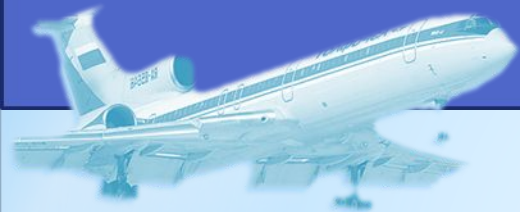


Лекция 1/5. Среда распространения сигнала

2014 г





Ранее была проведена классификация сред распространения сигнала и был сделан вывод, что для подавляющего большинства РЭС ГА средами распространения сигнала являются среды распространения радиоволн (РРВ), т.е. среды без использования искусственных направляющих линий. Среды, представляющие собой искусственные направляющие линии, применяются только в некоторых РЭС АЭС при передаче информации между абонентами, находящимися на земле.

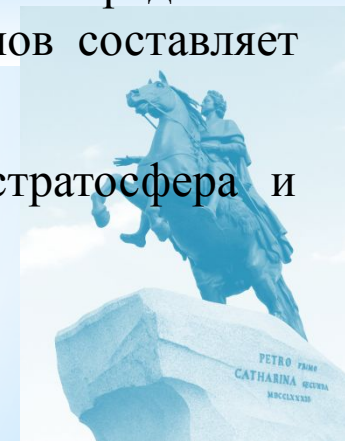
Поэтому рассмотрим особенности только среды распространения радиоволн.


1. Основные особенности сред распространения радиоволн

Для подавляющего большинства РЭС ГА средами РРВ являются атмосфера и космическое пространство.

Условно принято считать, что **космическое пространство** начинается за пределами двух-трех земных радиусов ($R_3 = 6370$ км), где плотность электронов составляет $2 \dots 20$ эл/см³, а ниже располагается атмосфера.

Атмосфера разделяется на три основные области: тропосфера, стратосфера и ионосфера.





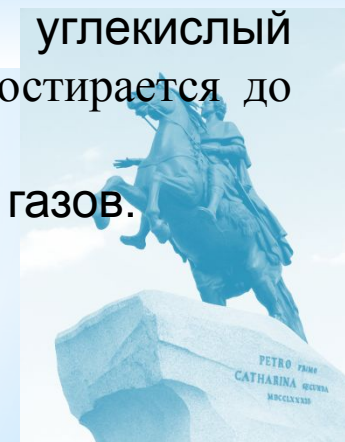
Тропосфера (нижняя атмосфера) располагается от поверхности Земли до высоты 15...18 км. С высотой температура и давление воздуха, а также содержание водяных паров в тропосфере изменяются, но газовый состав ее практически постоянен: азот и кислород. **Неоднородностями в тропосфере** являются пары воды, облака.

Тропосферные неоднородности способны отражать падающие на них радиоволны.

Стратосфера простирается примерно от 15...18 км до 60...80 км. Признаком перехода тропосферы в стратосферу является прекращение понижения температуры, которая в верхней части тропосферы падает до $-(50... 60)^{\circ}\text{C}$. В стратосфере температура изменяется мало и остается такой же до высоты около 40 км, а затем примерно до высоты 60 км растет до $+80^{\circ}$, далее же опять падает. Повышение температуры объясняется поглощением энергии ультрафиолетового излучения Солнца озоном, содержащимся в воздухе.

Ионосфера (верхняя атмосфера) состоит из множества газов (аргон, углекислый газа, неон, криптон и др.) и начинается с высоты 60...80 км и простирается до высоты 1500 км.

Падающее на ионосферу излучение Солнца вызывает ионизацию газов.

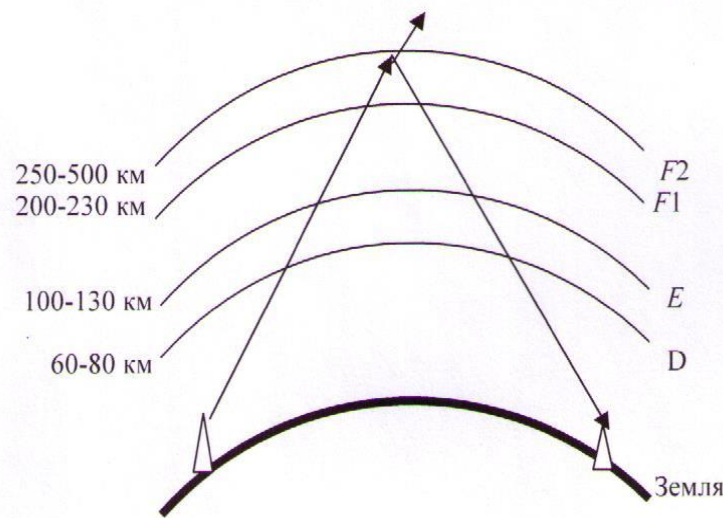




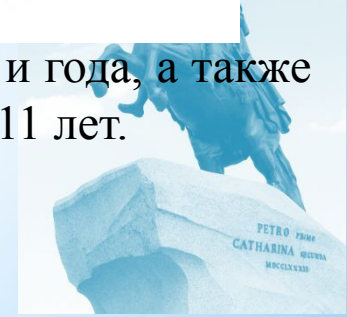
Существенное влияние на распространение радиоволн оказывает только часть ионосферы до высоты около 500 км, в которой плотность свободных электронов составляет $10^3 \dots 10^6$ эл/см³.

Полная картина физических процессов при прохождении радиоволн через ионосферу очень сложна, т.к. **ионосфера не представляет собой единую структуру, а состоит из ряда слоев, обладающих неодинаковыми свойствами.**

На относительно небольших высотах 60...80 км располагается слой, обозначаемый *D*, в котором концентрация свободных электронов невелика. Выше, на высотах 100...130 км, располагается слой *E*, далее, на высотах 200...230 км, располагается слой *F1* и на высотах 250...500 км – слой *F2*, для которого характерна наибольшая концентрация электронов.



Степень ионизации ионосферных слоев сильно зависит от времени суток и года, а также от текущего состояния солнечной активности, изменяющейся с периодом 11 лет.





Неоднородностями в ионосфере являются ионосферные слои.

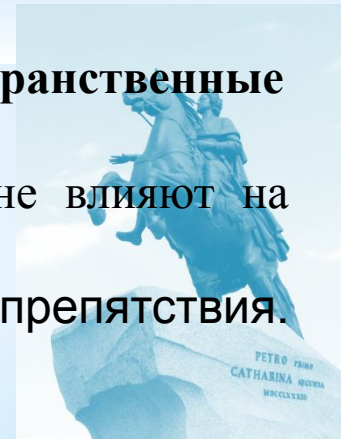
Радиоволны могут отражаться и не отражаться от ионосферных слоев. Отсутствие отражения радиоволны означает, что радиоволна либо «поглотилась» ионосферой, либо «пронзила» ее и ушла в космическое пространство.

Несмотря на изменчивость свойств ионосферы, относительная регулярность этих изменений позволяет использовать ее для работы постоянно действующих радиолиний.

В среде РРВ наблюдаются и иные менее регулярные неоднородности (например, следы метеоров, искусственные неоднородности), которые так же учитываются в построении ряда радиолиний.

На основе проведенного анализа свойств сред РРВ можно сделать вывод, что радиоволны могут распространяться:

- вдоль земной поверхности (**земные или поверхностные волны**);
- с отражением от неоднородностей, находящихся в среде РРВ (**пространственные волны**);
- в свободном пространстве (когда электрические параметры Земли не влияют на свойства РРВ).
- через геологические слои Земли, воду, некоторые искусственные препятствия.





Особенности РРВ зависят от частоты радиоволны:

- с ростом частоты (с уменьшением длины волны) поглощение энергии радиоволны в земле возрастает, а в ионосфере – уменьшается;
- с уменьшением частоты (с увеличением длины волны) возрастает дифракционная способность распространения радиоволн, т.е. способность огибать земную поверхность;
- с уменьшением частоты радиоволны и с увеличением угла падения волны на ионосферу возрастает отражающая способность ионосферных слоев.

Спектр радиоволн расположен в диапазоне от 3 Гц до 30 ТГц и условно он поделен на участки по декадному принципу.

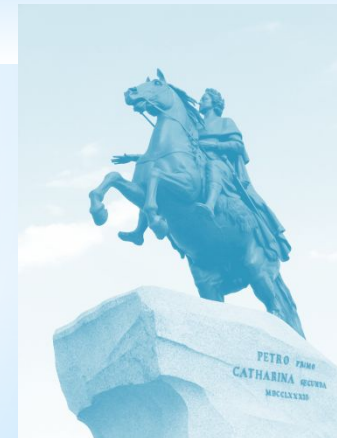
Радиоволны, Применяемые в авиационной радиосвязи и для РТОП, находятся в диапазоне частот 30 кГц – 300 ГГц (см. табл.).

Длина радиоволны λ и частота f связаны соотношением $\lambda f = 3 \times 10^8$ м/с, отсюда следует, что

$$\lambda_{(м)} = \frac{300}{f_{(ММГц)}}; \quad f_{(ММГц)} = \frac{300}{\lambda_{(м)}}$$

Из таблицы следует, что **радиоволны можно классифицировать**

- по частоте;
- по длине волны;
- по преимущественному способу распространения волны.





Наименование диапазона частот	Диапазон частот	Диапазон волн	Наименование диапазона волн	Преимущественный способ распространения радиоволн
Очень низкие частоты (ОНЧ)	3...30 кГц	100...10 км	мираметровые волны	Волноводное и поверхностное распространение
Низкие частоты (НЧ)	30...300 кГц	10...1 км	километровые волны	Поверхностное распространение
Средние частоты (СЧ)	0,3...3 МГц	1...0,1 км	гектометровые волны	Поверхностное распространение
Высокие частоты (ВЧ)	3...30 МГц	100...10 м	декаметровые волны	Пространственное распространение
Очень высокие частоты (ОВЧ)	30...300 МГц	10...1 м	метровые волны	На дальность прямой видимости
Ультравысокие частоты (УВЧ)	0,3...3 ГГц	10...1 дм	дециметровые волны	На дальность прямой видимости
Сверхвысокие частоты (СВЧ)	3...30 ГГц	10...1 см	сантиметровые волны	На дальность прямой видимости
Крайне высокие частоты (КВЧ)	30...300 ГГц	10...1 мм	миллиметровые волны	На дальность прямой видимости

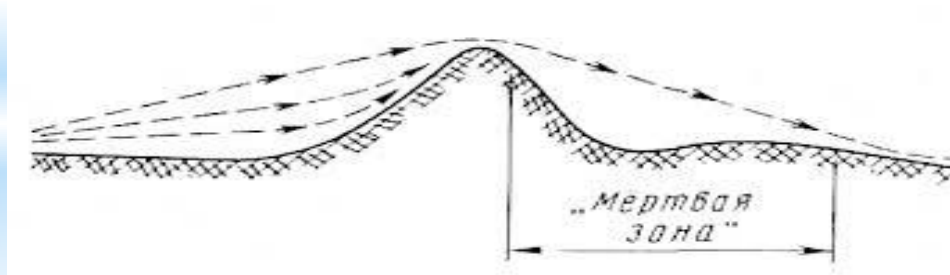
2. Особенности распространения радиоволн различных диапазонов

Несмотря на то что весь диапазон радиоволн разбит на области, обозначенные границы между ними являются условными. Участки следуют друг за другом непрерывно, переходя один в другой, но каждый из них обладает преимущественными особенностями.

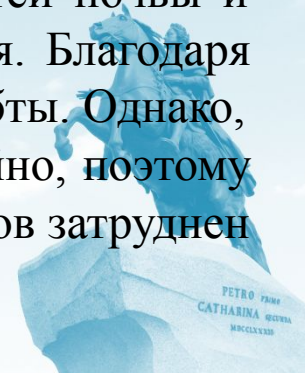
Особенности распространения радиоволн ОНЧ и НЧ диапазонов.


Радиоволны диапазонов НЧ и ОНЧ распространяются преимущественно вдоль земной поверхности на расстояния в несколько тысяч километров.

Земля



Так как длины этих волн превышают размеры большей части неровностей почвы и препятствий, то при их распространении заметно проявляется дифракция. Благодаря дифракции волны огибают земную поверхность, холмы и даже горные хребты. Однако, обогнув высокое препятствие, волны далее распространяются прямолинейно, поэтому **возможно образование "мертвых зон"**, в пределах которых прием сигналов затруднен или невозможен.





Пространственные волны НЧ и ОНЧ диапазонов, отражаясь от ионосферы, могут достичь практически любой точки Земли.

Для радиоволн **ОНЧ-диапазона** наблюдается не только поверхностное и пространственное, но и **волноводное распространение** в сферическом волноводе «Земля – нижняя граница ионосферы».

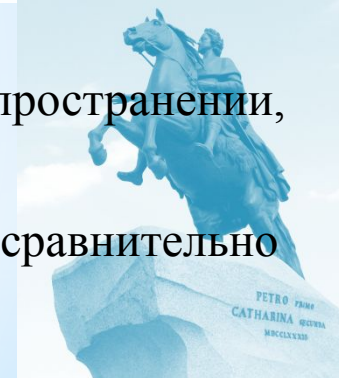
Если в место приема сигнала одновременно приходят поверхностные и пространственные волны, то происходит сложение волн – **интерференция**. Если фазы радиоволн взаимно противоположны и радиоволны мало различаются по уровню напряженности поля, то происходит их взаимное вычитание и напряженность результирующего поля падает до малых величин.

Явление ослабления уровня радиосигналов вследствие различных процессов при распространении волн называется **замиранием**.

Распространение радиоволн в место приема по разным путям называется **многолучевым**.

Замирания, вызванные интерференцией при многолучевом распространении, называются **интерференционными замираниями**.

В НЧ- и ОНЧ- диапазонах глубокие интерференционные замирания сравнительно редки.



Особенности распространения радиоволн СЧ диапазона

Радиоволны СЧ диапазона распространяются преимущественно вдоль земной поверхности на расстояния не более 1000...1500 км.

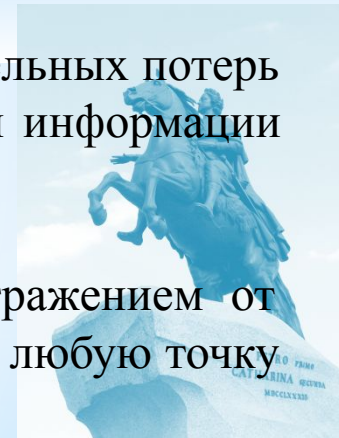
Пространственные волны СЧ диапазона в дневное время сильно поглощаются в слое *D* ионосферы, а ночью, когда слое *D* исчезает, поглощение меньше и пространственное распространение радиоволн СЧ диапазона возможно на расстояния до 2000...3000 км.

Однако ночью, в силу одинакового порядка значений напряженности поля поверхностной и пространственной волн, возможны глубокие интерференционные замирания радиосигнала СЧ диапазона.

Особенности распространения радиоволн ВЧ диапазона

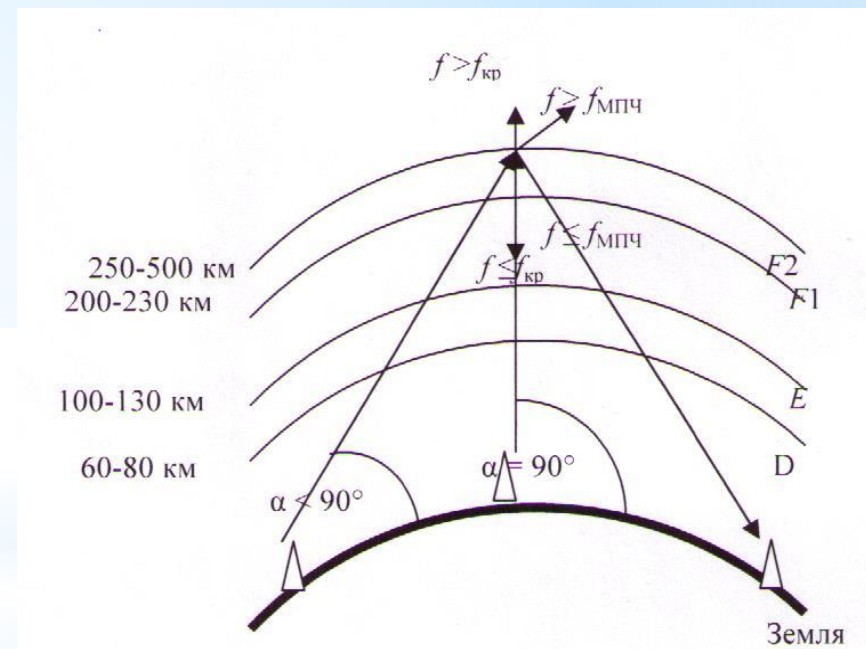
Поверхностные волны ВЧ диапазона сильно ослабляются из-за значительных потерь энергии радиоволн в почве, поэтому с их помощью дальность передачи информации невелика (не более 100 км).

Пространственное распространение радиоволн ВЧ диапазона с отражением от ионосферных неоднородностей позволяет обеспечить передачу сигнала в любую точку Земли.





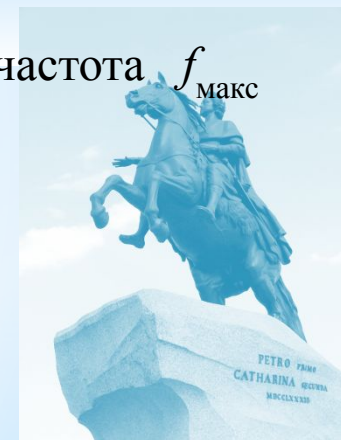
Радиоволны разной длины могут отражаться от разных слоев либо вообще не отражаться. Для количественной оценки этого явления введено понятие **критической частоты $f_{кр}$ радиосигнала**. Критическая частота – это максимальная частота вертикально излучаемого радиосигнала ($\alpha = 90^\circ$), который отражается от ионосферы и возвращается на Землю. **Для каждого ионосферного слоя существует своя критическая частота.**

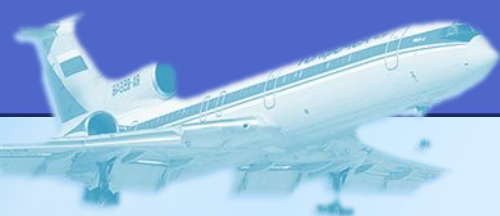


При уменьшении угла излучения α возрастает максимальная частота $f_{макс}$ отраженного радиосигнала:

$$f_{макс} = f_{кр} \sqrt{\frac{1,1}{0,1 + \sin^2 \alpha}},$$

называемая **максимальной применимой частотой (МПЧ)**.





При уменьшении частоты радиосигнала возрастает поглощение энергии радиоволны в ионосферных слоях и, соответственно, уменьшается энергия отраженной радиоволны.

Минимальная частота радиосигнала $f_{\text{мин}}$, которая не полностью поглощается в ионосфере, называется **наименьшей применимой частотой (НПЧ)**.

Таким образом:

- для каждой радиолинии определяются свои значения **МПЧ** и **НПЧ**, которые изменяются в зависимости от времени суток, сезона и года цикла солнечной активности.

- динамический диапазон рабочих частот радиолинии на каждый сеанс передачи информации определяется значениями МПЧ и НПЧ на интервал времени проведения этого сеанса передачи: $f_{\text{мин}} \dots f_{\text{макс}}$.

Ионосферные слои представляют собой не зеркальные, а шероховатые (неоднородные и неровные) поверхности, поэтому радиоволны отражаются от них в разных направлениях, т. е. имеет место **рассеянное (диффузное) отражение** радиоволны.

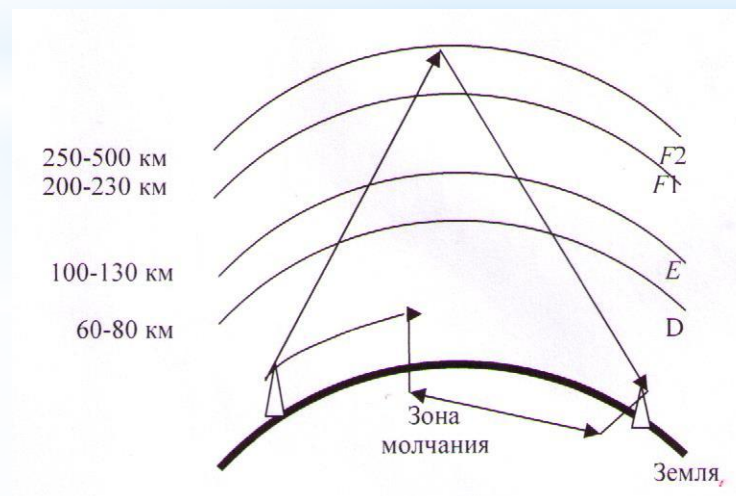
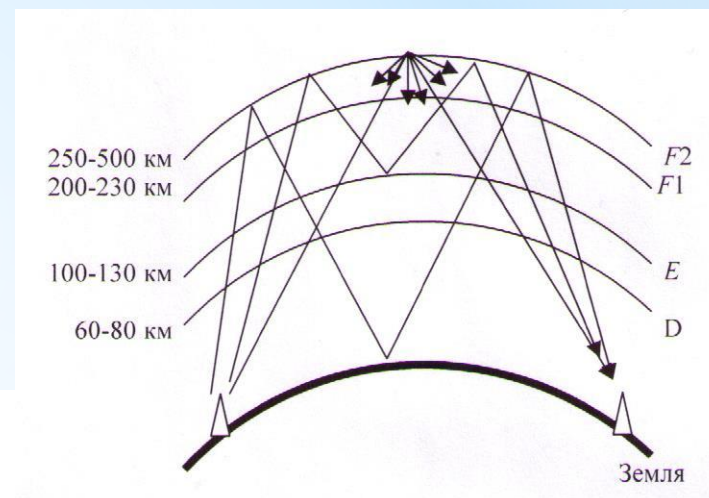


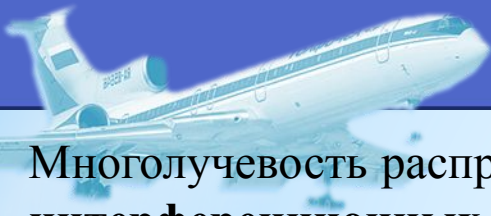
Радиоволны ВЧ диапазона могут распространяться с разным числом отражений от Земли, с отражением от разных ионосферных слоев, с неоднократным отражением от Земли и разных ионосферных слоев.

Такое распространение радиоволн называется **многомодовым**.

Из особенностей распространения поверхностных и пространственных радиоволн ВЧ диапазона следует, что между сравнительно небольшой зоной распространения поверхностной волны и местом прихода пространственной волны, образуется "**зона молчания**", т.е. зона, до которой не доходят поверхностные волны и которую «перескакивают» пространственные волны.

Из изложенного следует, что **распространение радиоволн ВЧ диапазона носит многолучевой характер,**





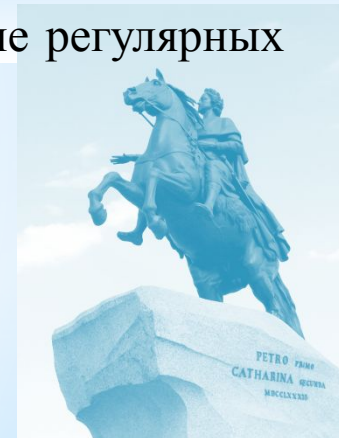
Многолучевость распространения радиоволн ВЧ диапазона приводит к возникновению **интерференционных замираний** радиосигнала в месте приема.

Существенное влияние на условия распространения радиоволн ВЧ диапазона оказывают **ионосферные возмущения**, вызванные процессами на Солнце.

Наиболее сильно ионосферные возмущения влияют на распространение радиоволн ВЧ диапазона в высоких широтах (выше 60° сгш). Они приводят к резкому повышению степени ионизации отдельных ионосферных слоев (авроральные возмущения) и ионосферы в целом (возмущения типа «полярная шапка»), экранируя верхние слои ионосферы и поглощая и рассеивая энергию радиоволн ВЧ диапазона.

Особенности распространения радиоволн ОВЧ и более высокочастотных диапазонов

Общим для радиоволн ОВЧ и более высокочастотных диапазонов является сильное поглощение поверхностных волн в земле, слабая дифракция и отсутствие регулярных отражений радиоволн от ионосферы и тропосферных неоднородностей.



Радиоволны ОВЧ и более высокочастотных диапазонов распространяются подобно свету прямолинейно и требуют обеспечения геометрической видимости между пунктами передачи радиосигналов.

Дальность прямой видимости r определяется по формуле

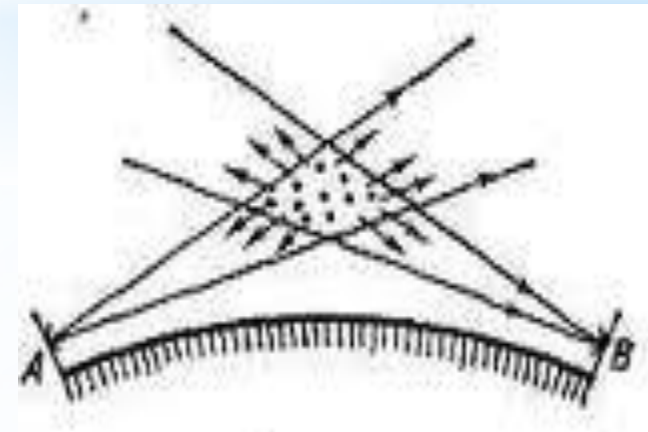
$$r_{(км)} = \sqrt{2R_{з(км)}} (\sqrt{h_{1(км)}} + \sqrt{h_{2(км)}}) = 3,57(\sqrt{h_{1(м)}} + \sqrt{h_{2(м)}}),$$


где h_1 и h_2 – высоты поднятия передающей и приемной антенн.

В нижней части ОВЧ диапазона возможна передача сигналов поверхностной волной за пределы прямой видимости

$$r_{(км)} = 4,12(\sqrt{h_{1(м)}} + \sqrt{h_{2(м)}}).$$

Пространственные волны ОВЧ и более высокочастотных диапазонов, как правило, «пронзают» ионосферу и уходят в заатмосферное (космическое) пространство практически без изменения траектории. Однако **радиоволны этих диапазонов могут рассеиваться тропосферными неоднородностями**. В этом случае дальность передачи сигналов может достигать нескольких сотен километров.



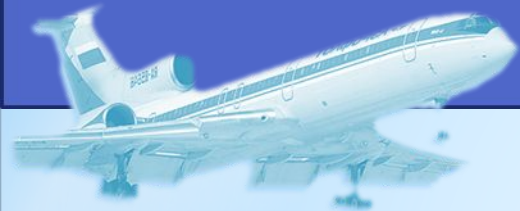


Неоднородности могут существовать и на больших высотах, в ионосфере, где они проявляются в неравномерности концентрации свободных электронов, и в них тоже происходит рассеяние радиоволн ОВЧ диапазона. В этом случае ионосферное рассеяние позволяет обеспечить передачу радиоволн ОВЧ диапазона на расстояния 1...2 тыс. км.

В атмосфере и космическом пространстве могут быть искусственные неоднородности (воздушные суда, аэростаты, искусственные спутники Земли), посредством которых возможна передача радиоволн ОВЧ и более высокочастотных диапазонов на территорию Земли, видимую с высоты размещения этих неоднородностей.

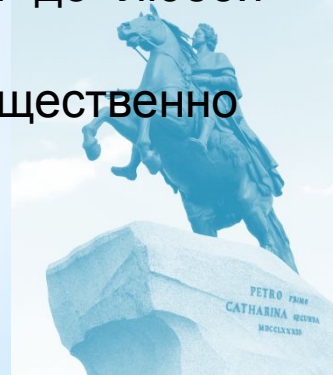
Поверхностные волны ОВЧ и более высокочастотных диапазонов могут отражаться от земной поверхности и местных предметов, что приводит к многолучевости и, как следствие, – к интерференционным замираниям радиосигнала.





Выводы

1. Для подавляющего большинства радиосигналов РЭС ГА **средами распространения сигнала являются атмосфера и космическое пространство.**
2. **Радиосигналы РЭС ГА могут распространяться:**
 - вдоль поверхности земли (**поверхностные волны**);
 - с отражением от неоднородностей в среде (**пространственные волны**);
 - в свободном пространстве;
 - через различные среды.
3. **Радиоволны по преимущественному способу распространения можно разделить на три группы:**
 - радиоволны ВЧ диапазона, преимущественно распространяющиеся пространственной волной до любой точки земного шара;
 - радиоволны ОНЧ, НЧ и СЧ диапазонов, преимущественно распространяющиеся поверхностной волной от сотен...тысяч км до любой точки земного шара;
 - радиоволны ОВЧ, УВЧ, СВЧ и КВЧ диапазонов, преимущественно распространяющиеся на дальность прямой видимости.



4. Радиоволны способны отражаться от различных неоднородностей атмосферы и космического пространства:

- от земной поверхности и местных предметов (дом, лес);
- от тропосферных и ионосферных неоднородностей;
- от естественных (Луна, планеты) и искусственных (аэростаты, воздушные суда, спутники) неоднородностей.

5. В процессе распространения энергия радиоволн всех диапазонов в большей или меньшей степени поглощается и рассеивается средой.

6. Распространение радиоволн всех диапазонов в большей или меньшей степени носит **многолучевой характер**, приводящий к замираниям сигнала.

