

**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  $P_{\text{BER}}$ ), дБВт;

поляризация (вертикальная, горизонтальная);

$C_S$  - скорость передачи информации, Гбит/с;

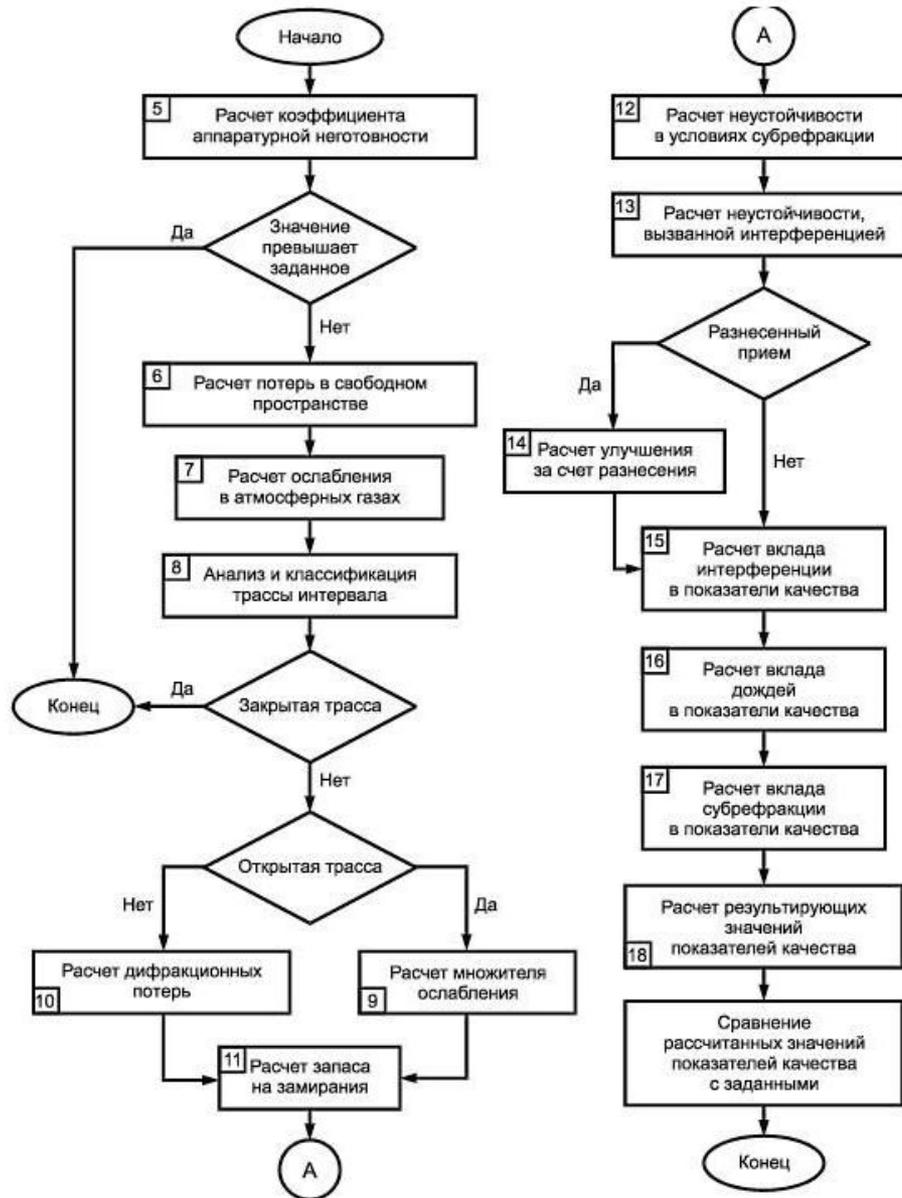
$M$  - число уровней модуляции;

$W_M$  - 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 ЦРРС<sub>1</sub> 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 ЦРРС<sub>2</sub>.

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 ЦРРС<sub>1</sub> 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 ЦРРС<sub>1</sub>:

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

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)  $\rho$ , г/м<sup>3</sup>.

7.2 Рассчитывают удельное ослабление радиосигнала в кислороде воздуха  $\gamma_O$ , 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  $\gamma_{H_2O}$ , дБ/км, по формуле

$$\begin{aligned} \gamma_{H_2O} &= \left\{ \frac{3,98\eta_1 \exp[2,23(1-r_t)]}{(f-22,235)^2 + 9,42\eta_1^2} g(f, 22) + \frac{1,196\eta_1 \exp[0,7(1-r_t)]}{(f-183,3)^2 + 1,114\eta_1^2} + \right. \\ &+ \frac{0,08\eta_1 \exp[6,44(1-r_t)]}{(f-321,226)^2 + 6,29\eta_1^2} + \frac{3,66\eta_1 \exp[16(1-r_t)]}{(f-325,153)^2 + 9,22\eta_1^2} + \frac{25,37\eta_1 \exp[1,09(1-r_t)]}{(f-380)^2} + \\ &+ \frac{17,4\eta_1 \exp[146(1-r_t)]}{(f-448)^2} + \frac{844,6\eta_1 \exp[0,17(1-r_t)]}{(f-557)^2} g(f, 557) + \\ &+ \left. \frac{290\eta_1 \exp[0,4(1-r_t)]}{(f-752)^2} g(f, 752) + \frac{83328\eta_2 \exp[0,99(1-r_t)]}{(f-1780)^2} g(f, 1780) \right\} \times \\ &\times f^2 r_p^{2,5} 10^{-4}, \end{aligned}$$

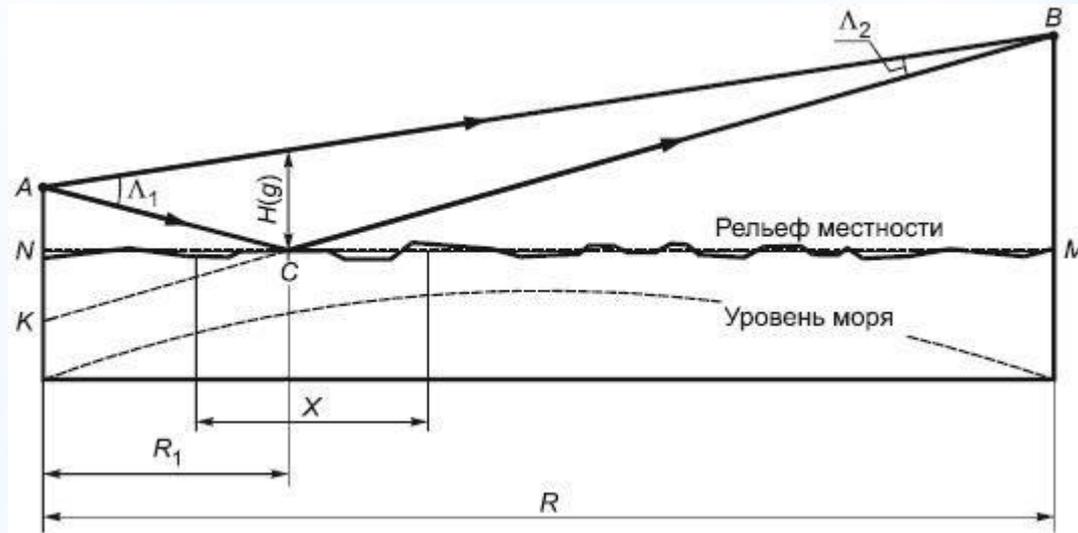
где

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

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,

$\lambda$  — 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  $\sigma$  — 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  $\Delta y$ , 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

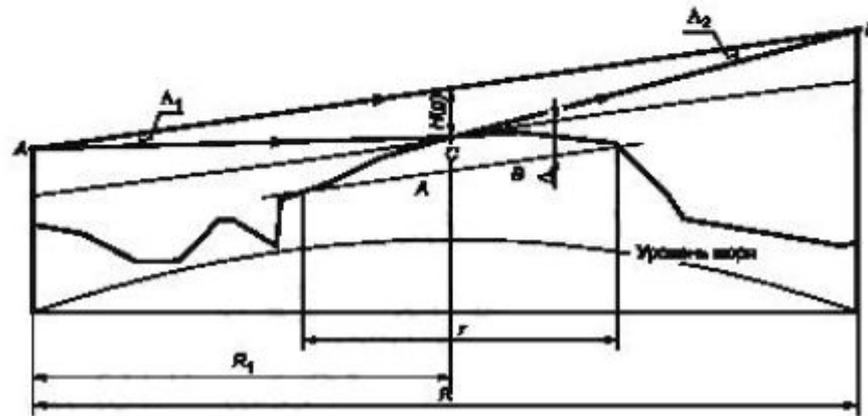
$$r(\Delta y = H_0) \geq 10. \quad (9.3)$$

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  $\Phi$  — 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  $\theta$  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  $\gamma$  — сдвиг фаз между прямой и отраженной волнами.

## 9.3 Определение размеров зоны отражения

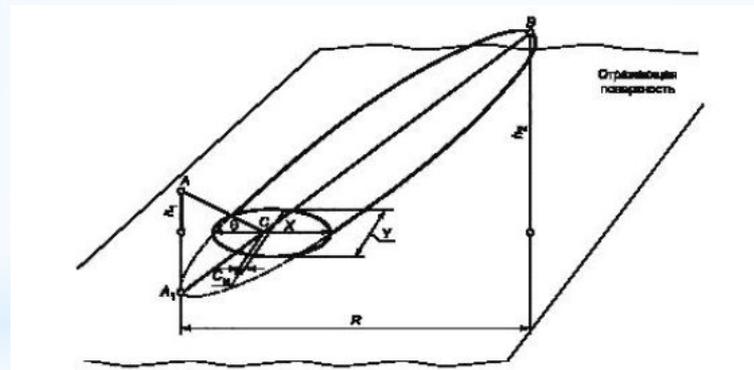
9.3.1 Размеры зоны, формирующей отраженную волну (см. рисунок 9.4), вдоль трассы X и в перпендикулярном к ней направлении Y определяются по формулам:

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

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

9.3.2 Смещение центра зоны  $C_{\text{м}}$ , м, относительно точки отражения C определяют по формуле

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



## 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  $\chi = \sigma_h(\sin\theta)\lambda$ ,  $\sigma_h$  — 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  $\epsilon$  и проводимости  $\sigma$  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].



## 9.9 Расчет множителя ослабления для открытых трасс

Расчет множителя ослабления проводят в порядке, приведенном ниже.

9.9.1 Проводят поиск точек отражения.

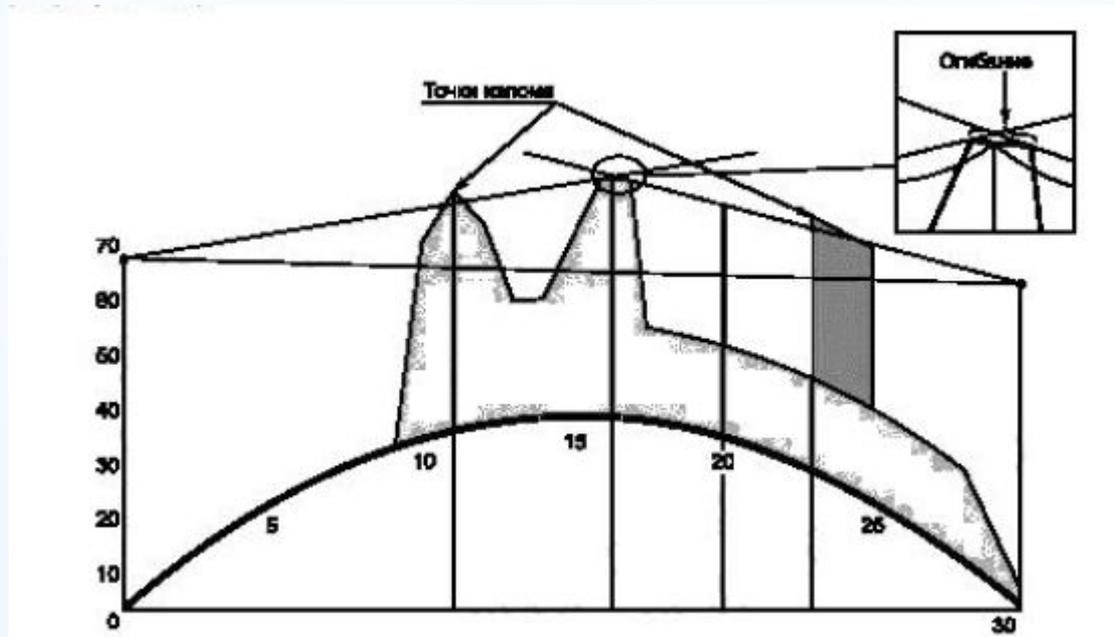
9.9.2 Для каждой найденной точки вычисляют коэффициент отражения  $\Phi$  по формуле

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

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  $L_{\Sigma}$ , 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  $\sigma_\varepsilon$  — 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  $\psi$  — параметр трассы вычисляют по формуле

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

где  $\rho(\bar{g})$  — 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  $\sigma_{\tau}$ , дБ:

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

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

15.5 Определяют долю замираний  $\alpha_{\tau_m}$ , 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  $\xi$  — 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  $\gamma$ .

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**