности земли $\epsilon \approx (1 + 6,5 \cdot 10^{-8})$ и изменяется с высотой. В результате этого возникает рефракция. При нормальном состоянии тропосферы диэлектрическая проницаемость ее уменьшается с высотой. Вследствие этого скорость распространения электромагнитных волн в верхних слоях тропосферы больше, чем в нижних. В результате кривизна рефракции совпадает по знаку с кривизной Земли. При этом кажущееся направление распространения электромагнитной волны отличается от истинного направления.

Распространение волн около Земли

Виды рефракции

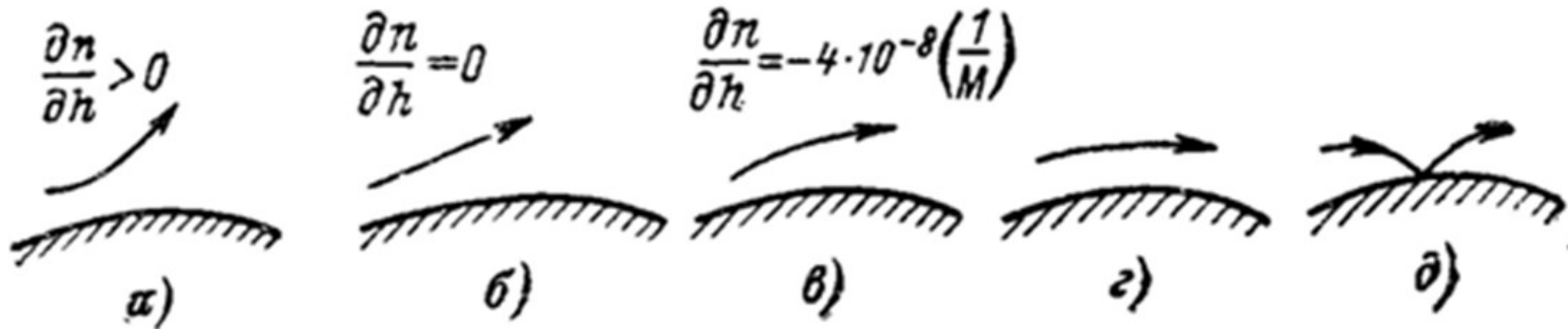


Рис. 20. Различные виды рефракций.

а — отрицательная; б — нулевая; в — нормальная; г — критическая $\frac{\partial n}{\partial h} = -16 \cdot 10^{-8} \left(\frac{1}{M} \right)$; д — сверхрефракция $\frac{\partial n}{\partial h} < -16 \cdot 10^{-8} \left(\frac{1}{M} \right)$.

Особенности распространения радиоволн различных диапазонов

Распространение сверхдлинных волн. Сверхдлинные (мираметровые) волны имеют частоты менее 30 кГц. В этом диапазоне практически любые природные среды, образующие подстилающую поверхность, хорошо отражают радиоволны, приближаясь по своим свойствам к идеальному проводнику. С другой стороны, сравнительно низкая частота колебаний обуславливает практически полное отражение сверхдлинных волн даже от самых нижних, наименее плотных ионосферных слоев D и E. В результате эти волны распространяются в сферическом приземном «волноводе» Земля-ионосфера. При современной технике генерирования и приема радиоволн дальность сверхдлинноволновых радиолиний может составлять несколько тысяч километров.

Распространение сверхдлинных волн

Распространение сверхдлинных волн выгодно отличается постоянством уровня сигнала в разное время суток и в различные сезоны года. Из-за весьма большой длины волны глубина поверхностного слоя в почве и в морской воде составляет десятки метров, что позволяет создавать системы подземной и подводной радиосвязи. Однако передающие антенны рассматриваемого диапазона получаются громоздкими, и, что самое главное, из-за низкого значения несущей частоты здесь не удастся осуществить модуляцию достаточно высокими частотами. Как следствие, подобные радиоканалы имеют очень малую скорость передачи информации и пригодны в основном для работы в телеграфном режиме. Основная область применения сверхдлинных волн - создание систем устойчивой дальней навигации для вождения кораблей и самолетов.

Распространение сверхдлинных волн

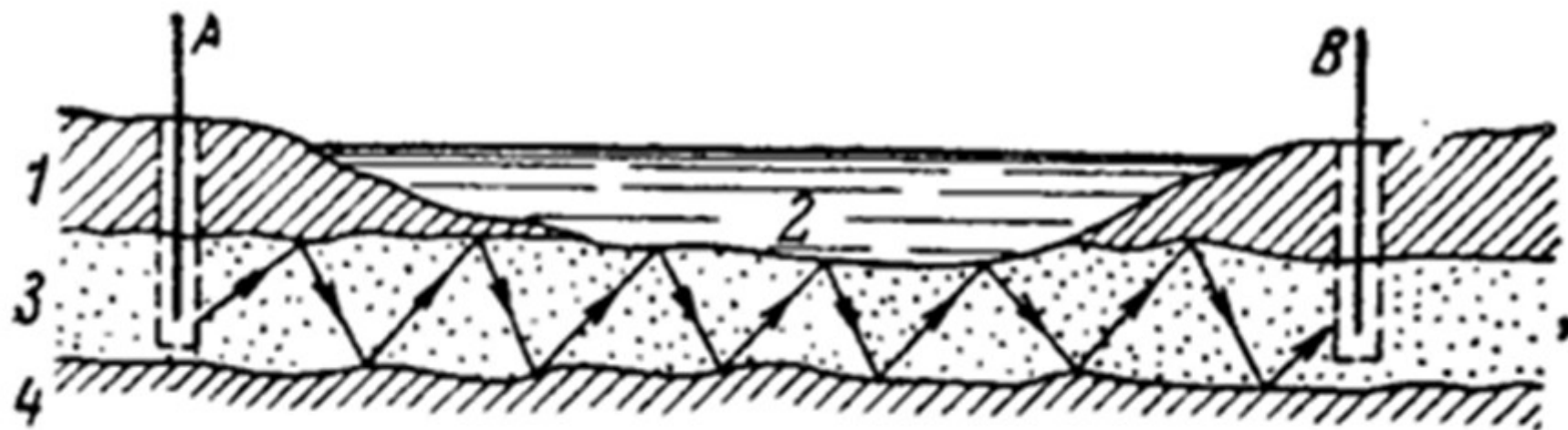


Рис. 28. Схема подземного волноводного распространения СДВ.

1, 2 — поверхностный слой с большой проводимостью;
3 — подземный слой с малой проводимостью; 4 — глубокие
слои с большой проводимостью.

Распространение длинных волн

Распространение длинных волн. Условия распространения длинных (километровых) волн приближаются к тем, которые были описаны выше применительно к сверхдлинным волнам. Сравнительно низкая частота длинных волн приводит к тому, что они хорошо отражаются ионосферой как в дневные, так и в ночные часы. С этим обстоятельством связана высокая устойчивость работы длинноволновых радиоканалов. Структура электромагнитного поля длинноволнового диапазона в приземном пространстве на расстояниях в несколько сотен километров от передатчика оказывается весьма сложной, так как одновременно существуют земная (поверхностная) и ионосферная (пространственная) волны, которые складываются друг с другом. Распространение длинных волн сопровождается потерями за счет конечной проводимости подстилающей поверхности, а также за счет дифракции.

Распространение длинных волн

Для расчета напряженности поля в длинноволновом диапазоне пользуются эмпирической *формулой Остина*, согласно которой множитель ослабления имеет вид

$$F = \frac{1}{2} \exp \left(- \frac{0,0014r}{\lambda^{0,6}} \right),$$

где расстояние r и длина волны λ выражены в километрах. Данная формула была получена на основе статистической обработки данных о работе радиовещательных каналов длинноволнового диапазона. Добавочное ослабление поля порой оказывается значительным. Так, если $r=5000$ км и $\lambda=2$ км, то $F=0,005$.

Распространение длинных волн

Основные области применения длинных волн - радиовещание, служебная телеграфная связь и навигация. Большой недостаток длинноволнового диапазона - его относительная узкополосность. Здесь полная ширина всего диапазона частот не превышает 270 кГц. Это обстоятельство ограничивает число радиоканалов, способных одновременно работать в длинноволновом диапазоне без взаимных помех.

Распространение средних волн

Распространение средних волн. Условия распространения средних (гектометровых) волн оказываются различными в дневные и в ночные часы. Дело в том, что днем эти радиоволны сильно поглощаются в низлежащем слое D ионосферы. Поэтому они могут распространяться лишь в форме земных волн на сравнительно короткие расстояния до 1000 км. Ночью слой D исчезает, и средние волны могут распространяться на несколько тысяч километров за счет отражения от ионосферных слоев E и F.

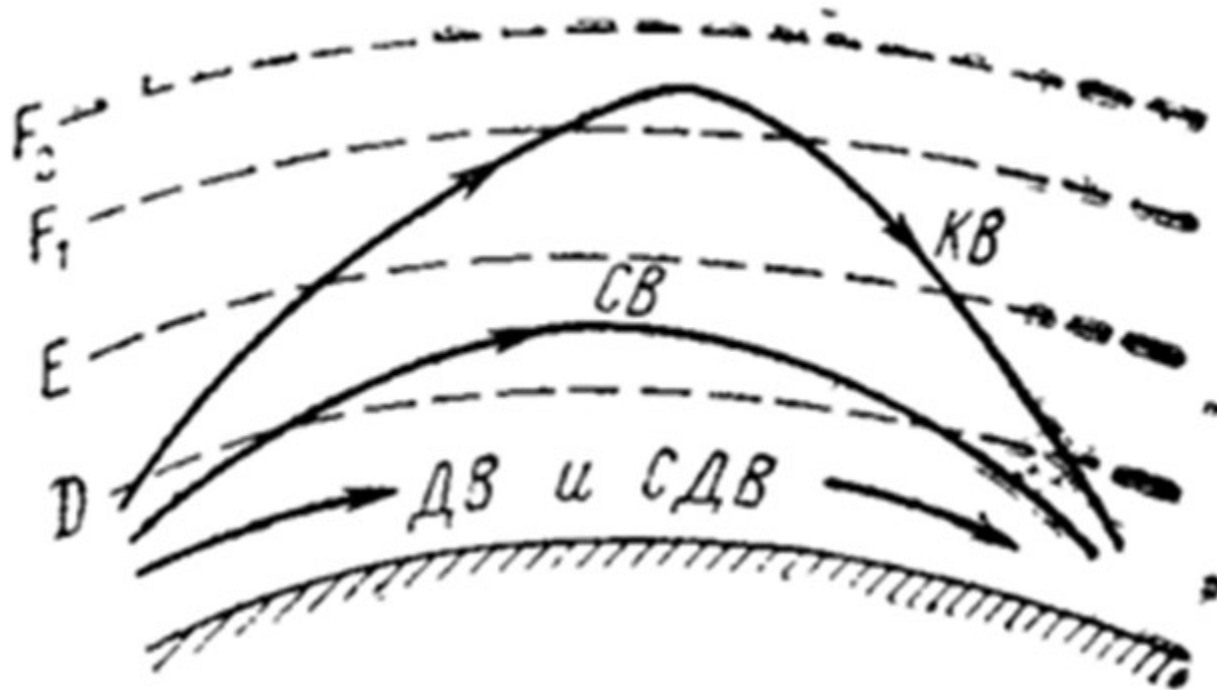
Средние волны используют в основном для создания радиовещательных каналов.

Распространение средних волн

Работа средневолновых радиоканалов осложняется так называемыми замираниями. Сущность этого явления заключается в следующем. Ионосферные слои всегда неоднородны, т. е. представляют собой хаотические чередования пространственных областей с повышенной и пониженной электронной концентрацией. Эти области перемещаются под действием сильных ветров, постоянно присутствующих на больших высотах. Если передающая антенна имеет невысокую направленность и излучает волны в широком интервале углов, то возможна ситуация, когда в точку приема одновременно приходят несколько лучей, отраженных от разных неоднородностей.

Распространение средних волн

Отражение волн различных диапазонов от слоев ионосферы



Распространение средних волн

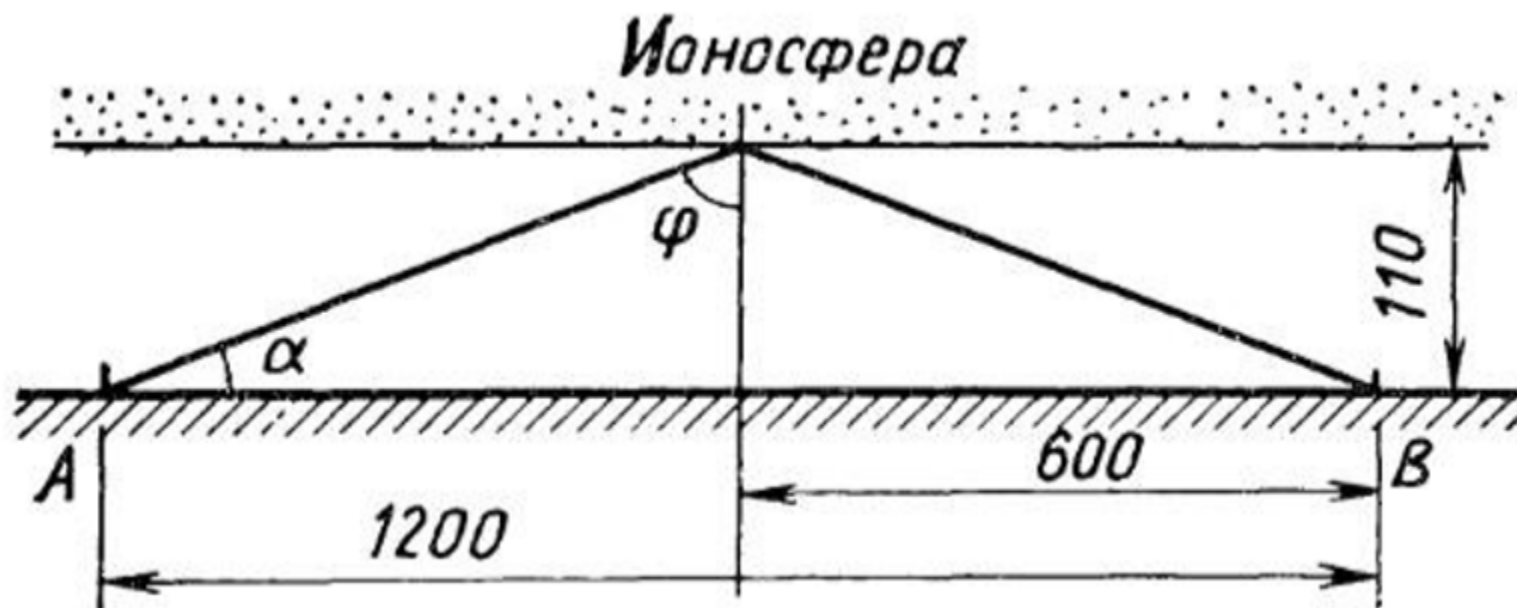
Фазы приходящих сигналов случайны, поэтому при сложении колебаний возникают беспорядочные изменения амплитуды напряжения на входе приемника с характерным временным интервалом в десятки секунд. Глубина замираний может быть весьма значительной. Частично ликвидировать замирания удастся в том случае, если приемник имеет достаточный запас усиления до детектора и снабжен системой автоматической регулировки усиления (АРУ). Радикальным способом борьбы с замираниями служит прием на несколько одинаковых антенн, разнесенных в пространстве на несколько длин волн, с последующим сложением сигналов.

Распространение коротких волн

Распространение коротких волн. Широкое применение коротких волн в практике радиосвязи и радиовещания обусловлено прежде всего тем, что в этом диапазоне удастся создать передающие антенны приемлемых габаритов с достаточно высокой направленностью излучения. Это позволяет в полной мере использовать отражающие свойства ионосферного слоя Земли и осуществлять достаточно надежные радиоканалы протяженностью в несколько тысяч и даже десятков тысяч километров при весьма ограниченной мощности передатчика, порой составляющей лишь несколько ватт. Влияние земных волн в коротковолновом диапазоне, как правило, незначительно.

Распространение коротких волн

Проектирование радиолинии КВ-диапазона требует сведений о характере распределения электронной концентрации в ионосфере применительно к конкретному времени суток и к известным географическим координатам точек размещения передатчика и приемника.



Распространение коротких волн

Пусть, например, требуется создать радиолинию между пунктами А и В, удаленными друг от друга на 1200 км. Так как длина трассы невелика по сравнению с длиной земного экватора, поверхность Земли в данном случае можно приближенно рассматривать как плоскость. Связь осуществляется в ночные часы. В качестве отражателя используется ионосферный слой Е с электронной концентрацией $N_e = 5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$, располагающийся на высоте $h = 110 \text{ км}$.

Распространение коротких волн

Из чертежа следует, что точка отражения от ионосферы размещается посередине трассы. Луч передатчика должен быть направлен под углом $\alpha = \arctg(110/600) = 10^\circ$ по отношению к горизонту; при этом угол падения волны на слой $\varphi = 80^\circ$.

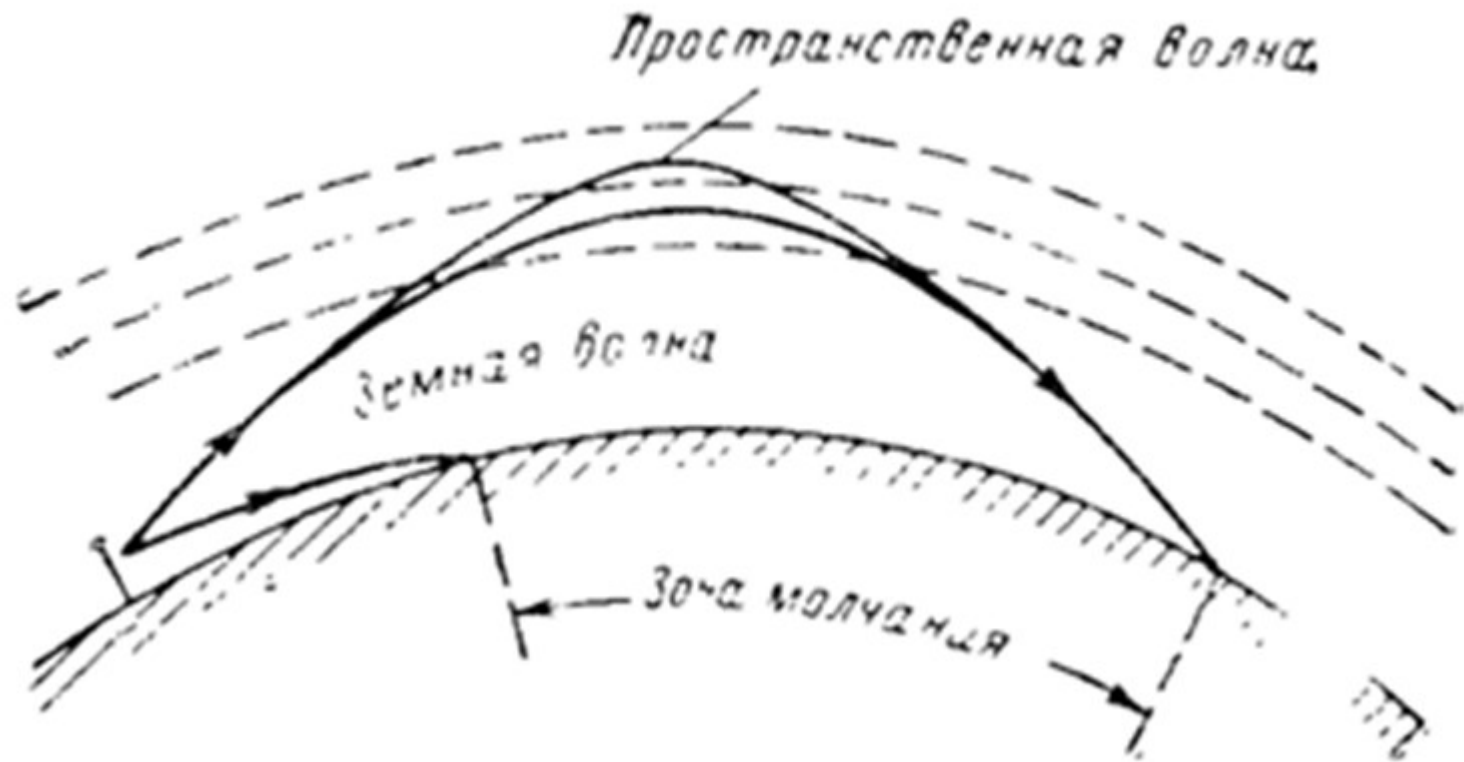
Связь между теми же самыми пунктами А и В можно осуществить, используя отражение от более высокого и более плотного слоя F, который существует как днем, так и ночью. Для этого придется несколько увеличить угол α , под которым волна излучается на передающем конце линии, а также взять большую рабочую частоту, чтобы расположенный ниже слой E оказался прозрачным для радиоволн.

Распространение коротких волн

Однако, как правило, поглощение волн в слое E достаточно интенсивно, так что общие потери в высокочастотном радиоканале могут оказаться выше, чем в низкочастотном. Практика показывает, что высокочастотный участок КВ-диапазона ($\lambda = 15 \div 30$ м) целесообразно использовать в дневные часы. Для работы в ночное время более пригоден низкочастотный участок диапазона ($\lambda = 40 \div 100$ м).

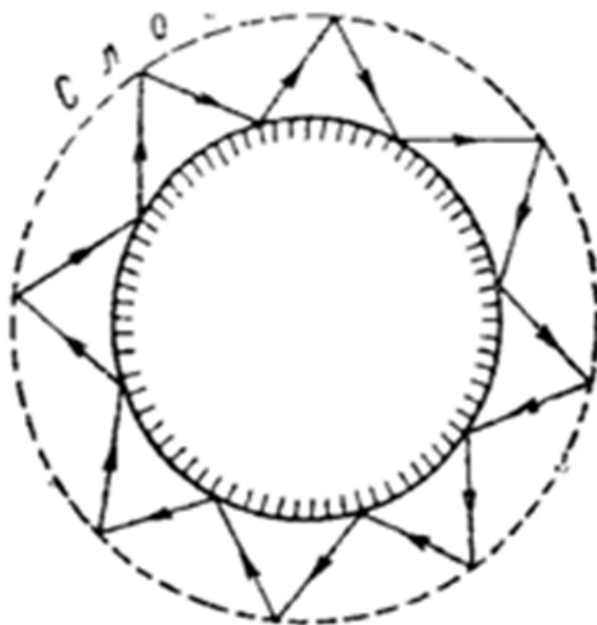
Важно отметить, что чисто ионосферный механизм распространения коротких волн приводит к тому, что лучи принципиально не могут попасть в точки земной поверхности, находящиеся примерно под областью отражения. Как следствие, электромагнитное поле здесь отсутствует. Такие участки вдоль трассы называют зонами молчания.

Распространение коротких волн



Распространение коротких волн

Электромагнитные волны КВ-диапазона могут испытывать целый ряд скачков, т. е. последовательных отражений от ионосферы и от поверхности Земли. Это дает возможность существенно увеличивать протяженность канала, а при благоприятных условиях даже поддерживать радиосвязь между антиподами, т. е. корреспондентами, располагающимися на одной прямой, проходящей через центр Земли.



Распространение коротких волн

Распространение волн КВ-диапазона на большие расстояния обычно сопровождается глубокими замираниями, которые серьезно осложняют работу радиоканалов и наряду с интенсивными помехами препятствуют высококачественному радиовещанию на волнах этого диапазона. Большие сложности возникают также из-за исключительно высокой плотности размещения передатчиков в этом участке спектра.

Распространение ультракоротких волн

Распространение ультракоротких волн.

Электромагнитные волны с частотами выше 30 МГц практически не отражаются от ионосферных слоев в обычных условиях. С другой стороны, малость длины волны таких колебаний по сравнению с радиусом Земли приводит к тому, что дифракционные эффекты в этих диапазонах выражены слабо. Если приемная антенна размещается ниже уровня горизонта, т. е. попадает в область геометрической «тени», то поле в точке приема будет, как правило, весьма слабым. Поэтому радиолинии УКВ работают обычно в условиях прямой видимости.

Эти условия естественно выполняются в космических линиях связи. Если же приемник и передатчик размещены вблизи земной поверхности, то факторами, ограничивающими протяжённость УКВ-радиолинии, служат высоты подъема антенн над землей.

Распространение ультракоротких волн

Рассмотрим, например, УКВ-радиолинию между диспетчерской службой аэропорта и командиром воздушного лайнера. Пусть $h_1=50$ м - высота антенны аэропорта, $h_2=10\ 000$ м - высота полета самолета. Предельная длина трассы с прямой видимостью $L=540$ км, что обычно вполне достаточно для оперативного управления воздушным движением в зоне аэропорта. Заметим, что фактически длина трассы даже несколько больше из-за атмосферной рефракции радиоволн.

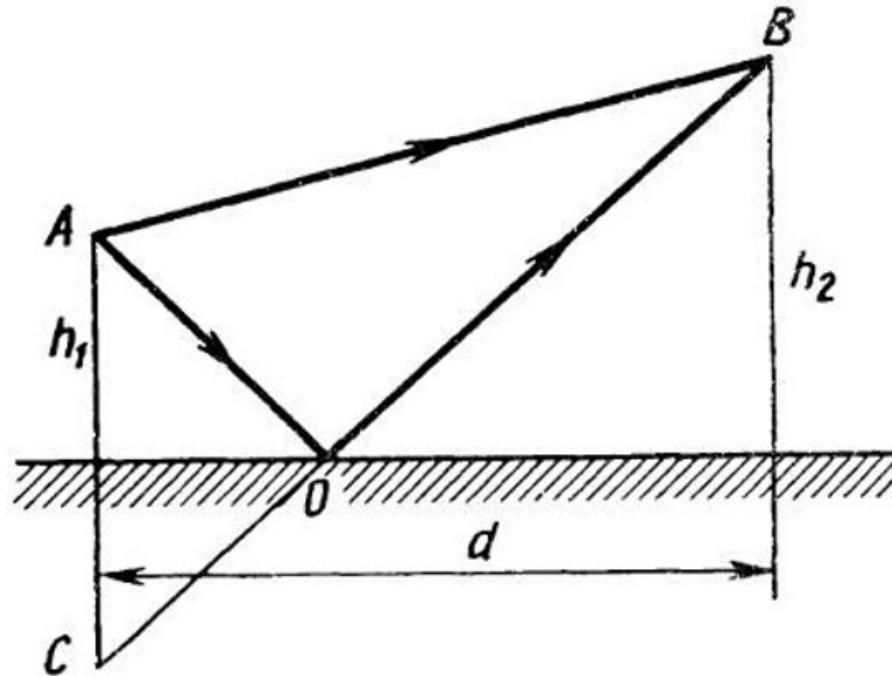
Распространение ультракоротких волн

Если направленные свойства применяемых антенн недостаточно совершенны, то часть энергии излучается передающей антенной по направлению к земной поверхности, отражается от нее и попадает на вход приемника наряду с энергией прямой волны. Описанное явление представляет собой интерференцию падающей и отраженной волн, которая может оказывать существенное влияние на работу радиолинии УКВ-диапазона.

На рисунке схематически изображена подобная радиолиния с передатчиком в точке А и приемником в точке В.

Распространение ультракоротких волн

На рисунке схематически изображена подобная радиолиния с передатчиком в точке А и приемником в точке В.



Геометрическая длина пути отраженной волны равна сумме длин отрезков АО и ОВ. Из построения видно, что эта сумма равна длине отрезка СВ, соединяющего «зеркальное изображение» передающей антенны с точкой размещения приемной антенны.

Распространение ультракоротких волн

Если d - длина трассы, измеренная вдоль земной поверхности, то

$$AB = \sqrt{(h_2 - h_1)^2 + d^2}; \quad CB = \sqrt{(h_2 + h_1)^2 + d^2}.$$

Разность геометрических длин двух путей

$$\delta = CB - AB = d \left[\sqrt{1 + \left(\frac{h_2 + h_1}{d} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{h_2 - h_1}{d} \right)^2} \right].$$

На практике обычно $h_1/d \ll 1$; $h_2/d \ll 1$, т.е. относительные высоты подъема антенн невелики. Это дает основание воспользоваться приближенным равенством $\sqrt{1 + x} \approx 1 + x/2$, справедливым при $x \ll 1$.

Выполнив элементарные преобразования, формулу можно представить следующим образом: $\delta \approx 2h_1h_2/d$.

Распространение ультракоротких волн

Предположим для простоты, что передающая антенна излучает волны с одной и той же интенсивностью по всем направлениям. Тогда в точке приема амплитуды колебаний, обусловленных прямой и отраженной волнами, будут одинаковыми. Фазы же этих колебаний окажутся различными: во-первых, при достаточно наклонном падении на земную поверхность фаза отраженного колебания получит дополнительный сдвиг на угол, близкий к 180° ; во-вторых, отраженный луч длиннее прямого луча на величину δ . В результате комплексная амплитуда сигнала на входе приемной антенны приобретает вид

$$\dot{E} = \dot{E}_0 \left[1 - \exp \left(-j \frac{2\beta h_1 h_2}{d} \right) \right],$$

Распространение ультракоротких волн

где \dot{E}_0 - некоторая амплитуда, относящаяся к прямому лучу (ее конкретное значение не играет роли); $\beta=2\pi/\lambda$, - коэффициент фазы плоской волны в свободном пространстве.

Назовем величину $V = 1 - \exp\left(-j \frac{2\beta h_1 h_2}{d}\right)$

интерференционным множителем. Амплитуда сигнала на входе приемника пропорциональна модулю этого комплексного числа:

$$\begin{aligned} |V| &= \left\{ \left[1 - \cos\left(\frac{2\beta h_1 h_2}{d}\right) \right]^2 + \sin^2\left(\frac{2\beta h_1 h_2}{d}\right) \right\}^{1/2} = \\ &= 2 \left| \sin \frac{\beta h_1 h_2}{d} \right|. \end{aligned}$$

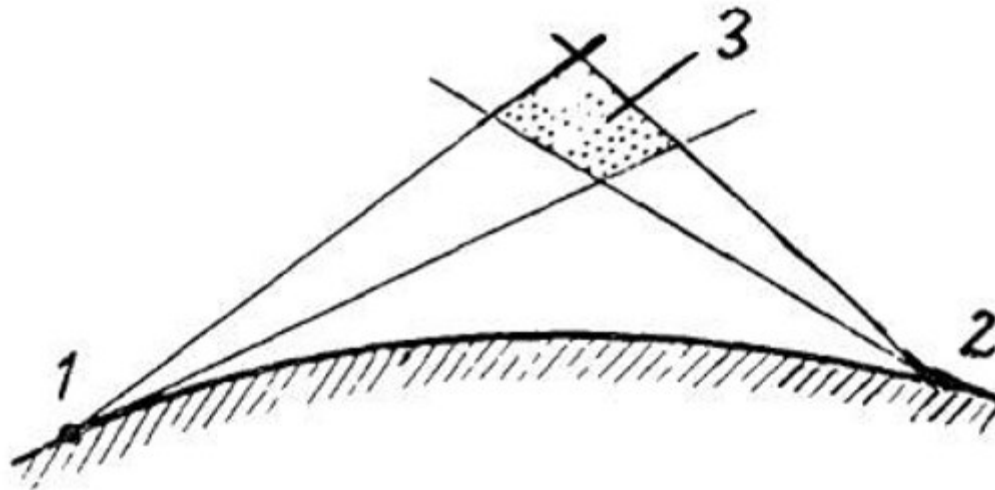
Распространение ультракоротких волн

Данное равенство представляет собой интерференционную формулу для расчета УКВ-радиолинии, полученную акад. Б.А. Введенским.

Если изменять высоту приемной антенны h_2 , оставив другие параметры системы неизменными, то амплитуда принимаемого сигнала будет изменяться по немонотонному закону. В частности, если $\beta h_1 h_2 / d = \pi$, то отраженный луч «гасит» прямой и сигнал на входе приемника исчезает. Чтобы бороться с интерференционными явлениями, следует сужать диаграммы направленности применяемых антенн.

Распространение ультракоротких волн

В УКВ-диапазоне нашел практическое применение интересный механизм дальнего распространения, получивший название тропосферного рассеяния. Здесь для создания поля в точке приема, находящейся глубоко за горизонтом, используется рассеяние падающей волны на турбулентных неоднородностях тропосферы, которые всегда присутствуют на высотах 10-20 км.



Распространение ультракоротких волн

Этот способ связи требует применения остронаправленных антенн и передатчиков значительной мощности (от единиц до сотен киловатт). Однако в большинстве случаев тропосферные линии дальней УКВ-связи экономически выгодны, так как не требуют никаких промежуточных сооружений вдоль трассы.

Используются также линии связи на УКВ с рассеянием от метеорных следов, время от времени возникающих в атмосфере на высотах 60-100 км. Эти высокоионизированные плазменные образования существуют всего несколько секунд, но имеют большую отражательную способность и дают возможность отдельными «порциями» передавать значительные объемы цифровой информации на расстояния в несколько сотен километров.

Распространение ультракоротких волн

Волны УКВ-диапазона часто используются для организации связи между подвижными объектами, например, между автомобилями в условиях больших городов. Условия распространения волн оказываются здесь весьма сложными из-за дифракции на местных предметах. Расчет и проектирование таких радиолиний ведется на основе сбора статистической информации об условиях приема радиосигналов в различных условиях.

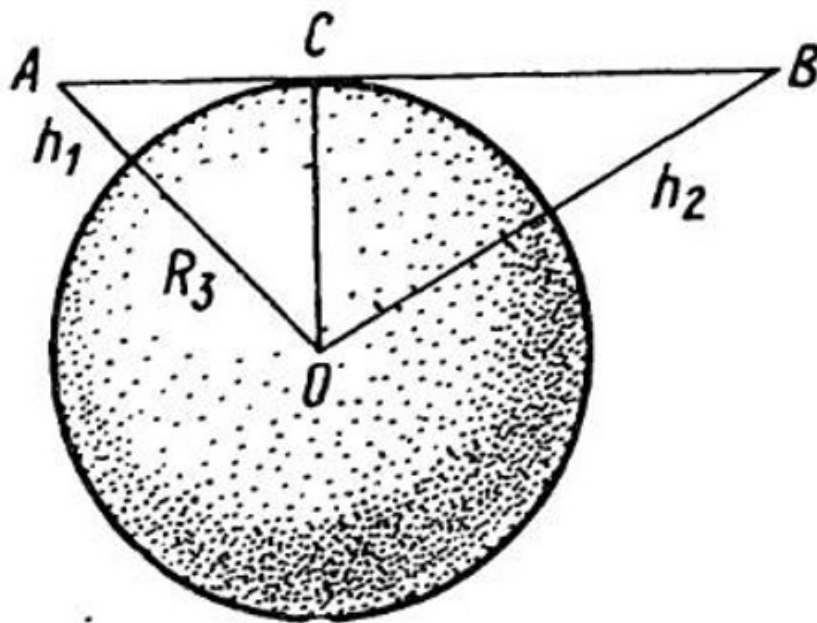
Распространение ультракоротких волн

Волны УКВ-диапазона часто используются для организации связи между подвижными объектами, например, между автомобилями в условиях больших городов. Условия распространения волн оказываются здесь весьма сложными из-за дифракции на местных предметах. Расчет и проектирование таких радиолиний ведется на основе сбора статистической информации об условиях приема радиосигналов в различных условиях.

Определение расстояния прямой видимости

На рисунке условно изображены антенны, приподнятые над земной поверхностью на отрезки h_1 и h_2 .

Расстояние прямой видимости – это расстояние между пунктами передачи и приема радиоволн, определяемое по длине касательной к земной поверхности, соединяющей эти пункты.



Определение расстояния прямой видимости

Предельно возможная длина трассы распространения с прямой видимостью будет получена в том случае, когда луч АВ касается поверхности Земли в точке С. Расстояния АС и СВ являются катетами прямоугольных треугольников $\triangle ACO$ и $\triangle OCB$. Примем во внимание, что радиус Земли $OC = R_3 = 6370$ км, а также то, что обычно $h_1/R_3 \ll 1$, $h_2/R_3 \ll 1$. Пренебрегаем квадратами малых величин.

$$\begin{aligned} AC &= \sqrt{AO^2 - OC^2} = \sqrt{(h_1 + R_3)^2 - R_3^2} = \\ &= \sqrt{h_1^2 + 2h_1R_3 + R_3^2 - R_3^2} \approx \sqrt{2h_1R_3}; \\ CB &= \sqrt{OB^2 - OC^2} = \sqrt{(h_2 + R_3)^2 - R_3^2} = \\ &= \sqrt{h_2^2 + 2h_2R_3 + R_3^2 - R_3^2} \approx \sqrt{2h_2R_3}; \end{aligned}$$

Определение расстояния прямой видимости

Тогда максимальная длина трассы

$$\begin{aligned} L_{\text{ПР}} &= AC + CB \approx \sqrt{2h_1 R_3} + \sqrt{2h_2 R_3} = \\ &= \sqrt{2R_3} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}). \end{aligned}$$

Расстояние прямой видимости с учетом значения радиуса Земли

$$L_{\text{ПР}} \approx 3,57 \cdot 10^3 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \text{ м.}$$

Все входящие сюда величины выражены в метрах.

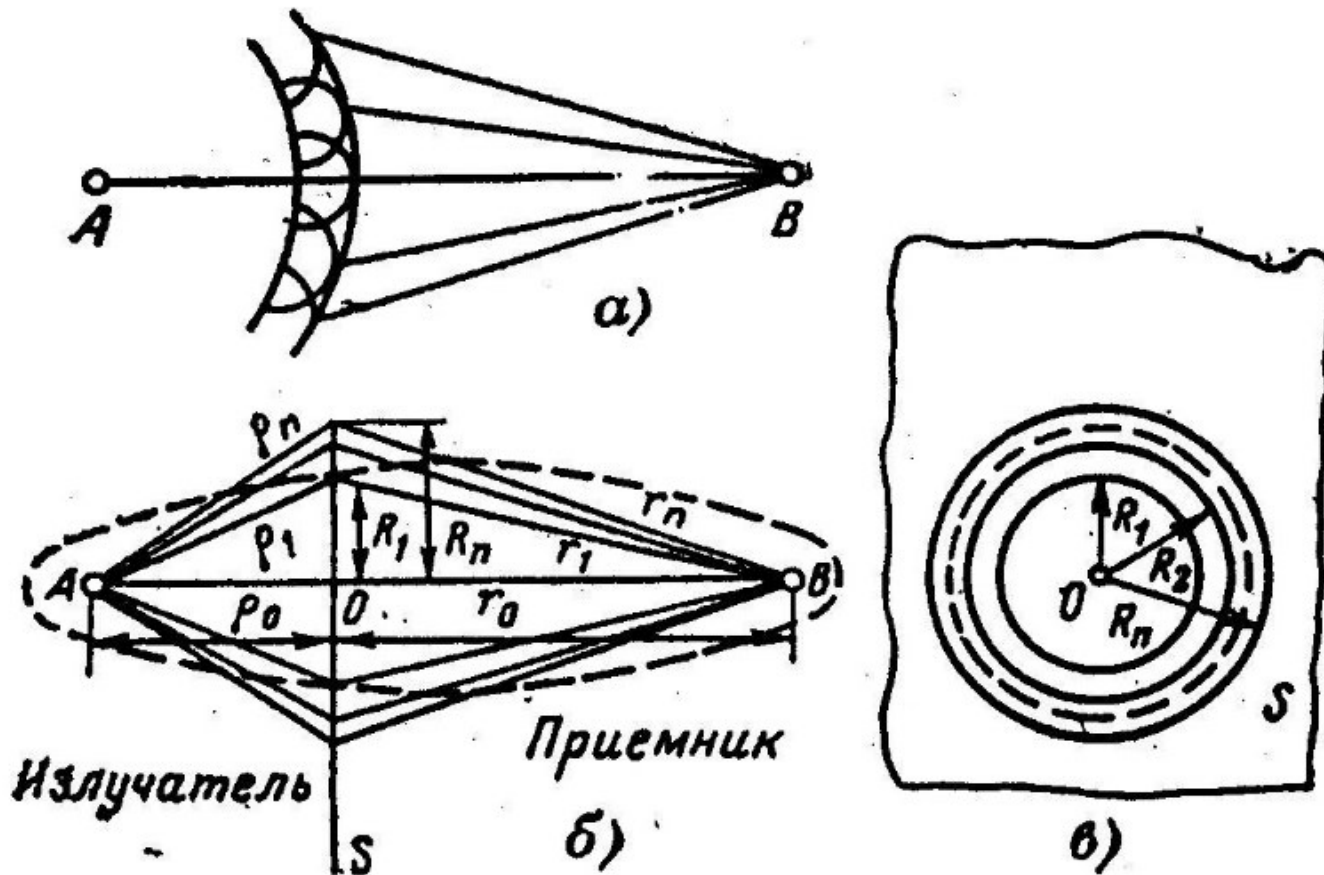
Определение расстояния прямой видимости

Атмосферная рефракция изменяет траекторию распространения электромагнитной волны, за счет чего дальность прямой видимости может увеличиваться. Для нормальной атмосферной рефракции расстояние прямой видимости определяется выражением:

$$L_{\text{ПР}} \approx 4,12 \cdot 10^3 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \text{ м.}$$

Область пространства, существенная при распространении радиоволн. Метод зон Френеля

На формирование поля вблизи приемной антенны В (см. рисунок) различные области свободного пространства, через которое проходят радиоволны от излучателя А, влияют в разной степени.



Область пространства, существенная при распространении радиоволн. Метод зон Френеля

Излучатель создает сферическую волну, каждый элемент фронта которой вновь является источником сферической волны. Новая волновая поверхность находится как огибающая вторичных сферических волн. Поле на некотором расстоянии от излучателя определяется суммарным действием вторичных источников. Основной вклад в эту сумму дают источники, расположенные вблизи прямой АВ. Действие вторичных смежных излучателей, расположенных на значительном расстоянии от этой прямой, взаимно компенсируется.

Областью, существенной при распространении радиоволн, называют часть пространства, в которой распространяется основная доля энергии.

Область пространства, существенная при распространении радиоволн. Метод зон Френеля

Неоднородности среды (например, препятствия на пути волны) влияют на характеристики поля в точке приема, если они охвачены областью, существенной при распространении. Эта область имеет конфигурацию эллипсоида вращения с фокусами в точках А и В.

Радиус поперечного сечения эллипсоида R_n на расстоянии ρ_0 от точки А и расстоянии r_0 от точки В определяется равенством

$$R_n = \sqrt{\frac{\lambda \rho_0 r_0}{\rho_0 + r_0}} n,$$

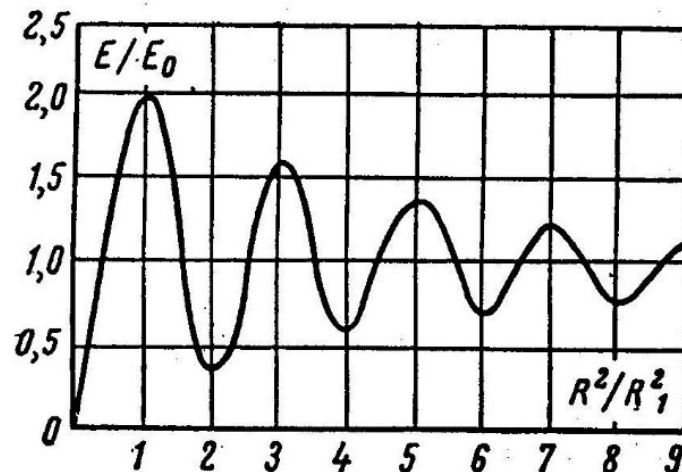
где n – целое число.

Кольцевую область, построенную на плоскости S , перпендикулярной линии АВ, с радиусом R_n называют **зоной Френеля** с номером n .

Область пространства, существенная при распространении радиоволн. Метод зон Френеля

Если на пути распространения волны помещен экран с круглым отверстием (плоскость экрана перпендикулярна линии АВ), то при изменении радиуса отверстия (или перемещении экрана вдоль трассы) напряженность поля в точке В будет периодически изменяться (см рис.).

Изменение напряженности поля за экраном с круглым отверстием при изменении радиуса отверстия R (R_1 – радиус первой зоны Френеля)



Область пространства, существенная при распространении радиоволн. Метод зон Френеля

Напряженность поля будет максимальной, когда радиус отверстия в экране равен радиусу первой зоны Френеля и радиусам зон Френеля со следующими нечетными номерами. При большом размере отверстия (больше радиуса шестой зоны Френеля) амплитуда напряженности поля стремится к E_0 , поэтому радиус поперечного сечения области, существенной при распространении, считают равным радиусу зоны Френеля с номерами 6...10. Однако для ориентировочных расчетов часто размер существенной области можно принять равным радиусу первой зоны Френеля.

Экологические проблемы

Технологическое развитие общества сопровождается непрерывным возрастанием интенсивности электромагнитных полей искусственного происхождения, которые окружают человека на производстве и в быту. Как следствие, актуальной становится защита здоровья человека от вредного влияния мощных полей, длительно воздействующих на организм.

На радиочастотах энергия квантов (фотонов) недостаточна для ионизации атомов вещества. Падающее электромагнитное поле переводит атомы или молекулы в возбужденное состояние. Вслед за этим атомы или молекулы возвращаются в исходное состояние, излучая новые кванты той же самой частоты. В конечном итоге вся энергия радиоволн, поглощаемая организмом, переходит в теплоту. Этим часто пользуются в медицине для прогревания внутренних органов.

Экологические проблемы

Длительное воздействие на человека СВЧ-полей с плотностью потока мощности в несколько мВт/см² приводит к болезненным явлениям, прежде всего к помутнению хрусталика глаза. Не исключается возможность генетических изменений в организме. Поэтому при эксплуатации соответствующего оборудования следует неукоснительно соблюдать научно обоснованные нормы радиочастотного облучения персонала.