

ГОСТ Р 53363-2009

**Цифровые
радиорелейные линии.
Показатели качества.
Методы расчета**

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Настоящий стандарт распространяется на цифровые радиорелейные линии прямой видимости, работающие в полосах частот от 3,4 до 40,5 ГГц.

Стандарт устанавливает методы расчета следующих основных показателей качества цифровых радиорелейных линий (ЦРРЛ), связанных с надежностью аппаратуры и условиями распространения радиоволн:

- коэффициента неготовности;
- коэффициента сильнопораженных (ошибками) секунд.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Заданные значения показателей качества:

SESR - заданное значение коэффициента сильнопораженных секунд

$K_{\text{НЕГ}}$ - заданное значение коэффициента неготовности..

Технические характеристики:

f - частота, ГГц;

$P_{\text{ПРД}}$ - мощность передатчика, дБВт;

$G_{\text{ПРД}}$ - коэффициент усиления передающей антенны, дБи;

$G_{\text{ПРМ}}$ - коэффициент усиления приемной антенны, дБи;

$L_{\text{фПРД}}$ - потери в АФТ передатчика, дБ;

$L_{\text{фПРМ}}$ - потери в АФТ приемника, дБ;

$P_{\text{реалПРМ}}$ - реальная чувствительность приемника (при заданном значении P_{BER}), дБВт;

поляризация (вертикальная, горизонтальная);

C_S - скорость передачи информации, Гбит/с;

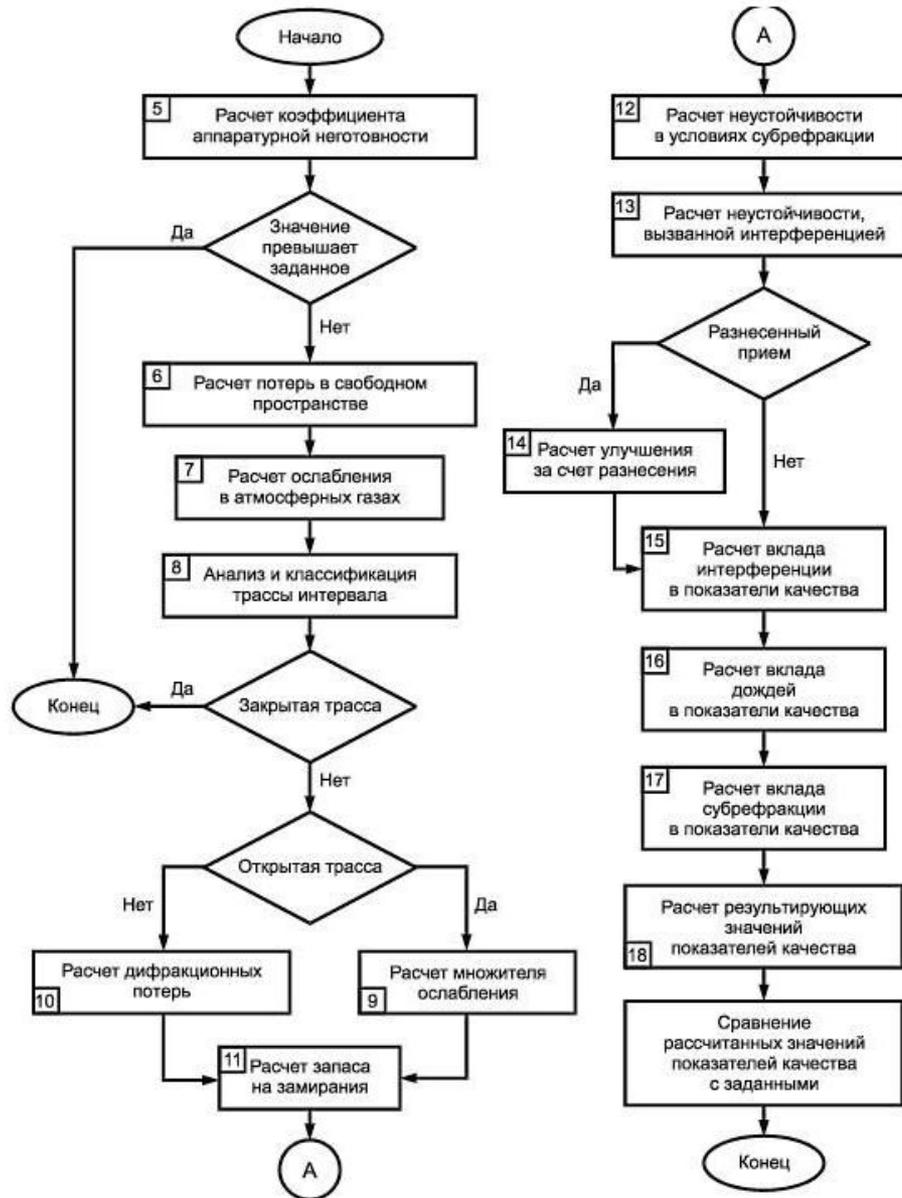
M - число уровней модуляции;

W_M - ширина сигнатуры, ГГц;

B_M - глубина сигнатуры (при заданном), дБ;

t_0 - время задержки отраженного сигнала при измерении параметров сигнатур, нс;

Блок схема алгоритма расчета показателей качества



Расчет коэффициента аппаратной неготовности пролета радиолинии без резервирования

Расчет проводят в порядке, указанном ниже.

5.1.1 Определяют значения T и T_a всех узлов каждой из двух ЦРРС.

5.1.2 В зависимости от конструктивного оформления радиорелейного оборудования распределяют узлы ЦРРС₁ по двум группам: Гр1 — узлов, работающих вне помещения (на открытом воздухе), и Гр2 — узлов, работающих в помещении (аппаратной). Оценивают значения T_{a1} для каждой группы ($T_{a1гр1}$ и $T_{a1гр2}$). Проводят аналогичные действия для ЦРРС₂.

5.1.3 Рассчитывают наработку на отказ узлов, входящих в каждую группу $T_{грj}$:

$$T_{грj} = (T_1^{-1} + T_2^{-1} + \dots + T_n^{-1})^{-1}, \quad (5.1)$$

где T_i — средняя наработка на отказ i -го узла j -й группы, $j = 1, 2$.

5.1.4 Для ЦРРС₁ рассчитывают коэффициент аппаратной неготовности для каждой группы с учетом своего значения $T_{a1гр}$:

$$K_{\text{нег. апп1}} = \frac{T_{a1гр1}}{T_{гр1}},$$
$$K_{\text{нег. апп2}} = \frac{T_{a1гр2}}{T_{гр2}} \quad (5.2)$$

5.1.5 Вычисляют значение $K_{\text{нег. апп}}$ для ЦРРС₁:

$$K_{\text{нег. апп(ЦРРС}_1)} = K_{\text{нег. апп1}} + K_{\text{нег. апп2}}. \quad (5.3)$$

5.1.6 Выполняя действия аналогично 5.1.3—5.1.5, вычисляют значение $K_{\text{нег. апп(ЦРРС}_2)}$.

5.1.7 Рассчитывают значение коэффициента аппаратной неготовности интервала ЦРРЛ:

$$K_{\text{нег. апп}} = K_{\text{нег. апп(ЦРРС}_1)} + K_{\text{нег. апп(ЦРРС}_2)}. \quad (5.4)$$

6. Расчет потерь распространения радиосигнала в свободном пространстве

$$L_0 = 92,45 + 20\lg(f) + 20\lg(R)$$

7. Расчет ослабления радиосигнала в атмосферных газах

Расчет ослабления радиосигнала в атмосферных газах проводят в порядке, указанном ниже.

7.1 С помощью приведенных в [1] климатических параметров для местности, в которой располагается интервал ЦРРЛ, определяют наибольшее (июль, август) среднемесячное значение:

- температуры воздуха t , °C;
- атмосферного давления p , мбар;
- плотности водяного пара (абсолютной влажности воздуха) ρ , г/м³.

7.2 Рассчитывают удельное ослабление радиосигнала в кислороде воздуха γ_O , дБ/км, по формуле

$$\gamma_O = \left[\frac{7,2r_t^{2,8}}{f^2 + 0,34r_p^2r_t^{1,6}} + \frac{0,62\xi_3}{(54-f)^{1,6\xi_1} + 0,83\xi_2} \right] f^2 r_p^2 \cdot 10^{-3}, \quad (7.1)$$

где f измеряют в ГГц, $r_p = p/1013$, $r_t = 288/(273 + t)$;

$$\begin{aligned} \xi_1 &= r_p^{0,717} r_t^{18132} \exp[0,0156(1-r_p) - 1,6515(1-r_t)]; \\ \xi_2 &= r_p^{0,5146} r_t^{4,6368} \exp[-0,1921(1-r_p) - 5,7416(1-r_t)]; \\ \xi_3 &= r_p^{0,3414} r_t^{-6,585} \exp[0,2130(1-r_p) - 8,5854(1-r_t)]. \end{aligned}$$

7.3 Рассчитывают удельное ослабление радиосигнала в водяном паре γ_{H_2O} , дБ/км, по формуле

$$\begin{aligned} \gamma_{H_2O} &= \left\{ \frac{3,98\eta_1 \exp[2,23(1-r_t)]}{(f-22,235)^2 + 9,42\eta_1^2} g(f, 22) + \frac{1,196\eta_1 \exp[0,7(1-r_t)]}{(f-183,3)^2 + 1,14\eta_1^2} + \right. \\ &+ \frac{0,08\eta_1 \exp[6,44(1-r_t)]}{(f-321,226)^2 + 6,29\eta_1^2} + \frac{3,66\eta_1 \exp[16(1-r_t)]}{(f-325,153)^2 + 9,22\eta_1^2} + \frac{25,37\eta_1 \exp[1,09(1-r_t)]}{(f-380)^2} + \\ &+ \frac{17,4\eta_1 \exp[146(1-r_t)]}{(f-448)^2} + \frac{844,6\eta_1 \exp[0,17(1-r_t)]}{(f-557)^2} g(f, 557) + \\ &+ \left. \frac{290\eta_1 \exp[0,4(1-r_t)]}{(f-752)^2} g(f, 752) + \frac{83328\eta_2 \exp[0,99(1-r_t)]}{(f-1780)^2} g(f, 1780) \right\} \times \\ &\times f^2 r_p^{2,5} \cdot 10^{-4}, \end{aligned}$$

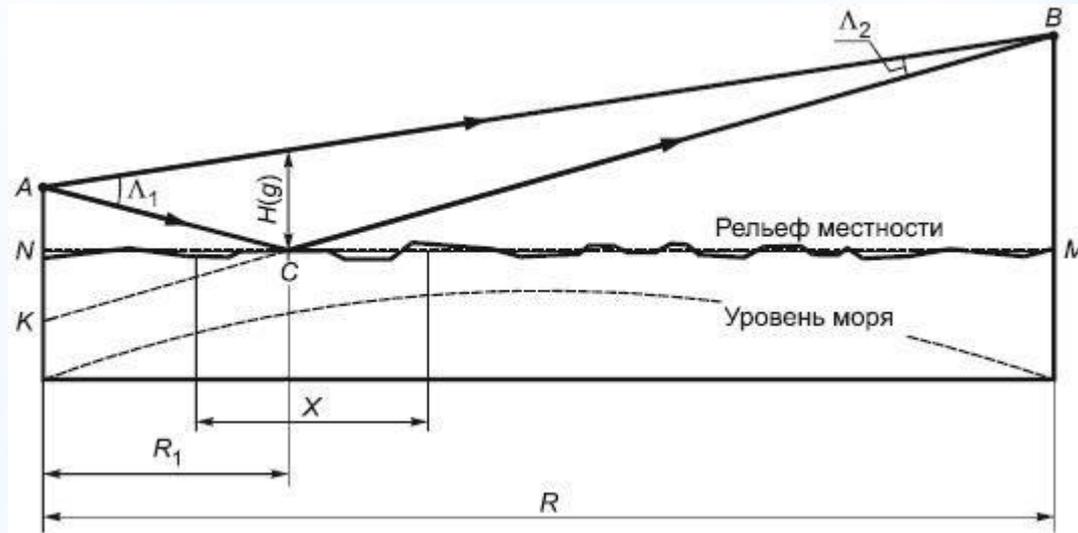
где

$$\begin{aligned} \eta_1 &= 0,955r_p r_t^{0,68} + 0,006\rho; \\ \eta_2 &= 0,735r_p r_t^{0,5} + 0,0353 r_t^4 \rho; \\ g(f, f_i) &= 1 + \left(\frac{f-f_i}{f+f_i} \right)^2. \end{aligned}$$

7.4 Рассчитывают ослабление в атмосферных газах A_a , дБ, на интервале ЦРРЛ длиной R , км, по формуле

$$A_a = (\gamma_O + \gamma_{H_2O})R. \quad (7.3)$$

8.1 Построение профиля радиорелейного интервала



8.1 Построение профиля радиорелейного интервала

8.2.1 Определяют просвет трассы $H(g)$ как минимальную разность высот между профилем радиорелейного интервала и прямой, соединяющей центры левой и правой антенн, с высотами h_1 и h_2 соответственно. При прохождении трассы над водной поверхностью значение просвета трассы H и расстояние до определяющей его точки R_1 рассчитывают по формулам:

$$H = \frac{(h_1 - R_1^2 / (2a_2))R_2 + (h_2 - R_2^2 / (2a_2))R_1}{R}, \quad R_1 = R(1 + b)/2, \quad (8.3)$$

где

$$R_2 = R - R_1; \quad b = 2\sqrt{\frac{m+1}{3m}} \cos\left(\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos\left[3\frac{c}{2}\sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}}\right]\right);$$

$$m = \frac{R^2}{4a_2[h_2 + h_1]}; \quad c = \frac{h_1 - h_2}{h_2 - h_1}$$

8.2.2 В зависимости от просвета трассы подразделяют на:

а) открытые, для которых $H > H_0$, где H_0 , м, соответствует радиусу минимальной зоны Френеля:

$$H_0 = \sqrt{\frac{1}{3} \frac{\lambda R_1 (R - R_1)}{R}} = \sqrt{\frac{1}{3} \lambda R k (1 - k)}, \quad (8.4)$$

где k — относительная координата точки, определяющей просвет на трассе,

λ — длина волны в тех же единицах, что и R ;

б) полуоткрытые, для которых $H_0 \geq H > 0$;

в) закрытые, для которых $H < 0$.

8.2.3 Определяют относительный просвет $p(g)$ на трассе:

$$p(g) = H(g)/H_0. \quad (8.5)$$

8.2 Анализ трассы

Под анализом трассы понимают процедуру определения такого значения g из диапазона его возможных изменений, при котором трасса переходит из открытой в полукрытую. При этом выделяют два поддиапазона, один из которых соответствует условиям, когда трасса будет открытой (поддиапазон О), другой — условиям, когда трасса не будет открытой, то есть либо полукрытой, либо закрытой (поддиапазон ПЗ).

8.3.1 Определяют нижнюю и верхнюю границы диапазона возможных изменений g , m^{-1} , как $g_n = \max(g_{кр}, g - 4,3\sigma)$ и $g_b = g + 4,3\sigma$ соответственно, где g и σ — среднее значение и среднеквадратическое отклонение эффективного вертикального градиента диэлектрической проницаемости воздуха (см. приложение Б, таблица Б.1), $g_{кр} = -31,4 \cdot 10^{-8}$ (критическая рефракция).

8.3.2 Для условий средней рефракции с помощью приведенных выше процедур строят профиль интервала и проводят классификацию трассы. Значение $H(\bar{g}) \leq 0$ означает, что трасса выбрана некорректно и следует увеличить высоту подвеса антенн либо выбрать другую трассу.

8.3.3 При $H(\bar{g}) > 0$ определяют граничное значение $g_r (H(g_r) = H_0)$:

$$g_r = g - 4 \frac{H_0 - H(g)}{R^2 k (1 - k)}. \quad (8.6)$$

8.3.4 Если значение g_r принадлежит диапазону (g_n, g_b) , то оно определяет поддиапазоны О и ПЗ как (g_n, g_r) и (g_r, g_b) соответственно.

8.3.5 Если значение g_r не принадлежит диапазону (g_n, g_b) то:

при $H(g) < H_0$ поддиапазон О = \emptyset и при всех возможных значениях g трасса не будет открытой, то есть ПЗ = (g_n, g_b) ;

при $H(\bar{g}) > H_0$ поддиапазон ПЗ = \emptyset и при всех возможных значениях g трасса будет открытой, то есть О = (g_n, g_b) .

9.1 Расчет местоположения точки отражения для водной поверхности

9.1.1 Для водной поверхности по формулам (8.3) рассчитывают расстояние от левой антенны (точка А) до точки отражения С, численно равное R_1 , и значение просвета $H(g)$ в точке отражения (см. рисунок 9.1). Разность хода между прямым и отраженным лучами рассчитывают по формулам:

при $g \geq g_{сп}$:

$$\begin{aligned} \Delta r = & \sqrt{(a_3 + h_1)^2 + a_3^2 - 2a_3(a_3 + h_1)\cos \alpha_1} + \\ & + \sqrt{(a_3 + h_2)^2 + a_3^2 - 2a_3(a_3 + h_2)\cos \left(\frac{R}{a_3} - \alpha_1 \right)} - \\ & - \sqrt{(a_3 + h_1)^2 + (a_3 + h_2)^2 - 2(a_3 + h_1)(a_3 + h_2)\cos \left(\frac{R}{a_3} \right)}. \end{aligned} \quad (9.1)$$

при $g < g_k$:

$$\Delta r = \frac{[H(g)]^2}{2R \cdot k(1-k)}. \quad (9.2)$$

9.1 Расчет местоположения точки отражения для пересеченной местности

9.1.3 Для пересеченной местности выполняют следующие действия (см. рисунок 9.3).

9.1.3.1 На профиле, параллельно линии AB , проводят прямую $A'B'$, отстоящую от вершины неоднородности на расстоянии Δy , равное значению H_0 .

9.1.3.2 Определяют расстояние r между точками, в которых прямая $A'B'$ пересекает неоднородность рельефа.

9.1.3.3 Если выполняется условие

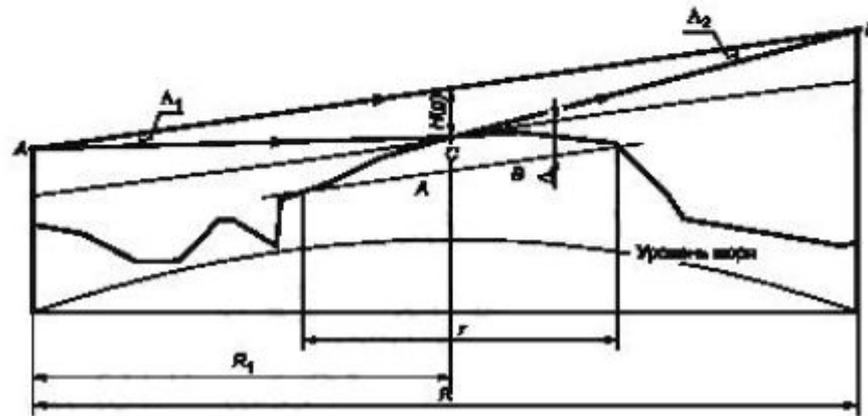
$$r(\Delta y = H_0) \geq 10. \quad (9.3)$$

то неоднородность может быть аппроксимирована сферой, радиус которой,

$$b = \frac{r^2}{8\Delta y}. \quad (9.4)$$

9.1.3.4 За точку отражения принимают вершину неоднородности (точку с наименьшим просветом $H(g)$). Если $r(\Delta y) < 10$, то неоднородность рассматривают как сформированную локально плоскими участками.

9.1.3.5 Разность хода между прямым и отраженным лучами рассчитывают по формуле (9.2).



9.2 Расчет множителя ослабления по интерференционным формулам

9.2.1 При наличии на трассе одной точки отражения модуль множителя ослабления V рассчитывают по формуле

$$V = \sqrt{1 + \Phi^2 - 2\Phi \cos[2\pi (\rho(g))^2 / \lambda]}, \quad (9.5)$$

где Φ — модуль коэффициента отражения от подстилающей поверхности;
 $\rho(g)$ — относительный просвет в точке отражения:

$$\rho(g) = \sqrt{6 \cdot \Delta r \lambda}. \quad (9.6)$$

$\Delta r = n\lambda$, ($n = 1, 2, 3, \dots$) — условие интерференционного минимума;
 $\Delta r = \lambda(2m - 1)/2$, ($m = 1, 2, 3, \dots$) — условие интерференционного максимума.

П р и м е ч а н и е — В зависимости от характера поверхностных отражений трассы подразделяют на пересеченные, на которых влиянием отражений от земной поверхности можно пренебречь, и слабопересеченные, для которых $\Phi \geq 0,8$. Интервал считается пересеченным, если соответствующая ему трасса (трассы) являются пересеченными, в противном случае интервал следует считать слабопересеченным. Для слабопересеченного интервала с одной трассой положение антенн выбирают так, чтобы в условиях средней рефракции обеспечивался интерференционный максимум.

9.2.2 Угол скольжения θ определяют по формуле

$$\theta = \Delta r / H(g) = \frac{H(g)}{2Rk(1-k)} \quad (9.7)$$

9.2.3 При наличии на трассе q точек отражения модуль множителя ослабления рассчитывают по формуле

$$V = \sqrt{\left(1 + \sum_{j=1}^q \Phi_j \cos \gamma_j\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^q \Phi_j \sin \gamma_j\right)^2}, \quad (9.8)$$

где γ — сдвиг фаз между прямой и отраженной волнами.

9.3 Определение размеров зоны отражения

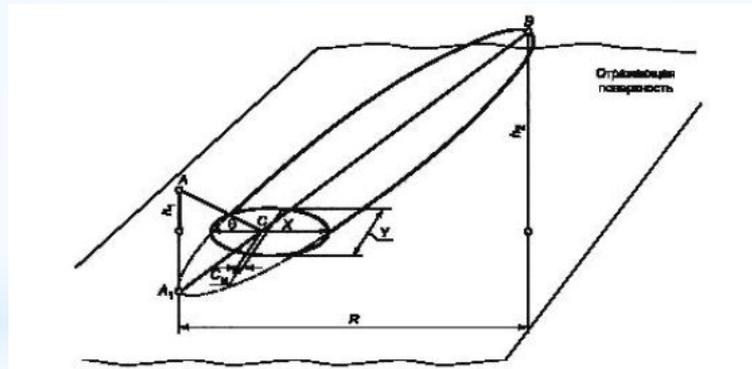
9.3.1 Размеры зоны, формирующей отраженную волну (см. рисунок 9.4), вдоль трассы X и в перпендикулярном к ней направлении Y определяются по формулам:

$$X = R \sqrt{\frac{\frac{\lambda}{3} \left(\frac{\lambda}{3} + 2\Delta r \right)}{\left(\frac{\lambda}{3} + \frac{\Delta r}{2k(1-k)} \right)}} = R \sqrt{\frac{\frac{R\lambda}{3} \left(\frac{R\lambda}{3} - \frac{[H(g)]^2}{k(1-k)} \right)}{\left(\frac{R\lambda}{3} - \frac{[H(g)]^2}{4k(1-k)^2} \right)}} \quad (9.9)$$

$$Y = \sqrt{R} \sqrt{\frac{\frac{\lambda}{3} \left(\frac{\lambda}{3} - 2\Delta r \right)}{\left(\frac{\lambda}{3} - \frac{\Delta r}{2k(1-k)} \right)}} = \sqrt{R} \sqrt{\frac{\frac{\lambda}{3} \left(\frac{R\lambda}{3} + \frac{[H(g)]^2}{k(1-k)} \right)}{\left(\frac{R\lambda}{3} + \frac{[H(g)]^2}{4k(1-k)^2} \right)}} \quad (9.10)$$

9.3.2 Смещение центра зоны C_m , м, относительно точки отражения C определяется по формуле

$$C_m = R(1-2k) \left(1 + \frac{3\Delta r}{2\lambda k(1-k)} \right) = R(1-2k) \left(1 - \frac{3[H(g)]^2}{4R\lambda k(1-k)^2} \right). \quad (9.11)$$



9.4 Оценка влияния неровностей отражающей поверхности

Для оценки влияния неровностей отражающей поверхности в пределах зоны отражения применяют критерий Релея.

9.4.1 При высоте неровностей

$$\Delta h \leq \Delta h_{\max} \approx \frac{\lambda H(g)}{(8-16)\Delta r} = \frac{\lambda Rk(1-k)}{(4-8)H(g)} \quad (9.12)$$

отражение считают зеркальным, а коэффициент отражения по модулю таким же, как при отражении от гладкой поверхности.

9.4.2 Если $\Delta h > \Delta h_{\max}$, то учитывают диффузный характер отражений, для чего коэффициент отражения умножают на величину

$$\rho_s = \max \left\{ \exp \left(-\frac{(4\pi\chi)^2}{2} \right), \exp(-2\pi\chi) \right\},$$

где $\chi = \sigma_h(\sin\theta)\lambda$, σ_h — стандартное отклонение гауссовского распределения вероятности высоты неровностей в пределах зоны отражения ($\sigma_h \approx 0,32\Delta h$). Если зона отражения полностью попадает на водную поверхность, то $\rho_s = 1$.

9.5 Расчет коэффициента отражения от плоской поверхности

Значение модуля коэффициента отражения от гладких плоских поверхностей при горизонтальной $\Phi_{пл.г}$ и вертикальной $\Phi_{пл.в}$ поляризациях вычисляются по формулам:

$$\Phi_{пл.г} = \left| \frac{\sin \theta - \sqrt{\epsilon - j60\sigma\lambda - \cos^2 \theta}}{\sin \theta + \sqrt{\epsilon - j60\sigma\lambda - \cos^2 \theta}} \right|, \quad (9.13)$$

$$\Phi_{пл.в} = \left| \frac{(\epsilon - j60\sigma\lambda) \sin \theta - \sqrt{\epsilon - j60\sigma\lambda - \cos^2 \theta}}{(\epsilon - j60\sigma\lambda) \sin \theta + \sqrt{\epsilon - j60\sigma\lambda - \cos^2 \theta}} \right|. \quad (9.14)$$

Значения диэлектрической проницаемости ϵ и проводимости σ для различных видов земной поверхности приведены в [5].

9.6 Расчет коэффициента расходимости

Значение коэффициента расходимости D рассчитывают по формуле

$$D = \left[1 + \frac{32\Delta y k^2 (1-k)^2 R^2}{r^2 H(g)} \right]^{-1/2}, \quad (9.15)$$

при этом значение r (см. рисунок 9.3) не должно превышать значения X [формула (9.9)], а $\Delta y = H_0$.
Для водных поверхностей:

$$D = \min \left\{ 1, \left[1 + \frac{4k^2 (1-k)^2 R^2}{a_y H(g)} \right]^{-1/2} \right\}. \quad (9.16)$$

9.7 Учет ослабления за счет диаграммы направленности антенны

Отраженная волна ослаблена ДН антенн за счет углов $\Lambda_1 \approx H(g)/R_1$ и $\Lambda_2 \approx H(g)/(R - R_1)$ (см. рисунок 9.1), что эквивалентно уменьшению коэффициента отражения в B раз:

$$B = 10^{0,05(F_{\text{ПРД}}(\Lambda_1) + F_{\text{ПРМ}}(\Lambda_2))} \quad (9.17)$$

где $F_{\text{ПРД}}(\Lambda_1)$, $F_{\text{ПРМ}}(\Lambda_2)$ — ослабление отраженной волны передающей и приемной антеннами ЦРРС соответственно, дБ. Значения $F_{\text{ПРД}}(\Lambda_1)$ и $F_{\text{ПРМ}}(\Lambda_2)$ определяют с учетом реальных ДН антенн. Эталонные ДН приведены в [3].

9.8 Учет затенения зоны отражения

Если известно, что в зоне отражения часть поверхности ΔX не является отражающей (см. рисунок 9.5), то коэффициент отражения умножают на величину

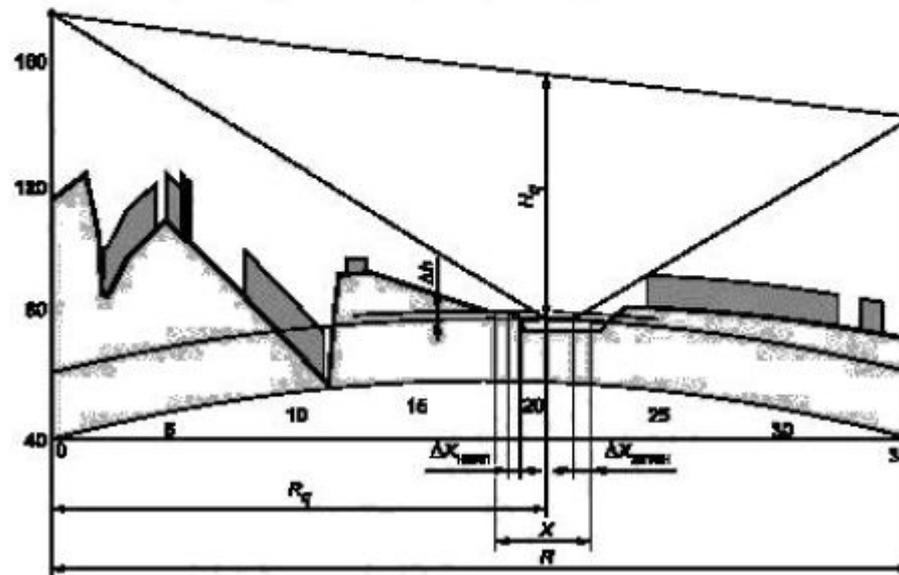
$$S = (1 - \Delta X/X), \quad (9.18)$$

где

$$\Delta X = \Delta X_{\text{затен}} + \Delta X_{\text{накл}}; \quad (9.19)$$

$\Delta X_{\text{затен}}$ — затененная часть зоны отражения;

$\Delta X_{\text{накл}}$ — часть зоны отражения, рассеивающая энергию под углами, отличными от θ .



9.9 Расчет множителя ослабления для открытых трасс

Расчет множителя ослабления проводят в порядке, приведенном ниже.

9.9.1 Проводят поиск точек отражения.

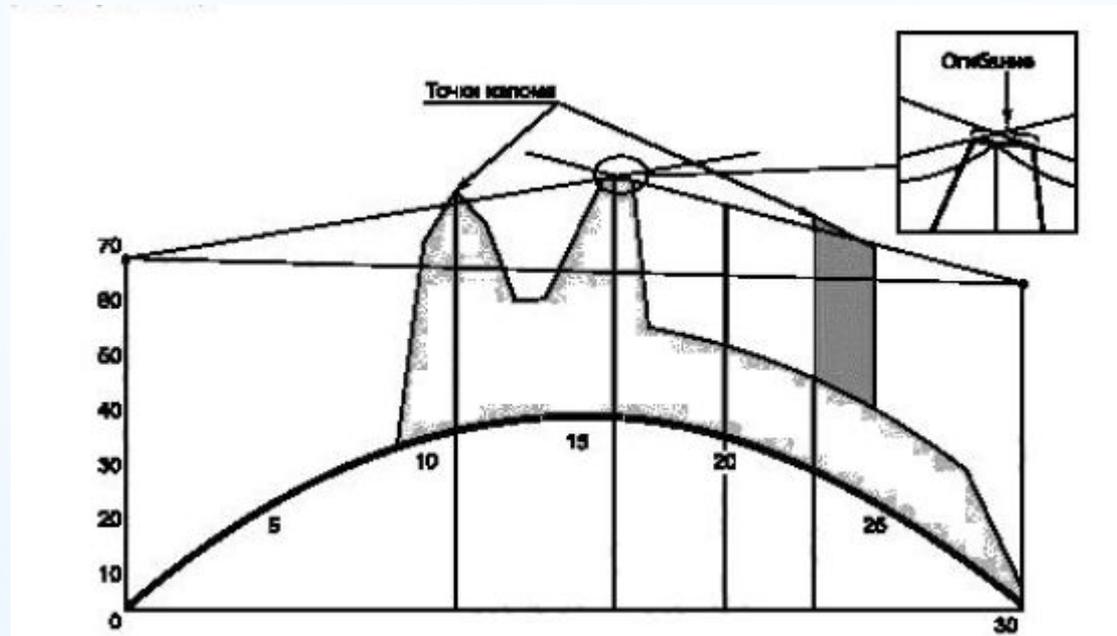
9.9.2 Для каждой найденной точки вычисляют коэффициент отражения Φ по формуле

$$\Phi = \Phi_{нд} D S \rho_s B. \quad (9.20)$$

9.9.3 Рассчитывают множитель ослабления по формуле (9.5) или (9.8), в зависимости от числа точек отражения (одна или более).

10. Расчет дифракционных потерь распространения

На полуоткрытых и закрытых интервалах происходит дифракционное ослабление радиоволны за счет препятствий, расположенных в минимальной зоне Френеля.



- Определение числа препятствий на интервале
- Аппроксимация препятствий
- Расчет дифракционных потерь за счет препятствия
- Расчет дифракционных потерь на сферической Земле
- Расчет дифракционных потерь на интервале, не являющимся "сферическим"

11. Расчет запаса на замирания

11.1 Расчет запаса на замирания при заданных условиях рефракции

Расчет запаса на замирания при заданных условиях рефракции проводят в порядке, приведенном ниже.

11.1.1 Рассчитывают ослабление L_{Σ} , дБ:

$$L_{\Sigma} = \begin{cases} L_0 + A_a - \min(V, 0) & \text{для открытых интервалов} \\ L_0 + A_a + L_{\text{дифр}} & \text{для полуоткрытых и закрытых интервалов,} \end{cases} \quad (11.1)$$

где L_0 — потери в свободном пространстве, дБ;

A_a — ослабление в атмосферных газах, дБ;

V — значение множителя ослабления относительно поля свободного пространства, дБ;

$L_{\text{дифр}}$ — дифракционные потери распространения, дБ.

11.1.2 Рассчитывают мощность сигнала на входе приемника $P_{\text{ПРМ}}$, дБВт, по формуле

$$P_{\text{ПРМ}} = P_{\text{ПРД}} + G_{\text{ПРД}} + G_{\text{ПРМ}} - L_{\text{ф. ПРД}} - L_{\text{ф. ПРМ}} - L_{\Sigma}. \quad (11.2)$$

11.1.3 Рассчитывают запас на тепловые замирания F , дБ:

$$F = P_{\text{ПРМ}} - P_{\text{ПРМ. реал}}. \quad (11.3)$$

11.2 Расчет запаса на замирания для «чистой» атмосферы

Расчет запаса на замирания для «чистой» атмосферы проводят в порядке, приведенном ниже.

11.2.1 Рассчитывают ослабление $L_{\text{атм}}$, дБ:

$$L_{\text{атм}} = L_0 + A_a. \quad (11.4)$$

11.2.2 Рассчитывают мощность сигнала на входе приемника $P_{\text{ПРМ}}$, дБВт, по формуле

$$P_{\text{ПРМ}} = P_{\text{ПРД}} + G_{\text{ПРД}} + G_{\text{ПРМ}} - L_{\text{фПРД}} - L_{\text{фПРМ}} - L_{\text{атм}}. \quad (11.5)$$

11.2.3 Рассчитывают запас на тепловые замирания F_m , дБ:

$$F_m = P_{\text{ПРМ}} - P_{\text{ПРМ. реал}}, \text{ дБ}. \quad (11.6)$$

12. Расчет неустойчивости в условиях субрефракции

Неустойчивость в условиях субрефракции рассчитывают в следующем порядке.

12.1 Если $PЗ = \emptyset$, то составляющая неустойчивости $P_{\text{субрефр}}$, обусловленная субрефракцией, равна нулю.

12.2 По формулам (11.1)—(11.3) вычисляют запас на замирания F при вертикальном градиенте диэлектрической проницаемости $g = g_n = g + 4,3\sigma$.

12.3 Если $F > 0$, то вероятность появления субрефракционных замираний $P_{\text{субрефр}}$ и значение $P_{\text{субрефр}}$ принимают равным нулю.

12.4 Если $F = 0$, то принимают $g_0 = g$ и рассчитывают значение $P_{\text{субрефр}}$ по формуле

$$P_{\text{субрефр}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} (a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5) \exp \left(-0,5 \left[\frac{g_0 - g}{\sigma} \right]^2 \right), \quad (12.1)$$

где $t = 1/(1 + 0,2316419 \cdot n)$; $a_1 = 0,31938153$; $a_2 = -0,356563782$; $a_3 = 1,781477937$; $a_4 = -1,821255978$; $a_5 = 1,330274429$.

Составляющую неустойчивости, обусловленную субрефракцией $P_{\text{субрефр}}$, %, определяют по формуле

$$P_{\text{субрефр}} = 100 \cdot P_{\text{субрефр}}. \quad (12.2)$$

12.5 Если $F < 0$, то диапазон (g_r, g_n) делят пополам.

12.6 Определяют запас на замирания F при $g = 0,5(g_r + g_n)$.

12.7 Если $F \neq 0$, то далее поиск величины g_0 проводят в поддиапазоне $(g_r, \frac{g_r + g_n}{2})$ при $F < 0$ или в поддиапазоне $(\frac{g_r + g_n}{2}, g_n)$ при $F > 0$ путем его дальнейшего деления на два и вычисления F для g на границе между образованными поддиапазонами.

12.8 В зависимости от значения F повторяют действия по 12.4 или 12.7.

13. Расчет неустойчивости, обусловленной интерференционными замираниями

Общую неустойчивость вследствие интерференционных (многолучевых) замираний $\rho_{мл}$ определяют по формуле

$$\rho_{мл} = \rho_{пл} + \rho_{сел}, \quad (13.1)$$

где $\rho_{пл}$ — неустойчивость, вызванная плоскими (тепловыми) замираниями, а $\rho_{сел}$ — неустойчивость, обусловленная частотно-селективными замираниями.

В зависимости от средней высоты трассы h , вычисляемой по формуле

$$h = \frac{h_1 + h_2}{2}, \quad (13.2)$$

интервалы подразделяют на следующие группы:

- 1) $h \leq 800$ м — приземные интервалы, расчет неустойчивости для которых проводят по 13.1 или 13.4;
- 2) $800 < h \leq 1200$ м — горные интервалы, расчет неустойчивости для которых проводят по 13.3;
- 3) $h > 1200$ м — высокогорные интервалы, расчет неустойчивости для которых проводят по 13.3.

13.1.1 Расчет неустойчивости, обусловленной плоскими интерференционными замираниями на частотах ниже 20 ГГц на пересеченных интервалах

13.1.1.1 Вычисляют параметр вероятности появления замирания p_0 , %, по формуле

$$p_0 = C f^{1,5} \begin{cases} 2,05 \cdot 10^{-5} R^3 & \text{для } R \leq 20 \\ 4,1 \cdot 10^{-4} R^2 & \text{для } R > 20 \end{cases} \quad (13.3)$$

где R — длина интервала, км;

C — множитель, зависящий от местоположения интервала и его средней высоты, м:

$C = 1$ для сухопутных пересеченных интервалов;

$C = 2$ для приморских районов акватории Северного Ледовитого океана;

$C = 5 - 0,007\bar{h} + 4 \cdot 10^{-6}(\bar{h})^2$ для приморских районов теплых и умеренных морей.

Примечание — Приморскими районами считают полосу вдоль береговой линии. Ориентировочная ширина этой полосы над ровной местностью — до 50 км. К приморским районам могут быть отнесены территории, расположенные вблизи водохранилищ, крупных рек, болот и других водных массивов.

13.1.1.2 Рассчитывают процент времени нарушения связи за счет плоского замирания в условиях наихудшего месяца $p_{пл}$, %, по формуле

$$p_{пл} = p_0 \cdot 10^{-F/10}, \quad (13.4)$$

где F — наименьшее значение запаса на тепловые замирания (11.3) в диапазоне изменений вертикального градиента диэлектрической проницаемости ($g_{зд}$, g), дБ.

13.1.1 Расчет неустойчивости, обусловленной селективными интерференционными замираниями на частотах ниже 20 ГГц на пересеченных интервалах

13.1.2.1 Вычисляют значение запаса на селективное замирание $F_{\text{сеп}}$, дБ, по формуле

$$F_{\text{сеп}} = -20 \lg \left(\frac{\pi C_s}{\sqrt{12f}} F(M) F(Rf) \right), \quad (13.5)$$

где $F(M)$ — функция, зависящая от вида модуляции и числа уровней модуляции M , значение которой вычисляют по формуле

$$F(M) = \frac{\sqrt{M} - 1}{\log_2 M} \text{ — для цифровых систем с QAM и TCM}, \quad (13.6)$$

$$F(M) = \frac{1}{\lg(\pi / M) \log_2 M} \text{ — для цифровых систем с PSK}.$$

$F(Rf)$ — функция, значение которой вычисляют по формуле

$$F^2(Rf) = \max \left[1, \frac{\sum_n \left[(2n-1)^2 \left(1 - \operatorname{erf} \left[\frac{\bar{\Delta\varepsilon} + \frac{3 \cdot 10^{-4}}{Rf} (2n-1)}{\sqrt{2}\sigma_\varepsilon} \right] \right) \right]}{\sum_n \left[1 - \operatorname{erf} \left[\frac{\bar{\Delta\varepsilon} + \frac{3 \cdot 10^{-4}}{Rf} (2n-1)}{\sqrt{2}\sigma_\varepsilon} \right] \right]} \right], \quad (13.7)$$

где $n = 1, 2, \dots$; $\bar{\Delta\varepsilon}$ и σ_ε — среднее значение и среднее квадратическое отклонение величины скачка диэлектрической проницаемости воздуха, равные соответственно минус $0,6 \cdot 10^{-6}$ и плюс $1,7 \cdot 10^{-6}$ для сухопутных интервалов, и минус $3,2 \cdot 10^{-6}$ и плюс $1,7 \cdot 10^{-6}$ для приморских районов.

13.1.2.2 Рассчитывают время нарушения связи за счет селективного замирания в условиях наилучшего месяца $p_{\text{сеп}}$, %, по формуле

$$p_{\text{сеп}} = p_0 \cdot 10^{-F_{\text{сеп}}/10}. \quad (13.8)$$

13.1.3 Рассчитывают общую неустойчивость по формуле (13.1).

14. Расчет эффективности разнесенного приема

- Эффективность приема с пространственным разнесением
- Эффективность приема с частотным разнесением
- Эффективность приема с частотным и пространственным (комбинированным) разнесением

15. Расчет показателей качества, обусловленных интерференционными замираниями (начало)

Расчет показателей качества, обусловленных интерференционными замираниями, выполняют в следующем порядке.

15.1 Если выполняется неравенство

$$\rho_{\text{мл}} < 0,000385, \quad (15.1)$$

то коэффициент сильнопораженных секунд $SESR_{\text{мл}}$, %, и коэффициент неготовности $K_{\text{нег. мл}}$, %, обусловленные интерференцией на интервале, принимают равными

$$\begin{aligned} SESR_{\text{мл}} &= \rho_{\text{мл}} \\ K_{\text{нег. мл}} &= 0 \end{aligned}$$

и дальнейших вычислений не требуется.

15.2 Рассчитывают эффективный запас на замирание $F_{\text{эф}}$:

$$F_{\text{эф}} = \sqrt{10^{F/10} + 10^{F_{\text{сел}}/10}}, \quad (15.2)$$

где F — значение запаса на тепловое замирание, при котором рассчитывают неустойчивость, вызванную плоским замиранием, дБ;

$F_{\text{сел}}$ — запас на селективное замирание, при котором рассчитывают неустойчивость, вызванную селективным замиранием, дБ.

15.3 Рассчитывают медианное значение длительности замираний $\tau_{\text{м}}$, с, при многолучевом распространении:

$$\tau_{\text{м}} = C_{\text{м}} F_{\text{эф}} (4/f)^{0.5}, \quad (15.3)$$

где $C_{\text{м}}$ — коэффициент, с, рассчитывают по формулам:

- для слабопересеченных и приморских интервалов:

$$C_{\text{м}} = (0,002 + (0,272\psi)^{2.1})^{-1}, \quad (15.4)$$

- для пересеченных интервалов:

$$C_{\text{м}} = (0,001 + (0,106\psi)^{1.9})^{-1}, \quad (15.5)$$

где ψ — параметр трассы вычисляют по формуле

$$\psi = R^2 \bar{\rho}(g) \cdot 10^{-4}, \quad (15.6)$$

где $\bar{\rho}(g)$ — относительный просвет при средней рефракции в наиболее высокой точке интервала или в точке отражения для слабопересеченного интервала.

15. Расчет показателей качества, обусловленных интерференционными замираниями (конец)

15.4 Рассчитывают СКО длительности замираний σ_{τ} , дБ:

$$\sigma_{\tau} = 3,694 + \frac{250,541}{(-V_{дБ})^{-1,5}} + 4 \lg \frac{f_c}{4} \quad (15.7)$$

где $V_{дБ} = 20 \lg F_{эф}$ — глубина замираний, дБ.

15.5 Определяют долю замираний α_{τ_m} , продолжительностью более $\tau_m = 10$ с:

$$\alpha_{\tau_m} = \frac{1}{2} \left[1 - \text{sign}(x_m) \left(1 - [a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3] e^{-x_m^2} \right) \right] \quad (15.8)$$

где $t = 1/(1 + 0,47047|x_m|)$, $a_1 = 0,3480242$, $a_2 = -0,0958798$, $a_3 = 0,7478556$;

$$\text{sign}(x_m) = \begin{cases} 1, & x_m \geq 0 \\ -1, & x_m < 0 \end{cases} \quad (15.9)$$

$$x_m = \frac{4,343}{2\sigma_{\tau [дБ]}} \ln \left(\frac{\tau_m}{\tau_m} \right) - \frac{\sqrt{2}\sigma_{\tau [дБ]}}{8,686} \quad (15.10)$$

15.6 Вычисляют коэффициент сильнопораженных секунд $SESR_{мл}$, %, обусловленный интерференцией на интервале

$$SESR_{мл} = (1 - \alpha_{\tau_m - 10}) \rho'_{мл} \quad (15.11)$$

где $\rho'_{мл}$ — в случае одинарного приема — неустойчивость $\rho_{мл}$, обусловленная многолучевостью (см. раздел 13), а в случае разнесенного приема — $\rho_{мл \sigma}$ (см. раздел 14).

15.7 Вычисляют интерференционную составляющую коэффициента неготовности $K_{инт. мл}$, %:

$$K_{инт. мл} = z \alpha_{\tau_m - 10} \rho'_{мл} \quad (15.12)$$

где z — коэффициент пересчета от «наихудшего» месяца к «среднему году», равный 1/4, 1/3 и 1/7 для сухопутных, приморских и горных районов соответственно.

16. Расчет показателей качества, обусловленных влиянием дождей (начало)

Показатели качества, обусловленные влиянием дождей, рассчитывают в порядке, приведенном ниже.

16.1 Рассчитывают интенсивность дождя $J_{д1}$, мм/ч:

$$J_{д1} = \xi \cdot 2.5 \cdot 10^5 \cdot \text{Ш}^{-2} (\text{Д} + 25)^{-0.3}, \quad (16.1)$$

где ξ — коэффициент, учитывающий особенности различных территорий (см. приложение В);
 $\text{Д}(\text{Ш})$ — долгота (широта) середины интервала, определяемая как среднее значение долготы (широты) конечных ЦРРС интервала, град.

16.2 По формулам, приведенным в [7], для интенсивности $J_{д1}$ рассчитывают погонное затухание сигнала γ .

16.3 Рассчитывают параметр B_1 по формуле

$$B_1 = \lg [0.19J_{д1}]. \quad (16.2)$$

16.4 Рассчитывают энергетический параметр интервала E по формуле

$$E = \alpha B_1 + \lg(\bar{F}l(\gamma R)), \quad (16.3)$$

где \bar{F} — запас на замирание при средних условиях рефракции по (11.3).

16.5 Рассчитывают параметр B_2 :

$$B_2 = B_1 \sum_{i=1}^6 A_i E^i, \quad (16.4)$$

где $A_1 = (\alpha B_1 - \varepsilon_1)^{-1}$;

$$A_2 = \varepsilon_2 A_1^3;$$

$$A_3 = [2\varepsilon_2^2 + (\alpha B_1 - \varepsilon_1)\varepsilon_3] A_1^5;$$

$$A_4 = [5(\alpha B_1 - \varepsilon_1)\varepsilon_2 \varepsilon_3 + (\alpha B_1 - \varepsilon_1)^2 \varepsilon_4 + 5\varepsilon_2^3] A_1^7;$$

16. Расчет показателей качества, обусловленных влиянием дождей (конец)

$$A_5 = [6(\alpha B_1 - \varepsilon_1)^2 \varepsilon_2 \varepsilon_4 + 3(\alpha B_1 - \varepsilon_1)^2 \varepsilon_3^2 + 14\varepsilon_2^4 + (\alpha B_1 - \varepsilon_1)^3 \varepsilon_5 + 21(\alpha B_1 - \varepsilon_1) \varepsilon_2^2 \varepsilon_3] A_1^9;$$

$$A_6 = [7(\alpha B_1 - \varepsilon_1)^3 \varepsilon_2 \varepsilon_5 + 7(\alpha B_1 - \varepsilon_1)^3 \varepsilon_3 \varepsilon_4 + 84(\alpha B_1 - \varepsilon_1) \varepsilon_2^3 \varepsilon_3 + (\alpha B_1 - \varepsilon_1)^4 \varepsilon_6 + 28(\alpha B_1 - \varepsilon_1)^2 \varepsilon_2 \varepsilon_3^2 + 28(\alpha B_1 - \varepsilon_1)^2 \varepsilon_2^2 \varepsilon_4 + 42 \varepsilon_2^5] A_1^{11};$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= 0,43429 \psi; \\ \varepsilon_2 &= 0,43429 \psi \ln d - 0,217145 \psi^2; \\ \varepsilon_3 &= 0,217145 \psi \ln^2 d - 0,43429 \psi^2 \ln d + 0,144763 \psi^3; \\ \varepsilon_4 &= 7,28316 \cdot 10^{-2} \psi \ln^3 d - 0,43429 \psi^2 \ln^2 d + 0,43429 \psi^3 \ln d - 0,10857 \psi^4; \\ \varepsilon_5 &= 1,80954 \cdot 10^{-2} \psi \ln^4 d - 0,28953 \psi^2 \ln^3 d + 0,65143 \psi^3 \ln^2 d - 0,43429 \psi^4 \ln d + 8,68581 \cdot 10^{-2} \psi^5; \\ \varepsilon_6 &= 3,61908 \cdot 10^{-3} \psi \ln^5 d - 0,14476 \psi^2 \ln^4 d + 0,65143 \psi^3 \ln^3 d - 0,8686 \psi^4 \ln^2 d + 0,43429 \psi^5 \ln d - \\ &\quad - 7,23816 \cdot 10^{-2} \psi^6; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d &= R^{0,545} B_1; \\ \psi &= 3,5088 \cdot 10^{-2} \cdot B_1 R^{0,33}. \end{aligned} \tag{16.5}$$

16.6 Рассчитывают параметр AS_d , %:

$$AS_d = 10^{[2 \cdot 2(\beta_2 - \beta_1) + 0,2387\beta_2 - \beta_1]^{2,5682}}. \tag{16.6}$$

16.7 Определяют коэффициент неготовности интервала, обусловленный дождями $K_{\text{нер. д}}$, % по формуле

$$K_{\text{нер. д}} = \begin{cases} AS_d & \text{при } AS_d \geq 3,2 \cdot 10^{-5} \\ 0 & \text{при } AS_d < 3,2 \cdot 10^{-5} \end{cases}. \tag{16.7}$$

16.8 Вычисляют дождевую составляющую коэффициента сильнопораженных секунд $SESR_d$, % по формуле

$$SESR_d = \begin{cases} 0 & \text{при } AS_d \geq 3,2 \cdot 10^{-5} \\ AS_d \cdot Q & \text{при } AS_d < 3,2 \cdot 10^{-5}, \end{cases} \%, \tag{16.8}$$

где Q — коэффициент, вычисляемый по формуле

$$Q = \min (12, 0,1227 \psi^{0,7456} d^{0,1140} AS_d^{0,1227}). \tag{16.9}$$

17. Расчет показателей качества, обусловленных субрефракционными замираниями

Показатели качества, обусловленные субрефракционными замираниями, рассчитывают в следующем порядке:

17.1 Определяют параметр $AS_{\text{субрефр}}$, %:

$$AS_{\text{субрефр}} = zp_{\text{субрефр}}, \quad (17.1)$$

где $p_{\text{субрефр}}$ — составляющая неустойчивости, обусловленная субрефракцией, (см. раздел 12);

z — коэффициент пересчета от «наихудшего» месяца к «среднему году», равный 1/4 для сухопутных интервалов и 1/3 — для приморских интервалов.

17.2 Вычисляют субрефракционную составляющую коэффициента неготовности $K_{\text{нег. субрефр}}$, %:

$$K_{\text{нег. субрефр}} = \begin{cases} AS_{\text{субрефр}} & \text{при } AS_{\text{субрефр}} \geq 3,2 \cdot 10^{-5} \\ 0 & \text{при } AS_{\text{субрефр}} < 3,2 \cdot 10^{-5} \end{cases} \quad (17.2)$$

17.3 Вычисляют субрефракционную составляющую коэффициента сильнопораженных секунд $SESR_{\text{субрефр}}$, %:

$$SESR_{\text{субрефр}} = \begin{cases} 0 & \text{при } AS_{\text{субрефр}} \geq 3,2 \cdot 10^{-5} \\ p_{\text{субрефр}} & \text{при } AS_{\text{субрефр}} < 3,2 \cdot 10^{-5} \end{cases} \quad (17.3)$$

18. Расчет результирующих значений показателей качества

Основные показатели качества ЦППЛ, связанные с надежностью аппаратуры и условиями распространения радиоволн: коэффициент неготовности и коэффициент сильнопораженных (ошибками) секунд рассчитывают в следующем порядке.

18.1 Величина $SESR_{и}$, %, интервала ЦППЛ определяется вкладами интерференции, дождей и субрефракции:

$$SESR_{и} = SESR_{мл} + SESR_{д} + SESR_{субрефр} \quad (18.1)$$

где $SESR_{мл}$, $SESR_{д}$ и $SESR_{субрефр}$ рассчитывают по формулам (15.11), (16.8) и (17.3), соответственно.

18.2 Коэффициент неготовности интервала ЦППЛ $K_{нег. и}$, %, определяется вкладами аппаратуры и среды распространения:

$$K_{нег. и} = K_{нег. апп} + K_{нег. д} + K_{нег. мл} + K_{нег. субрефр} \quad (18.2)$$

где $K_{нег. апп}$ рассчитывают по формуле (5.4) или (5.10), $K_{нег. д}$ — по (16.7), $K_{нег. мл}$ — по (15.12), а $K_{нег. субрефр}$ — по (17.2).

18.3 Необходимые условия удовлетворительной работы интервала ЦППЛ определяют неравенства:

$$SESR_{и} \leq SESR_{з}, \quad (18.3)$$

$$K_{нег. и} \leq K_{нег. з}. \quad (18.4)$$

18.4 При невыполнении неравенств (18.3) и (18.4) в соответствии с приложением А проводят анализ результатов расчета и поиск условий, при которых выполняются указанные неравенства.

18.5 Если ЦППЛ состоит из q интервалов, то помимо выполнения неравенств (18.3) и (18.4) для каждого интервала, необходимо выполнение неравенств:

$$\sum_{j=1}^q SESR_{j} \leq SESR_{зл}, \quad (18.5)$$

$$\sum_{j=1}^q K_{нег. j} \leq K_{нег. зл}. \quad (18.6)$$

где $SESR_{j}$ и $K_{нег. j}$ — значения коэффициента сильнопораженных секунд и коэффициента неготовности, рассчитанные для j -го интервала согласно (18.1) и (18.2) соответственно.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ