

РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ

Спутниковая цифровая линия связи работает через геостационарный ИСЗ (см. пример в Приложении). Центральная земная станция (ЦЗС) находится в г. Санкт-Петербурге с координатами $59,9^\circ$ северной широты и $30,3^\circ$ восточной долготы. Приемная земная станция (ЗС) располагается в одном из городов (см. таблицу вариантов – табл.1 и табл.2), обозначенных буквами $\Gamma_1 - \Gamma_{10}$.

Известны значения:

- долготы подспутниковой точки ИСЗ $D_{исз}$ (в градусах восточной долготы);
- широт центральной $\Pi_{цзс}$ и приемной ЗС $\Pi_{зс}$ (в градусах с.ш.);
- долгот центральной $D_{цзс}$ и приемной ЗС $D_{зс}$ (в градусах в.д.);
- частоты на линии «вверх» $f_{вверх}$, МГц;
- частоты на линии «вниз» $f_{вниз}$, МГц;
- коэффициент усиления антенны центральной ЗС $G_{цзс}$, дБ;
- скорость передачи цифрового сигнала $V_{инф}$, кбит/с;
- скорость кодирования R_k ;
- коэффициент скругления спектра α_c ;
- выходная мощность передатчика ИСЗ на ствол $P_{пер.исз}$, Вт;
- количество несущих в одном стволе, $n_{нес}$,

а также вид модуляции сигнала.

Требуется, используя данные вариантов, рассчитать спутниковую цифровую линию связи, диаметр раскрыва приемной параболической антенны земной станции и построить диаграмму уровней.

Таблица 1

Информация по координатам размещения приемных ЗС

Условное обозначение города	Название города	Координаты в градусах	
		Ш, с.ш.	Д, в.д.
Γ_1	Москва	55,8	37,6
Γ_2	Минск	53,9	27,6
Γ_3	Астана	51,2	71,4
Γ_4	Ереван	40,1	44,5
Γ_5	Бишкек	42,9	74,6
Γ_6	Ташкент	41,3	69,3
Γ_7	Душанбе	38,5	68,8
Γ_8	Сочи	43,6	39,7
Γ_9	Ашхабад	37,6	58,2
Γ_{10}	Севастополь	44,6	33,5

Таблица 2

Данные вариантов задания

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки										
Параметр	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{\text{пер.ис}},$ Вт	103,5	103,5	103,5	103,5	82	38	82	38	82	38
$V_{\text{инф}},$ кбит/с	128	256	512	128	256	512	128	256	512	128
$D_{\text{ис}},$ град в.д.	53	53	53	53	53	40	40	40	40	40
$f_{\text{верх}},$ МГц, поляриза- ция	13781,25 V	13781,25 H	14031,25 V	14031,25 H	14468,75 V	14041,67 V	14041,67 H	14208,33 V	14208,33 H	14458,33 V
$f_{\text{вниз}},$ МГц, поляриза- ция	12531,25 H	12531,25 V	11481,25 H	11481,25 V	11168,75 H	10991,67 H	10991,67 V	11158,33 H	11158,33 V	11658,33 H
Вид модуля- ции	QPSK	BPSK	8PSK	QPSK	BPSK	8PSK	QPSK	BPSK	8PSK	QPSK

Последняя цифра номера зачетной книжки										
Параметр	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$n_{\text{нес}}$	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R_k	1/2	3/4	7/8	1/2	3/4	7/8	1/2	3/4	7/8	1/2
α_c	0,2	0,25	0,3	0,35	0,3	0,25	0,2	0,25	0,3	0,35
$G_{1.\text{прд.цзс}},$ дБ	35	36	37	38	39	40	39	38	37	36
город	Γ_1	Γ_2	Γ_3	Γ_4	Γ_5	Γ_6	Γ_7	Γ_8	Γ_9	Γ_{10}

Пояснительная записка к работе должна содержать:

1. Введение, содержащее информацию об особенностях организации и работы спутниковых линий связи на 8 - 15 страницах.

2. Результаты расчета значений азимутов и углов места на спутник от центральной земной станций (ЦЗС) и земной станции (ЗС) спутниковой связи с использованием выражений (1) – (3).

3. Результаты расчета величин ослабления в свободном пространстве и дополнительных потерь на трассах ЦЗС – ИСЗ и ИСЗ – ЗС с использованием выражений (4) – (7).

4. Результаты расчета значений ослабления в дожде на трассах ЦЗС – ИСЗ и ИСЗ – ЗС с использованием изолиний на рис.6 -13 и выражений (8) – (19).

5. Результаты расчета значений суммарной шумовой температуры ИСЗ и ЗС, приведенной к облучателю приемной антенны с использованием выражений (20) – (23).

6. Результаты расчета требуемого отношения мощности несущей к спектральной плотности шума $q_{\text{треб}}$ с использованием выражений (24) – (30).

7. Результаты расчета значения эквивалентной изотропно-излучаемой мощности (ЭИИМ) ИСЗ с использованием выражений (32) – (33).

8. Результаты расчета добротности тракта ИСЗ с помощью выражения (34).

9. Результаты расчета плотности потока мощности (ППМ) на входе ИСЗ, необходимой для обеспечения на линии «вверх» требуемого отношения $q_{\text{треб.вверх}}$ для случая ясного неба и дождя с помощью выражения (35) и проверки с помощью формулы (36).

10. Результаты расчета требуемых значений ЭИИМ одной несущей, излучаемой ЦЗС в условиях ясного неба и дождя с помощью выражения (37).

11. Результаты расчета значений мощности одной несущей и передатчика ЦЗС с использованием выражений (38) – (39).

12. Результаты расчета значений добротности антенны земной станции, максимального коэффициента усиления и диаметра антенны с использованием выражений (40) – (42).

13. Результаты расчета значения ППМ сигнала у поверхности Земли с использованием выражений (43) – (44) и сравнения с допустимым значением.

14. Построенную диаграмму уровней.

15. Заполненную сводную таблицу с данными варианта и результатами расчета.

16. Заключение по результатам расчета.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЯ

Для определения величины потерь на трассе геостационарный ИСЗ – Земля необходимо определить значения угла места или возвышения β (в вертикальной плоскости) и азимутального угла φ (в горизонтальной плоскости). Эти углы показаны на рис.4. Угол места β отсчитывается от касательной к поверхности Земли до линии (наклонной дальности), соединяющей ЗС на Земле со спутником. Азимутальный угол φ отсчитывается от направления на Северный полюс по меридиану, до направления на подспутниковую точку по часовой стрелке.

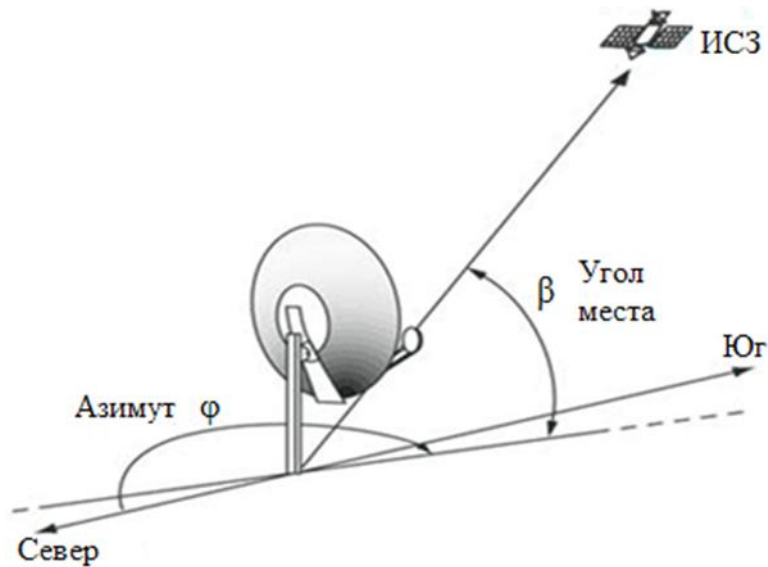


Рис.4. К определению значений углов β и φ

Формулы для определения приближенных значений угла места β и азимута φ имеют вид:

$$\beta = \arctg[(\cos \rho - 0,15105) / \sin \beta], \quad (1)$$

$$\varphi = 180^\circ + \arctg[\operatorname{tg}(D_{\text{ЗС}} - D_{\text{ИСЗ}}) / \sin \Pi_{\text{ЗС}}], \quad (2)$$

$$\rho = \arccos[\cos(D_{\text{ЗС}} - D_{\text{ИСЗ}}) \cdot \cos \Pi_{\text{ЗС}}], \quad (3)$$

где ρ – топоцентрическое расстояние (центральный угол) - угол между направлениями из центра Земли на точку наблюдения и на спутник (угловое расстояние между точкой наблюдения и спутником, если смотреть из центра Земли).

Расчет ослабления (затухания) сигнала в свободном пространстве.

Основные потери передачи L_0 определяются по формуле

$$L_0 = 20 \operatorname{lg} f_{(\text{МГц})} + 20 \operatorname{lg} d_{(\text{км})} + 32,45, \text{ дБ}, \quad (4)$$

или
$$L_0 = 20 \lg(4\pi d/\lambda), \text{ дБ}, \quad (4.a)$$

где d (рис.5) – наклонная дальность, м

$$d = \sqrt{R_3^2 + R_{\text{орб}}^2 - 2R_3R_{\text{орб}} \cdot \cos\rho}; \quad (5)$$

λ – длина волны, м ($\lambda = \lambda_{\text{вверх}}$ на линии «вверх» и $\lambda = \lambda_{\text{вниз}}$ на линии «вниз»);

R_3 – радиус Земли ($R_3 = 6,37 \cdot 10^6$ м);

$R_{\text{орб}}$ – радиус геостационарной орбиты ИСЗ ($R_{\text{орб}} = 42,164 \cdot 10^6$ м).

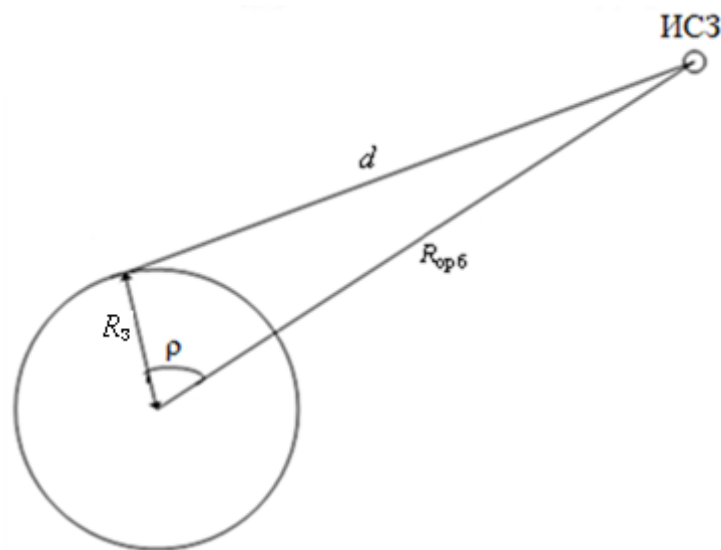


Рис.5. К определению наклонной дальности

Расчёт потерь начинают с определения ослабления сигналов на участках трассы, как в условиях «ясного неба» (при отсутствии дождя), так и при дожде заданной интенсивности. Расчёт проводят для направлений «вверх» (на ИСЗ) и «вниз» (на ЗС), учитывая значения наклонной дальности d для этих случаев.

Общее ослабление энергии радиоволн

$$L_{\Sigma} = L_0 + L_{\text{доп}}, \text{ дБ}. \quad (6)$$

Дополнительное ослабление энергии радиоволн $L_{\text{доп}}$ при распространении в реальных условиях равно

$$L_{\text{доп}} = L_{\text{атм}} + L_{\text{д}} + L_{\text{н}} + L_{\text{п}}, \text{ дБ}, \quad (7)$$

где $L_{\text{атм}}$ – ослабление в спокойной атмосфере, дБ;

$L_{\text{д}}$ – ослабление в осадках, дБ (в условиях «ясного неба» полагают $L_{\text{д}} = 0$);

L_H - ослабление из-за неточности наведения антенн, дБ;

L_{Π} - поляризационные потери, дБ.

Величина $L_{\text{доп}}$ зависит от значений рабочей частоты и угла места, характеристик антенн, вида поляризации волны и систем их наведения. Кроме того, ослабление в осадках зависит от климатического района, в котором находится ЗС, и изменяется во времени.

Ослабление в спокойной атмосфере $L_{\text{атм}}$ возникает из-за поглощения сигнала в кислороде и водяных парах и может быть рассчитано по методике рекомендаций МСЭ-Р (см. табл.3).

Таблица 3

Ослабление радиоволн в спокойной атмосфере $L_{\text{атм}}$ дБ

Угол места, град.	Частота, ГГц									
	4	6	10	11	12	14	16	18	20	30
90,0	0,04	0,05	0,07	0,07	0,08	0,10	0,14	0,22	0,44	0,38
80,0	0,04	0,05	0,07	0,07	0,08	0,11	0,15	0,23	0,44	0,39
40,0	0,07	0,08	0,10	0,11	0,13	0,16	0,22	0,35	0,68	0,60
30,0	0,09	0,10	0,13	0,14	0,16	0,21	0,29	0,45	0,88	0,77
20,0	0,13	0,15	0,19	0,21	0,24	0,30	0,42	0,65	1,28	1,12
10,0	0,25	0,29	0,37	0,41	0,47	0,60	0,82	1,29	2,52	2,21
5,0	0,51	0,57	0,75	0,83	0,93	1,19	1,64	2,57	5,03	4,41

Потери из-за несогласованности поляризаций антенн. В спутниковых системах связи применяют как круговую (на частотах до 10 ГГц обязательно), так и линейную (выше 10 ГГц) поляризацию волн. Потери возникают при несовпадении видов поляризации приёмной антенны и волны в точке приёма. На практике удаётся свести эти потери до величины 0,2-0,5 дБ.

Ослабление из-за неточности наведения антенн. Эти потери определяются угловым отклонением оси главного лепестка диаграммы направленности от истинного направления на ИСЗ, а также шириной и формой главного лепестка ДН антенны. Для снижения этих потерь антенны большого диаметра снабжаются системами автоматического наведения на ИСЗ.

В существующих системах спутниковой связи ослабление из-за неточности наведения антенн составляет порядка 0,15-0,3 дБ. Для дальнейших расчетов значение L_H выбирают в этих пределах.

Расчёт ослабления в дожде. Величина ослабления L_D связана с поглощением и рассеянием энергии радиоволн каплями дождя и может быть рассчитана в соответствии с рекомендацией Р-618 МСЭ-Р. Для расчёта величины ослабления необходимы следующие данные:

- координаты ЗС - $\text{Ш}_{\text{ЗС}}$ - широта ЗС (со знаком плюс для Северного полушария и со знаком минус - для Южного), $\text{Д}_{\text{ЗС}}$ - долгота ЗС, $H_{\text{ЗС}}$ - высота над уровнем моря (в км);

- рабочая частота - f ,

- угол места - β , процент времени месяца (или года), для которого определяются потери - $T_{\text{мес}}$ (или $T_{\text{год}}$).

Методика включает следующие шаги.

1. Определяется эффективная высота дождевой зоны $H_{\text{д}}$, км. Для Северного полушария

$$H_{\text{д}} = 5 - 0,075 \cdot (\text{Ш}_{\text{ЗС}} - 23) \quad \text{для } \text{Ш}_{\text{ЗС}} > 23^\circ \quad \text{и} \quad H_{\text{д}} = 5 \quad \text{для } 0^\circ \leq \text{Ш}_{\text{ЗС}} \leq 23^\circ. \quad (8)$$

2. Определяется путь сигнала в дожде l_{s}

$$l_{\text{s}} = (H_{\text{д}} - H_{\text{ЗС}}) / \sin \beta, \text{ км} \quad (9)$$

(формула справедлива для углов $\beta \geq 5^\circ$).

3. Рассчитывается горизонтальная проекция l_{g}

$$l_{\text{g}} = l_{\text{s}} \cdot \cos \beta, \text{ км.} \quad (10)$$

4. По картам рекомендации Р-837-6 МСЭ-Р (см. рис.6 - 13) определяется значение $R_{0,01}$ - интенсивности дождя в мм/ч, превышаемое в данной зоне в течение 0,01 % времени года.

5. Рассчитывается коэффициент уменьшения $r_{0,01}$, учитывающий пространственную неравномерность дождя

$$r_{0,01} = 1 / [1 + (l_{\text{g}} / l_0)], \quad (11)$$

где l_0 - опорное расстояние, зависящее от $R_{0,01}$,

$$l_0 = 35 \cdot \exp(-0,015 \cdot R_{0,01}), \text{ км.} \quad (12)$$

При > 100 мм/ч следует принять $l_0 = 7,81$ км.

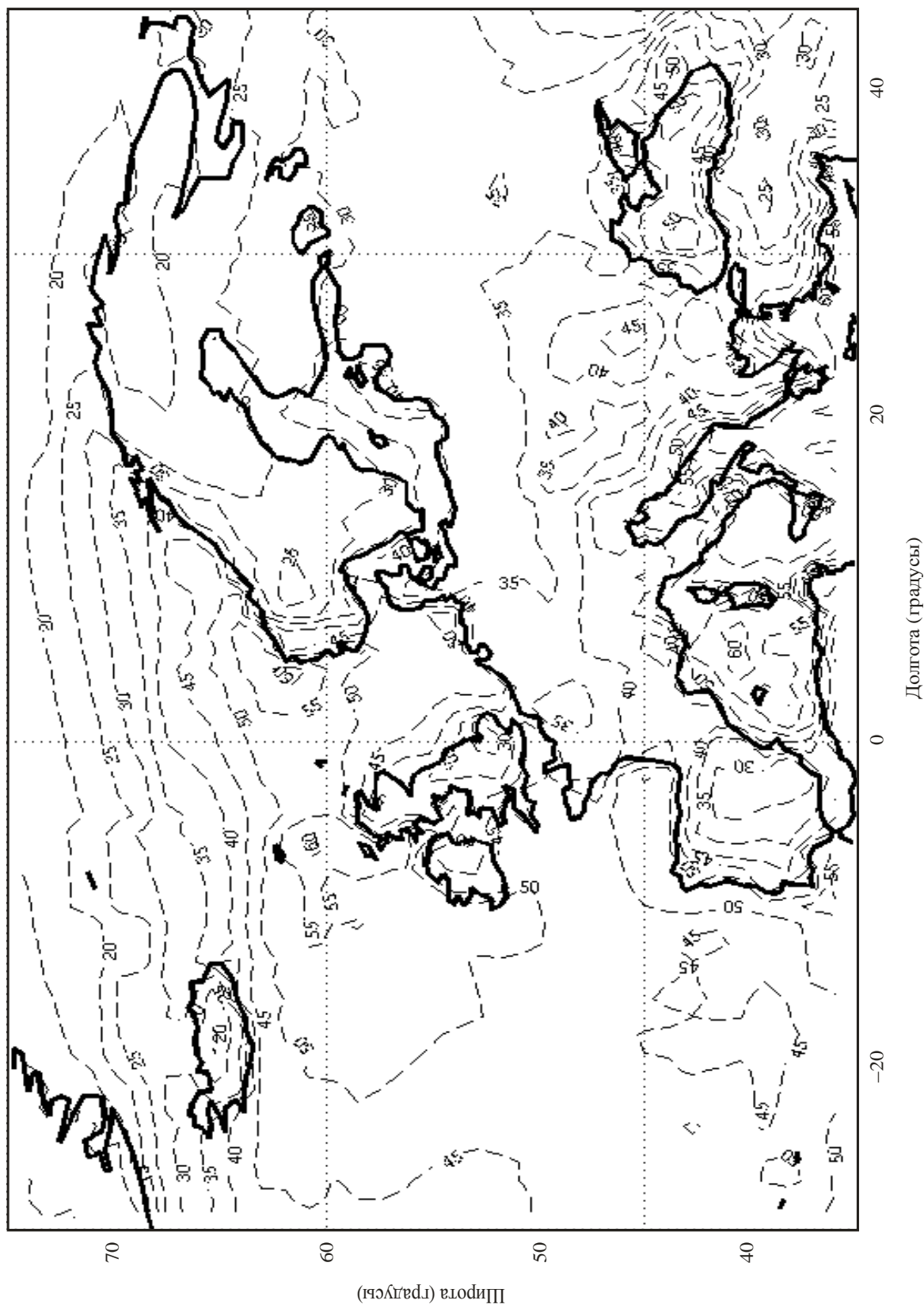
6. В соответствии с рекомендацией Р-838 МСЭ-Р рассчитывается удельное затухание сигнала в дожде γ_{r} , дБ/км. Оно зависит от рабочей частоты f , вида поляризации волны и интенсивности дождя

$$\gamma_{\text{r}} = k \cdot (R_{0,01})^\alpha, \quad (13)$$

где коэффициенты k и α рассчитываются по формулам:

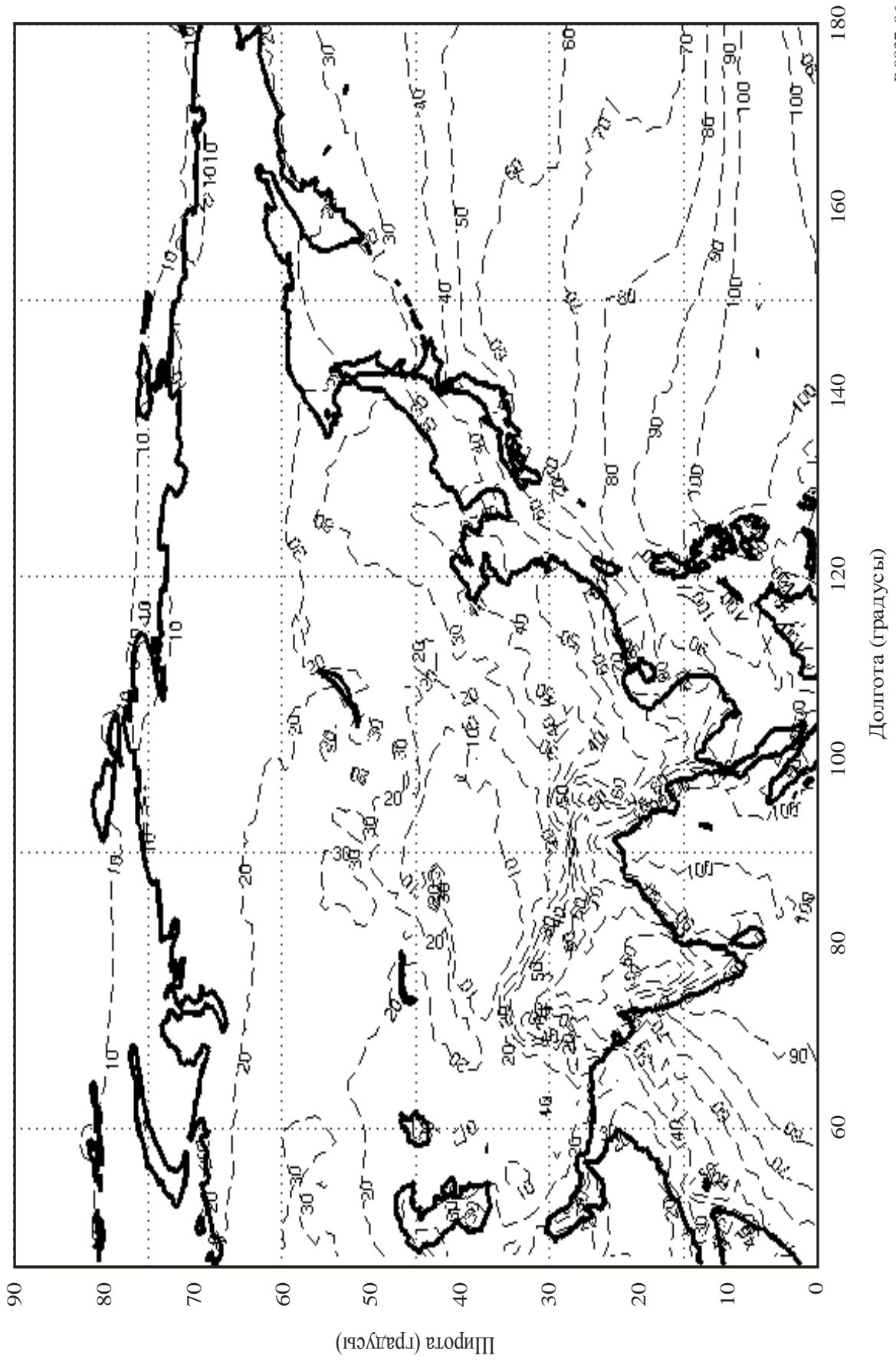
$$k = [k_{\text{H}} + k_{\text{V}} + (k_{\text{H}} - k_{\text{V}}) \cdot \cos^2 \beta \cdot \cos 2\tau] / 2, \quad (14)$$

$$\alpha = [k_{\text{H}} \cdot \alpha_{\text{H}} + k_{\text{V}} \cdot \alpha_{\text{V}} + (k_{\text{H}} \cdot \alpha_{\text{H}} - k_{\text{V}} \cdot \alpha_{\text{V}}) \cdot \cos^2 \beta \cdot \cos 2\tau] / 2k. \quad (15)$$



P.0837-04

Рис.6. К определению значения $R_{0,01}$



P.0837-06

Рис.7. К определению значения $R_{0,01}$

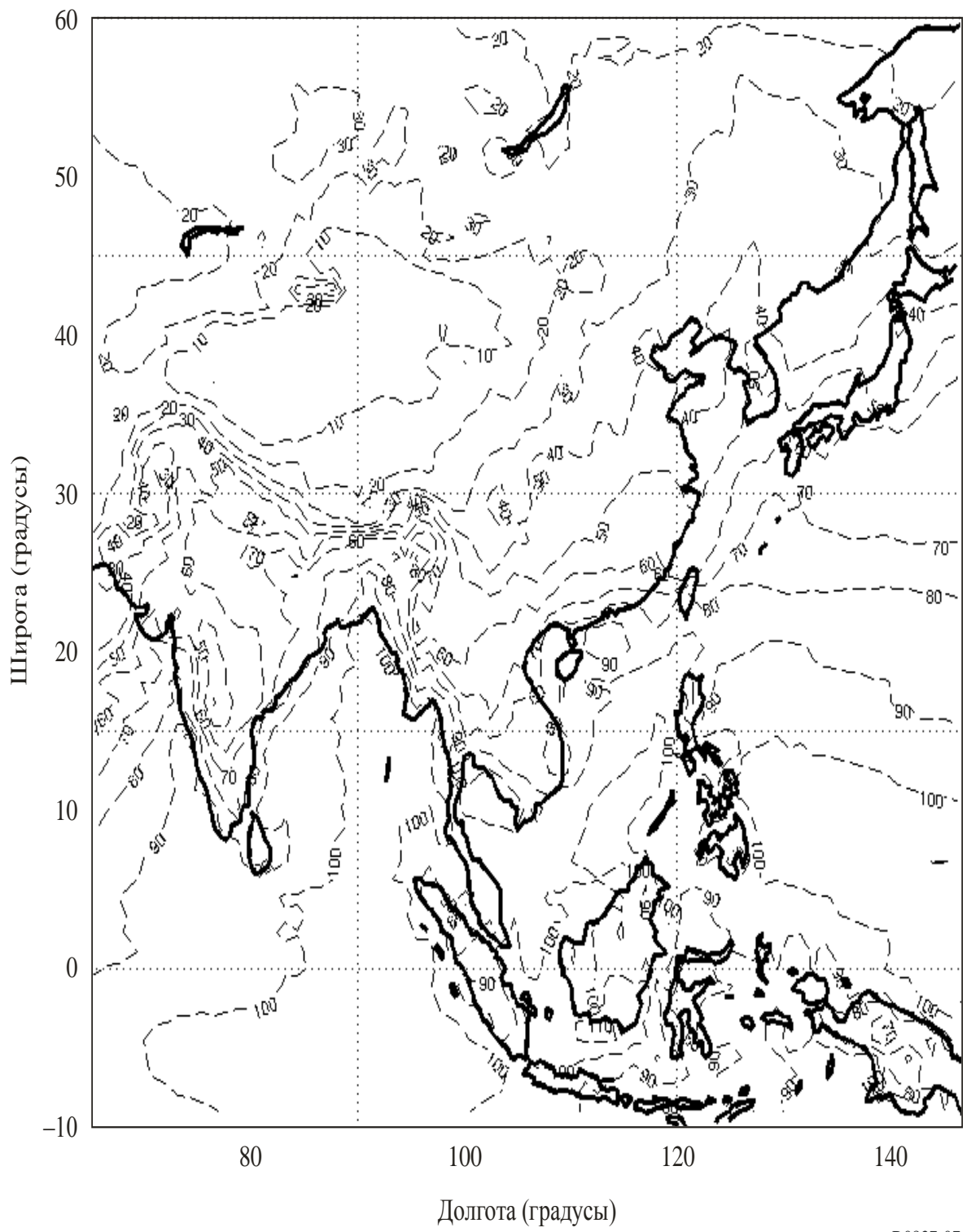


Рис.8. К определению значения $R_{0,01}$

Здесь β - угол места, τ - угол наклона плоскости поляризации к горизонту (при круговой поляризации $\tau = 45^\circ$). Коэффициенты k_H , k_V , α_H , α_V определяются из табл.4.

7. Потери в дожде $L_{д0,01Г}$, превышаемые в течение не более чем 0,01% года, определяются по формуле

$$L_{д0,01Г} = \gamma_r \cdot l_s \cdot r_{0,01}, \text{ дБ.} \quad (16)$$

Таблица 4

Коэффициенты регрессии для оценки удельного затухания в дожде

f , ГГц	k_H	k_V	α_H	α_V
1	0,0000387	0,0000352	0,912	0,880
2	0,000154	0,000138	0,963	0,923
4	0,000650	0,000591	1,121	1,075
6	0,00175	0,00155	1,308	1,265
7	0,00301	0,00265	1,332	1,312
8	0,00454	0,00395	1,327	1,310
10	0,0101	0,00887	1,276	1,264
12	0,0188	0,0168	1,217	1,200
15	0,0367	0,0335	1,154	1,128
20	0,0751	0,0691	1,099	1,065
25	0,124	0,113	1,061	1,030
30	0,187	0,167	1,021	1,000
35	0,263	0,233	0,979	0,963
40	0,350	0,310	0,939	0,929

Значения k и α для частот, отличных от приведенных в табл.4, могут быть получены интерполяцией с использованием логарифмической шкалы для частот k и линейной шкалы для α .

В случае, если заданы другие проценты времени, то величина потерь $L_{дТГ}$ в дожде, которая превышает для другого процента времени года T_G $L_{д0,01Г}$ в диапазоне 0,001...1%, может быть пересчитана по формуле

$$L_{дТГ} = L_{д0,01Г} \cdot 0,12 \cdot T_G^{-(0,546+0,043gT_G)}, \text{ дБ.} \quad (17)$$

При требовании обеспечения необходимого уровня сигнала в определённом проценте времени месяца T_M в рекомендации Р-841 МСЭ-Р содержится формула для пересчёта T_M в T_G , которой можно пользоваться при $1,9 \cdot 10^{-4} \% < T_M < 7,8\%$

$$T_G = 0,3 \cdot T_M^{1,15}, \text{ \%}. \quad (18)$$

Поскольку для цифровой спутниковой линии связи требуется $T_M = 0,03\%$, то из (18) и (17) следует

$$L_{дГг} = 1,255 \cdot L_{д0,01г} = L_{д}, \text{ дБ.} \quad (19)$$

Значения $L_{д}$ и L_{Σ} рассчитываются, как в направлении «вверх» - $L_{д.вверх}$ и $L_{\Sigma\text{вверх}}$, так и в направлении «вниз» - $L_{д.вниз}$ и $L_{\Sigma\text{вниз}}$.

Расчет шумовой температуры. Суммарная шумовая температура ИСЗ, приведенная к облучателю приемной антенны, определяется выражением

$$T_{\Sigma\text{исз}} = T_{\text{а.исз}} + T_0 \cdot (10^{\eta_{\text{афт.прм.исз}}/10} - 1) + T_{\text{прм.исз}} \cdot 10^{\eta_{\text{афт.прм.исз}}/10}, \text{ К.} \quad (20)$$

Здесь $T_{\text{а.исз}}$ - результирующая шумовая температура антенны ИСЗ, $\eta_{\text{афт.прм.исз}}$ - потери в антенно-фидерном тракте ИСЗ на приём; $T_{\text{прм.исз}}$ - эквивалентная шумовая температура (ЭШТ) приемника ИСЗ, обусловленная собственными тепловыми шумами малошумящего усилителя (МШУ) приемника. Значение $T_{\text{прм.исз}}$ можно выбрать в пределах 220...280К.

При расчетах с достаточной точностью можно полагать:

$$T_{\text{а.исз}} = T_0 = 290 \text{ К, } \eta_{\text{афт.прм.исз}} = 0,5 \text{ дБ.}$$

Суммарная шумовая температура ЗС при «ясном небе» и дожде, приведенная к облучателю приемной антенны, определяется по формулам:

$$T_{\Sigma\text{зс.ян}} = T_{\text{а.зс.ян}} + T_0 \cdot (10^{\eta_{\text{афт.прм}}/10} - 1) + T_{\text{прм.зс}} \cdot 10^{\eta_{\text{афт.прм}}/10}, \text{ К,} \quad (21)$$

$$T_{\Sigma\text{зс.д}} = T_{\text{а.зс.д}} + T_0 \cdot (10^{\eta_{\text{афт.прм}}/10} - 1) + T_{\text{прм.зс}} \cdot 10^{\eta_{\text{афт.прм}}/10}, \text{ К,} \quad (21.а)$$

где $T_{\text{прм.зс}}$ - ЭШТ приемника ЗС, К. Она может быть выбрана в пределах 35-50 К для диапазона **С**, 60-80 К для диапазона **К_u** и 180-250 К для диапазона **К_a**; $\eta_{\text{афт.прм}}$ (обычно не более 0,5дБ) - ослабление сигнала в антенно-фидерном тракте ЗС на приём; $T_0 = 290 \text{ К}$; $T_{\text{а.зс}}$ - шумовая температура антенны ЗС при «ясном небе» и дожде, определяемая по формулам:

$$T_{\text{а.зс.ян}} = T_{\text{к}} + c_{\text{бл}} \cdot T_0 + T_{\text{атм.ян}}(\beta), \text{ К.} \quad (22)$$

$$T_{\text{а.зс.д}} = T_{\text{к}} + c_{\text{бл}} \cdot T_0 + T_{\text{атм.д}}(\beta), \text{ К.} \quad (22.а)$$

Здесь $T_{\text{к}}$ - ЭШТ космического излучения. В диапазонах частот 4 ГГц и выше этим видом шумов можно пренебречь (за исключением шумов от Солнца, которые могут «подсвечивать» приёмную антенну ЗС и вызывать прогнозируемые кратковременные перерывы связи); $c_{\text{бл}} = 0,2-0,4$ - коэффициент, учитывающий интегральный уровень боковых лепестков приёмной антенны ЗС;

$T_{\text{атм}}(\beta)$ - ЭШТ атмосферы при «ясном небе» и дожде, которые определяются по формулам:

$$T_{\text{атм.ян}}(\beta) = T_{\text{а.сп}} \cdot (1 - 10^{-L_{\text{атм}}/10}), \text{ К,} \quad (23)$$

$$T_{\text{атм.д}}(\beta) = T_{\text{а.ср}} \cdot (1 - 10^{-(L_{\text{атм}} + L_{\text{д.вниз}})/10}), \text{ К}, \quad (23.a)$$

где $T_{\text{а.ср}} \approx 260\text{К}$ - яркостная температура спокойной (при отсутствии дождя) атмосферы.

Системы спутниковой связи, входящие в состав сетей общего пользования, обычно проектируют исходя из требований рекомендации МСЭ-P S-614:

- в условиях «ясного неба» $K_{\text{ош}} \leq 10^{-7}$;
- в условиях дождя $K_{\text{ош}} \geq 10^{-3}$ в течение не более, чем $T_{\text{М}} = 0,2\%$, из которых $0,17\%$ относятся к периоду неготовности, а $0,03\%$ - определяют ухудшение качества связи в период готовности.

Ширина спектра модулированного радиосигнала Δf_c (в Гц) численно равна результирующей скорости передачи $B_{\text{рк}}$ (в бит/с) с учетом коэффициента скругления спектра α_c

$$\Delta f_c = B_{\text{рк}} \cdot (1 + \alpha_c), \text{ Гц}; \quad (24)$$

$$B_{\text{рк}} = B_{\text{вх}} / [R_k \cdot \log_2(M)], \quad (25)$$

где $M = 2$ при модуляции BPSK, $M = 4$ при модуляции QPSK и $M = 8$ при модуляции 8PSK; R_k – скорость кода с прямым исправлением ошибок.

Пренебрегая скоростью передачи сигналов служебной связи, получаем $B_{\text{вх}} = B_{\text{инф}}$.

Требуемое для обеспечения заданной достоверности значение $h_{\text{доп}}$ (отношение энергии несущей, приходящейся на 1 бит цифрового сигнала к спектральной мощности шума) на входе демодулятора приемной ЗС определяется из табл.5 в зависимости от кодовой скорости R_k и требуемого значения коэффициента ошибок $K_{\text{ош}}$ ($K_{\text{ош}} = 10^{-7}$ и 10^{-3}) цифрового сигнала на выходе декодера. Данные приведены для декодирования по алгоритму Витерби и учитывают погрешности аппаратурной реализации.

Таблица 5

Значения допустимых величин $h_{\text{доп}}$, дБ

Коэффициент ошибок $K_{\text{ош}}$	$R_k = 1/2$	$R_k = 3/4$	$R_k = 7/8$
10^{-3}	4,1	5,2	6,2
10^{-6}	6,0	7,5	8,6
10^{-7}	6,6	8,2	9,3
10^{-8}	7,1	8,7	10,2

При проектировании следует иметь в виду, что на входе приемника ЗС помимо полезного сигнала и теплового шума могут присутствовать

также мешающие сигналы от других систем связи и интермодуляционные шумы, возникающие в передатчиках ИСЗ и ЗС, работающих в многосигнальном режиме. Данные помехи могут быть учтены прибавкой к $h_{\text{доп}}$ запаса $\Delta_{\text{доп}} = 1-2$ дБ, т.е. $h_{\text{треб}} = h_{\text{доп}} + \Delta_{\text{доп}}$.

Затем рассчитывают требуемые значения отношения мощности несущей к спектральной мощности (СПМ) шума $q_{\text{фтреб}}$ и $q_{\text{треб}}$ в дБГц для заданных значений $K_{\text{ош}}$

$$q_{\text{фтре}} = h_{\text{треб}} + 10 \lg B_{\text{вк}}, \quad (26)$$

$$q_{\text{треб}} = q_{\text{фтре}} - 10 \lg \Delta f_{\text{с}}. \quad (27)$$

Для обеспечения требуемого отношения $q_{\text{флинии}}$ в конце спутниковой линии, состоящей из двух участков - «вверх» и «вниз», на каждом оно должно обеспечиваться с запасом. На участке «вверх» энергетический потенциал обеспечить легче, поэтому коэффициент энергетического запаса a_3 на этом участке выбирают больше $a_3 = 5-10$, а на участке «вниз» коэффициент энергетического запаса b_3 рассчитывают по формуле

$$b_3 = a_3 / (a_3 - 1) \quad (28)$$

и распределяют требуемое отношение $q_{\text{ф}}$ по участкам для «ясного неба» и дождя:

$$q_{\text{фтреб.вверх}} = q_{\text{фтре}} + 10 \lg a_3, \text{ дБГц}; \quad (29)$$

$$q_{\text{фтреб.вниз}} = q_{\text{фтре}} + 10 \lg b_3, \text{ дБГц}. \quad (30)$$

Далее может быть выбран следующий порядок расчета:

1. Коэффициенты усиления передающей $G_{\text{пер.исз}}$ и приёмной $G_{\text{прм.исз}}$ антенн ИСЗ считаются одинаковыми и выбираются в пределах 25-30 дБ. *Примечание к п.1. Если известны значения в градусах ширины главного лепестка антенны ИСЗ по половинной мощности в двух взаимно перпендикулярных плоскостях $\Delta\varphi$ и $\Delta\beta$, то коэффициент усиления антенны определяется по формуле*

$$G_{\text{исз}} = 45,05 - 10 \lg (\Delta\varphi \cdot \Delta\beta), \text{ дБ}. \quad (31)$$

2. Определяются значения эквивалентной изотропно-излучаемой мощности (ЭИИМ)

$$P_{\Sigma\text{исз}} = 10 \lg P_{\text{пер.исз}} - \eta_{\text{афт.пер.исз}} + G_{\text{пер.исз}}, \text{ дБВт}, \quad (32)$$

где $P_{\text{пер.исз}}$ – выходная мощность передатчика ИСЗ, Вт; $\eta_{\text{афт.пер.исз}}$ – потери в антенно-фидерном тракте передачи ИСЗ (принимается $\eta_{\text{афт.пер.исз}} = 1$ дБ), а ЭИИМ в расчёте на одну несущую

$$P_{\Sigma 1.исз} = P_{\Sigma исз} - \Delta_{кр} - 10 \lg \Delta_{р.вых} - 10 \lg n_{нес}, \text{ дБВт}, \quad (33)$$

где $\Delta_{кр} = 3$ дБ, если ЗС находится ближе к краю зоны обслуживания; $\Delta_{р.вых}$ – коэффициент недоиспользования выходной мощности в много-сигнальном режиме; обычно $\Delta_{р.вых} = 2-5$; $n_{нес}$ – количество полос частот (несущих).

При этом добротность тракта ИСЗ

$$[G/T]_{исз} = G_{прм.исз} - 10 \lg T_{\Sigma исз}, \text{ дБ/К}. \quad (34)$$

3. Рассчитывается плотность потока мощности (ППМ) - параметр SFD (Saturated Flux Density) на входе ИСЗ, необходимый для обеспечения на линии «вверх» требуемого отношения $q_{\text{треб.вверх}}$

$$SFD_{\text{ян}} = q_{\text{треб.вверх.ян}} - 207,15 - [G/T]_{исз} + \Delta_{[G/T]} + 20 \lg f_{\text{вверх}}, \text{ дБВт/м}^2, \quad (35)$$

$$SFD_{\text{д}} = q_{\text{треб.вверх.д}} - 207,15 - [G/T]_{исз} + \Delta_{[G/T]} + 20 \lg f_{\text{вверх}}, \text{ дБВт/м}^2, \quad (35.а)$$

где $\Delta_{[G/T]} = 3$ дБ, если ЗС находится ближе к краю зоны обслуживания, а значение $f_{\text{вверх}}$ подставляется в ГГц.

Примечание к п.3. При заданном значении SFD определяется значение $q_{\text{треб.вверх}}$ по формуле

$$q_{\text{треб.вверх}} = SFD_{\text{д}} + 207,15 + [G/T]_{исз} - \Delta_{[G/T]} - 20 \lg f_{\text{вверх}}, \text{ дБГц}, \quad (36)$$

где $\Delta_{[G/T]} = 3$ дБ, если ЗС находится ближе к краю зоны обслуживания; значение $f_{\text{вверх}}$ подставляется в ГГц. Если рассчитанное значение $q_{\text{треб.вверх}}$ превышает или равно допустимому – расчет ЭИИМ закончен, если меньше – требуется скорректировать: либо коэффициенты a_3 и b_3 , либо кодовую скорость R , либо параметр SFD ретранслятора, либо и то и другое вместе и повторить расчет.

4. Определяются требуемые значения ЭИИМ одной несущей, излучаемой ЦЗС в условиях «ясного неба» и дождя

$$P_{\Sigma 1.цзс.ян} = SFD_{\text{ян}} + 20 \lg d + 71 + L_{\text{атм}} + L_{\text{н}} + L_{\text{п}}, \text{ дБВт}, \quad (37)$$

$$P_{\Sigma 1.цзс.д} = SFD_{\text{д}} + 20 \lg d + 71 + L_{\text{атм}} + L_{\text{н}} + L_{\text{п}} + L_{\text{д.вверх}}, \text{ дБВт}, \quad (37.а)$$

где значение d подставляется в км.

Выходная мощность передатчика определяется исходя из условий обеспечения рассчитанных выше значений ЭИИМ ($P_{\Sigma 1.цзс}$ и $P_{\Sigma 1.цзс.д}$) и добротности $[G/T]_{\text{зс.ян}}$ и $[G/T]_{\text{зс.д}}$, требующихся как в условиях «ясного неба», так и дождя.

Уровень мощности одной несущей на выходе передатчика ЦЗС при «ясном небе» и дожде можно определить как:

$$P_{1.\text{пер.цзс.ян}} = P_{\Sigma 1.\text{цзс.ян}} - G_{\text{цзс}} + \eta_{\text{афт.пер.цзс}}, \text{ дБВт},$$

$$P_{1.\text{пер.цзс.ян}} = 10^{P_{1.\text{пер.цзс.ян}}/10}, \text{ Вт}, \quad (38)$$

$$P_{1.\text{пер.цзс.д}} = P_{\Sigma 1.\text{цзс.д}} - G_{\text{цзс}} + \eta_{\text{афт.пер.цзс}}, \text{ дБВт},$$

$$P_{1.\text{пер.цзс.д}} = 10^{P_{1.\text{пер.цзс.д}}/10}, \text{ Вт}. \quad (38.a)$$

Ослабление сигнала в антенно-фидерном тракте ЦЗС $\eta_{\text{афт.пер.цзс}}$ можно принять равным 0,5-2 дБ.

В случае если ЦЗС излучает n несущих, мощность насыщения передатчика должна быть не менее, чем

$$P_{1.\text{пер.цзс.макс}} = P_{1.\text{цзс}} + 10 \lg n + 7, \text{ дБВт}, \quad P_{1.\text{пер.цзс.макс}} = 10^{P_{1.\text{пер.цзс.макс}}/10}, \text{ Вт}, \quad (39)$$

где 7 дБ - запас, необходимый для работы передатчика в линейном режиме. В качестве $P_{1.\text{цзс}}$ принимается максимальное из значений $P_{1.\text{цзс.д}}$ и $P_{1.\text{цзс.ян}}$.

Требуемое значение добротности приемной ЗС рассчитывается из условия обеспечения на линии «вниз» необходимых отношений $q_{\text{треб.вниз}}$ при «ясном небе» и дожде

$$[G/T]_{\text{зс.ян}} = q_{\text{треб.ян}} + L_{0.\text{вниз}} + L_{\text{атм}} + L_{\text{н}} + L_{\text{п}} - P_{\Sigma 1.\text{исз}} - 228,6, \text{ дБ/К}, \quad (40)$$

$$[G/T]_{\text{зс.д}} = q_{\text{треб.вниз}} + L_{0.\text{вниз}} + L_{\text{атм}} + L_{\text{н}} + L_{\text{п}} + L_{\text{д.вниз}} - P_{\Sigma 1.\text{исз}} - 228,6, \text{ дБ/К}, \quad (40.a)$$

где $L_{0.\text{вниз}}$ и $L_{\text{д}}$ рассчитывается аналогично $L_{0.\text{вверх}}$ и $L_{\text{д}}$, но для частоты $f_{\text{вниз}}$, местоположения ЗС и для своего значения наклонной дальности d .

Рассчитываются значения коэффициента усиления приемной антенны: для «ясного неба» - $G_{\text{зс.ян}}$ и дождя - $G_{\text{зс.д}}$

$$G_{\text{зс.ян}} = [G/T]_{\text{зс.ян}} + 10 \lg T_{\Sigma \text{зс.ян}}, \text{ дБ}, \quad (41)$$

$$G_{\text{зс.д}} = [G/T]_{\text{зс.д}} + 10 \lg T_{\Sigma \text{зс.д}}, \text{ дБ} \quad (41.a)$$

и в качестве $G_{\text{зс}}$ выбирается большее значение, которое надо пересчитать в «разы» при расчете диаметра приемной антенны ЗС.

Диаметр антенны $D_{\text{ант}}$ ЗС рассчитывается с помощью формулы

$$G_{\text{зс}} = \nu \pi^2 \cdot D_{\text{ант}}^2 / \lambda_{\text{макс}}^2, \quad (42)$$

где ν - коэффициент использования поверхности раскрыва антенны.

Значение $\nu = 0,5-0,6$ в случае однозеркальной антенны и $\nu = 0,6-0,8$ в случае двухзеркальной антенны.

С точки зрения электромагнитной совместимости необходимо отметить, что у поверхности Земли диапазоны частот 4 и 11 ГГц используются наземными радиорелейными линиями (РРЛ). Чтобы излучение ИСЗ проектируемой спутниковой радиорелейной линии не создавало для наземных РРЛ недопустимых помех, плотность потока мощности (ППМ) W сигнала передатчика ИСЗ у поверхности Земли в контрольной полосе частот Δf_k не должна превышать допустимых значений. Эти значения, измеряемые в дБВт/м², для ИСЗ приведены в табл.6.

ППМ рассчитывается по формуле

$$W = P_{\Sigma \text{ИСЗ}} - L_{0, \text{вниз}} - L_{\text{атм}} - L_n - L_{\pi} + 10 \lg(4\pi / \lambda^2) + 10 \lg(\Delta f_k / \Delta f_{\text{ш}}), \text{ дБВт/м}^2, \quad (43)$$

где λ - длина волны на линии «вниз», м;

Δf_k - эталонная полоса частот, равная 4 кГц,

$\Delta f_{\text{ш}}$ - эквивалентная (энергетическая) шумовая полоса приемника

$$\Delta f_{\text{ш}} = \gamma_{\text{прм}} \cdot \Delta f_{\text{прм}}, \quad (44)$$

$\gamma_{\text{прм}}$ - коэффициент, определяемый избирательными свойствами приемника ($\gamma_{\text{прм}} = 1, 1 \dots 1, 2$), $\Delta f_{\text{прм}}$ – полоса частот приемника ($\Delta f_{\text{прм}} = \Delta f_c$).

Если ППМ превышает допустимое значение, следует уменьшить мощность передатчика ИСЗ и повторить расчеты.

Таблица 6

Допустимые значения плотности потока мощности у поверхности Земли

Диапазон частот на участке «вниз», ГГц	Угол возвышения антенны ЗС, град.		
	$\beta \leq 5$	$5 < \beta \leq 25$	$25 < \beta \leq 90$
3,4...4,2; 4,5...4,8; 7,25...7,75	-152	$-152 + 0,5 \cdot (\beta - 5)$	-142
10, 7 ... 11,7	-150	$-150 + 0,5 \cdot (\beta - 5)$	-140
12,2 ... 12,75	-148	$-148 + 0,5 \cdot (\beta - 5)$	-138

Рекомендуемый алгоритм расчета также представлен в виде сводной таблицы значений параметров (табл.7), которую необходимо заполнить с указанием размерностей заданных, рассчитываемых и выбранных величин параметров.

Таблица 7

Сводная таблица значений параметров

№ п/п	Величина	Значение	Примечание
1	2	3	4
заданные значения			
1	$\Pi_{ЗС}$		для центральной ЗС
2	$D_{ЗС}$		---
3	$D_{исз}$		
4	$\Pi_{ЗС}$		для приемной ЗС
5	$D_{ЗС}$		---
6	$f_{\text{вверх}}$		
7	вид поляризации		для $f_{\text{вверх}}$
8	$f_{\text{вниз}}$		
9	вид поляризации		для $f_{\text{вниз}}$
10	вид модуляции		
11	$G_{1ЗС}$		
12	$B_{\text{инф}}$		
13	R		
14	α_c		
15	$P_{\text{пер.исз}}$		на ствол
16	полоса частот		одного ствола
17	$n_{\text{нес}}$		на ствол
рассчитанные и выбранные значения			
1	β		на участке «вверх»
2	φ		---
3	ρ		---
4	d		---
5	$\lambda_{\text{вверх}}$		---
6	$L_{0.\text{вверх}}$		---
7	$L_{\text{атм}}$		---
8	$L_{\text{н}}$		---
9	$L_{\text{п}}$		---
10	$H_{ЗС}$		---
11	$H_{\text{д}}$		---
12	l_s		---
13	l_g		---
14	$R_{0,01}$		---
15	l_0		---
16	$r_{0,01}$		---
17	$k_{\text{н}}$		---

Продолжение таблицы 7

1	2	3	4
18	k_v		---
19	α_H		---
20	α_v		---
21	τ		---
22	k		---
23	α		---
24	γ_r		---
25	$L_{д0,01r}$		---
26	$L_{дTr} = L_{д}$		
27	$L_{доп}$		---
28	$L_{\Sigma\text{вверх}} = L_{\Sigma}$		---
29	β		на участке «вниз»
30	ϕ		---
31	ρ		---
32	d		---
33	$\lambda_{\text{вниз}}$		---
34	$L_{0.\text{вниз}}$		---
35	$L_{\text{атм}}$		---
36	L_H		---
37	L_{Π}		---
38	H_{3c}		---
39	$H_{д}$		---
40	l_s		---
41	l_g		---
42	$R_{0,01}$		---
43	l_0		---
44	$r_{0,01}$		---
45	k_H		---
46	k_v		---
47	α_H		
48	α_v		---
49	τ		---
50	k		---
51	α		---
52	γ_r		---
53	$L_{д0,01r}$		---
54	$L_{дTr} = L_{д}$		
55	$L_{доп}$		---

Продолжение таблицы 7

1	2	3	4
56	$L_{\Sigma\text{ВНИЗ}} = L_{\Sigma}$		---
57	$T_{\Sigma\text{ИСЗ}}$		
58	$T_{\text{атм.ян}(\beta)}$		
59	$T_{\text{атм.д}(\beta)}$		
60	$T_{\text{а.зс.ян}}$		
61	$T_{\text{а.зс.д}}$		
62	$T_{\Sigma\text{ЗС.ян}}$		
63	$T_{\Sigma\text{ЗС.д}}$		
64	$B_{\text{ВХ}}$		
65	$B_{\text{РК}}$		
66	M		
67	$\log_2 M$		
68	$\Delta f_{\text{с}}$		
69	a_3		---
70	b_3		---
71	$h_{\text{доп.ян}}$		при ясном небе и $K_{\text{ош}} = 10^{-7}$
72	$h_{\text{треб.ян}}$		---
73	$q_{\text{треб.ян}}$		---
74	$q_{\text{треб.ян}}$		---
75	$q_{\text{треб.вверх.ян}}$		---
76	$q_{\text{треб.вниз.ян}}$		---
77	$h_{\text{доп.д}}$		при дожде и $K_{\text{ош}} = 10^{-3}$
78	$h_{\text{треб.д}}$		---
79	$q_{\text{треб.д}}$		---
80	$q_{\text{треб.д}}$		---
81	$q_{\text{треб.вверх.д}}$		---
82	$q_{\text{треб.вниз.д}}$		---
83	$G_{1\text{пер.исз}} = G_{2\text{прм.исз}}$		
84	$P_{\Sigma\text{ИСЗ}}$		
85	$P_{\Sigma 1.\text{исз}}$		
86	$[G/T]_{\text{исз}}$		
87	$SFD_{\text{ян}}$		
88	$SFD_{\text{д}}$		
89	$P_{\Sigma 1\text{зс.ян}}$		
90	$P_{\Sigma 1\text{зс.д}}$		

Продолжение таблицы 7			
1	2	3	4
91	$P_{1.\text{пер.зс.ян}}$		
92	$P_{1.\text{пер.зс.д}}$		
93	$P_{\text{пер.зс.макс}}$		$P_{\text{пер.зс}} = P_{\text{пер.зс.макс}}$
94	$[G/T]_{\text{зс.ян}}$		
95	$[G/T]_{\text{зс.д}}$		
96	$G_{2.\text{прм.зс.ян}}$		
97	$G_{2.\text{прм.зс.д}}$		
98	$D_{\text{ант}}$		
99	W		норма выполняется

После окончания расчетов следует построить диаграмму уровней спутниковой линии связи. Пример диаграммы уровней, с указанием ее составляющих, приведен на рис.14. При построении диаграммы уровней рекомендуется на оси ординат использовать равномерную шкалу уровней мощности в дБВт.

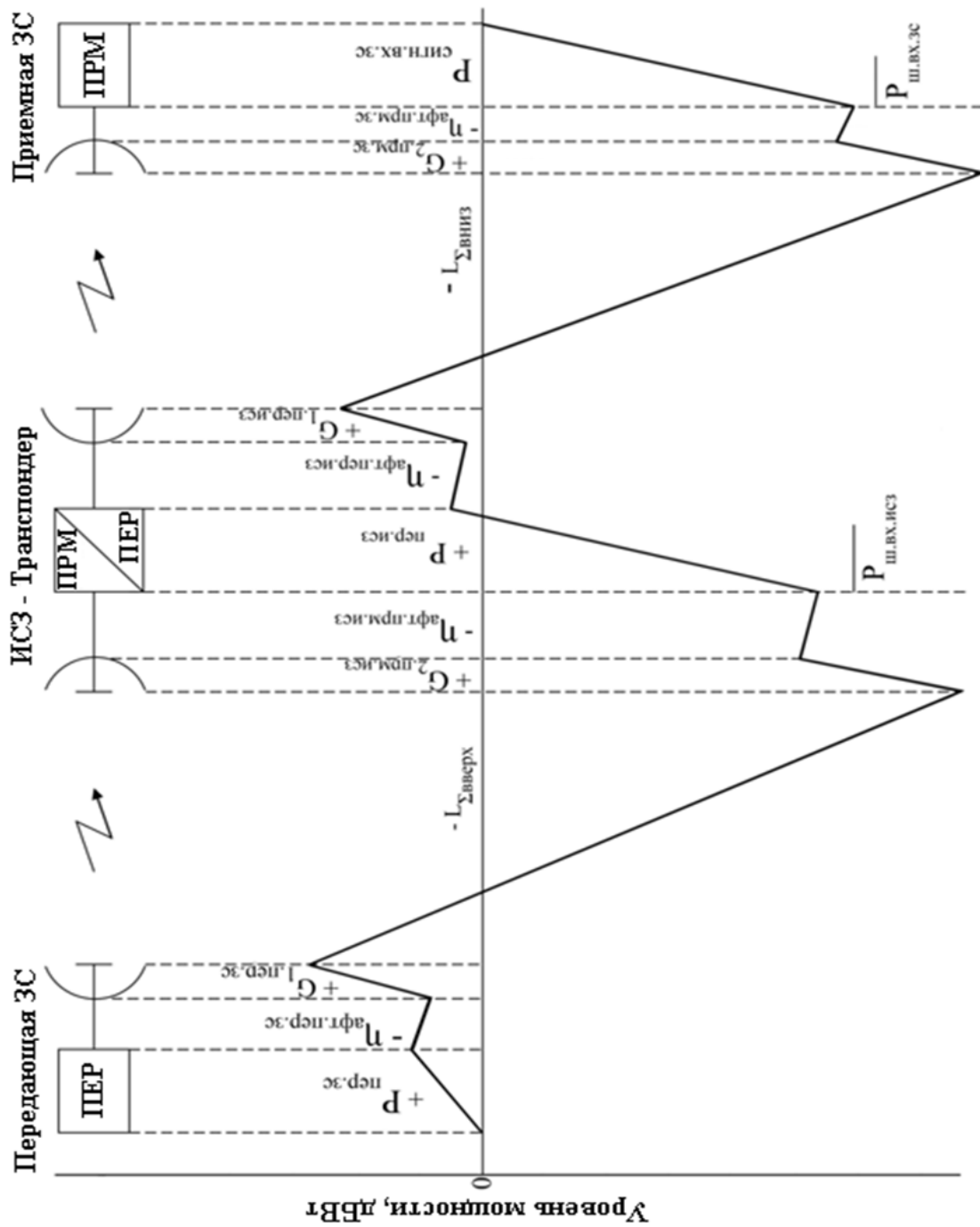


Рис.9. Пример построения диаграммы уровней спутниковой линии связи

ЛИТЕРАТУРА

- 1.Бартенев В.А., Болотов Г.А. и др. Спутниковая связь и вещание. Справочник /под ред. Л.Я. Кантора – М.:Радио и связь, 1997.
- 2.Сухорукова И.Ю., Тарасов С.С. Проектирование цифровых систем спутниковой связи.- М.:МТУСИ, 2012.
- 3.ГОСТ Р 53363-2009. Цифровые радиорелейные линии. Показатели качества. Методы расчета.
- 4.Рекомендация МСЭ-R P.838-2 Модель погонного ослабления в дожде, используемая в методах прогнозирования.
- 5.ITU-R Rec. S.614-3. Allowable error performance for a hypothetical reference digital path in the fixed-satellite service operating below 15 GHz when forming part of an international connection in an integrated services digital network (11/93).
- 6.ITU-R p.618-5 Propagation data and prediction methods required for the design of earth space telecommunication systems.(Question ITU-R 206/3).
- 7.ITU-R PN.837-1Characteristics of precipitation for propagation modelling(Question ITU-R 201/3).
- 8.Рекомендация МСЭ-R P.837-6 Характеристики осадков, используемые при моделировании распространения радиоволн. (Вопрос МСЭ-R 201/3).
- 9.Электромагнитная совместимость систем спутниковой связи./Под ред. Л.Я. Кантора и В.В.Ноздрина. – М.:НИИР, 2009.
- 10.Ликонцев Д.Н.Антенны мобильной и спутниковой систем связи. Индивидуальные задания и методические указания к их выполнению для специальности 5А522105 – «Мобильные системы связи».- Ташкент: ТУИТ, 2008.
- 11.Основы измерения коэффициента шума в радиочастотном и микроволновом диапазонах. Заметки по применению 57-1. Публикация AgilentTechnologies 5953-8255RURU, 2011.
- 12.Маковеева М.М., Шинаков Ю.С. Системы связи с подвижными объектами. – М.:Радио и связь, 2002.

Типовые энергетические показатели

В табл. П.2 и П.3 значения ЭИИМ и плотности потока мощности приведены для насыщения в односигнальном режиме.

Таблица П.2

Зона обслуживания	Европейская зона обслуживания			Широкая европейская зона обслуживания		
	1	2	3	1	2	3
«Минимальная ЭИИМ» в зоне, дБВт	50,0	48,0	42,0	48,0	46,0	41,0
Минимальная G/T в зоне, дБ/К	+6	+4	-2	+4	+2	-3

Таблица П.3

Плотность потока мощности насыщения (параметр SFD)

Зона обслуживания	Режим фиксированного усиления дБВт/м ²	Режим автоматической установки уровня, дБВт/м ²
Европейская	-77...-97	-80...-100
Широкая европейская	-77...-97	-80...-100

На рис.П.1 приведена зона обслуживания ИСЗ «Экспресс-АМб».

