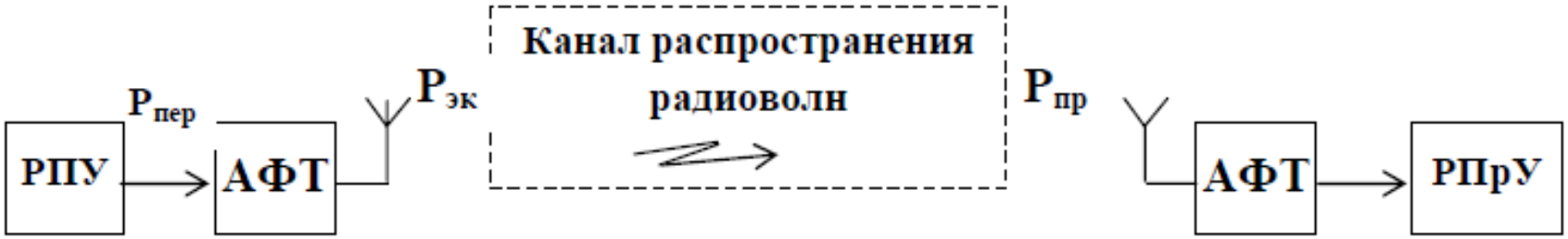
Лекция 4

Основные энергетические характеристики радиолиний



1. Эквивалентная изотропно-излучаемая мощность (ЭИИМ) (англ. Effective Isotropically Radiated Power - EIRP) — мощность, с которой должна излучать ненаправленная антенна вместо направленной, чтобы в направлении максимума излучения ненаправленной антенны уровень сигнала был такой же, как при приёме от направленной антенны.

$$P_{эк} = P_{пер}\eta_{пер}G_{пер}$$

$P_{пер}$ – мощность на выходе передатчика, Вт;
$\eta_{пер}$ – коэффициент передачи фидерного тракта;
$G_{пер}$ – коэффициент усиления передающей антенны.

2. Плотность потока мощности на расстоянии d:

$$W = \frac{P_{эк}}{4\pi d^2} = \frac{P_{пер}\eta_{пер}G_{пер}}{4\pi d^2}$$

3. Добротность приемной станции: $Q = G_{пр}/T$

$G_{пр}$ – коэффициент усиления антенны на частоте приема;

T – шумовая температура станции, К.

4. Эффективная площадь апертуры приемной антенны: $S_{эф} = G_{пр}\lambda^2/(4\pi)$

λ – длина волны принимаемого сигнала.

5. Мощность сигнала на входе приемника: $P_{пр} = W\eta_{пр}S_{эф}$

$\eta_{пр}$ – коэффициент передачи приемного фидерного тракта.

$$P_{пр} = W\eta_{пр}S_{эф} = \frac{P_{эк}\eta_{пр}S_{эф}}{4\pi d^2} = \frac{P_{пер}\eta_{пер}G_{пер}\eta_{пр}S_{эф}}{4\pi d^2} = \frac{P_{пер}\eta_{пер}G_{пер}\eta_{пр}G_{пр}\lambda^2}{4\pi d^2 \cdot 4\pi} =$$

$$= \frac{P_{пер}\eta_{пер}G_{пер}\eta_{пр}G_{пр}}{(4\pi d/\lambda)^2} = \frac{P_{пер}\eta_{пер}G_{пер}\eta_{пр}G_{пр}}{L_{св}}$$

6. Множитель ослабления радиоволн в свободном пространстве: $L_{св} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2$

$F_{св}[дБ] = -10\lg(L_{св})$

7. Мощность сигнала на входе приемника в логарифмической форме:

$P_{пр} = P_{пер} + \eta_{пер} + \eta_{пр} + G_{пер} + G_{пр} + F_{св}$

8. Полный множитель ослабления радиоволн: $L = L_{св}L_{доп}$, $F[дБ] = F_{св} + F_{доп}$

$L_{доп} = L_д \cdot L_р \cdot L_и \cdot L_{атм}$ или $F_{доп} = F_д + F_р + F_и + F_{атм}$

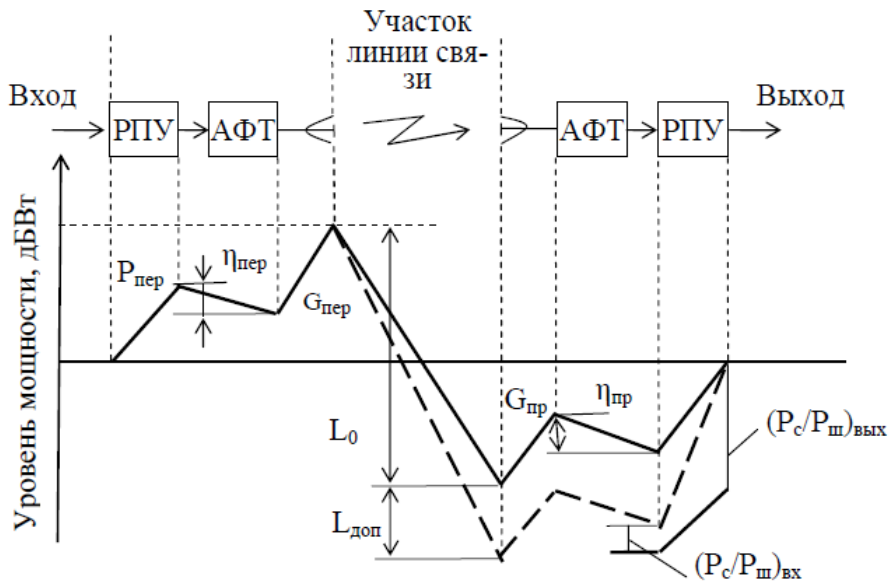
$L_д$, $L_р$, $L_и$, $L_{атм}$ – множители ослабления, обусловленные влиянием дифракции, рефракции, интерференции и атмосферы.

9. Требуемая мощность передатчика линии радиосвязи:

$$P_{пер} = \frac{P_{пр} L}{\eta_{пер} G_{пер} \eta_{пр} G_{пр}} = \frac{P_{пр} L_{св} L_{доп}}{\eta_{пер} G_{пер} \eta_{пр} G_{пр}} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \frac{P_{пр} L_{доп}}{\eta_{пер} G_{пер} \eta_{пр} G_{пр}}$$

10. Мощность передатчика линии радиосвязи при наличии шумов:

$$P_{пер} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \frac{P_{ш} L_{доп}}{\eta_{пер} G_{пер} \eta_{пр} G_{пр}} \left(\frac{P_c}{P_ш}\right)_{вх}$$



11. Суммарная мощность аддитивных тепловых шумов : $P_ш = k \cdot \Delta f_ш \cdot T_\Sigma$

k – постоянная Больцмана, $k=1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Вт/(Гц·град);

$\Delta f_ш$ – эквивалентная шумовая полоса приемника, Гц;

T_Σ – эквивалентная шумовая температура, приведенная ко входу станции, К.

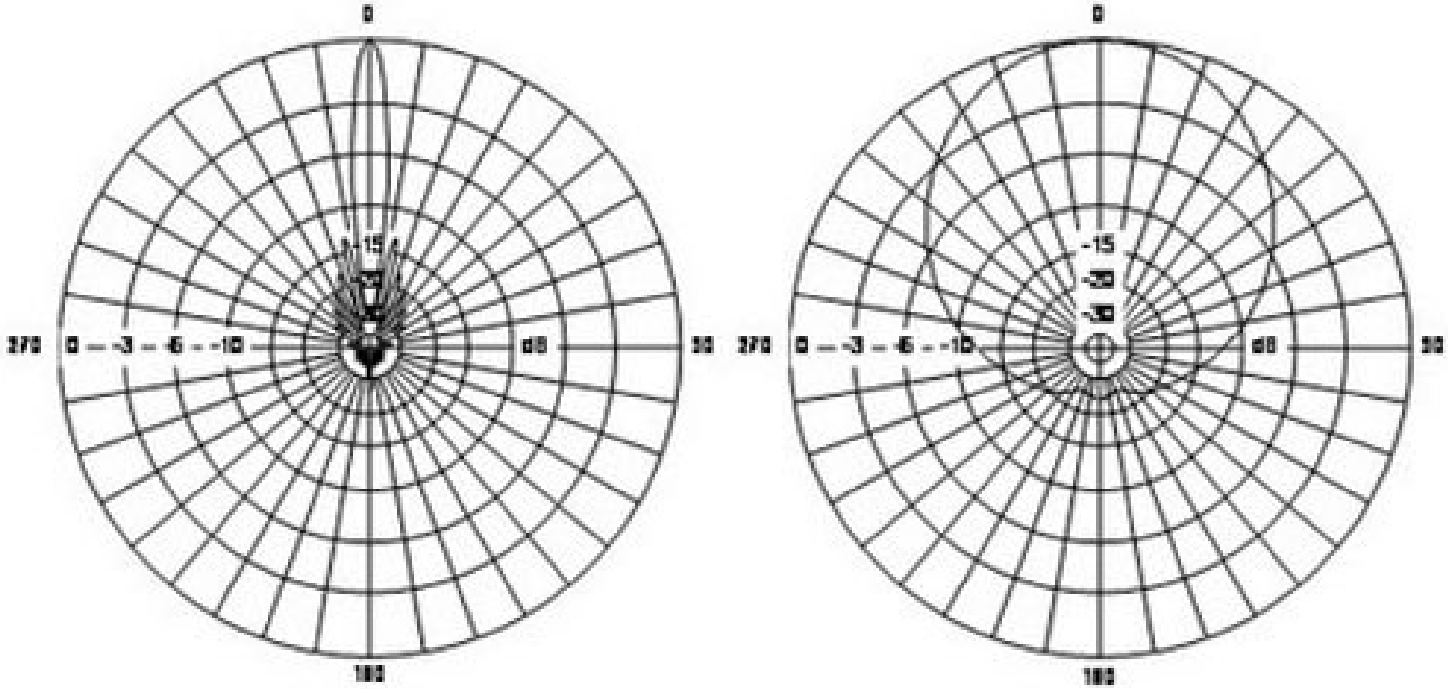
12. Мощность передатчика участка линии связи при наличии тепловых шумов:

$$P_{пер} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \frac{k \cdot \Delta f_ш \cdot T_\Sigma \cdot L_{доп}}{\eta_{пер} G_{пер} \eta_{пр} G_{пр}} \left(\frac{P_c}{P_ш}\right)_{вх}$$

d – длина участка линии связи.

Коэффициент усиления антенны

Коэффициент усиления (КУ) антенны — отношение мощности на входе эталонной антенны к мощности, подводимой ко входу рассматриваемой антенны, при условии, что обе антенны создают в данном направлении на одинаковом расстоянии равные значения напряженности поля или такой же плотности потока мощности.



КУ является количественной мерой способности антенны концентрировать мощность электромагнитной волны в узком луче с учетом потерь в элементах конструкции антенны и объектах, расположенных в ближней зоне антенны.

Энергетический ресурс канала связи (энергетический бюджет)

1. Отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума, необходимое для получения заданной вероятности ошибки

$$\frac{E_б}{N_0} = \frac{P_{пр} T_б}{N/\Delta f_ш} = \frac{P_{пр}}{N}\left(\frac{\Delta f_ш}{R}\right)$$

$$\frac{E_б}{N_0} = \frac{P_{пр}}{N_0}\left(\frac{1}{R}\right), \quad \frac{P_{пр}}{N_0} = \frac{E_б}{N_0} R$$

$P_{пр}$ – принятая мощность;
N_0 – спектральная плотность мощности шума;
N – мощность шума;
$\Delta f_ш$ – ширина полосы частот;
$T_б$ – время передачи одного бита;
R – скорость передачи информации.

2. Уравнение связи: $$P_{пр} = \frac{P_{пер}\eta_{пер}G_{пер}\eta_{пр}G_{пр}}{L_{св}} = \frac{ЭИИМ \cdot \eta_{пр}G_{пр}}{L_{св}}$$

3. Отношение сигнал-шум: $$\frac{P_{пр}}{N} = \frac{ЭИИМ \cdot \eta_{пр}G_{пр}}{L_{св}N},$$

а с учетом дополнительных потерь в канале распространения

$$\frac{P_{пр}}{N} = \frac{ЭИИМ \cdot \eta_{пр}G_{пр}}{L_{св}L_{доп}N} = \frac{ЭИИМ \cdot \eta_{пр}G_{пр}}{L \cdot N}$$

Поскольку $N_0 = \dfrac{N}{\Delta f_ш} = k \cdot T_\Sigma$ Вт·Гц, то

$$\frac{P_{пр}}{N_0} = \frac{ЭИИМ \cdot \eta_{пр} G_{пр}}{L \cdot N_0} = \frac{ЭИИМ \cdot \eta_{пр} G_{пр}}{L \cdot k \cdot T_\Sigma} = \frac{ЭИИМ \cdot \eta_{пр}}{L \cdot k}\left(\frac{G_{пр}}{T_\Sigma}\right) = \frac{ЭИИМ \cdot \eta_{пр} Q_{ст}}{L \cdot k}$$

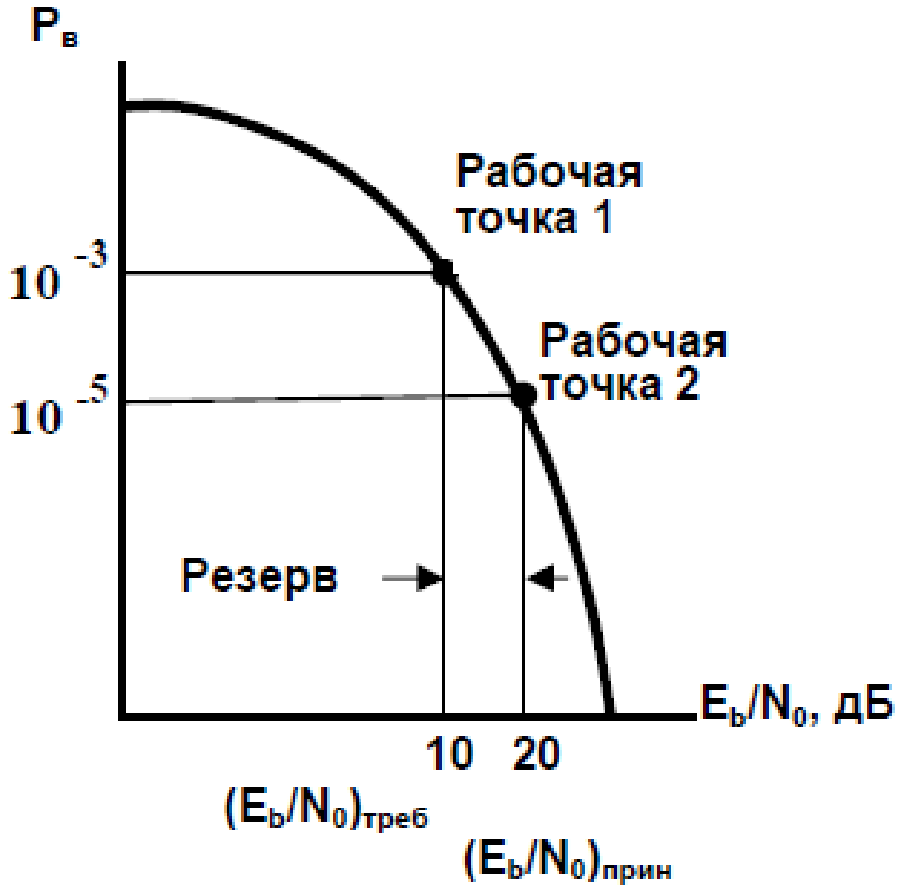
$Q_{ст} = G_{пр} / T_\Sigma$ - добротность станции.

4. Отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума, необходимое для получения заданной вероятности ошибки

$$\frac{E_б}{N_0} = \frac{P_{пр}}{N_0}\left(\frac{1}{R}\right) = \frac{ЭИИМ \cdot \eta_{пр} Q_{ст}}{L \cdot k}\left(\frac{1}{R}\right)$$

R – скорость передачи информации

Для обеспечения положительного энергетического резерва отношение $E_б/N_0$ должно быть выше некоторого требуемого значения, определяющего необходимую достоверность передачи.



Зависимость отношения $E_б/N_0$ от требуемой системной достоверности передачи

5. Энергетический резерв линии связи:

$$M = \left(\frac{E_б}{N_0}\right)_{прин} \Big/ \left(\frac{E_б}{N_0}\right)_{треб}$$

или

$$M[дБ] = \left(\frac{E_б}{N_0}\right)_{прин}[дБ] - \left(\frac{E_б}{N_0}\right)_{треб}[дБ]$$

$$\left(\frac{E_б}{N_0}\right)_{прин} = \frac{P_{пр}}{N_0}\left(\frac{1}{R}\right),$$

тогда

$$M = \frac{P_{пр}}{N_0}\left(\frac{1}{R}\right) \Big/ \left(\frac{E_б}{N_0}\right)_{треб} = \frac{ЭИИМ \cdot \eta_{пр} Q_{ст}}{L \cdot k \cdot R \cdot \left(E_б / N_0\right)_{треб}}$$

6. Энергетический резерв линии связи в логарифмической форме:

$$M[дБ] = ЭИИМ[дБВт] + \eta_{пр}[дБ] + Q_{ст}[дБ] - L[дБ] - k[дБ] - R[дБбит/с] - \\ -\left(E_б / N_0\right)_{треб}[дБ]$$

При расчете энергетического резерва в логарифмической форме:

- мощность переданного сигнала $P_{пер}$ выражается в децибел-ваттах (дБВт);
- спектральная плотность мощности шума N_0 – в децибел-ваттах на герц (дБВт/Гц);
- усиление антенны G – в децибелах относительно изотропного усиления (дБ[i]);
- скорость передачи данных R – в децибелах относительно величины 1 бит/с (дББит/с).

Поглощение энергии сигнала в атмосфере

Полный множитель затухания

$$F = F_{св} + F_{з} + F_{тр}$$

Множитель затухания в свободном пространстве

$$F_{св} = 20\lg\frac{4\pi d}{\lambda}$$

Множитель ослабления за счет влияния земной поверхности

$$F_{з} = F_{д} + F_{р} + F_{и}$$

Множитель ослабления за счет влияния тропосферы

$$F_{тр} = F_{г} + F_{о} + F_{сл}$$

$F_{д}$ – дифракционный множитель;
$F_{р}$ – рефракционный множитель;
$F_{и}$ – интерференционный множитель.

$F_{г}$ – множитель ослабления в газах;
$F_{о}$ – множитель ослабления в осадках;
$F_{сл}$ – множитель ослабления в слоях тропосферы.

Поглощение в газах в условиях «ясного неба»

$$F_г = \frac{\gamma_{O_2} h_{O_2} + \gamma_{H_2O} h_{H_2O}}{\sin\varphi_0}, \ \varphi_0 > 10$$

φ_0 – угол места земной станции, град;

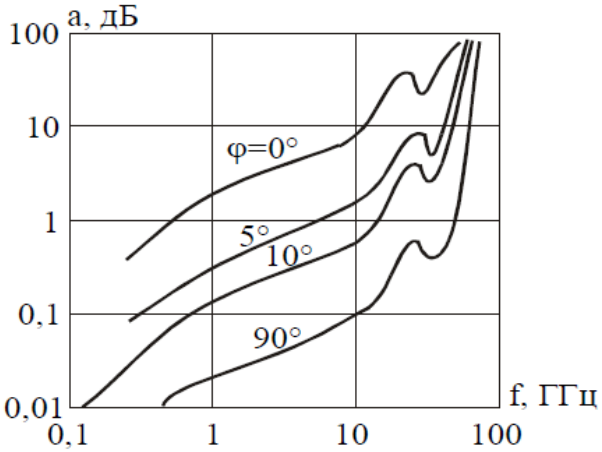
$\gamma_{O_2}, \gamma_{H_2O}$ – погонные ослабления в кислороде и водяном паре (зависят от частоты и концентрации пара), дБ/км;

h_{O_2}, h_{H_2O} – эквивалентная толщина кислорода и водяного пара, км.

$$h_{H_2O} = 2{,}2 + \frac{3}{3 + (f - 22{,}3)^2} + \frac{0{,}3}{1 + (f - 118{,}7)^2}, \text{ при } f<350 \text{ ГГц}$$

$$h_{O_2} = \begin{cases} 6 & \text{при } f<50 \text{ ГГц} \\ 6 + \dfrac{60}{1 + (f - 118{,}7)^2} & \text{при } 70<f<350 \text{ ГГц} \end{cases}$$

Частотные зависимости суммарного молекулярного ослабления



Усредненные значения погонного молекулярного ослабления

Частота, ГГц	Ослабление в кислороде дБ/км,	Ослабление в парах воды при ρ = 7,5 г/м	Ослабление в парах воды при ρ = 20 г/м	Суммарное погонное ослабление, дБ/км
10,0	0,02	0,004	0,01	0,024…0,03
15,0	0,02	0,03	0,08	0,05…0,1
20,0	0,02	0,3	0,3	0,12…0,32

Ослабление сигналов, вызванное дождем

Множитель ослабления в дожде, дБ

$$F_д = \gamma_д \cdot d_д \cdot r_{0,01}$$

$\gamma_д$ – погонное ослабление сигнала в дожде, дБ/км

$$\gamma_д = \beta_д(f) I_д^{\alpha_д(f)} \qquad f = 9\ldots30 \text{ ГГц}$$

$I_д$ – интенсивность осадков, мм/час

$$\alpha_д(f) = 1{,}47 - 0{,}09\sqrt{f}$$

$$\beta_д(f) = -10^{-3} + 5{,}1 \cdot 10^{-5} \cdot f^{2{,}45}$$

$r_{0,01}$ – фактор уменьшения, учитывающий неравномерность дождя в течение 0,01% времени

$$r_{0,01} = \frac{90}{90 + 4d_д \cos\varphi_0}$$

$d_д$ – наклонная дальность в дожде, км

$$d_д = \frac{2(h_д - h_0)}{\sqrt{\sin^2\varphi_0 + 2(h_д - h_0)} + \sin\varphi_0}$$

h_0 – высота станции над уровнем моря, км;

$h_д$ – высота дождя, км

$$h_д = \begin{cases} 0{,}6 \cdot h_F, & 0^0 \le |\varphi| < 20^0 \\ \left[0{,}6 + 0{,}02(|\varphi| - 20)\right] \cdot h_F, & 20^0 \le |\varphi| < 40^0 \\ h_F, & |\varphi| \ge 40^0 \end{cases}$$

h_F – высота нулевой изотермы;

φ – широта земной станции, град.

$$h_F = 5{,}1 - 2{,}151 \cdot \lg\left(1 + 10^{\frac{\varphi - 27}{25}}\right)$$

Ослабление сигналов в туманах и облаках

Ослабление сигнала в туманах и облаках существенно меньшее, чем в дожде, однако вероятность (длительность) ослаблений значительно больше. Так, например, распространение в облаках на частотах 10…30 ГГц может приводить к продолжительным ослаблениям сигнала до 5…10% времени на 0,5…1 дБ и 4…5 дБ в малых процентах времени (порядка 0,1%).

$$F_т = k_т \cdot M_т \cdot r_т$$

$k_т$ – множитель погонного ослабления (дБ·м^3/(Г·км)), уменьшается с ростом температуры воздуха;

$M_т$ – водность – количество жидкой воды в единице объема, Г/м^3;

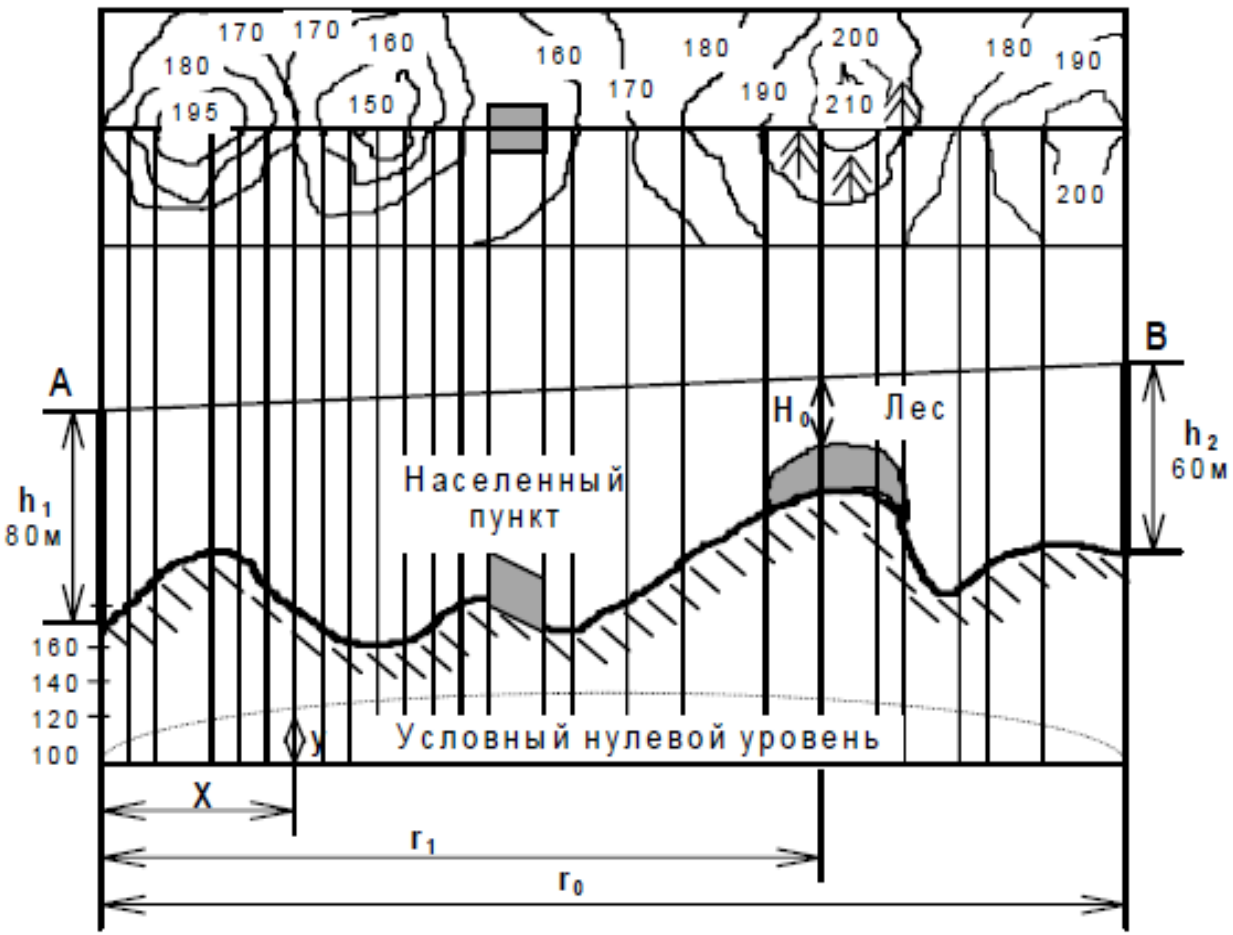
Водность, Г/м^3	2	1	0,5	0,2	0,1	0,05
Оптическая видимость, м	30	50	80	200	300	400

$r_т$ – длина пути распространения сигнала в тумане, км.

Вероятность появления туманов в равнинной местности в холодное время года составляет 3…5% и 0,6…2% в теплое. Приземные туманы могут захватывать большие районы, при этом горизонтальные размеры таких туманов могут лежать в пределах от нескольких сот метров до нескольких сот километров, а вертикальные от 300 м до 2,5 км.

Профиль радиотрассы при прямолинейном представлении траектории волны

Профиль радиотрассы – вертикальный разрез местности между радиостанциями со всеми высотными отметками, включающими здания, лес и т.п.



r_0 – расстояние между радиостанциями А и В;

r_1 – расстояние до препятствия (существенно влияет на ослабление радиоволн на трассе);

H_0 – величина просвета на трассе (расстояние между прямой АВ и профилем трассы), определяемая в наивысшей точке профиля (при наличии препятствий просвет находят относительно их вершин)

1. Условный нулевой уровень: $y = \frac{r_0^2}{2R_з} \cdot s(1-s)$

s – относительная координата точки, $s = x/r_0$
x – расстояние до текущей точки от левого конца трассы;
r_0 – расстояние между радиостанциями А и В;
$R_з$ – геометрический радиус Земли.

2. Разность хода прямого и отраженного от поверхности лучей:

$$\Delta r = \frac{H^2}{2 \cdot r_0 \cdot s(1-s)}$$

При $\Delta r \le \lambda/6$ отраженный луч не ослабляет прямой луч, тогда минимальная величина просвета

$$\frac{H_0^2}{2 \cdot r_0 \cdot s(1-s)} = \frac{\lambda}{6} \quad \Rightarrow \quad H_0 = \sqrt{\frac{1}{3}\lambda \cdot r_0 \cdot s(1-s)}$$

Открытая трасса	Полуоткрытая трасса	Закрытая трасса
$H > H_0$	$H_0 > H \ge 0$	$H < 0$

Дифракция радиоволн проявляется в огибании ими земной поверхности. Множитель ослабления с учетом реального рельефа местности рассчитывают при помощи приближенных методов В. А. Фока.

Ослабление за счет рефракции

Рефракция (преломление) — изменение направления луча (волны), возникающее на границе двух сред, через которые этот луч проходит или в при прохождении луча по одной среде, но с меняющимися свойствами.

Рефракция обусловлена *вертикальной неоднородностью диэлектрической проницаемости воздуха*. Для ее оценки ввели понятие **эффективного вертикального градиента диэлектрической проницаемости $g_{эф}$**. Его величина зависит от географического положения местности и для большинства стран Европейской зоны (в т.ч. и для Украины) составляет $g_{эф}=-8\cdot10^{-8}$ 1/м.

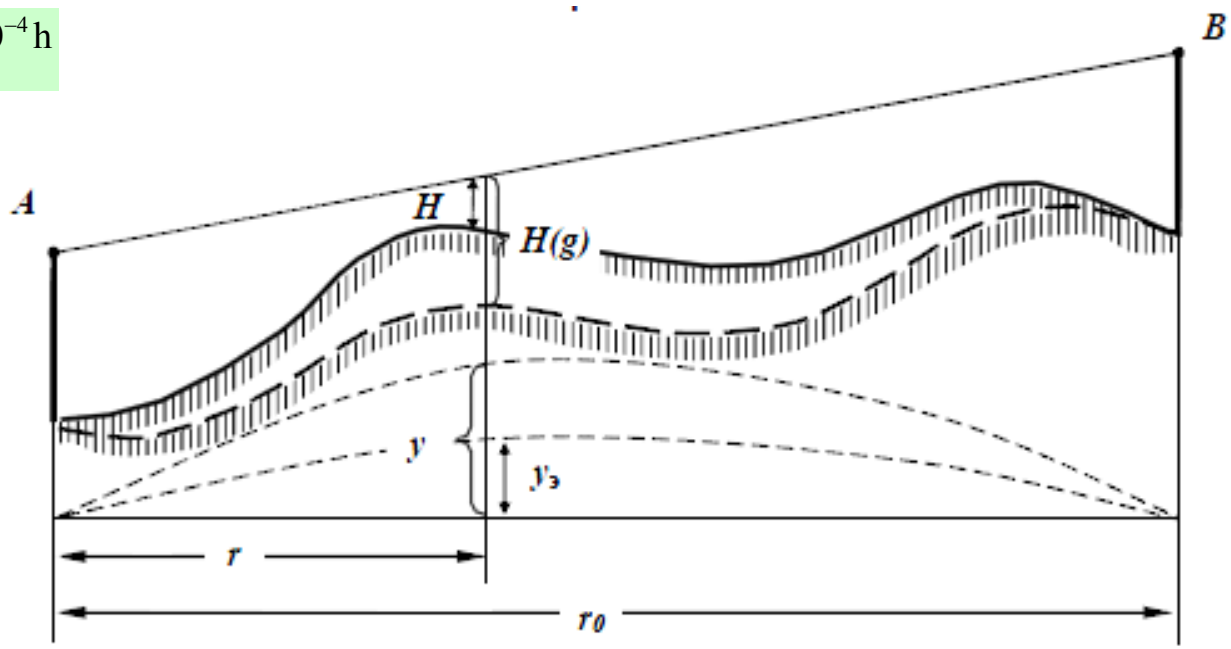
Высотная зависимость коэффициента преломления:

$$\varepsilon(h)=1+5,78\cdot10^{-4}\cdot e^{-1,36\cdot10^{-4}h}$$

Влияние рефракции проявляется в виде изменения просвета:

$$H(g)=H_0+\Delta H(g)$$

$$\Delta H(g)=-\frac{r_0^2}{4}g_{эф}s(1-s)$$



Ослабление за счет интерференции

Интерференция — взаимное увеличение или уменьшение результирующей амплитуды нескольких когерентных волн при их наложении друг на друга.

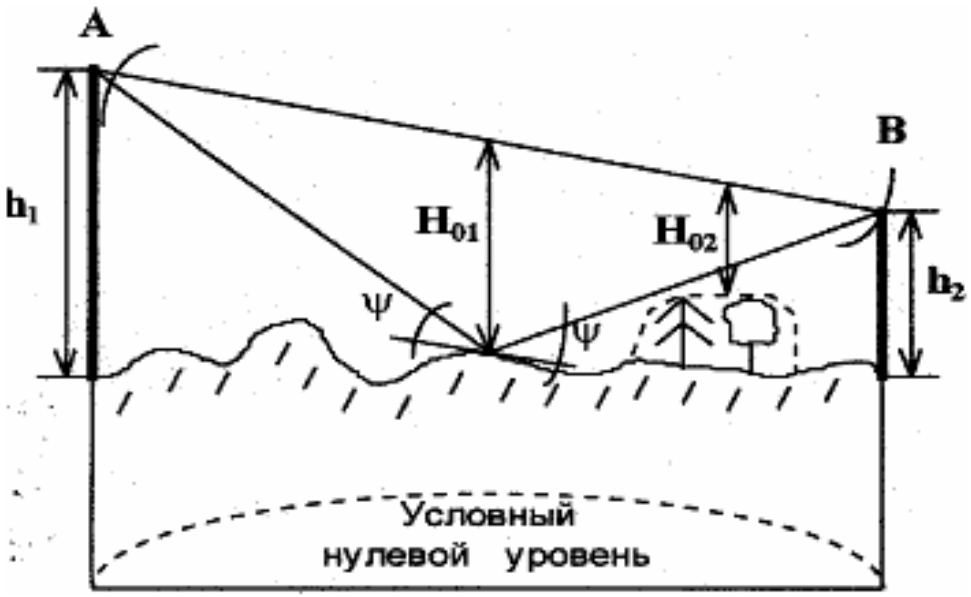
Модуль множителя интерференционного ослабления :

$$F_и = \sqrt{1 + |R|^2 + 2|R|\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\Delta r + \alpha\right)}$$

R – коэффициент отражения, зависящий от физических свойств поверхности;
α – угол сдвига фаз между прямой и отраженной волнами.

Для протяженных трасс $h_1 << r_0$, $h_2 << r_0$ углы скольжения становятся малыми и можно считать, что $\Delta r \approx 2h_1h_2/r_0$, тогда

$$F_и = \sqrt{1 + |R|^2 + 2|R|\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\frac{h_1h_2}{r_0} + \alpha\right)}$$

Модуль множителя интерференционного ослабления с учетом величины просвета:

$$F_и = \sqrt{1 + |R|^2 + 2|R|\cos\left(\frac{\pi}{\lambda}\frac{H^2(g)}{3H_0^2}\right)}$$