Лекция 12

Дальнее тропосферное распространение УКВ

Тропосферой называют нижний слой атмосферы, расположенный непосредственно над поверхностью земли. Высота тропосферы в полярных широтах равна 8—10 км, в умеренных широтах—10—12 км, в тропиках—16—18 км. В тропосфере содержится почти вся масса воздуха.

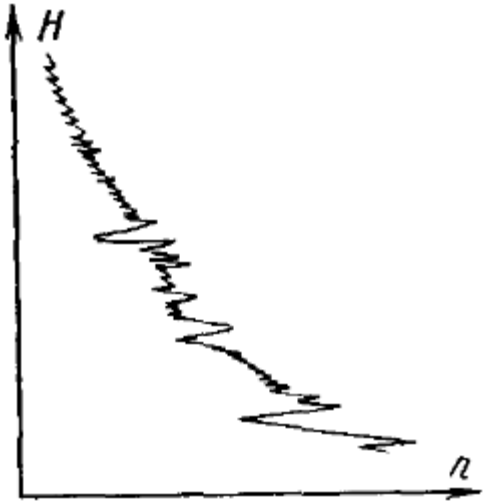
Дальнее тропосферное распространение ультракоротких волн (УКВ) (λ=10…0,01 м) — это распространение радиоволн путем переизлучения в неоднородной тропосфере. Дальнее тропосферное распространение УКВ (ДТР УКВ) наблюдается на расстояниях примерно до 1200 км, не считая расстояний до горизонта от передающей и приемной антенн. Этот вид распространения радиоволн используется в тропосферных радиорелейных линиях связи. Для ДТР иногда возникают необычно благоприятные условия, поэтому оно может быть причиной возникновения помех от далеко расположенных передающих станций.

Механизм ДТР

В тропосфере всегда имеются отдельные объемы воздуха, коэффициент преломления которых отличается от коэффициента преломления окружающей среды на весьма малую величину $\Delta n=5\cdot10^{-7}\ldots5\cdot10^{-5}$. Эти объемы воздуха представляют собою ***неоднородности*** различной величины. Под действием сил тяжести некоторые неоднородности принимают слоистую форму. Слои имеют толщину от десятых долей метра до нескольких сотен метров, а их протяженность в горизонтальной плоскости лежит в пределах от десятков метров до десятков километров (пример: облака).

Под действием излучения, создаваемого передающей антенной, каждая неоднородность превращается во вторичный излучатель, вызывая рассеяние или отражение радиоволн далеко за горизонт. Рассеяние радиоволн обязано преимущественно мелкомасштабным неоднородностям, отражение — слоистым неоднородностям больших размеров.

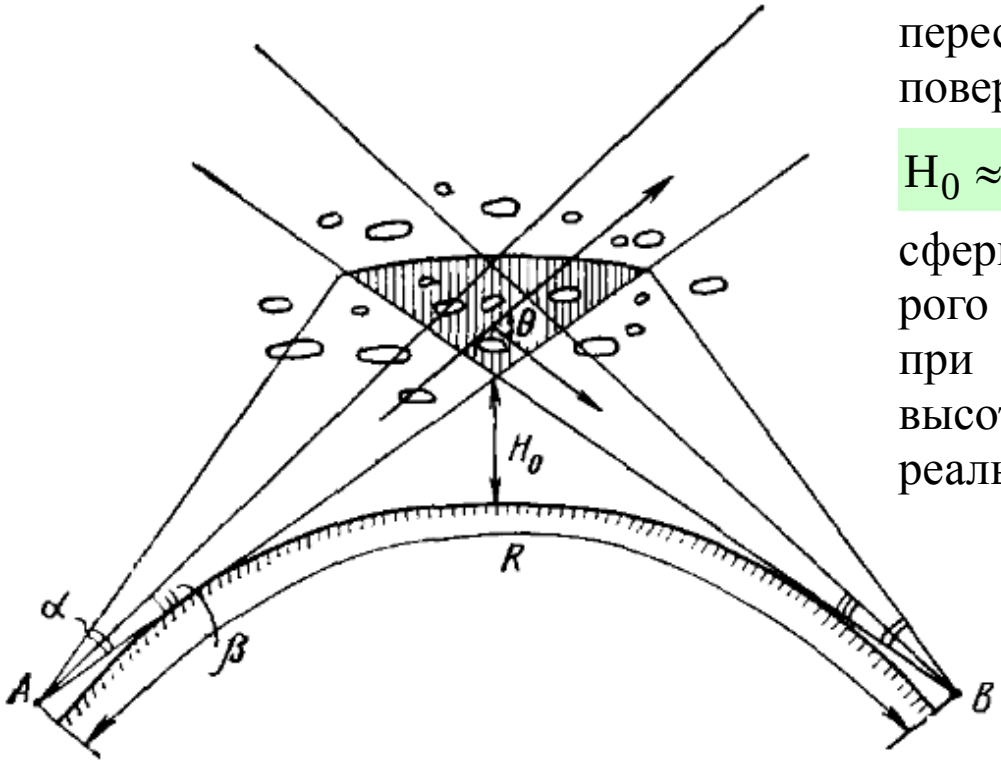
Коэффициент преломления воздуха n в среднем уменьшается с высотой. Небольшие флуктуации Δn на кривой связаны с наличием мелкомасштабных неоднородностей, а сравнительно большие – с наличием слоев.



Наиболее велико переизлученне от неоднородностей с толщиной $l\approx\lambda/\theta$, где θ – угол «рассеяния». Волна отражается от нижней и верхней поверхностей такой неоднородности в фазе. Угол θ в реальных условиях составляет несколько градусов, поэтому интенсивно переизлучают только те неоднородности, толщина которых $l>>\lambda$.

При ДТР в область тени переизлучается очень малая доля излученной энергии. Значительная ее часть проникает через толщу атмосферы, теряясь в мировом пространстве.

Чем больше Δn и чем меньше θ, тем выше интенсивность переизлучения и выше уровень сигнала в месте приема. В переизлучеиин радиоволн играют роль неоднородности тропосферы, расположенные выше плоскостей, проведенных из точек передачи и приема касательно к земной поверхности. С другой стороны, поле, перензлученное каждой неоднородностью, тем меньше, чем выше расположена неоднородность или чем дальше она расположена от трассы АВ, поскольку при этом увеличивается угол θ. Поэтому ***в переизлучении радиоволн принимает участие некоторый объем тропосферы***, ограниченный со всех сторон, по форме напоминающий призму. Длина такого «эффективного» тропосферного объема вдоль трассы составляет примерно R/2 (где R — длина трассы), а высота и ширина — несколько километров.



Высота нижней точки объема (точка пересечения касательных к горизонту) над поверхностью земли:

$$H_0 \approx R^2/(8a_э)$$

$a_э$ – эквивалентный радиус Земли (радиус воображаемой сферической поверхности Земли, для которого траектория радиоволны прямолинейна при условии, что она проходит на той же высоте, что и криволинейный луч над реальной поверхностью), $a_э \approx 8500$ км.

Угловая ширина эффективного объема переизлучения, отсчитываемая по точкам, где мощность сигнала падает вдвое, в вертикальной плоскости (угол α) ≈1,7°, а в горизонтальной - ≈1^0.

Мощность сигнала на входе приемника при ДТР непрерывно изменяется во времени:

$$P_{пр} = P_0 V^2(T)$$

P_0 – мощность сигнала на входе приемника при распространении сигнала в свободном пространстве;
V – множитель ослабления.

Множитель ослабления при ДТР

Длина трассы

Рельеф местности

Высоты поднятия антенн

Длина волны

Неоднородность тропосферы

Трудность расчета уровня сигнала на входе приемника заключается в определении величины множителя ослабления

Отсутствие единой методики расчета множителя ослабления

Большую часть инженерных расчетов, связанных с ДТР, производят **полуэмпирически**

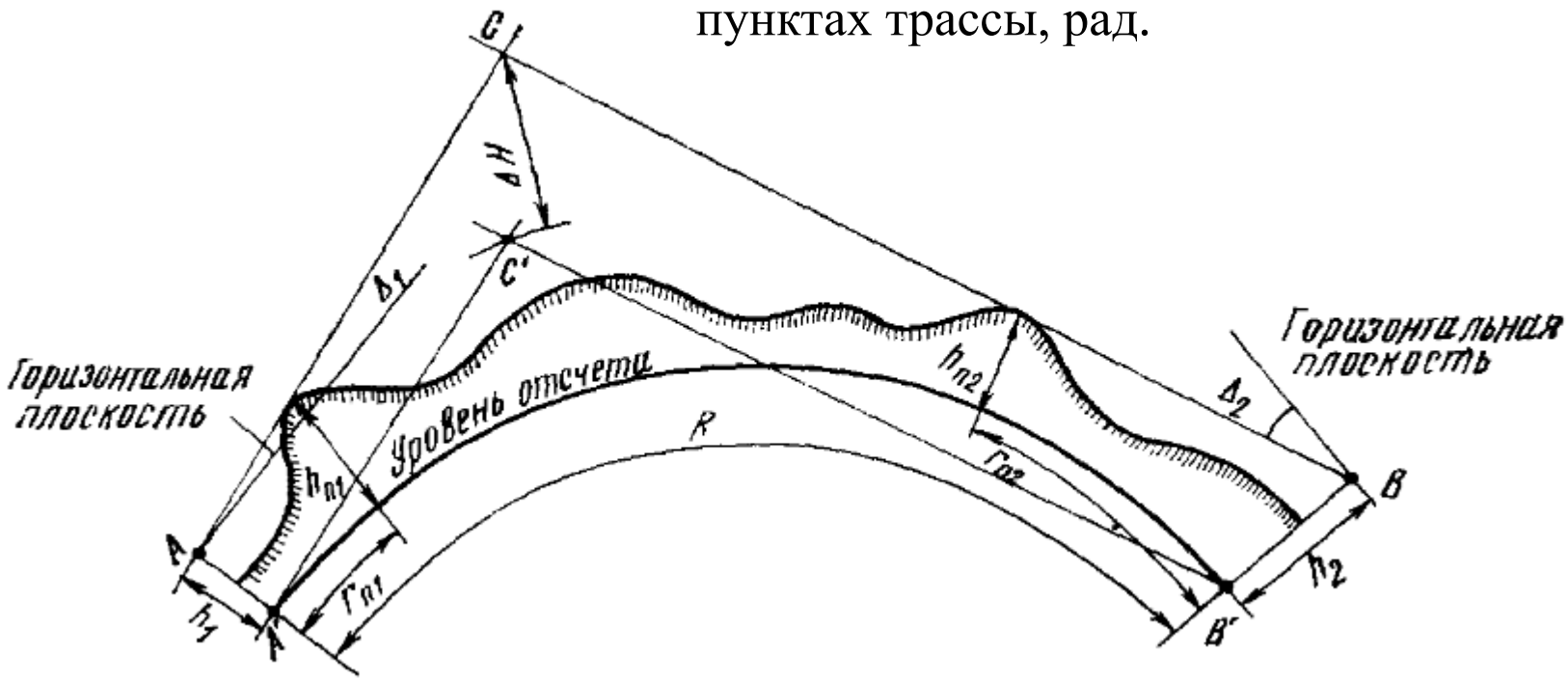
Эквивалентное расстояние

В инженерных расчетах, связанных с ДТР, вместо истинного расстояния между корреспондирующими пунктами R берется **эквивалентное расстояние $\mathbf{R_э}$**. Это позволяет учесть влияние рельефа местности на уровень сигнала.

Большинство трасс РРЛ, использующих ДТР, находятся на высоте $\Delta H \approx 0{,}15 \ldots 0{,}25$ км над уровнем моря. Для таких трасс $R_э$ определяется только углом рассеяния:

$$R_э = a_э \theta = R + a_э(\Delta_1 + \Delta_2)$$

R – географическая протяженность трассы, км;
$\Delta_{1,2}$ – углы закрытия (открытия) в конечных пунктах трассы, рад.



Горизонтальная плоскость – это плоскость, проходящая через центр антенны перпендикулярно радиусу Земли.

Значения углов Δ_1 и Δ_2 берутся со знаком «плюс», если вершина препятствия находится выше горизонтальной плоскости (угол закрытия), и со знаком «минус», если препятствие находится ниже этой плоскости (угол открытия). Углы Δ_1 и Δ_2 (рад) определяются из профилей конечных участков трассы, построенных для $a_э$ = 8500 км, по формулам:

$$\Delta_1 = \frac{h_{п1} - h_1}{r_{п1}} - 5{,}9 \cdot 10^{-5} r_{п1}$$

$$\Delta_2 = \frac{h_{п2} - h_2}{r_{п2}} - 5{,}9 \cdot 10^{-5} r_{п2}$$

$h_{1,2}$, $h_{п1,2}$ – высоты соответственно центра антенны и препятствия, которого касается линия АС или ВС, над уровнем моря;

$r_{п1,2}$ – расстояние от антенны до наивысшей точки препятствия.

В частном случае, когда $\Delta_1=\Delta_2=0$, имеем $R_э=R$. При увеличении углов закрытия $R_э$ возрастает и становится больше R. Если антенны установлены на господствующих возвышенностях так, что углы закрытия отрицательны, то $R_э<R$.

Замирания сигнала

Уровень сигнала при ДТР подвержен медленным изменениям, на которые накладываются быстрые флуктуации. Такой характер сигнала привел к необходимости условного деления замираний сигнала на ***быстрые*** и ***медленные***.

Замирания сигнала

Быстрые

изменения мгновенных значений уровня сигнала в пределах некоторого малого периода времени ΔT

Медленные

изменения величин $V_м$ относительно медианного значения $V_{м\,м}$, определенного за длительный срок (месяц, год)

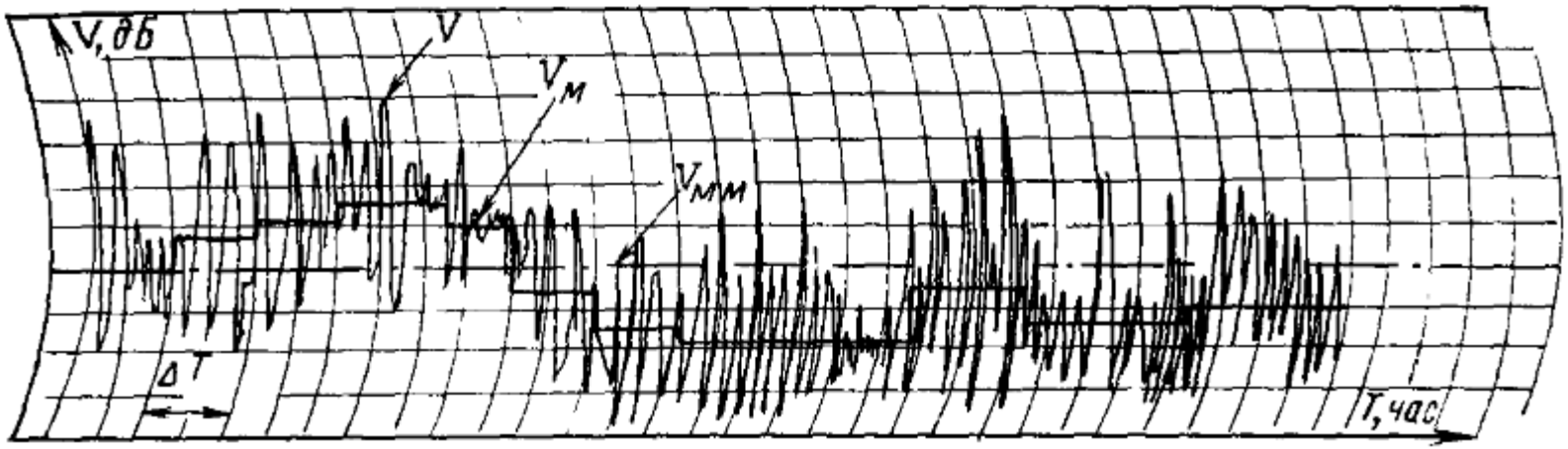
$$\Delta V_б = 20\lg\left(V/V_м\right)$$

$$\Delta V_м = 20\lg\left(V_м/V_{м\,м}\right)$$

V, $V_м$ – мгновенное и медианное значения множителя ослабления за период времени ΔT.

Длительность периода ΔT выбирается большей квазипериода мгновенных изменений сигнала, на практике ΔT=1…5 мин, но иногда 15 – 60 мин.

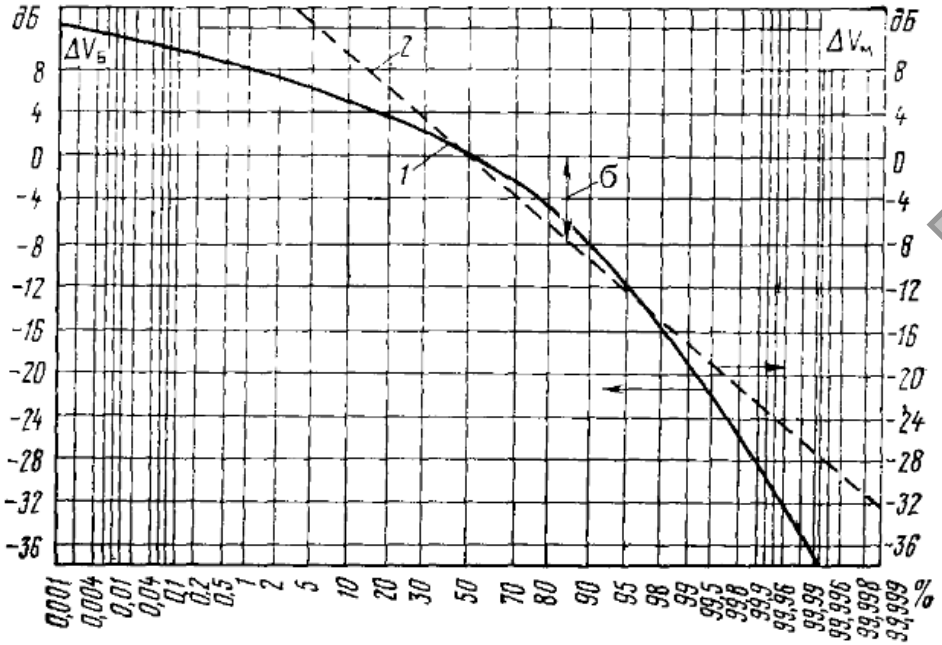
Медленные замирания можно заметить за период времени, больший 2 – 4 ч (радиус автокорреляции).



Характер замираний уровня сигнала при ДТР

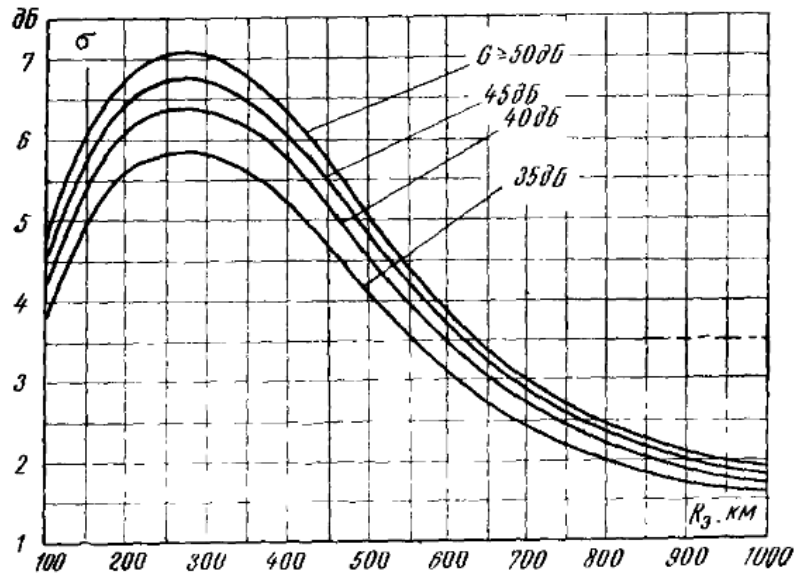
Быстрые замирания обусловлены интерференцией множества волн, переизлученных неоднородностями тропосферы, которые движутся и одновременно меняют свои размеры и интенсивность. Для инженерных расчетов статистическое распределение глубины быстрых замираний аппроксимируют **законом Рэлея**.

Медленные замирания сигнала вызываются изменением условий рефракции и медленным изменением параметров неоднородностей (интенсивности, размеров). Медленные замирания сигнала наблюдаются обычно при прохождении теплых и холодных фронтов воздуха. Глубина медленных замираний в течение ***зимнего месяца*** подчиняется **логарифмически-нормальному закону.** График логарифмически-нормального закона представляет собой прямую линию, наклон которой по отношению к оси абсцисс определяется стандартным отклонением σ. Отсчет σ производится в децибелах между медианным уровнем (50%) и уровнем, соответствующим 16 (или 84)% времени. σ зависит от эквивалентной длины трассы $R_э$ и коэффициента усиления используемых антенн и практически не зависит от длины волны.



Законы распределения глубины быстрых замираний по Рэлею (кривая 1, левая шкала) и медленных замираний по логарифмически-нормальному закону (кривая 2, правая шкала)

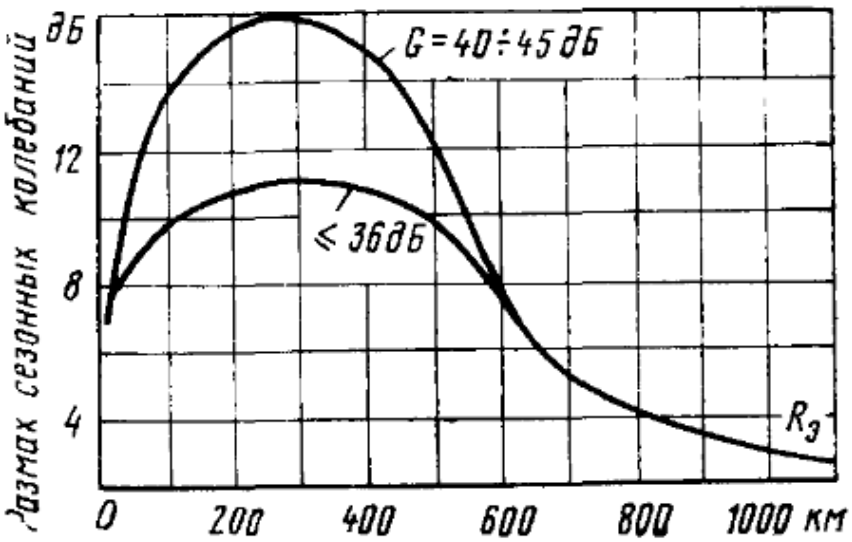
В ***летние месяцы*** закон распределения глубин медленных замираний заметно отличается от логарифмически-нормального особенно в области высоких уровней сигнала. Поэтому его ***определяют по экспериментальным данным***, однако такой подход требует осторожности, т.к. для одинаковых условий приема разброс значений $\Delta V_м(T)$ за различные периоды наблюдений достигает 10—15 дБ.



Зависимость стандартного отклонения σ для сухопутных трасс и зимнего месяца от эквивалентного расстояния

Суточный ход уровня сигнала на трассах ДТР отмечается, как правило, в ясную, безветренную погоду, особенно летом. В пасмурные дни при наличии ветра, дождя или снега изменения уровня сигнала в пределах суток незаметны. Максимум сигнала наблюдается ночью и утром, минимум — в дневные часы. Это объясняется тем, что ночью и утром увеличивается рефракция и возникают слоистые образования в тропосфере. На сухопутных трассах длиной порядка 100—500 км изменение усредненной за каждый час медианы уровня в течение суток составляет примерно 4 дБ зимой и 10 дБ летом. На более протяженных трассах размах суточных колебаний часовой медианы составляет **2—4 дБ** и почти не зависит от времени года. На морских и приморских трассах суточные колебания обычно выше. В отдельные сутки размах суточного хода может достигать **40—80 дБ**.

Сезонные колебания уровня сигнала — это колебания месячной медианы уровня сигнала в течение года. Размах сезонных колебаний зависит от многих факторов: климата, коэффициента усиления антенн, длины трассы и др. На трассах длиной 100—700 км при слабонаправленных антеннах размах сезонных колебаний месячной медианы лежит в пределах 5— 10 дБ; для антенн с коэффициентом усиления 40—45 дБ размах — около 15 дБ. На расстоянии 1000 км такого рода изменение составляет несколько дБ.

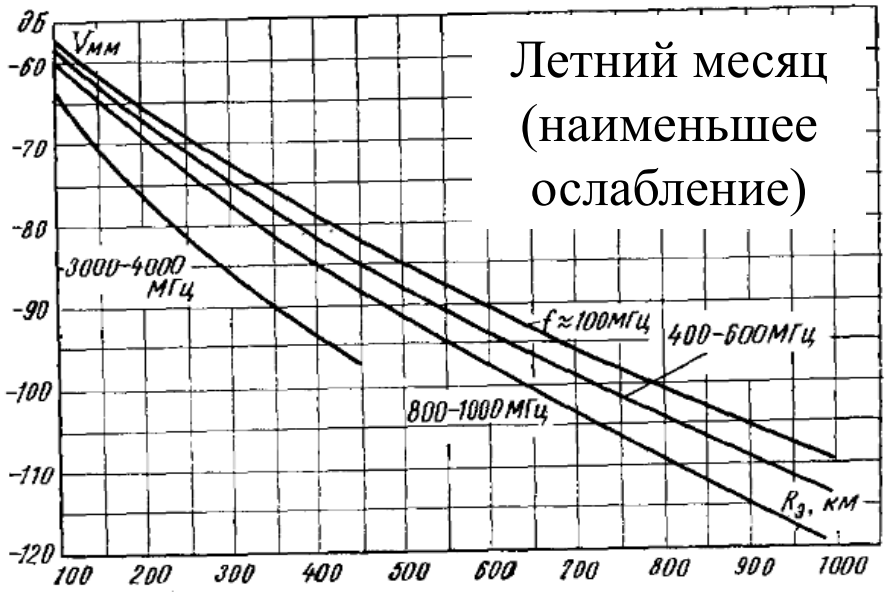


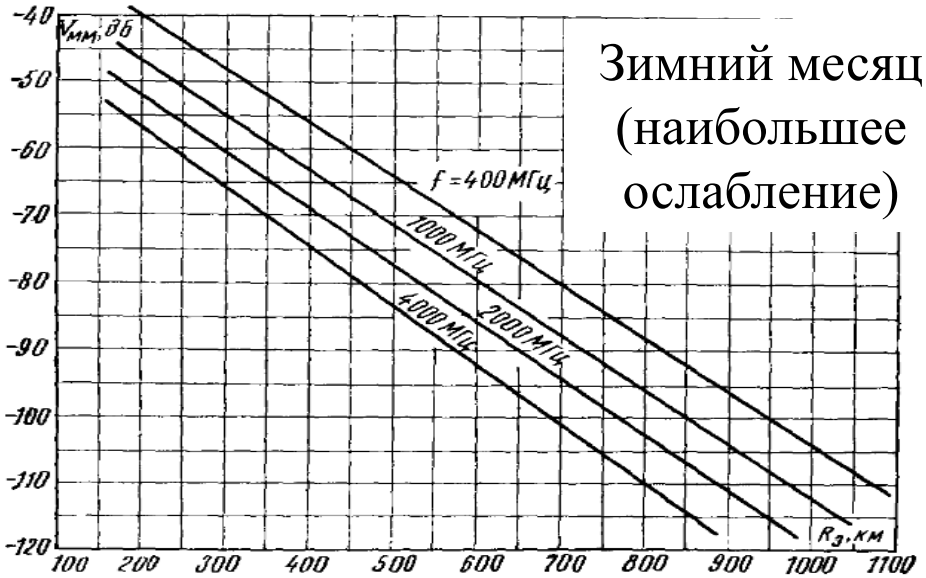
Средний уровень сигнала при ДТР

Средний уровень сигнала определяется медианным значением множителя ослабления $V_{мм}$ за наихудший (зимний) месяц.

Физическая причина уменьшения множителя ослабления при увеличении длины трассы объясняется увеличением угла рассеяния, т. е. уменьшением коэффициента рассеяния или отражения, а также тем, что объем переизлучения смещается вверх, в область тропосферы, где интенсивность неоднородностей слабее.

Зависимости $V_{мм}(R_э, f)$ для сухопутных трасс при использовании слабонаправленных антенн (ШГЛ ДН больше или равна 2^0 по уровню 3 дБ)





Потери усиления антенн

При использовании на трассе ДТР антенн с ШГЛ ДН менее 2° реальный коэффициент усиления антенн оказывается меньше, чем в условиях свободного пространства. Этот эффект называют **потерями усиления антенн**.

Мощность сигнала пропорциональна переизлучаюшему объему. При антеннах с широким главным лепестком используется весь «эффективный» объем тропосферы. Применение остронаправленных антенн приводит к ограничению «эффективного» объема (определяемого теперь пересечением ДН антенн) и, соответственно к потерям в уровне сигнала. Такие потери, выраженные в децибелах, равны: $\Delta G = (G_1 + G_2)_{ДТР} - (G_1 + G_2)$

$(G_1+G_2)_{ДТР}$, (G_1+G_2) – суммы коэффициентов усиления антенн при ДТР и при использовании антенн в свободном пространстве.

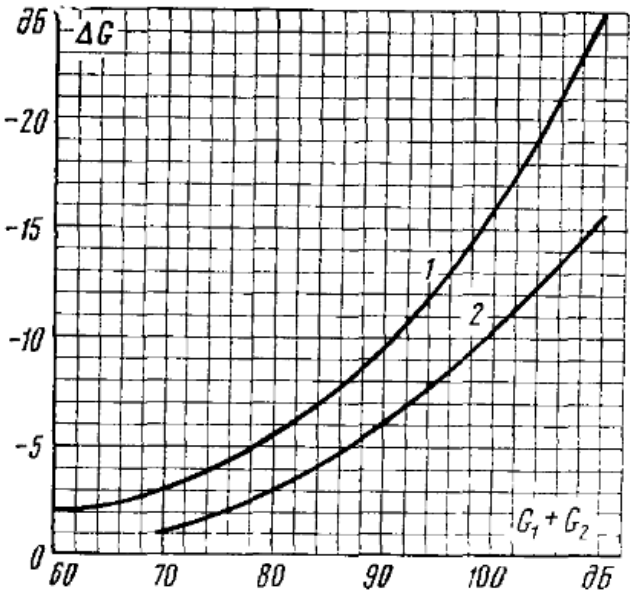


График 1 справедлив, если различие между коэффициентами усиления передающей и приемной антенн – менее 6 дБ. Если на трассе используются слабонаправленная и остронаправленная антенны, то потери усиления обеих антенн в дБ будут равны примерно 2/3 суммы потерь двух остронаправленных антенн.

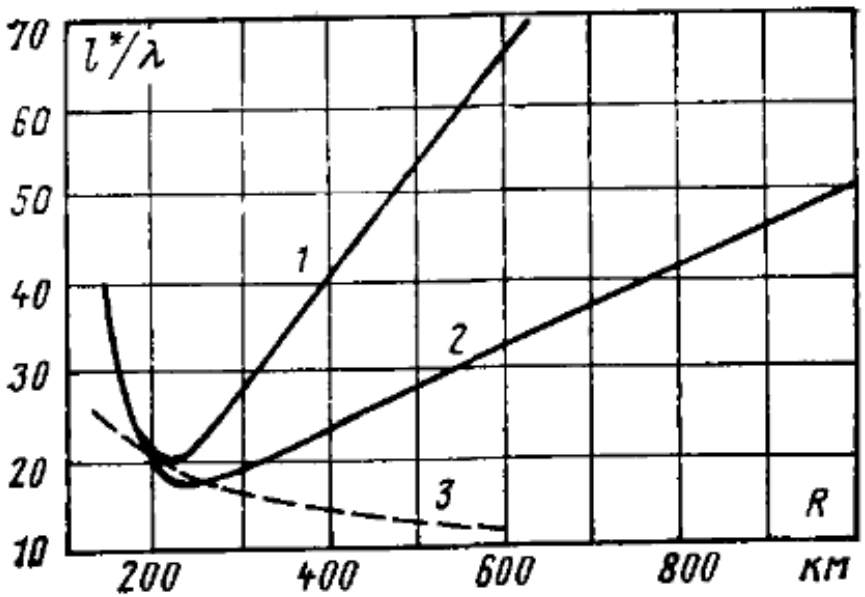
Корреляционные характеристики сигналов

Радиус корреляции – это такое разнесение сигналов (каналов приема), при котором значение коэффициента корреляции между огибающими сигналов достигает значения 0,37.

Методы уменьшения корреляции сигналов

Пространственное разнесение	**Частотное разнесение**	**Угловое разнесение**
Одновременный прием на две или более антенн, разнесенных в горизонтальной и вертикальной плоскостях	Одновременная передача (прием) информации на двух или более частотах	Прием на антенну, имеющую два или более облучателей, формирующих ДН таким образом, чтобы они были сдвинуты относительно друг друга на некоторый угол

Радиус пространственной корреляции

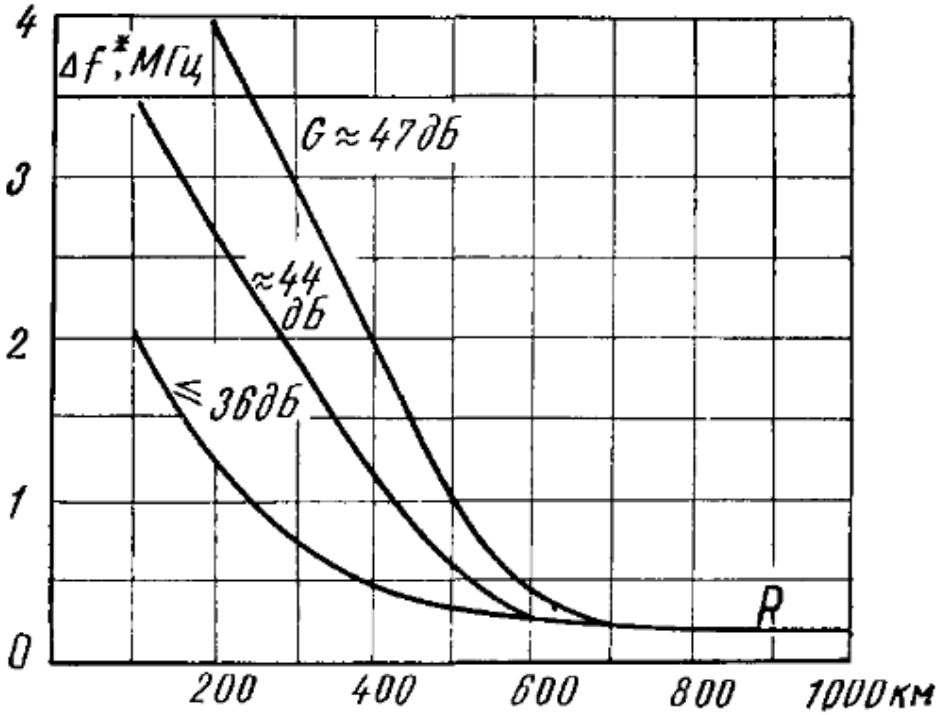


Зависимость радиуса пространственной корреляции от длины трассы: 1, 2 — при разнесении по горизонтали соответственно остронаправленных антенн (G≈44 дБ) и слабонаправленных антенн (G≤36 дБ); 3 — при разнесении антенн по вертикали (G = 36…48 дБ)

Значения радиуса даны в виде отношения l/λ, где l – расстояние между антеннами.

Для статистической независимости сигналов остронаправленные антенны (коэффициент усиления G=40…50 дБ) целесообразно разносить по горизонтали на расстояние порядка 100— 150λ. Радиус вертикальной корреляции оказывается меньше, чем по горизонтали, практически не зависит от коэффициента усиления антенн и слабо зависит от длины трассы. Статистическая зависимость между принимаемыми сигналами будет достаточно мала, если установить разнесение антенн по высоте порядка 50λ.

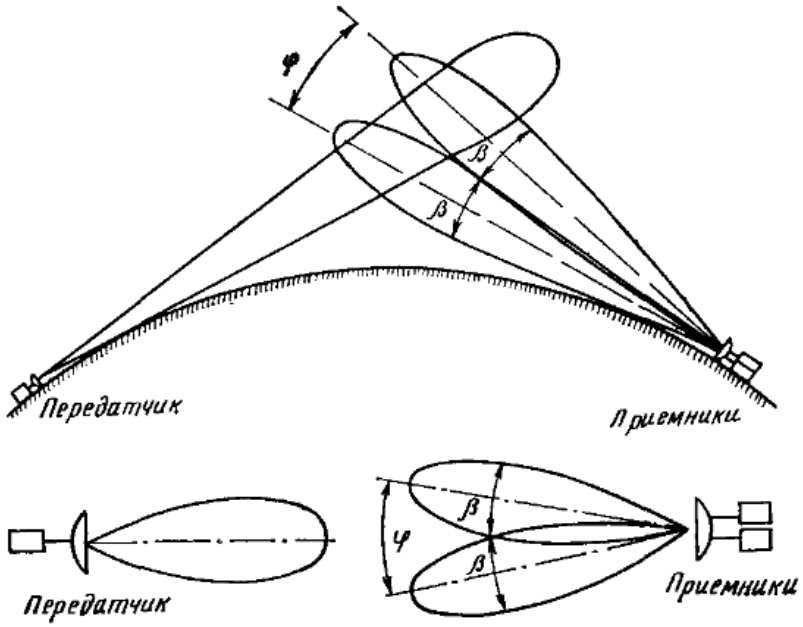
Радиус частотной корреляции



Зависимость радиуса частотной корреляции от расстояния, G – коэффициенты усиления антенн

Радиус частотной корреляции Δf*, определяется в большой степени разностью хода волн, пришедших от нижней и верхней «точек» объема переизлучения, иначе говоря, определяется высотой объема. При применении остронаправленных антенн и при переходе к более коротким трассам величина Δf* возрастает вследствие уменьшения высоты переизлучающего объема. Если на одном, передающем или приемном, конце трассы установлена остронаправленная антенна (G≈40 дБ), то установка на другом конце такой же антенны несущественно изменяет высоту переизлучающего объема и соответственно значение Δf*.

Угловое разнесение сигналов



Разнос главных лепестков может быть сделан либо в горизонтальной, либо в вертикальной плоскости. Угловое разнесение, в принципе, аналогично пространственному. По сравнению с пространственным разнесением в данном случае требуется только одно антенное зеркало, но вследствие выноса облучателей из фокуса средние уровни разнесенных сигналов снижаются.

Угловое разнесение целесообразно в основном для антенн с узким главным лепестком ДН, поскольку для них уровень сигнала в ветвях разноса падает незначительно. При угловом разнесении в вертикальной плоскости радиус корреляции оказывается меньше, чем при разнесении в горизонтальной плоскости. На трассах длиной несколько сотен метров при использовании антенн с ШГЛ $\beta \approx 0{,}3 \ldots 1^0$ оптимальный угол разнесения φ должен быть примерно равен β. При этом условии разнесенные сигналы оказываются практически некоррелированными, а уровень полезного сигнала в каждой ветви разноса уменьшается на 1—4 дБ (в зависимости от плоскости разноса).