

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Ульяновский государственный технический университет

А. С. Садомовский
В. А. Гульшин

**Расчёт
радиорелейных линий (РРЛ)
связи**

Методические указания по курсовому проектированию
для студентов специальностей 21030265 и 21020165

Ульяновск 2005

УДК 621.396 (076)
ББК 32.84 Я 7
С 14

Рецензент директор Ульяновского отделения
института радиотехники и
электроники Российской
академии наук
канд. техн. наук А. А. Широков

Одобрено секцией методических пособий научно –
методического совета университета.

Садомовский, А. С.

- С14 Расчет радиорелейных линий (РРЛ) связи: методические указания по курсовому проектированию для студентов специальностей 21030265 и 21020165 / А. С. Садомовский, В. А. Гульшин. – Ульяновск : УлГТУ, 2005. – 28 с.

Указания составлены в соответствии с учебным планом специальностей 21030265 и 21020165. Содержат методику строительного расчета РРЛ и пример расчета интервала РРЛ.

Работа выполнена на кафедре «Радиотехника».

УДК 621.396 (076)
ББК 32.84 Я 7

© А. С. Садомовский,
В. А. Гульшин, 2005
© Оформление. УлГТУ, 2005

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Общие положения	4
2. Исходные данные для расчёта РРЛ	6
3. Требования к качественным характеристикам каналов РРЛ	6
4. Порядок расчёта РРЛ	8
5. Расчёт ослабления радиоволны на интервале РРЛ	8
5.1. Расчёт медианного ослабления на интервале РРЛ $W_{МЭД,i}$	8
5.2. Построение чертежей профилей местности на интервалах РРЛ	9
5.3. Влияние земной поверхности на распространение радиоволн на интервалах РРЛ	10
5.4. Расчёт ослабления, вносимого рельефом местности, на полуоткрытых и закрытых интервалах	12
5.5. Ослабление радиоволн, вносимое рельефом местности, на открытых интервалах	17
6. Расчёт медианной мощности сигнала на входе приёмника интервала РРЛ	20
7. Расчёт реальной чувствительности приёмника на интервале РРЛ	20
8. Расчёт реальной чувствительности приёмника РРС при передаче цифровых радиосигналов	23
9. Определение запаса ВЧ уровня q_i и надёжности связи на интервале РРЛ	24
10. Пример расчёта РРЛ	25
10.1. Исходные данные	25
10.2. Расчёт интервалов РРЛ	25
Библиографический список	28

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Расчёт РРЛ – один из основных этапов её планирования. Цель расчёта состоит в определении пригодности выбранного размещения РРС на планируемой трассе для обеспечения требуемого качества связи по её каналам.

Качество РРЛ связано со степенью искажений сигналов на её интервалах. Поэтому методология расчёта РРЛ сводится к расчёту её интервалов.

Расчёт интервалов (определение их пригодности для обеспечения связи с требуемым качеством Q) производится на основе двух уравнений, связывающих параметры РРС и интервалов с качеством связи на этих интервалах.

Первое уравнение, называемое *уравнением передачи*, связывает мощность сигнала на входе приёмника с энергетическими параметрами РРС и затуханием (ослаблением) радиоволн на интервалах РРЛ (рис. 1).

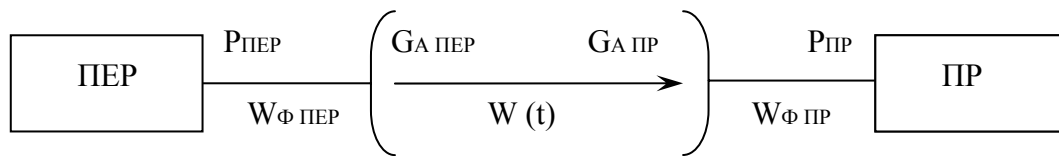


Рис. 1

Наиболее распространённой является его запись в логарифмических единицах

$$P_{ПР}(t) = P_{ПЕР} - W_{Ф.ПЕР} + G_{А.ПЕР} + G_{А.ПР} - W_{Ф.ПР} - W(t)_{МЕД}, \quad (1)$$

где $P_{ПР}(t)$ – мощность сигнала на входе приёмника, дБ/Вт;

$P_{ПЕР}$ – мощность передатчика на выходе фидера передающей антенны, дБ/Вт;

$W_{Ф.ПЕР(ПР)}$ – ослабление радиоволн в фидере соответственно передающей и приёмной антенн, дБ;

$G_{А.ПЕР(ПР)}$ – коэффициенты усиления антенн соответственно передающей и приёмной, дБ;

$W(t)$ – медианное ослабление радиоволн без учёта их ослабления на замирания при распространении между антеннами интервала, дБ.

Второе уравнение, называемое *уравнением качества*, связывает качество связи по каналам интервала РРЛ Q_i с уровнем сигнала на входе приёмника $P_{ПР}$.

$$Q = f(P_{ПР}). \quad (2)$$

Проверка пригодности интервала проектируемой РРЛ производится по следующему алгоритму: по заданному качеству связи на интервале Q_i определяется мощность сигнала $P_{\text{ПР.ТРЕБ}}$, требуемая для обеспечения заданного качества Q_i .

$$P_{\text{ПР.ТРЕБ}} = F(Q_i). \quad (3)$$

Далее производится сравнение реальной, полученной при расчёте из уравнения (1) медианной мощности сигнала на входе приёмника $P_{\text{ПР.МЕД}}$ (без учёта замираний радиоволн на интервале) с $P_{\text{ПР.ТРЕБ}}$, являющейся реальной чувствительностью приёмника. Очевидно, для обеспечения связи по каналам с заданным качеством необходимо, чтобы $P_{\text{ПР.МЕД}}$ было больше $P_{\text{ПР.ТРЕБ}}$ на величину запаса уровня сигнала q_i на замирания.

$$q_i = P_{\text{ПР.МЕД}} - P_{\text{ПР.ТРЕБ}}. \quad (4)$$

По величине запаса ВЧ уровня q_i определяется потеря надёжности из-за замираний на интервале РРЛ по графикам зависимости.

$$T_i \% = f(W_3 = q_i). \quad (5)$$

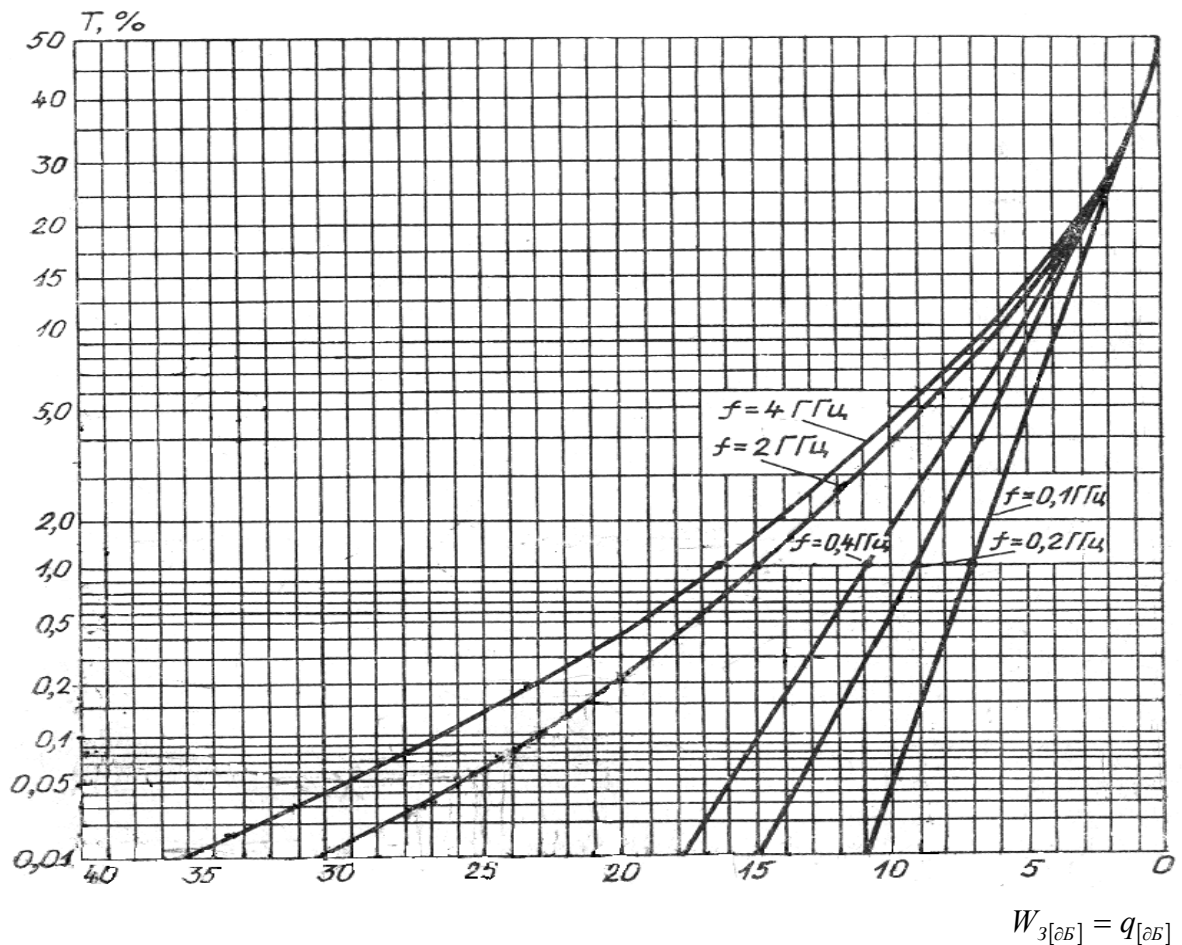


Рис. 2

Если величина потери надёжности связи на интервале $T_i\% \pi T_i\%_{зад.}$, то качество связи на интервале проектируемой РРЛ удовлетворяет заданным требованиям на качество связи.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЁТА РРЛ

а) Тип станций, используемых для строительства РРЛ, и их технические характеристики: диапазон частот $f_H \div f_B$, мощность передатчика $P_{ПЕР}$, коэффициент шума приёмника $P_{Ш}$, коэффициент усиления антенн G_A , ослабление сигнала в фидерах W_ϕ трактов передачи и приёма.

б) Требование к качественным характеристикам каналов РРЛ.

в) Число интервалов в РРЛ полной протяжённости.

3. ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВЕННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ КАНАЛОВ РРЛ

Качественными характеристиками каналов РРЛ являются: шумовая защищённость $a_{ш}$ при передаче аналоговых сигналов и достоверность передачи Q_d или эквивалентная ей вероятность ошибки $P_{ош} = 1 - Q_d$ при передаче дискретных сигналов.

Шумовая защищённость выражается в логарифмических единицах (децибелах, неперах) как отношение мощности измеренного синусоидального сигнала частоты 800 Гц на выходе канала к суммарной мощности шумов в той же точке

$$a_{ш} [\partial B] = 10 \lg \frac{P_{(F=800 \Gamma u)}}{P_{ш}},$$

$$a_{ш} [Hn] = \frac{1}{2} \ln \frac{P_{(F=800 \Gamma u)}}{P_{ш}}. \quad (6)$$

В зависимости от метода измерения различают шумы (и соответственно шумовую защищённость) интегральные, измеренные обычным вольтметром, и психофотметрические шумы, измеренные вольтметром с психофотметрическим фильтром, учитывающим частотную восприимчивость человеческого уха. Психофотметрическая мощность шума меньше интегральной и связана с ней психофотметрическим коэффициентом $K_{пс}^2 = (0,75)^2 = 0,56$. Соответственно психофотметрическая шумовая защищённость больше интегральной на 2,6 дБ (0,3 Нп).

Для мобильных радиорелейных линий установлены нормы шумовой защищённости, приведенные в таблице 1.

Таблица 1

Шумовая защищённость	Качество канала			
	хорошее		удовлетворительное	
	дБ	Нп	дБ	Нп
$a_{ш.лс}$	37,3	4,3	31,2	3,6
$a_{ш.инт}$	34,8	4,0	28,7	3,3

Шумовая защищённость во времени является случайной величиной вследствие замирания сигнала на трассе интервала РРЛ. Надёжность по замираниям оценивается процентом времени $H\%$, в течение которого обеспечивается номинальное значение шумовой защищённости. Величина $T\% = 100 - H\%$ является потерей надёжности по замираниям, равная выраженному в процентах отношению суммы отрезков времени Δt_i , в течение которых $a_{ш}$ п $a_{ш.ном}$, ко времени наблюдения t_H , равному одним, наихудшим по замираниям, суткам года.

$$T\% = \frac{\sum \Delta t_i}{t_H} \cdot 100\% . \quad (7)$$

В соответствии с нормами для мобильных РРЛ потеря надёжности линии связи по замираниям должна быть не более 5% времени $T\% \leq 5\%$; т. е. в течение 72 минут наихудших по замираниям суток года допускается $a_{ш}$ п $a_{ш.ном}$.

Для оценки глубины замираний на одном интервале РРЛ определяется допустимая потеря надёжности на одном интервале $T_1\%$. Она в M раз меньше, чем в линии, состоящей из M интервалов.

$$T_1\% = \frac{T\%}{M} . \quad (8)$$

Величину глубины замираний на одном интервале $W_3(T_1\%)$ можно определить по графикам зависимости $W_3 = f(T_1\%)$ (рис. 2).

Достоверность передачи дискретных сигналов по каналам ТЧ Q_d определяется отношением числа правильно принятых двоичных символов к общему числу символов, переданных за определённый (обычно нормируемый) промежуток времени (сеанс связи).

Потеря достоверности $P_{ош} = 1 - Q_d$ при передаче бинарной информации по каналам ТЧ с установленной скоростью (например, 1200 бит) не должна превышать нормированное значение $P_{ош.ном}$ (например, 10^{-4}) в течение $H\%$ (например, 95%) времени сеанса передачи. При этом потеря надёжности

должна составлять менее 5% $T\% \leq 5\%$ на линию полной протяжённости. Потеря надёжности по замираниям на одном интервале РРЛ будет $T_1\% = \frac{T\%}{M}$.

4. ПОРЯДОК РАСЧЁТА РРЛ

По топографической карте выбираются места развертывания РРЛ на планируемой трассе РРЛ.

Снимается профиль местности и строится в масштабе длин и высот чертёж на миллиметровой бумаге профиля местности на интервалах РРЛ.

Рассчитывается медианное ослабление радиоволн $W_{МЭД.i}$ (без учёта замираний) на каждом интервале РРЛ.

Определяется величина медианной мощности сигнала на входе приёмника $P_{ПР.МЭД.i}$ каждого интервала.

Рассчитывается величина мощности сигнала, требуемая на входе приёмника для обеспечения связи на линии с заданным качеством, т. е. реальная чувствительность приёмника $P_{РЧ}$.

Определяется запас высокочастотного уровня сигнала q_i на каждом интервале.

$$q_i = P_{ПР.МЭД.i} - P_{РЧ}. \quad (9)$$

По величине запаса q_i определяется потеря надёжности по замираниям на интервалах по графикам зависимости $T_1\% = f(W_3 = q_i)$ (рис. 2).

Формулируется вывод о пригодности интервалов РРЛ для обеспечения связи в линии с заданным качеством. Если $T_1\% \leq T_1\%_{ДОП}$, то связь на заданном интервале будет обеспечена с заданным качеством.

5. РАСЧЁТ ОСЛАБЛЕНИЯ РАДИОВОЛНЫ НА ИНТЕРВАЛЕ РРЛ

5.1 Расчёт медианного ослабления на интервалах РРЛ $W_{МЭД.i}$

Расчёт сводится к определению ослабления радиоволн в свободном пространстве $W_{СВ}$ и ослабления, вносимого рельефом местности W_p .

$$W_{МЭД.i} = W_{СВ.i} + W_{P.i}. \quad (10)$$

Величина ослабления радиоволн в свободном пространстве $W_{СВ.i}$ определяется выражением (11).

$$W_{СВ.i} [\text{дБ}] = 122 + 20 \lg \frac{R_{KM}}{\lambda_{CM}}. \quad (11)$$

Величина ослабления сигнала рельефом местности $W_{P.i}$ определяется после построения профиля интервала на миллиметровой бумаге.

5.2 Построение чертежей профилей местности на интервалах РРЛ

Чертёж профиля местности интервала РРЛ является основным документом для расчёта ослабления, вносимого рельефом местности на интервале РРЛ.

Чертёж профиля строится по топографической карте масштаба 1:100 000 на миллиметровой бумаге в масштабе: расстояния 1 см – 2 км, высоты 1 см – 10 м.

Чертёж профиля местности выполняется в следующем порядке:

1. Строится линия кривизны Земли, для чего:

- на листе миллиметровой бумаги (рис. 3) проводится прямая СД, на которой наносится точка «О», принимаемая в дальнейшем за середину профиля интервала;

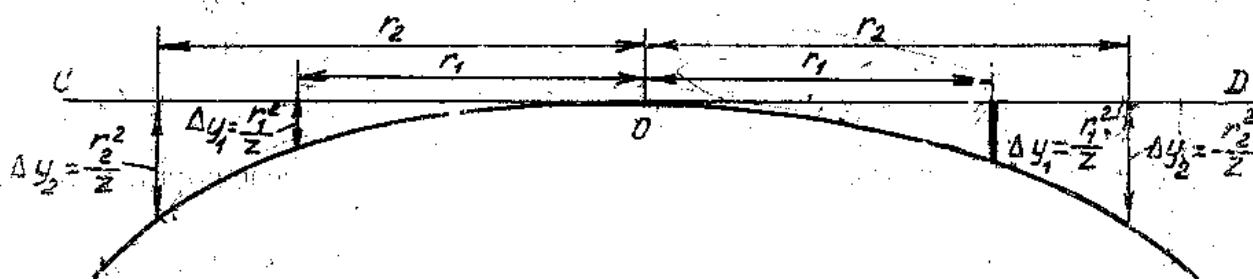


Рис. 3

- на прямой СД на равных расстояниях r от точки «О» откладываются вниз перпендикуляры длиной Δy в выбранном масштабе;

$$\Delta y[\text{м}] = \frac{r^2[\text{км}]}{17}. \quad (12)$$

- концы перпендикуляров соединяются плавной кривой, являющейся линией кривизны Земли.

2. От линии кривизны Земли в принятом масштабе откладываются перпендикуляры к линии СД, длины которых берутся равными географическим высотам характерных точек местности, лежащих на интервале. Высоты точек определяются по топографической карте. Концы перпендикуляров соединяются плавной линией.

3. На полученную линию в принятом масштабе наносятся местные предметы (лес, массивы зданий и др.). Полученный чертёж является чертежом профиля местности интервала РРЛ (рис. 4).

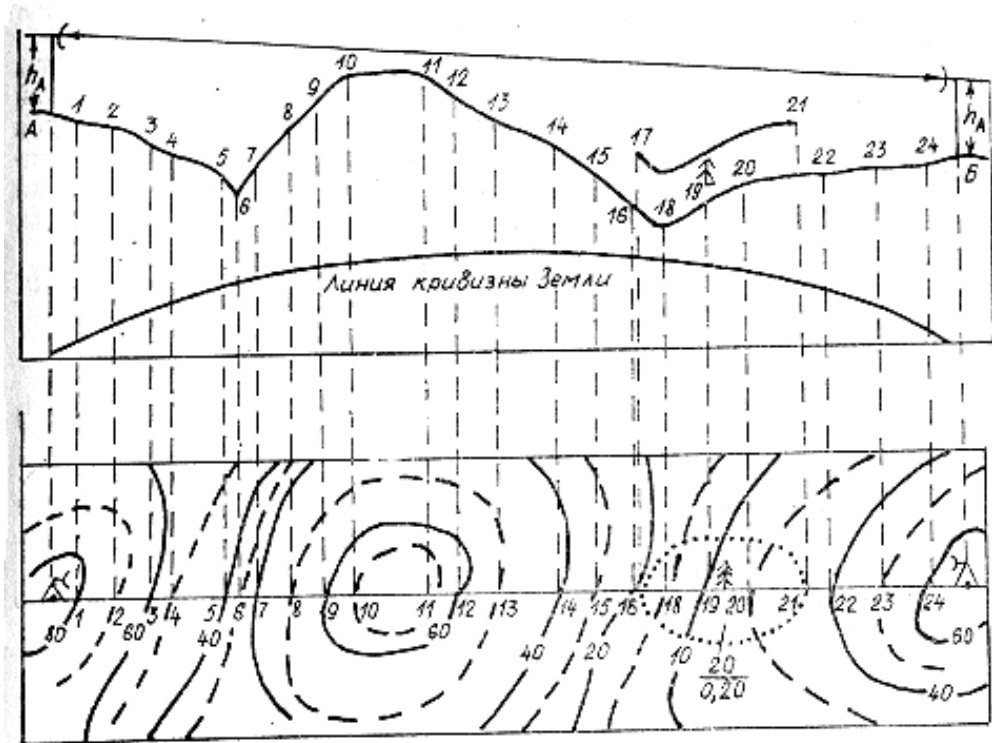


Рис. 4

На этот чертёж в точках размещения РРС наносят высоты антенных опор. Электрические центры антенн соединяют прямой, называемой *линией прямой видимости*.

5.3 Влияние земной поверхности на распространение радиоволн на интервалах РРЛ

Распространение радиоволн непосредственно над земной поверхностью может привести к ряду нежелательных явлений:

- экранированию приёмников РРС от источника излучения (передатчика) рельефом или другими местными предметами (лес, строения и др.);
- появлению отражённых волн от земной поверхности и их интерференции с прямой волной.

Экранирование источника излучения местностью приводит к уменьшению уровня сигнала в точке приёма, т. е. дополнительному ослаблению по сравнению с распространением радиоволн в свободном пространстве. Для характеристики степени экранирования вводится понятие *минимальной зоны*, существенной для распространения. Под этой зоной понимают отверстие в экране с минимальным радиусом ρ_{\min} , при котором поле в точке приёма равно полю свободного пространства, что имеет место при разности хода прямого и отражённого лучей $АСВ-АВ=\lambda/6$ (рис. 5).

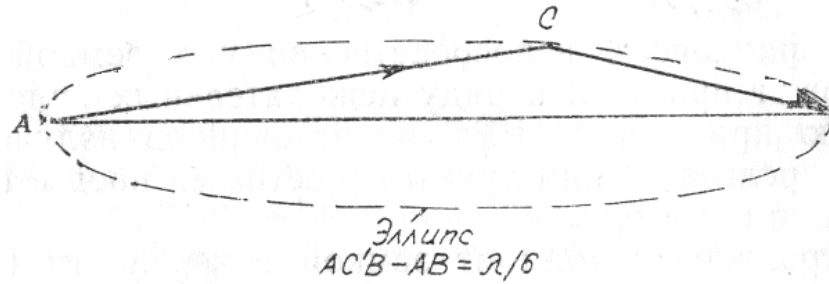


Рис. 5

В данном случае радиус минимальной зоны определяется как

$$\rho_{\min} = \sqrt{\frac{1}{3} \lambda R K (1 - K)}, \quad (13)$$

где λ – длина рабочей волны;

R – длина интервала;

K – относительное расстояние до точки отражения, являющейся серединой препятствия $K = \frac{R_1}{R}$ (рис. 6).

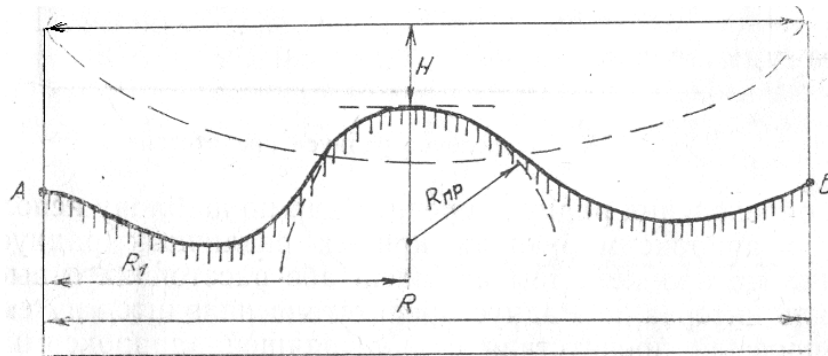


Рис. 6

В этой зоне, т. е. когда просвет H между линией прямой видимости и рельефом местности в любой точке интервала больше ρ_{\min} , уровень поля в точке приёма будет равен полю при распространении в свободном пространстве, т. е. экранированием местности можно пренебречь. В противном случае, когда $H < \rho_{\min}$, экранирующее действие местности необходимо учитывать.

По этому критерию осуществляется классификация интервалов. Интервал считается открытым (рис. 7), если величина просвета в любой точке интервала больше критической $H_0 = \rho_{\min}$, т. е. при условии

$$H \geq H_0 = \sqrt{\frac{1}{3} \lambda R K (1 - K)}. \quad (14)$$

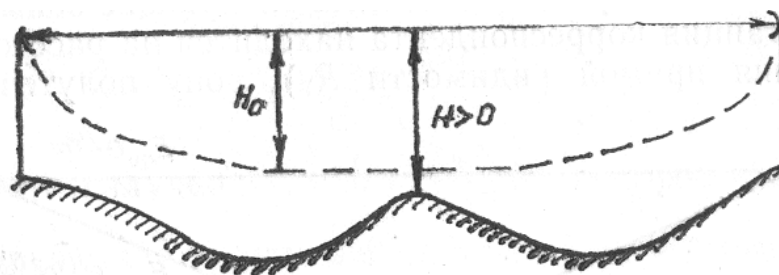


Рис. 7

Интервал считается полуоткрытым (рис. 8), если хотя бы в одной точке интервала условие (14) не выполняется, но линия прямой видимости не пересекает рельеф местности и местных предметов, т. е. выполняется условие $0 \leq H \leq H_0$.

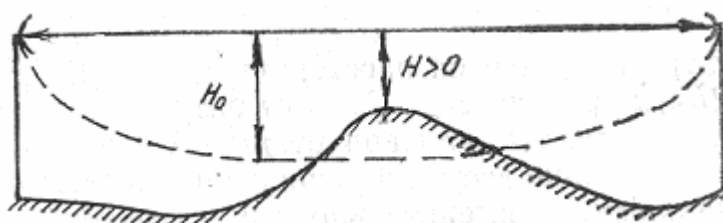


Рис. 8

Интервал считается закрытым (рис. 9), если хотя бы в одной точке интервала линия прямой видимости пересекает препятствия (местные предметы), т. е. при условии $0 < H$.

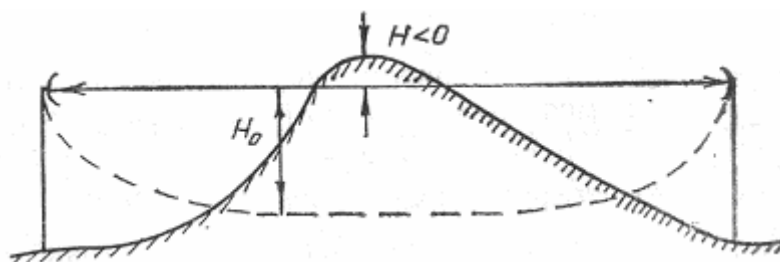


Рис. 9

5.4 Расчёт ослабления, вносимого рельефом местности, на полуоткрытых и закрытых интервалах

Оценка ослабления радиоволн, вносимого рельефом местности на полуоткрытых и закрытых интервалах с одним препятствием (рис. 10), производится с учётом способности радиоволн огибать препятствия. Поэтому препятствия аппроксимируются сферами с определённым радиусом $R_{\text{пр}}$.

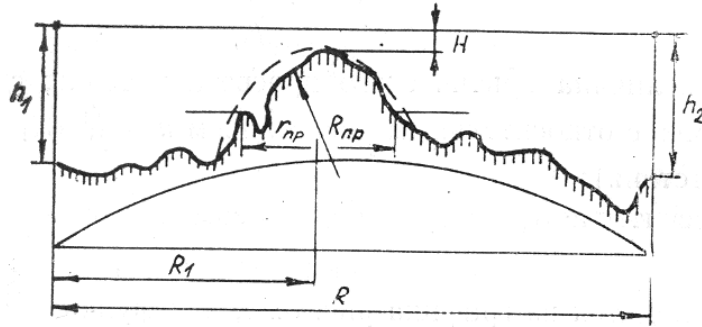


Рис. 10

Ослабление тем больше, чем больше радиус препятствия $R_{пр}$, меньше просвет H и короче длина волны λ .

Радиус препятствия определяется расчётным путём или с помощью шаблонов. Для расчёта $R_{пр}$ используется формула

$$R_{пр}[\text{км}] = \frac{r_{пр}^2[\text{км}]}{8Y[\text{км}]}, \quad (15)$$

где $r_{пр}$ – ширина препятствия на уровне секущей плоскости (рис.11).

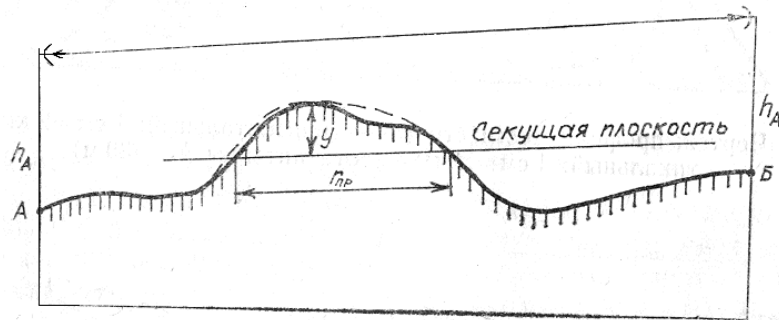


Рис.11

Секущая плоскость проводится на таком максимальном от вершины уровне, на котором ещё не нарушается сферичность препятствия до секущей плоскости.

Для определения радиуса препятствия по шаблону используется семейство аппроксимирующих кривых различных радиусов, построенных на кальке в том же масштабе расстояний и высот, как и профиль интервала (расстояний 1 см – 2 км; высот 1 см – 10 м). Радиус препятствия находится путём совмещения профиля препятствия с «подходящей» аппроксимирующей кривой.

Семейство кривых строится с использованием формулы (15). С этой целью, задавая конкретные $R_{пр}$, по значениям « Y » вычисляют и откладывают на чертеже (кальке) соответственные им значения $r_{пр}$. Например, $R_{пр} = 500$ км; $Y = 5, 10, 15, 20$ м; соответственно, $r_{пр} = \sqrt{8YR_{пр}} = 4,5; 6,35; 7,8; 9 \dots$ км.

Ослабление радиоволн за счёт рельефа местности на интервале W_{pi} рассчитывается по формуле

$$W_{pi}[\text{дБ}] = W_0(\mu)(1-h), \quad (16)$$

где $W_0(\mu)$ – ослабление радиоволн, вызываемое препятствием, касающимся линии прямой видимости, т. е. $H=0$;

μ – параметр клиновидности препятствия:

$$\mu = \sqrt[3]{\frac{R^2 K^2 (1-K)^2}{R_{np} H_0}}, \quad (17)$$

где H_0 – величина критического просвета в точке расположения препятствия с относительным расстоянием $K = R_1/R$ (R_1 – расстояние до препятствия).

$W_0(\mu)$ определяется по графику (рис. 12).

$h = H/H_0$ – относительный просвет над препятствием на интервале.

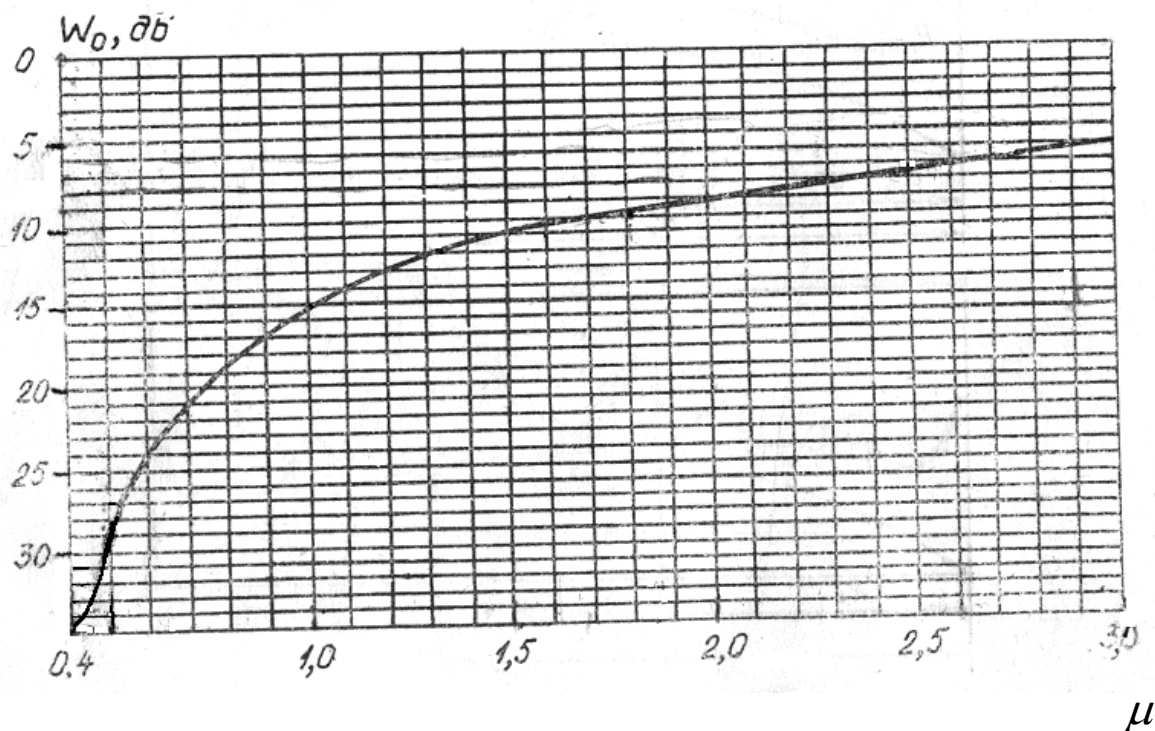


Рис.12

При расчёте W_{pi} [дБ] по формуле (16) h берется со знаком, соответствующим знаку H .

Значения W_{pi} [дБ] = $-V_p$ [дБ] могут быть определены непосредственно из графика (рис. 13).

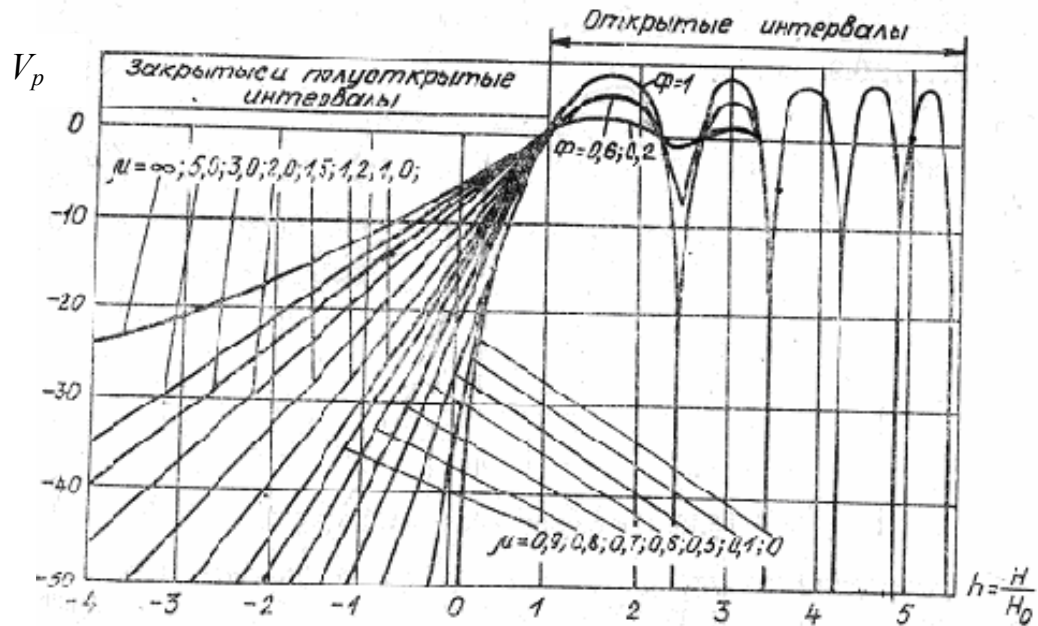


Рис. 13

Расчёт ослабления радиоволн на интервале с несколькими препятствиями производится в следующем порядке:

- определяются геометрические параметры интервала для каждого препятствия $R_1, R_{np1}, h_1; R_2, R_{np2}, h_2$ и т. д.;
- находится расстояние $X_{1,2}$ от более пологого препятствия, например, $R_{np1} > R_{np2}$ до точки пересечения скатов препятствий (рис. 14). При этом аппроксимирующие прямые препятствий производятся с помощью шаблонов;
- значение $X_{1,2}$ сравнивается с параметром β , на основе сравнения принимается решение об учёте совместного действия препятствий.

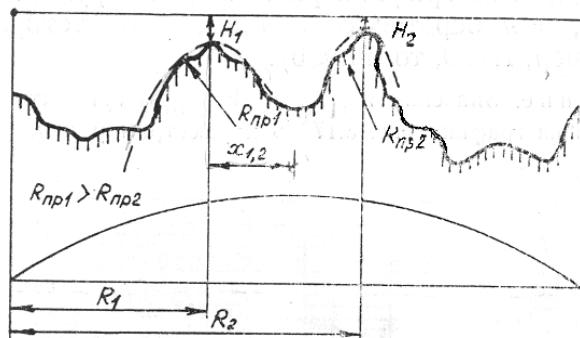


Рис. 14

Препятствия учитываются отдельно, если $X_{1,2} > \beta$, и наоборот, препятствия аппроксимируются одной сферой, для которой определяются геометрические параметры R_1, R_{np} и h .

Значения β [км] для различных длин волн приведены в таблице 2.

Таблица 2

λ , см	R_{np} , км									
	20	50	100	300	500	1000	3000	5000	6370	10 000
7	0,22	0,63	1,0	2,1	3,0	4,7	9,9	14	16	22
20	0,3	0,8	1,3	2,7	3,8	6,1	12,6	17,7	21	28
60	0,48	1,25	2,0	4,2	6,0	8,0	20	288	33	44
120	0,6	1,6	2,6	5,4	7,6	10,6	25,2	35,4	42	56
240	0,75	2,0	3,3	6,5	6,5	13	32	44	53	70
500	1,0	2,4	4,0	8,1	11,4	15,6	38	53	63	84

Значения β могут быть рассчитаны по формуле (18).

$$\beta = \sqrt[3]{R_{np}^2 \lambda}. \quad (18)$$

Таким образом, ослабление радиоволн для нескольких препятствий рассчитывается:

а) в случае $X_{1,2} < \beta$ – по методике, изложенной для одного препятствия, но с геометрическими параметрами одной эквивалентной сферы;

б) в случае $X_{1,2} > \beta$ – как сумма ослаблений, вносимых каждым препятствием, т. е.

$$W_{pi} = W_{p1} + W_{p2}. \quad (19)$$

При этом ослабления W_{p1} и W_{p2} вычисляются с учётом следующих положений: если одна из вершин, например, вершина второго препятствия лежит выше линии прямой видимости, то H_1 отсчитывается от прямой, соединяющей электрический центр антенны A_1 с вершиной второго препятствия (рис. 15).

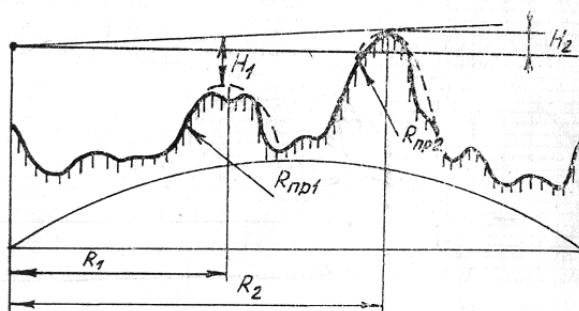


Рис.15

Если обе вершины лежат выше линии прямой видимости, то H_1 и H_2 отсчитываются от линий, соединяющих электрические центры антенн с вершиной другого препятствия (рис. 16).

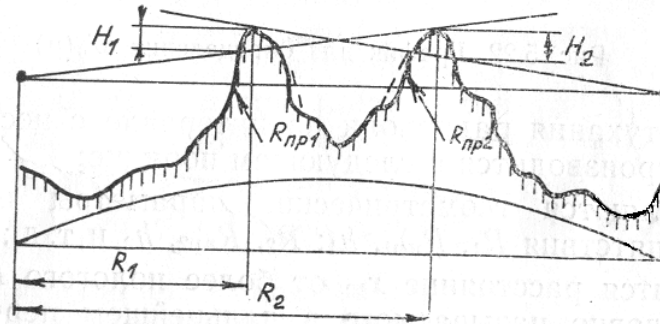


Рис. 16

5.5 Ослабление радиоволн, вносимое рельефом местности, на открытых интервалах

Ослабление рельефом W_{pi} на открытых интервалах определяется в соответствии с выражением (20).

$$W_{pi}[\text{дБ}] = -10 \lg(1 + \Phi_{\text{эф}}^2 - 2\Phi_{\text{эф}} \cos \frac{\pi}{3} h^2), \quad (20)$$

где $\Phi_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент отражения от поверхности Земли в области отражения. $\Phi_{\text{эф}}$ в зависимости от типа поверхности в точке отражения и диапазона используемых частот приведены в таблице 3; h – относительный просвет в точке отражения.

Таблица 3

Тип поверхности	Коэффициент $\Phi_{\text{эф}}$		
	$\lambda = 7$ см	$\lambda = 20$ см	$\lambda = 50$ см
Водная	0,8 - 0,95	0,9 - 0,95	0,9 - 0,95
Равнина, пойменный луг	0,8	0,8 - 0,9	0,9
Сухая почва, пески	0,3 - 0,5	0,4 - 0,6	0,6 - 0,7
Равнинные участки средне пересеченной местности	0,4 - 0,6	0,6 - 0,8	0,8 - 0,9
Лес	0,3 - 0,4	0,8	0,9

Из выражения (20) видно, что значения W_{pi} могут в зависимости от $\Phi_{\text{эф}}$ и h находиться в пределах от -3 дБ (при $\Phi=1$ и $\cos \frac{\pi}{3} h^2 = -1$), что соответствует увеличению уровня сигнала в точке приёма по сравнению с прямым лучом в два раза, до бесконечно большого значения $W_{pi} \rightarrow \infty$ при $\Phi=1$ и $\cos \frac{\pi}{3} h^2 = 1$ (случай компенсации поля прямой волны полем отражённой волны).

$W_{pi}[\text{дБ}]$ можно определить непосредственно по графику (рис.13).

Значения коэффициента отражения $\Phi_{эф}$ принимаются равными «нулю» и соответственно ослабление равно нулю, если:

- перепады высот Δh между отдельными препятствиями превышают величину $(0,3 \div 0,5)H_0$ при расстоянии Δr между вершинами препятствий не более 1 – 3 км, а пересечённый участок имеет протяжённость R_0 не менее $0,3R$ (рис. 17). Такую местность называют шероховатой;

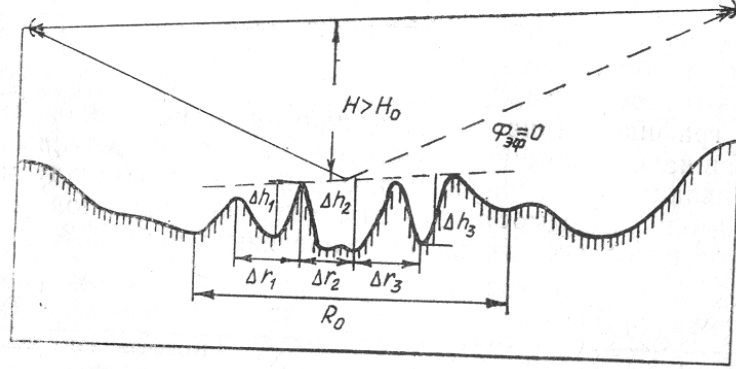


Рис. 17

- прямая А'Б, проходящая через точку отражения (рис. 18) пересекает неровности поверхности или местные предметы (эффект экранирования);

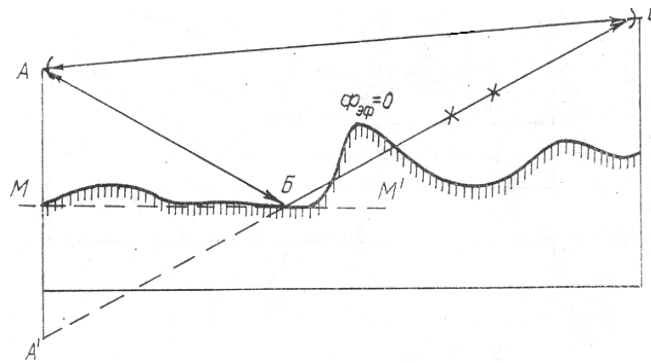


Рис. 18

- точка отражения В лежит вне областей, способных к отражению (рис.19);

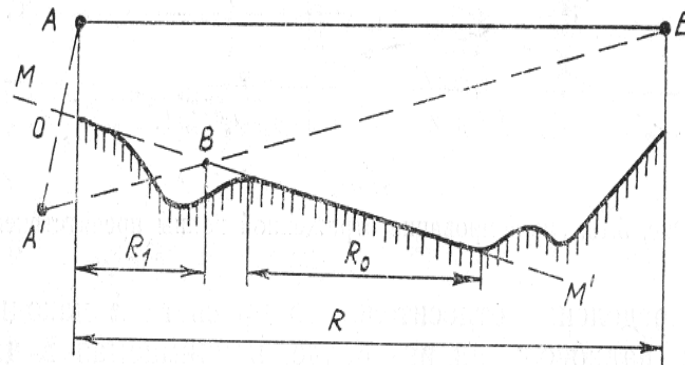


Рис. 19

- протяженность отражающей области менее 4 км. Эффективно отражающие площадки соизмеримы с размерами минимальных зон отражения $0,38R$.

При определении относительного просвета $h = H/H_0$ находится точка отражения радиоволны на интервале. Методика нахождения точки отражения зависит от формы отражающей поверхности. Точка отражения от плоской площадки, параллельной линии прямой видимости, находится на середине интервала (рис. 20).

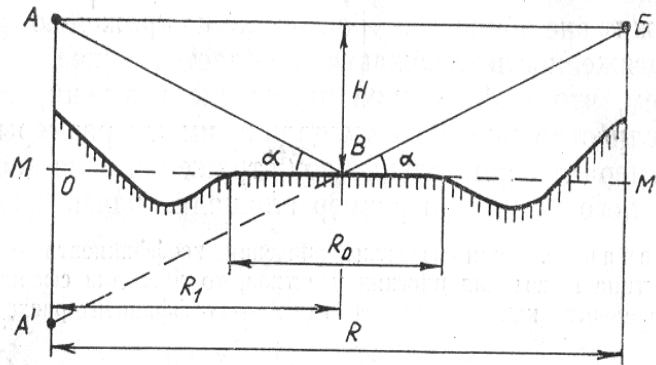


Рис. 20

Точка отражения от плоской площадки, не параллельной линии прямой видимости, находится путём дополнительных геометрических построений (рис. 21).

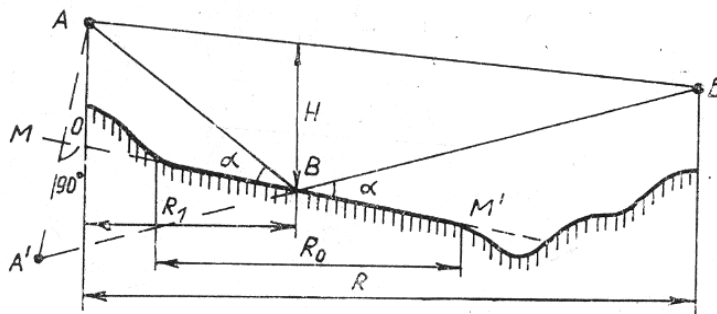


Рис. 21

Точка отражения от сферической поверхности определяется из равенства углов падения и отражения (рис. 22).

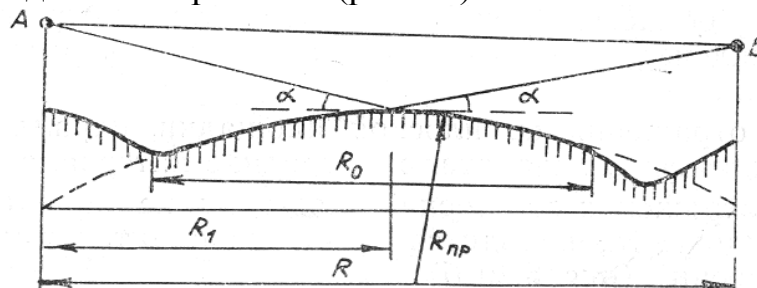


Рис. 22

6. РАСЧЁТ МЕДИАННОЙ МОЩНОСТИ СИГНАЛА НА ВХОДЕ ПРИЁМНИКА ИНТЕРВАЛА РРЛ

Величина медианной мощности сигнала на входе приёмника интервала РРЛ, т. е. мощность сигнала при отсутствии замираний, находится из первого уравнения передачи (1) при известных энергетических параметрах и медианном ослаблении на интервале РРЛ.

Медианное ослабление на интервалах РРЛ определяется как сумма ослабления сигнала свободным пространством и прилегающей поверхностью Земли, рассмотренные в параграфе 5.

7. РАСЧЁТ РЕАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЁМНИКА НА ИНТЕРВАЛЕ РРЛ

Под реальной чувствительностью $P_{рч.лр}$ приёмника интервала РРЛ понимается мощность радиосигнала, которая должна быть подана на вход приёмника данного интервала для обеспечения требуемого (нормированного) качества связи на интервале и в линии в целом. Реальная чувствительность зависит от режима работы РРЛ, т. е. вида сигнала, передаваемого по линии.

Реальная чувствительность $P_{рч.лр}$ при передаче телефонных сигналов определяется с учётом следующих исходных данных:

- требований к шумовой защищённости a_u ;
- требований к надёжности связи по замираниям $H\%$;
- максимального числа интервалов в линии M .

Расчёт $P_{рч.лр}$ производится при допущениях:

- все интервалы линии одинаковы по медианному ослаблению;
- законы распределения и параметры замираний на всех интервалах тождественны и соответствуют приведённым на рис. 2;
- замирания сигналов на интервалах независимы, т. е. нормированный процент времени замираний на одном интервале $T_1\%$ с допустимым временем замираний в линии в целом $T\%$ связан соотношением (8).

Величина $P_{рч.лр}$ определяется из соотношений связывающих мощность тепловых шумов в канале ТЧ одного интервала с мощностью сигнала на входе приёмника. Такие соотношения имеют вид:

- для интервала РРЛ с ЧРК-ЧМ

$$P_{шт} = \frac{\Pi_u k T \Delta F_k}{P_{лр}} \left(\frac{F_N}{\Delta f_k} \right)^2 P_c K_{пс}^2 \mu_{лр}; \quad (21)$$

- для интервала РРЛ с ФИМ-АМ

$$P_{шт} = \frac{1,2 \Pi_u k T \Delta F_k}{P_{лр.ср}} \cdot \frac{\tau_0 N_k}{\Delta t_m^2 \Delta F_{вф}} P_c K_{пс}^2, \quad (22)$$

где Π_u – коэффициент шума приёмника;

$$kT = 4 \cdot 10^{-21} \text{ Вт/Гц};$$

ΔF_k – полоса ЭППЧ $\Delta F_k = 3,1 \text{ кГц}$;

F_N – средняя частота верхнего в групповом спектре канала;

P_c – номинальная мощность телефонного сигнала на выходе канала ТЧ;

$K_{ПС}$ – психофотометрический коэффициент шума $K_{ПС} = 0,75$;

$\beta_{ПР}$ – коэффициент предискажений $\beta_{ПР} = 0,4$;

$P_{ПР}$, $P_{ПР.СР}$ – соответственно мощности сигналов на входе приёмников ЧРК-ЧМ и ФИМ-АМ;

τ_0 – длительность радиоимпульса на входе приёмника;

Δt_m – девиация импульсов;

$\Delta F_{ВФ}$ – полоса пропускания видеофильтра приёмника, согласованного с длительностью принимаемых видеоимпульсов;

N_k – число каналов;

Δf_k – девиация частоты на один канал.

Выражения (21) и (22) позволяют рассчитать необходимую мощность сигнала на входе приёмника $P_{РЧ.ПР}$ по нормированному значению мощности тепловых шумов на одном интервале $P_{ШТ1}$ или, соответственно, из требуемой шумовой защищённости по тепловым шумам на одном интервале $a_{ШТ1}$.

$$a_{ШТ1} = \frac{P_c}{P_{ШТ1}}. \quad (23)$$

Таким образом, учтя выражение (23), для РРЛ с ЧРК-ЧМ:

$$P_{РЧ.ПР} = a_{ШТ1} \Pi_u kT \Delta F_k \left(\frac{F_N}{\Delta f_k} \right) K^2_{ПС} \beta_{ПР}; \quad (24)$$

для РРЛ с ФИМ-АМ:

$$P_{РЧ.ПР} = 1,2 a_{ШТ1} \Pi_u kT \Delta F_k N_k \frac{\tau_0}{\Delta t_u^2 \Delta F_{ВФ}} K^2_{ПС}. \quad (25)$$

Требования к $a_{ШТ1}$ пересчитываются из норм к шумовой защищённости РРЛ a_u по следующему алгоритму: мощность шумов на выходе канала ТЧ РРЛ складывается из тепловых шумов, шумов нелинейных переходов и аппаратурных шумов:

$$P_{Ш} = P_{ШТ} + P_{ШНП} + P_{ШАП}. \quad (26)$$

Накопление шумов в линии зависит от типа указанных шумов. Накопление тепловых и аппаратурных шумов подчиняется аддитивному закону, т. е.

$$P_{шт} = \sum_{i=1}^M P_{штi}, \quad (27)$$

$$P_{шАП} = \sum_{k=1}^{M_{ТЧ}} P_{шАПк}, \quad (28)$$

где $P_{штi}$ – мощность тепловых шумов, вносимая i -м интервалом;

M – число интервалов в линии;

$P_{шАПк}$ – мощность аппаратурных шумов на k -м переприёмном участке по ТЧ;

$M_{ТЧ}$ – число переприёмных участков по ТЧ.

Накопление шумов нелинейных переходов подчиняется более сложным законам.

При расчёте реальной чувствительности приёмника отказываются от точного учета механизмов накопления шумов, пользуясь тем обстоятельством, что доля аппаратурных шумов и шумов нелинейных переходов невелика по сравнению с тепловыми шумами в момент глубоких замираний. Соотношение между $P_{шт}$ и P_u имеет вид

$$P_{шт} = \alpha P_u, \quad (29)$$

где α – для РРЛ с ЧРК-ЧМ с числом каналов $N_k \leq 12$ $\alpha = 0,85 \div 0,95$; $12 < N_k \leq 60 \Rightarrow \alpha = 0,6 \div 0,4$; для РРЛ с ФИМ-АМ $\alpha = 0,85-0,95$.

Норма на шумовую защищённость на одном интервале многоинтервальной РРЛ с замираниями имеет вид

$$a_{шт1} = \frac{1}{\alpha} a_u \left[1 + \frac{(M-1)f(\sigma)}{W_3(T_1\%)} \right]. \quad (30)$$

Следовательно, $P_{рч.пр}$ вычисляется из соотношений:

для РРЛ с ЧРК-ЧМ:

$$P_{рч.пр} = \frac{1}{\alpha} a_u \left[1 + \frac{(M-1)f(\sigma)}{W_3(T_1\%)} \right] \Pi_u k T \Delta F_K \left(\frac{F_N}{\Delta f_k} \right)^2 K_{ПС}^2 \beta_{пр}; \quad (31)$$

для РРЛ с ФИМ-АМ:

$$P_{рч.пр.ср} = \frac{1,2}{\alpha} a_u \left[1 + \frac{(M-1)f(\sigma)}{W_3(T_1\%)} \right] \Pi_u k T \Delta F_K \frac{\tau_0 N_K}{\Delta t_m^2 \Delta F_{ВФ}} K_{ПС}^2; \quad (32)$$

для РРЛ $f(\sigma) \approx 1$.

8. РАСЧЁТ РЕАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЁМНИКА РРС ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ЦИФРОВЫХ РАДИОСИГНАЛОВ

Реальная чувствительность приёмника РРС в этом режиме определяется скоростью передачи сигналов, методом манипуляции несущей (АМ, ЧМ, ФМ, ОФМ), способом обработки сигналов в приёмнике (когерентная, некогерентная), требованиями к достоверности передачи и др.

При когерентном приёме реальная чувствительность $P_{рч}$ вычисляется для одного интервала с учетом требований к достоверности $P_{ош}$, которые определяются выражением

$$P_{ош} = \frac{1}{2} [1 - \Phi(\gamma h)] , \quad (33)$$

где $\Phi(\gamma h) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\gamma h} e^{-t^2/2} dt$ - функция Крампа, значения которой для различных значений γh приводятся в математических справочниках.

h – отношение сигнал/шум на входе решающей схемы, равное

$$h = \frac{P_c}{\Pi_u k T \Delta f_{np}} , \quad (34)$$

P_c – реальная чувствительность приёмника;

Δf_{np} – полоса пропускания приёмника $\Delta f_{np} = \frac{1}{\tau_u} = B$;

τ_u – длительность символа;

B – скорость передачи;

Π_u – коэффициент шума приёмника;

γ – коэффициент, зависящий от метода манипуляции: для ФМ $\gamma = \sqrt{2}$, для ЧМ

$\gamma = 1$, для АМ $\gamma = \frac{1}{\sqrt{2}}$.

При известном методе манипуляции и заданной вероятности ошибки $P_{ош}$ на интервале РРЛ можно определить требуемое отношение сигнал\шум на входе решающей схемы « h » по графику зависимости $P_{ош} = f(\gamma h)$.

Определив необходимое значение h из выражения (34) можно определить требуемый уровень сигнала на входе приёмника P_c , т. е. его реальную чувствительность $P_{рч}$

$$P_c = P_{рч} = h \Pi_u k T \Delta f_{np} = h \Pi_u k T T . \quad (35)$$

Следует иметь в виду, что накопление ошибок в линии происходит аддитивно, т. е.

$$P_{ош\Sigma} = \sum_{i=1}^M P_{ошi}$$

где $P_{ошi}$ - вероятность ошибок на i – м интервале, и принимая во внимание, что вероятность ошибок на интервале с замираниями на несколько порядков выше, чем на интервалах без замираний, можно считать вероятность ошибки во всей линии равной вероятности ошибки на интервале с замираниями. Поэтому необходимый уровень сигнала на входе приёмника (его реальная чувствительность) на одном интервале должна быть меньше медианного уровня сигнала на входе приёмника, обеспеченная энергетикой интервала, на величину запаса уровня сигнала на замирания. Величина этого запаса определяется по $H\%$ надёжности связи.

В технических данных для отдельных цифровых РРЛ как отечественного, так и иностранного производства, приводятся нормы реальной чувствительности приёмника $P_{рч}$ в децибелах по отношению к 1 мВт $P_{рч}$ (дБм), при которой обеспечивается норма на вероятность ошибки $T_{ош} = 10^{-3}$. Поэтому в этих случаях нет необходимости производить расчёт реальной чувствительности по формуле (35).

9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСА ВЧ УРОВНЯ q_i И НАДЁЖНОСТИ СВЯЗИ НА ИНТЕРВАЛЕ РРЛ

Определение запаса уровня q_i производится в соответствии с формулой (36).

$$q_i [\text{дБ}] = P_{\text{ПР.МЕД}i} [\text{дБ/Вт}] - P_{\text{РЧ.ПР}} [\text{дБ/Вт}] \quad (36)$$

где $P_{\text{ПР.МЕД}i}$ – медианная мощность на входе приёмника;

$P_{\text{РЧ.ПР}}$ – реальная чувствительность приёмника.

Определение надёжности связи на интервале $H_i\% = 100 - T_i\%$ производится по полученным значениям q_i по графикам $T_i\% = f(q_i = W_3)$ (рис. 2).

Вывод о пригодности РРЛ делается на основании сравнения полученной потери надёжности на каждом интервале РРЛ $T_i\%$ с допустимой потерей надёжности на интервалах РРЛ $\frac{T\%}{M}$. Если $T_i\% \leq \frac{T\%}{M}$, то интервал считается пригодным для обеспечения связи с заданным качеством.

10. ПРИМЕР РАСЧЁТА РРЛ

10.1 Исходные данные

Произвести расчёт участка РРЛ протяжённостью $L_{уч}=500$ км, который будет наращиваться до линии полной протяжённости $L=1000$ км, по исходным данным:

1. Тип РРЛ - ФИМ-АМ;
2. Число каналов $N_k = 24$;
3. Диапазон используемых частот – 2 ГГц;
4. Энергетические параметры:
 - мощность передатчика (средняя) $P_{ПЕР} = 4$ Вт;
 - коэффициент усиления антенн $G_{А.ПЕР} = G_{А.ПР} = 25$ дБ;
 - ослабление фидерных трактов $W_{ф.ПЕР} = W_{ф.ПР} = 6$ дБ;
 - коэффициент шума приемника $L_u = 10$ дБ.
5. Девиация импульсов $\Delta t_m = 1$ мкс;
6. Групповая частота следования импульсов $F_N = 192$ кГц;
7. Длительность импульсов $\tau_0 = 0,4$ мкс;
8. Полоса пропускания тракта ПЧ $\Delta f_{ПЧ} = 7$ МГц;
9. Полоса пропускания видеофильтра $\Delta F_{ВФ} = 1,5$ МГц;
10. Среднее расстояние на интервале $R = 33$ км;
11. Максимальное расчетное число интервалов в линии полной протяженности $M=30$.
12. Требования к качеству связи:
 - $a_u = 36$ дБ; $H\% = 95\%$ ($T\% = 5\%$).

10.2 Расчёт интервалов РРЛ

Расчёт ослабления радиоволн на i -м интервале РРЛ

Геометрические параметры интервала

Из снятого профиля интервала (рис.23) имеем:

$$R=40 \text{ км}; H=8 \text{ м}; R_1=16 \text{ км}; K = \frac{R_1}{R} = \frac{16}{40} = 0,4.$$

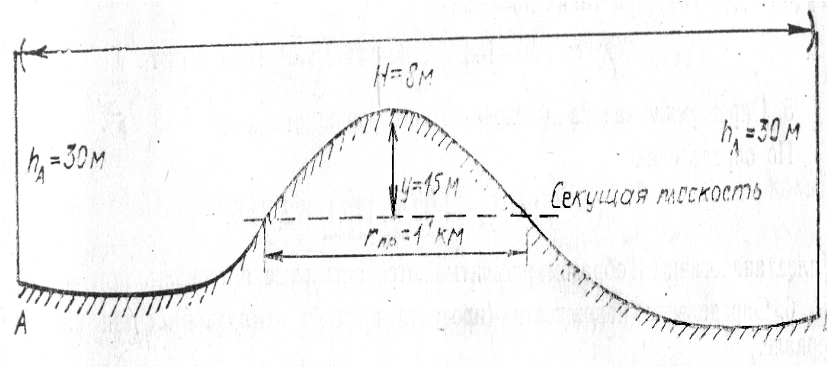


Рис. 23

Определяем радиус препятствия на интервале расчетным путем:

$$R_{пр} = \frac{r_{пр}^2}{8U}.$$

По рисунку профиля интервала определяем $r_{пр}$ и U , $r_{пр} = 11$ км, $U = 15$ м.

$$R_{пр} = \frac{11^2}{8 \cdot 15 \cdot 10^{-3}} \approx 1000 \text{ км.}$$

Определяем по рисунку профиля просвет $H = 8$ м.

Критический просвет на интервале в точке препятствия:

$$H_0 = \sqrt{\frac{1}{3} \lambda R K (1 - K)} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot 0,15 \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 0,4 \cdot (1 - 0,4)} = 23 \text{ м.}$$

Так как $0 < H < H_0$, интервал считается полуоткрытым.

Ослабление свободного пространства на трассе интервала определяет из выражения:

$$W_{свi} [\text{дБ}] = 122 + 20 \lg \frac{R [\text{км}]}{\lambda [\text{см}]} = 122 + \lg \frac{40}{15} = 130 \text{ дБ.}$$

Ослабление рельефом местности для полуоткрытых интервалов определяем из выражения

$$W_{pi} [\text{дБ}] = W_0(\mu)(1 - h),$$

$$\text{где } \mu = \sqrt[3]{\frac{R^2 \cdot K^2 (1 - K)^2}{R_{пр} \cdot H_0}} = \sqrt[3]{\frac{(40)^2 \cdot (0,4)^2 \cdot (0,6)^2}{1000 \cdot 23 \cdot 10^{-3}}} \approx 1,6;$$

$$h = \frac{H}{H_0} = \frac{8}{23} = 0,35.$$

По графику $W_0 = f(\mu)$ (рис.12) определяем $W_0(\mu)$. Его величина составляет 10 дБ.

Итак, ослабление рельефом местности на интервале трассы составляет:

$$W_{pi} [\text{дБ}] = 10(1 - 0,35) = 6,5 \text{ дБ.}$$

Медианное ослабление на интервале составляет:

$$W_i [\text{дБ}] = W_{CBi} + W_{Pi} = 130 + 6,5 = 136,5 \text{ дБ.}$$

Медианная мощность на входе приёмника i -го интервала определяем из выражения:

$$P_{\text{ПР.МЕД.}i} = P_{\text{ПЕР}} [\text{дБ/Вт}] + 2G_A [\text{дБ}] - 2W_\phi [\text{дБ}] - W_i [\text{дБ}] = 6 + 2 \cdot 25 - 2 \cdot 6 - 136,5 = -92,5 [\text{дБ/Вт}].$$

Реальную чувствительность приёмника определяем из выражения:

$$P_{\text{РЧ.ПР.СР}} = 1,2a_u \frac{1}{\alpha} \left[1 + \frac{(M-1)}{W_3(T_1\%)} \right] \Pi_u k T \Delta F_K \frac{\tau_0 N_K}{\Delta t_m^2 \Delta F_{B\Phi}} \cdot K_{\text{ПС}}^2.$$

Или в логарифмических единицах:

$$P_{\text{РЧ.ПР.СР}} \left[\frac{\text{дБ}}{\text{Вт}} \right] = a_u [\text{дБ}] + 10 \lg \frac{1,2}{a} \left[1 + \frac{M-1}{W_3(T_1\%)} \right] + \Pi_u [\text{дБ}] + 10 \lg(k T \Delta F_K) + \\ + 10 \lg \left(\frac{\tau_0 N_K}{\Delta t_m^2 \Delta F_{B\Phi}} \right) + 10 \lg K_{\text{ПС}}^2,$$

где для линии полной протяженности $M=33$:

$$T_1\% = \frac{T\%}{M} = \frac{5\%}{33} = 0,16\%;$$

$$a = 0,94; a_{\text{шПС}} = 36 \text{ дБ.}$$

Величина $W_3(T_1\%)$ для $T_1\% = 0,16\%$ по графику $W_3 = f(T_1\%)$ (рис. 2) равна 21 дБ, или $W_3(0,16)$ в натуральных числах $W_3(0,16) = 120$.

Итак,

$$P_{\text{РЧ.ПР.СР}} = 36 \text{ дБ} + 10 \lg \frac{1,2}{0,9} \left[1 + \frac{32}{120} \right] + 10 \text{ дБ} + 10 \lg 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 3,1 \cdot 10^3 + \\ + 10 \lg \frac{0,4 \cdot 10^{-6} \cdot 24}{(10^{-6})^2 \cdot 1,5 \cdot 10^6} + 10 \lg (0,75)^2 = 36 + 10 \lg 1,6888 + 10 + (10 \lg 12,534 - 10 \lg 10^{-18}) + \\ + 10 \lg 6,4 + 10 \lg 0,56 = 36 + 2,2 + 10 - 169 + 8 - 2,6 = -115,4 \text{ дБ/Вт.}$$

Запас высокочастотного уровня на i -м интервале составляет:

$$q_i = P_{\text{ПР.МЕД.}i} - P_{\text{РЧ.ПР.СР}} = -92,5 \frac{\text{дБ}}{\text{Вт}} - (-115,4 \frac{\text{дБ}}{\text{Вт}}) = 22,9 \text{ дБ.}$$

По графику (рис. 2) для $q_i = 22,9$ дБ имеем $T_1\% = 0,11\%$.

Вывод. Рассчитываемая величина потери надёжности на i -м интервале $T_1\% = 0,11\%$ меньше допустимой её величины $T_1\% = 0,16\%$.

Следовательно, на данном интервале связь может быть обеспечена с требуемым качеством.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**Основная:**

1. Военные системы радиорелейной и тропосферной связи/ под ред. А. П. Родимова. – Л.: ВАС, 1984.
2. Теория электрической связи/ под ред. Д. Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 1999.

Дополнительная:

1. Чердынцев, В. А. Радиотехнические системы./В. А. Чердынцев. – Минск: Вышэйшая школа, 1988.
2. Финк, Л. М. Теория передачи дискретных сообщений./Л. М. Финк. – М.: Советское радио, 1963.

Учебное издание
Садомовский Александр Савинович
Гульшин Владимир Александрович
Расчёт радиорелейных линий (РРЛ) связи
Методические указания

Редактор Н. А. Евдокимова

Подписано в печать 30.04.2005. Формат 60x84/16. Бумага тип.№1.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,63. Уч. – изд. л. 1,00. Тираж 100 экз.
Заказ .

Ульяновский государственный технический университет
432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.

Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.