

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна
Должность: проректор по учебной работе
Дата подписания: 21.12.2021 14:46:47
Уникальный программный ключ:
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f111eab73a913d448511a56d1089

МИНОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

« 15 » 12



2017 г.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПУТНИКОВОГО РАДИОКАНАЛА

Методические указания
по выполнению практической работы
для студентов, обучающихся по специальности
10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» по курсу «Методы пространственного моделирования радиоканала»

Курск 2017

УДК 621.396.72

Составители: В.Г.Довбня, И.Г.Бабанин, А.А.Тимофеева

Рецензент

Доктор физико-математических наук, профессор *А.А. Гуламов*

Математическое моделирование спутникового радиоканала : методические указания по выполнению практической работы / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.Г.Довбня, И.Г.Бабанин, А.А.Тимофеева. - Курск, 2017.- 34 с.: ил. 5, табл. 3, прил. 12. – Библиогр.: с. 17.

Методические указания по выполнению практической работы содержат цель, перечень используемых ресурсов, основные расчётные соотношения, задание, исходные данные, методику выполнения практической работы, содержание и оформление и список используемых источников.

Полученные знания в результате выполнения работы дадут возможность сформировать целостную картину информационного взаимодействия в современных сетях, что является фундаментом для изучения остальных дисциплин профессионального цикла учебного плана, а также могут быть использованы в будущей профессиональной деятельности выпускника.

Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» по курсу «Методы пространственного моделирования радиоканала»

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *15.12.17*. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. *1,94*. Уч-изд. *1,789* л. Тираж 100 экз. Заказ *3282* Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

1. Цель работы:

- освоение работы с научно-технической и справочной литературой в области машинного моделирования;
- решение отдельных прикладных задач моделирования;
- проведение экспериментов с моделями систем на ЭВМ;
- получение навыков работы в рамках современных технологий машинной имитации;
- получение умений оформлять программную документацию в соответствии с требованиями;
- получение навыков выступления перед аудиторией с целью защиты результатов своей работы.

2. Перечень используемых ресурсов:

- персональный компьютер с конфигурацией не ниже PentiumIV, ОЗУ 256 МБ;
- программный продукт MathCad версии не ниже 15.0.

3. Основные расчетные соотношения

3.1. Азимут и угол места земной станции (ЗС) на искусственный спутник Земли (ИСЗ) определяются соответственно из выражений, (град.):

$$\alpha = 180^\circ + \operatorname{arctg} \left[\frac{\operatorname{tg}(\theta_E - \theta_S)}{\sin(\psi_E)} \right]; \quad (1)$$

$$\beta = \operatorname{arctg} \left[\frac{\cos(\theta_E - \theta_S) \cos(\psi_E) - 0,1513}{\sqrt{1 - \cos^2(\theta_E - \theta_S) \cos^2(\psi_E)}} \right], \quad (2)$$

где: ψ_E, θ_E – географические широта и долгота ЗС (Приложение А), (град);

θ_S – географическая долгота подспутниковой точки ИСЗ, (град).

3.2. Протяженность спутниковой линии связи (СЛС) рассчитывается по формуле, (км)

$$r = 42710 \sqrt{1 - 0,295 \cos(\theta_E - \theta_S) \cos(\psi_E)}. \quad (3)$$

3.3. Затухание сигнала в свободном пространстве на СЛС рассчитывается по формуле, (дБ)

$$L_O = 10 \lg \left[\left(\frac{4\pi 10^3 r}{\lambda} \right)^2 \right] = 92,44 + 20 \lg(f) + 20 \lg(r), \quad (4)$$

где: f – несущая частота сигнала, (ГГц);
 r – протяженность СЛС, (км).

3.4. Затухание сигнала в атмосферных газах на СЛС определяется из выражения, (дБ)

$$L_G = (\gamma_O r_O + \gamma_W r_W) \operatorname{cosec}(\beta), \quad (5)$$

где: $r_O \approx 5,3$ км – эквивалентная длина зенитной радиотрассы в кислороде, (км);

$r_W \approx 2,1$ км – эквивалентная длина зенитной радиотрассы в водяном паре, (км);

β – угол места ЗС на ИСЗ, (град);

γ_O, γ_W – погонные затухания в кислороде и водяном паре соответственно вблизи поверхности Земли (Приложение Б.1), определяемые из следующих эмпирических выражений при нормальном атмосферном давлении (1013 гПа), (дБ/км):

$$\gamma_O = [1 - 0,01(t - 15)] \left[7,19 \cdot 10^{-3} + \frac{6,09}{f^2 + 0,227} + \frac{4,81}{(f - 57)^2 + 1,5} \right] f^2 \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

для $f \leq 54$ ГГц;

$$\gamma_W = [1 - 0,06(t - 15)] \left[0,05 + 2,1 \cdot 10^{-3} \rho + \frac{3,6}{(f - 22,2)^2 + 8,5} + \frac{10,6}{(f - 183,3)^2 + 9} \right] \cdot \rho \cdot f^2 \cdot 10^{-4}, \quad \text{для } f \leq 180 \text{ ГГц}, \quad (7)$$

где: t – температура воздуха, (град. С, типовое значение 15 град. С);

ρ – концентрация водяных паров в атмосфере (г/м^3 , типовое значение $\rho = 7,5 \text{ г/м}^3$).

Множитель $(\gamma_O r_O + \gamma_W r_W)$ в формуле (5) определяет общее зенитное затухание в атмосферных газах (Приложении Б.2).

3.5. Затухание сигнала в гидрометеорах на СЛС рассчитывается по формуле, (дБ)

$$L_R = [K_1(P_C + V_F r_F) + \gamma_J r_J] \operatorname{cosec}(\beta), \quad (8)$$

где: K_1 – коэффициент погонного затухания в тумане и облаках при температуре 0°C (Приложение В), (дБ/км)/(г/м³);

P_C – нормированный общий столбчатый объем жидкой воды, содержащийся в облаках, превышаемый 0,5% времени среднего года (для территории РФ $P_C = 1 \text{ кг/м}^2$), (кг/м²);

$V_F = 0,05 \text{ г/м}^3$ – водность среднего тумана ($0,5 \text{ г/м}^3$ – густого тумана), (г/м³);

$r_F = (0,3 \dots 0,5) \text{ км}$ – зенитная длина радиотрассы в тумане, (км);

γ_J – погонное затухание в дожде, (дБ/км);

$r_J = 3,36 \text{ км}$ – зенитная длина радиотрассы в дожде (для территории РФ $r_J = 3,36 \text{ км}$), (км).

Погонное затухание в дожде определяется из выражения, (дБ/км)

$$\gamma_J = b \cdot J_{0,005}^a, \quad (9)$$

где: $J_{0,005}$ – интенсивность осадков, превышаемая 0,5 % времени среднего года (Приложение Г), (мм/ч);

b, a – коэффициенты (Приложение Д).

3.6. Результирующее затухание сигнала на СЛС определяется выражением, (дБ)

$$L = L_O + L_G + L_R + L_C + L_P, \quad (10)$$

где: L_O – затухание в свободном пространстве, (дБ);

L_G – затухание в атмосферных газах, (дБ);

L_R – затухание в гидрометеорах (дождь, туман, облака), (дБ);

$L_C = 0,5 \text{ дБ}$ – затухание из-за рефракции и погрешности наведения ЗС на ИСЗ, (дБ);

$L_P = 0,5 \text{ дБ}$ – затухание из-за деполяризации сигнала при распространении, (дБ).

3.7. Коэффициент усиления антенны ЗС определяется выражением, (дБ)

$$G = 10 \lg \left[k_A \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right] = 20,4 + 20 \lg(D) + 20 \lg(f) + 10 \lg(k_A), \quad (11)$$

где: D – диаметр отражателя (зеркала) антенны ЗС, (м);

$\lambda = 0,3/f$ – длина волны, (м);

f – несущая частота передаваемого (принимаемого) сигнала, (ГГц);

$k_A = 0,5 \dots 0,7$ – коэффициент использования поверхности.

3.8. Эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) передающей ЗС рассчитывается по формуле, (дБВт)

$$H = 10 \lg(P) + G - L_T, \quad (12)$$

где: P – мощность передатчика передающей ЗС, (Вт);

G – коэффициент усиления антенны передающей ЗС, (дБ);

$L_T = 0,5$ дБ – потери в волноводном тракте передающей ЗС, (дБ).

3.9. Шумовая температура антенны приемной ЗС определяется из выражения, (град. К)

$$T_A = 15 + \frac{30}{D} + \frac{180}{\beta}, \quad (13)$$

где: D – диаметр отражателя антенны приемной ЗС, (м);

β – угол места приемной ЗС на ИСЗ, (град).

3.10. Шумовая температура приемной ЗС рассчитывается по формуле, (град. К)

$$T = T_A + 290 [10^{0,1(L_T+F)} - 1], \quad (14)$$

где: T_A – шумовая температура антенны приемной ЗС, (град, К);

$L_T = 0,3$ дБ – потери в волноводном тракте приемной ЗС, (дБ);

F – коэффициент шума МШП приемной ЗС, (дБ).

3.11. Отношение сигнал/шум на выходе приемника ИСЗ и приемной ЗС рассчитываются соответственно по формулам, (дБ):

$$h_1^2 = 168,6 + N_1 + G_T/T_T - 10\lg \left[\frac{R}{r_{\text{FEC}} \log_2(M)} \right] - L_1; \quad (15)$$

$$h_2^2 = 168,6 + N_T + G_2 - 10\lg (T_2) - 10\lg (B_T) - L_2, \quad (16)$$

где: N_T – ЭИИМ транспондера ИСЗ (Приложение Е), (дБВт);

G_T/T_T – отношение «коэффициент усиления антенны»/«шумовая температура» приемника транспондера ИСЗ (Приложение Е), (дБ/К);

r_{FEC} – результирующая скорость кодирования (Приложение Ж);

R – информационная скорость без учета помехоустойчивого кодирования, (Мбит/с);

M – позиционность сигнала;

B_T – полоса пропускания транспондера ИСЗ, (МГц);

G_2 – коэффициент усиления антенны ЗС₂, (дБ);

T_2 – шумовая температура ЗС₂, (К);

L_1, L_2 – результирующее затухание сигнала на участках СЛС «ЗС₁-ИСЗ» и «ИСЗ-ЗС₂» соответственно, (дБ).

Примечание: Отношение мощности сигнала к мощности шума на входе приемников ИСЗ и ЗС₂

$$\frac{P_s}{P_N} = \frac{P_s}{N_0 B} = \frac{h^2}{B T_s},$$

где: P_s – мощность сигнала на входе приемника, (Вт);

P_N – приведенная ко входу приемника мощность шума, (Вт);

$N_0 = k T_R$ – односторонняя спектральная плотность мощности шума, (Вт/Гц);

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, (Дж/К);

T_R – шумовая температура приемника, (град. К);

$B = 1/T_s$ – полоса пропускания согласованного фильтра, (Гц);

$h^2 = \frac{P_s T_s}{N_0} = \frac{E_s}{N_0}$ – отношение средней энергии символа $E_s = E_b \log_2(M)$ к односторонней спектральной плотности мощности шума N_0 ;

$T_s = \frac{r_{\text{FEC}}}{R} \log_2(M)$ – длительность символа, (с);

R – информационная скорость без учета помехоустойчивого кодирования, (бит/с).

3.12. Энергетический запас на участках СЛС «ЗС₁-ИСЗ» и «ИСЗ-ЗС₂» определяются соответственно из выражений, (дБ):

$$\Delta_1 = h_1^2 - h_0^2; \quad (17)$$

$$\Delta_2 = h_2^2 - h_0^2, \quad (18)$$

где: $h_0^2 = \left[\frac{E_b}{N_0} \right]_{10^{-6}} + 10 \lg[\log_2(M)]$ – требуемое отношение сигнал/шум в СЛС;

$\left[\frac{E_b}{N_0} \right]_{10^{-6}}$ – требуемое отношение E_b/N_0 для обеспечения гарантированной вероятности ошибки $P_{\text{ош}}=10^{-6}$ с учетом исправляющей способности помехоустойчивого кода (Приложение Ж), (дБ).

3.13. Энергетический запас на участках СЛС «ЗС₁-ИСЗ» и «ИСЗ-ЗС₂» связаны следующими соотношениями, (дБ):

$$\Delta_2 \geq -10 \lg(1 - 10^{-0.1\Delta_1}) \quad (19)$$

или

$$\Delta_1 \geq -10 \lg(1 - 10^{-0.1\Delta_2}). \quad (20)$$

График взаимной зависимости Δ_1 и Δ_2 приведен в Приложении 3.

3.14. Результирующие значения энергетического запаса и отношения сигнал/шум для СЛС в целом определяются из следующих выражений, (дБ):

$$10^{-0,1\Delta} = 10^{-0,1\Delta_1} + 10^{-0,1\Delta_2};$$

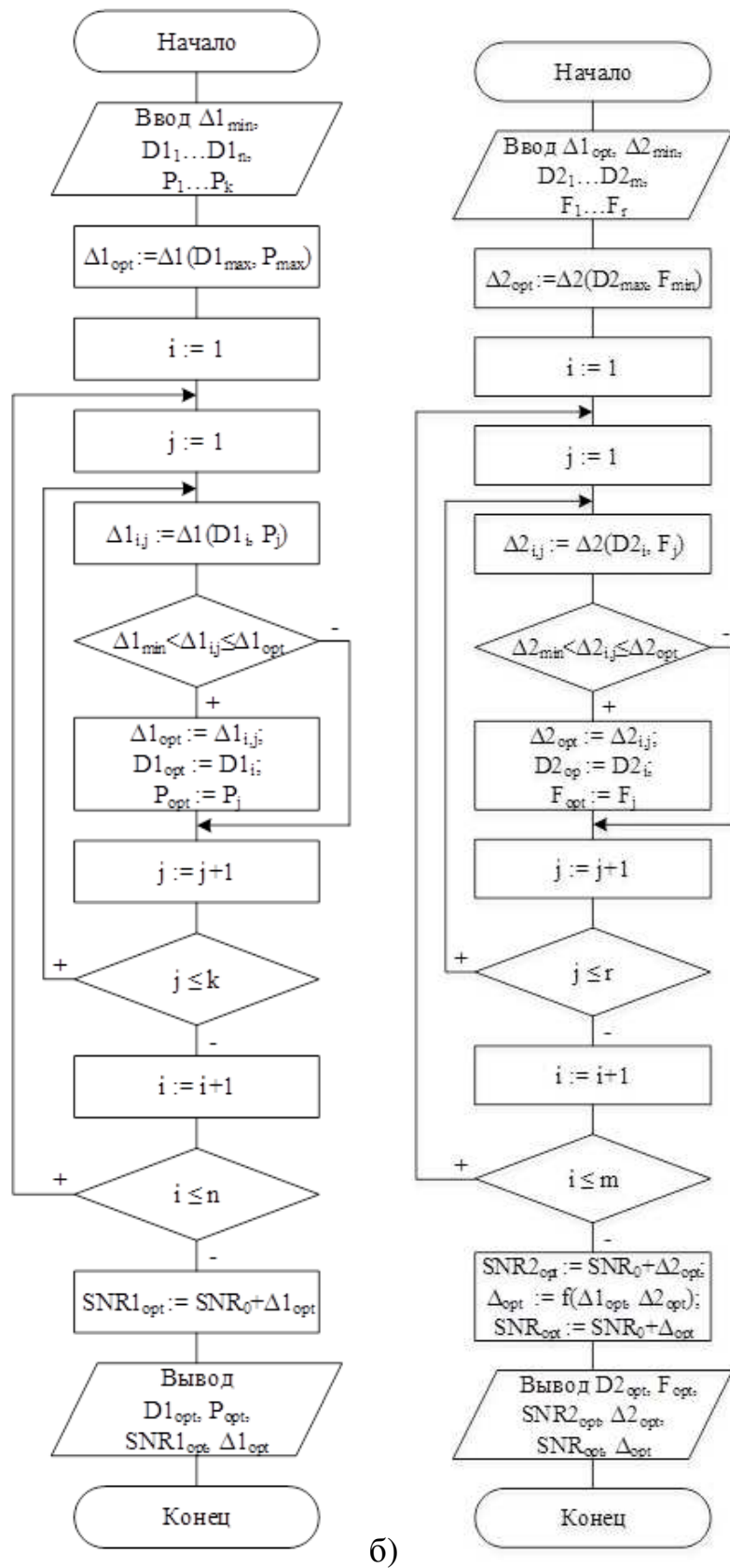
$$10^{-0,1h^2} = 10^{-0,1h_1^2} + 10^{-0,1h_2^2}$$

или

$$\Delta = -10 \lg(10^{-0,1\Delta_1} + 10^{-0,1\Delta_2}); \quad (21)$$

$$h^2 = h_0^2 + \Delta. \quad (22)$$

3.15. Алгоритмы оптимизации параметров земных станций ЗС₁ и ЗС₂ и примеры их реализации в виде подпрограмм в MathCad 15 представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.



а)

б)

Рисунок 1 – Алгоритмы оптимизации параметров земных станций: а) $3C_1$; б) $3C_2$

$$\text{a) } D1 := \begin{pmatrix} D1_1 \\ D1_2 \\ D1_3 \\ \vdots \\ D1_n \end{pmatrix} \quad P := \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \vdots \\ P_k \end{pmatrix}$$

$$\Delta 1_{\min} := 2 \text{ dB}$$

$$\text{ORIGIN} := 1$$

```

E1 := | Δ1opt ← Δ1 (D1max, Pmax)
      | for i ∈ 1..n
      |   for j ∈ 1..k
      |     if Δ1min < Δ1 (D1i, Pj) ≤ Δ1opt
      |       | Δ1opt ← Δ1 (D1i, Pj)
      |       | D1opt ← D1i
      |       | Popt ← Pj
      |     SNR1opt ← SNR0 + Δ1opt
      |     ( D1opt
      |       Popt
      |       SNR1opt
      |     Δ1opt )

```

E1 = ■

E1_file := "d:\E1_AM-2.txt"

WRITEPRN(E1_file) := E1

$$\text{б) } D2 := \begin{pmatrix} D2_1 \\ D2_2 \\ D2_3 \\ \vdots \\ D2_m \end{pmatrix} \quad F := \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_r \end{pmatrix}$$

$$\Delta 2_{\min} := -10 \log(1 - 10^{-0.1 \Delta 1_{\text{opt}}})$$

$$\text{ORIGIN} := 1$$

```

E2 := | Δ2opt ← Δ2 (D2max, Fmin)
      | for i ∈ 1..m
      |   for j ∈ 1..r
      |     if Δ2min < Δ2 (D2i, Fj) ≤ Δ2opt
      |       | Δ2opt ← Δ2 (D2i, Fj)
      |       | D2opt ← D2i
      |       | Fopt ← Fj
      |     SNR2opt ← SNR0 + Δ2opt
      |     Δopt ← -10 log(10-0.1Δ1opt + 10-0.1Δ2opt)
      |     SNRopt ← SNR0 + Δopt
      |     ( D2opt
      |       Fopt
      |       SNR2opt
      |       Δ2opt
      |       SNRopt
      |     Δopt )

```

E2^T = ■

E2_file := "d:\E2_file.txt"

WRITEPRN(E2_file) := E2

Рисунок 2 – Примеры реализации в MathCad 15 алгоритмов оптимизации параметров земных станций с помощью оператора создания цикла *for*: а) ЗС₁; б) ЗС₂

4. Задание на курсовой проект

4.1. Провести энергетический расчет спутниковой линии связи (СЛС) «Передающая земная станция ЗС₁» – «Искусственный спутник

Земли ИСЗ» – «Приемная земная станция ЗС₂» (ЗС₁-ИСЗ-ЗС₂ на рисунке 3).

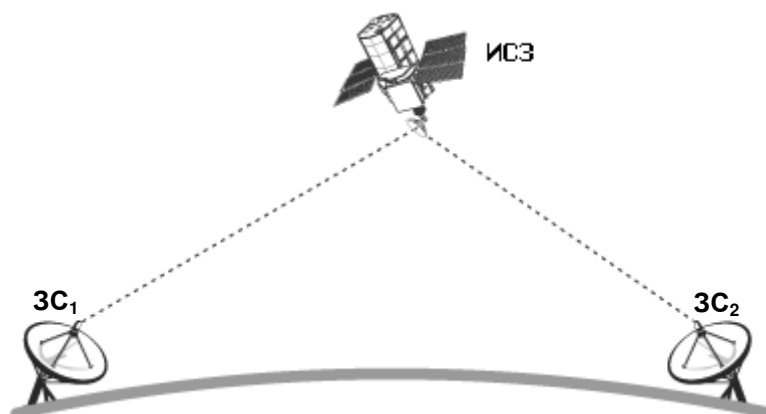


Рисунок 3 – Структурная схема спутниковой линии связи системы VSAT

4.2. Исходя из допустимого (гарантированного) значения битовой ошибки и реализуемого минимального энергетического запаса для каждого из участков СЛС «ЗС₁-ИСЗ» и «ИСЗ-ЗС₂» оптимизировать параметры передающей и приемной земных станций:

- диаметр отражателя зеркально-параболической прямофокусной однозеркальной антенны передающей ЗС (три номинала значений);
- мощность передатчика передающей ЗС (два номинала значений);
- диаметр отражателя зеркально-параболической прямофокусной однозеркальной антенны приемной ЗС (три номинала значений);
- коэффициент шума малошумящего преобразователя (МШП) приемной ЗС (два номинала значений).

4.3 Рассчитать результирующие значения отношения сигнал/шум и энергетического запаса для СЛС в целом.

5. Исходные данные

Исходными данными являются:

1) Параметры передающей ЗС (Таблица 1):

- местоположение;
- несущая частота;
- поляризация;
- скорость передачи;
- вид модуляции;
- вид помехоустойчивого кодирования (каскадного кода).

Примечание: V – вертикальная поляризация;
 H – горизонтальная поляризация;
 СК – сверточный код, декодируемый по алгоритму Витерби;
 RS – код Рида-Соломона.

Таблица 1 – Параметры передающей земной станции ЗС₁

Номер варианта	Место расположения передающей ЗС	Несущая частота, ГГц/поляриз.	Скорость передачи, кбит/с	Вид модуляции	Внутр. код, скорость кода	Внешний код
1-10	Курск	14,5/V	2048	ФМ-4	СК, $r = 3/4$	RS(219, 201, 9)
11-20	Курск	14,5/H	2048	ФМ-4	СК, $r = 1/2$	RS(219, 201, 9)

2) Параметры ИСЗ-ретранслятора (Таблица 2):

- координаты подспутниковой точки;
- количество транспондеров;
- полоса пропускания транспондера;
- несущая частота передатчика;
- поляризация излучения передатчика;
- местоположение приемной ЗС (Таблица 3).

Таблица 2 – Параметры ИСЗ – ретранслятора

Номер варианта	Наименование ИСЗ	Подспутниковая точка, град.	Несущая частота передатчика, ГГц/поляриз.	Количество транспондеров в диапазоне	Полоса пропускания транспондера, МГц
1-10	Экспресс-АМ6	53° в.д.	11,2/H	24	54
11-20	Экспресс-АМ2	80° в.д.	11,2/V	12	54

Таблица 3 – Местоположение приемной земной станции ЗС₂

Номер варианта	Месторасположения приемной ЗС
1	Калининград
2	Петрозаводск
3	Рязань

Продолжение таблицы 3

Номер варианта	Месторасположения приемной ЗС
4	Иваново
5	Нижний Новгород
6	Саратов
7	Казань
8	Самара
9	Ижевск
10	Оренбург
11	Пермь
12	Екатеринбург
13	Воркута
14	Омск
15	Новосибирск
16	Томск
17	Абакан
18	Братск
19	Иркутск
20	Владивосток

6.Методика выполнения практической работы

Оптимизация параметров передающей ЗС:

6.1.Рассчитать азимут α_1 и угол места β_1 передающей ЗС на ИСЗ, используя выражения (1) и (2).

6.2.Рассчитать протяженность r_1 участка СЛС «ЗС₁-ИСЗ» по формуле (3).

6.3.Рассчитать затухание в свободном пространстве L_{O1} на участке СЛС «ЗС₁-ИСЗ» по формуле (4).

6.4. Рассчитать затухание сигнала в атмосферных газах L_{G1} на участке СЛС «ЗС₁-ИСЗ», используя выражения (5) – (7).

6.5. Рассчитать затухание сигнала в гидрометеорах L_{R1} на участке СЛС «ЗС₁-ИСЗ», используя выражения (8) и (9).

6.6. Рассчитать результирующее затухание L_1 на участке СЛС «ЗС₁-ИСЗ» по формуле (10).

6.7. Записать коэффициент усиления антенны G_1 и ЭИИМ H_1 для передающей ЗС в виде функций от параметров, требующих оптимизации, используя выражения (11) и (12):

$$G_1(D_1) = 20,4 + 20 \lg(D_1) + 20 \lg(f_1) + 10 \lg(k_{A1}); \quad (23)$$

$$H_1(P, D_1) = 10 \lg(P) + G_1(D_1) - L_{T1}. \quad (24)$$

где: D_1 – диаметр отражателя антенн передающей ЗС;

f_1 – несущая частота передаваемого ЗС сигнала;

$k_{A1} = 0,6$.

6.8. Записать выражения для отношения сигнал/шум h_1^2 и энергетического запаса Δ_1 на выходе приемника ИСЗ в виде функций от параметров, требующих оптимизации, используя выражения (15) и (17):

$$h_1^2(P, D_1) = 168,6 + H_1(P, D_1) + G_T/T_T - 10 \lg \left[\frac{R}{r_{FEC} \log_2(M)} \right] - L_1; \quad (25)$$

$$\Delta_1(P, D_1) = h_1^2(P, D_1) - h_0^2. \quad (26)$$

6.9. С помощью подпрограммы оптимизации параметров передающей ЗС, приведенной на рисунке 3а, найти оптимизированные значения диаметра отражателя D_{1opt} и мощности передатчика P_{opt} для ЗС₁, значения отношения сигнал/шум h_{1opt}^2 и энергетического запаса Δ_{1opt} на выходе приемника ИСЗ.

6.10. Рассчитать коэффициент усиления G_{1opt} для антенны ЗС₁. Полученные результаты занести в таблицу 4

Таблица 4 – Результаты расчета участка СЛС «ЗС₁-ИСЗ»

Наименование параметра	Значение параметра
α_1 , град	
β_1 , град	
r_1 , км	
L_{O1} , дБ	
L_{G1} , дБ	
L_{R1} , дБ	
L_1 , дБ	
D_{1opt} , м	

Продолжение таблицы 4

G_{1opt} , дБ	
P_{opt} , Вт	
h_{1opt}^2 , дБ	
Δ_{1opt} , дБ	

Оптимизация параметров приемной ЗС:

1. Рассчитать азимут α_2 и угол места β_2 приемной ЗС на ИСЗ, используя выражения (1) и (2).

2. Рассчитать протяженность r_2 участка СЛС «ИСЗ-ЗС₂» по формуле (3).

3. Рассчитать затухание в свободном пространстве L_{O2} на участке СЛС «ИСЗ-ЗС₂» по формуле (4).

4. Рассчитать затухание сигнала в атмосферных газах L_{G2} на участке СЛС «ИСЗ-ЗС₂», используя выражения (5) – (7).

5. Рассчитать затухание сигнала в гидрометеорах L_{R2} на участке СЛС «ИСЗ-ЗС₂», используя выражения (8) и (9).

6. Рассчитать результирующее затухание L_2 на участке СЛС «ИСЗ-ЗС₂» по формуле (10).

7. Записать коэффициент усиления G_2 и шумовую температуру T_A для антенны ЗС₂, шумовую температуру T для ЗС₂ в виде функций от параметров, требующих оптимизации, используя выражения (11), (13) и (14):

$$G_2(D_2) = 20,4 + 20 \lg(D_2) + 20 \lg(f_2) + 10 \lg(k_{A2}), \quad (27)$$

$$T_A(D_2) = 15 + \frac{30}{D_2} + \frac{180}{\beta_2}; \quad (28)$$

$$T(D_2, F) = T_A(D_2) + 290 [10^{0,1(L_{T2}+F)} - 1]. \quad (29)$$

где: D_2 – диаметр отражателя антенны приемной ЗС;

f_2 – несущая частота принимаемого ЗС сигнала;

$k_{A2} = 0,6$.

8. Записать выражения для отношения сигнал/шум h_2^2 и энергетического запаса Δ_2 на выходе приемника ЗС₂ в виде функции от параметров, требующих оптимизации, используя выражения (16) и (18):

$$h_2^2(D_2, F) = 168,6 + H_T + G_2 - 10 \lg [T_2(D_2, F)] - 10 \lg (B_T) - L_2, \quad (30)$$

$$\Delta_2(D_2, F) = h_2^2(D_2, F) - h_0^2. \quad (31)$$

9. Рассчитать минимально допустимое значение энергетического запаса на выходе приемника ЗС₂, используя выражение (19), по формуле:

$$\Delta_{2\min} = -10 \lg(1 - 10^{-0.1\Delta_{1\text{opt}}}) \quad (32)$$

10. С помощью подпрограммы оптимизации параметров приемной ЗС, приведенной на рисунке 3б, найти оптимизированные значения диаметра отражателя $D_{2\text{opt}}$ и коэффициента шума МШП F_{opt} для ЗС₂, значения отношения сигнал/шум $h_{2\text{opt}}^2$ и энергетического запаса $\Delta_{2\text{opt}}$ на выходе приемника ЗС₂, значения отношение сигнал/шум h_{opt}^2 и энергетического запаса Δ_{opt} для СЛС в целом.

11. Рассчитать коэффициент усиления $G_{2\text{opt}}$ и шумовую температуру T_{Aopt} для антенны ЗС₂, шумовую температуру T_{opt} для ЗС₂. Полученные результаты занести в таблицу 5.

Таблица 5 – Результаты расчета участка СЛС «ИСЗ-ЗС₂»

Наименование параметра	Значение параметра
α_2 , град	
β_2 , град	
r_2 , км	
L_{O2} , дБ	
L_{G2} , дБ	
L_{R2} , дБ	
L_2 , дБ	
$D_{2\text{opt}}$, м	
$G_{2\text{opt}}$ дБ	
T_{Aopt} , К	
F_{opt} , дБ	
T_{opt} , К	
$h_{2\text{opt}}^2$, дБ	
$\Delta_{2\text{opt}}$, дБ	

Результирующие значения для СЛС в целом:

$$h_{\text{opt}}^2 = \dots \text{дБ};$$

$$\Delta_{\text{opt}} = \dots \text{дБ}.$$

7. Содержание и оформление практической работы

Пояснительная записка должна быть оформлена в соответствии со стандартом университета СТУ 04.02.030-2017 – Работы (проекты) курсовые, работы выпускные квалификационные. Общие требования к структуре, оформлению и защите.

Пояснительная записка должна иметь следующую структуру:

- титульный лист;
- задание;
- оглавление;
- обозначения и сокращения (по необходимости);

Текст пояснительной записки:

- введение;
- основная часть;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложение(я).

На титульном листе обязательно указывается название учебного заведения, кафедры, темы, фамилия и инициалы автора, номер учебной группы, а также должность, ученая степень и звание проверяющего.

В введении дается краткая характеристика объекта исследования и обосновывается актуальность темы.

В основной части производится непосредственно расчет и оптимизации параметров объекта исследования. При выполнении расчетов должна быть приведена в общем виде расчетная формула с расшифровкой всех входящих в нее буквенных обозначений. Результаты расчета сопровождаются выводами и анализом полученных результатов.

В заключении кратко дается значимость результатов.

В приложении приводится текст программы в MathCad 15.0.

8. Список использованных источников

1) Ерохин, Г.А. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн: учебник для вузов. / Г.А. Ерохин, О.В. Чернов, Н.Д. Козырев, В.Д. Кочержевский.– М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 547 с.

2) Географические координаты основных городов [Электронный ресурс].- Режим доступа: www.al-soft.com/saa/webreports.- (Дата обращения 04.10.2017).

- 3) Диденко, М.Г. Радиосигналы в спутниковых системах связи / М.Г. Диденко // Специальный выпуск. Спутниковая связь и вещание.- 2005.
- 4) Приказ Министерства информационных технологий и связи РФ от 23 ноября 2006 г. N 153 «Об утверждении правил применения антенн и фидерных устройств».
- 5) Быховецкий, М.А. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем: учебн. пособие.- М.:Эко-Трендз, 2006. – 376 с.
- 6) Немировский, А.С. Радиорелейные и спутниковые системы передачи: учебник для вузов / А.С. Немировский, О.С. Данилович, Ю.И. Маримонт. – М.: Радио и связь, 1986. – 392 с.
- 7) Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б.Скляр.- М.: Изд. дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
- 8) Кантор, Л.Я. Спутниковая связь и вещание: справочник / Л.Я.Кантор.- М.: Радио и связь, 1988. – 344 с.
- 9) ФГУП «Космическая связь» [Электронный ресурс].- Режим доступа: www.rssc.ru/space. - (Дата обращения 04.10.2017).
- 10) Фиксированная спутниковая служба [Электронный ресурс].- Режим доступа: www.rfc-rf.ru/grfc/uslugi/sputnik2. - (Дата обращения 04.10.2017).
- 11) Фролов, О.П. Антенны для земных станций спутниковой связи / О.П.Фролов. – М.: Радио и связь, 2000. – 376 с.
- 12) Рекомендация ITU-R P.525-2. Расчет ослабления в свободном пространстве.
- 13) Рекомендация ITU-R P.618-10. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем электросвязи Земля-космос.
- 14) Рекомендация ITU-R P.676-9. Затухание в атмосферных газах.
- 15) Рекомендация ITU-RP.837-6. Характеристики осадков, используемые для моделирования распространения радиоволн.
- 16) Рекомендация ITU-R P.838-3. Модель погонного ослабления в дожде, используемая в методах прогнозирования.
- 17) Рекомендация ITU-R P.839-3. Модель высоты слоя дождя, используемая в методах прогнозирования.
- 18) Рекомендация ITU-RP.840-5. Ослабление из-за облачности и тумана.

19) СТУ 04.02.030-2017. Работы (проекты) курсовые, работы выпускные квалификационные. Общие требования к структуре, оформлению и защите.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

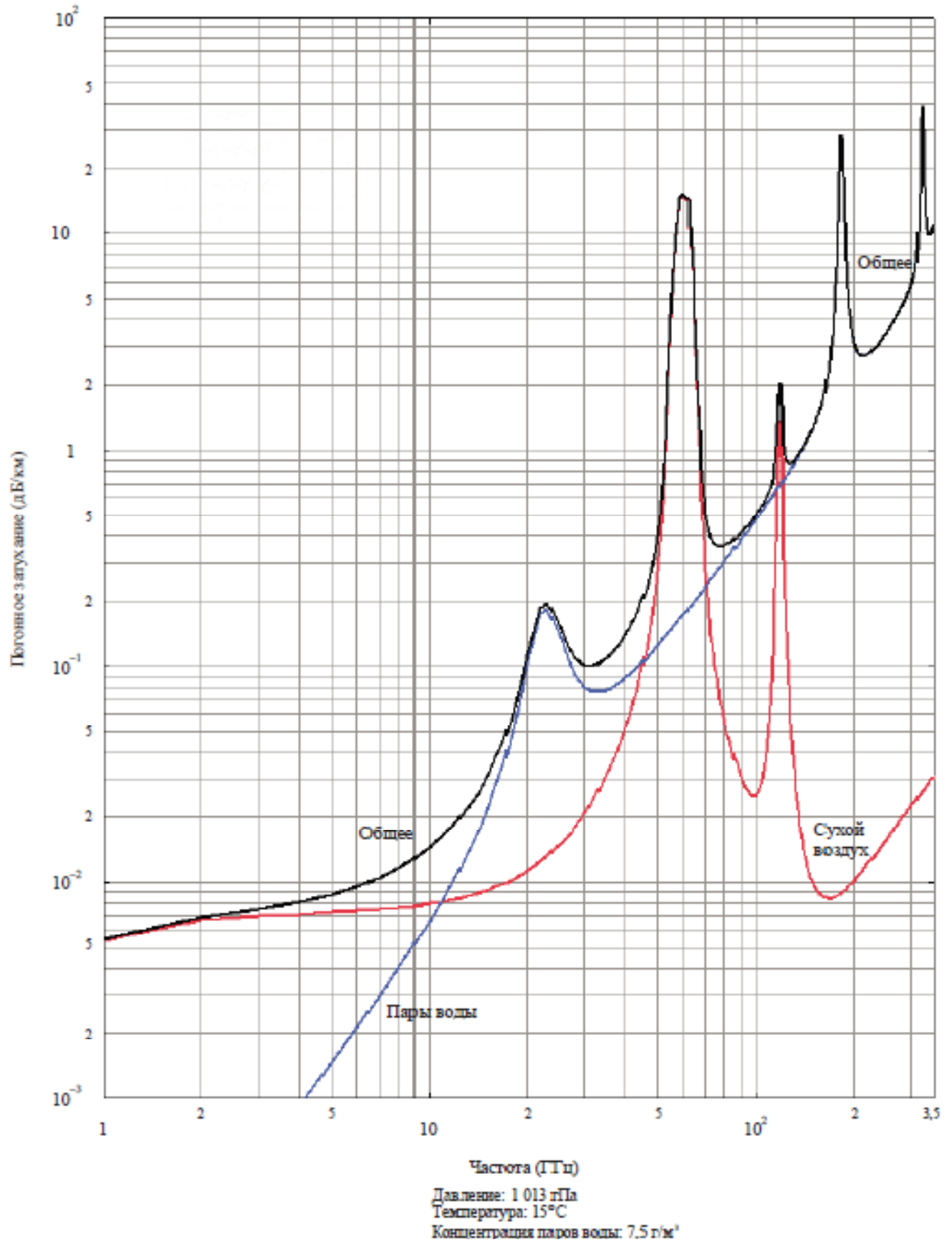
Географические координаты основных городов РФ

Абакан ($53^{\circ}43'$ с.ш., $91^{\circ}26'$ в.д.)
Анапа ($44^{\circ}57'$ с.ш., $37^{\circ}19'$ в.д.)
Астрахань ($46^{\circ}22'$ с.ш., $48^{\circ}05'$ в.д.)
Белгород ($50^{\circ}35'$ с.ш., $36^{\circ}35'$ в.д.)
Беломорск ($64^{\circ}30'$ с.ш., $34^{\circ}45'$ в.д.)
Братск ($56^{\circ}05'$ с.ш., $101^{\circ}48'$ в.д.)
Брянск ($53^{\circ}15'$ с.ш., $34^{\circ}25'$ в.д.)
Владивосток ($43^{\circ}08'$ с.ш., $131^{\circ}54'$ в.д.)
Владимир ($56^{\circ}10'$ с.ш., $40^{\circ}25'$ в.д.)
Волгоград ($48^{\circ}48'$ с.ш., $44^{\circ}28'$ в.д.)
Воркута ($67^{\circ}23'$ с.ш., $63^{\circ}58'$ в.д.)
Добрянка ($58^{\circ}27'$ с.ш., $56^{\circ}25'$ в.д.)
Елабуга ($55^{\circ}45'$ с.ш., $52^{\circ}04'$ в.д.)
Екатеринбург ($56^{\circ}50'$ с.ш., $60^{\circ}43'$ в.д.)
Зеленодольск ($55^{\circ}50'$ с.ш., $48^{\circ}30'$ в.д.)
Иваново ($57^{\circ}00'$ с.ш., $41^{\circ}00'$ в.д.)
Ижевск ($56^{\circ}51'$ с.ш., $53^{\circ}14'$ в.д.)
Иркутск ($52^{\circ}16'$ с.ш., $104^{\circ}20'$ в.д.)
Казань ($55^{\circ}45'$ с.ш., $49^{\circ}08'$ в.д.)
Калининград ($54^{\circ}43'$ с.ш., $20^{\circ}25'$ в.д.)
Киров ($58^{\circ}36'$ с.ш., $49^{\circ}39'$ в.д.)
Кирс ($59^{\circ}21'$ с.ш., $52^{\circ}20'$ в.д.)
Ковров ($56^{\circ}21'$ с.ш., $41^{\circ}22'$ в.д.)
Кострома ($57^{\circ}46'$ с.ш., $40^{\circ}55'$ в.д.)
Кунгур ($57^{\circ}24'$ с.ш., $57^{\circ}02'$ в.д.)
Курган ($55^{\circ}28'$ с.ш., $65^{\circ}21'$ в.д.)
Курск ($51^{\circ}42'$ с.ш., $36^{\circ}12'$ в.д.)
Котельнич ($58^{\circ}18'$ с.ш., $48^{\circ}20'$ в.д.)
Котлас ($61^{\circ}15'$ с.ш., $46^{\circ}39'$ в.д.)
Краснодар ($45^{\circ}01'$ с.ш., $38^{\circ}59'$ в.д.)
Липецк ($52^{\circ}35'$ с.ш., $39^{\circ}37'$ в.д.)
Магадан ($59^{\circ}40'$ с.ш., $150^{\circ}40'$ в.д.)
Магнитогорск ($53^{\circ}25'$ с.ш., $59^{\circ}05'$ в.д.)
Михайловка ($50^{\circ}05'$ с.ш., $43^{\circ}13'$ в.д.)
Москва ($55^{\circ}45'$ с.ш., $37^{\circ}42'$ в.д.)

Мурманск (68°58'с.ш., 33°05'в.д.)
Муром (55°34'с.ш., 42°02'в.д.)
Налимск (67°37'с.ш., 153°28'в.д.)
Нижний Новгород (56°19'с.ш., 44°00'в.д.)
Новгород (58°31'с.ш., 31°17'в.д.)
Новокузнецк (53°45'с.ш., 87°06'в.д.)
Новосибирск (55°02'с.ш., 82°55'в.д.)
Омск (55°00'с.ш., 73°24'в.д.)
Орел (52°56'с.ш., 36°06'в.д.)
Оренбург (51°50'с.ш., 55°09'в.д.)
Пенза (53°13'с.ш., 45°00'в.д.)
Пермь (58°00'с.ш., 56°19'в.д.)
Петрозаводск (61°42'с.ш., 34°22'в.д.)
Печора (65°11'с.ш., 57°19'в.д.)
Ростов-на-Дону (47°14'с.ш., 39°42'в.д.)
Рязань (54°37'с.ш., 39°37'в.д.)
Самара (53°14'с.ш., 50°19'в.д.)
Санкт-Петербург (59°55'с.ш., 30°15'в.д.)
Саранск (54°11'с.ш., 45°11'в.д.)
Саратов (51°33'с.ш., 45°54'в.д.)
Светлогорск (54°57'с.ш., 20°10'в.д.)
Северодвинск (64°29'с.ш., 40°04'в.д.)
Североморск (69°02'с.ш., 33°25'в.д.)
Смоленск (54°47'с.ш., 32°03'в.д.)
Сочи (43°35'с.ш., 39°43'в.д.)
Тамбов (52°42'с.ш., 41°22'в.д.)
Тольятти (53°34'с.ш., 49°33'в.д.)
Томск (56°31'с.ш., 85°08'в.д.)
Туапсе (44°03'с.ш., 39°11'в.д.)
Тула (54°12'с.ш., 37°34'в.д.)
Усурийск (43°48'с.ш., 131°57'в.д.)
Чапаевск (52°59'с.ш., 49°43'в.д.)
Челябинск (55°10'с.ш., 61°25'в.д.)
Ярославль (57°41'с.ш., 39°46'в.д.)

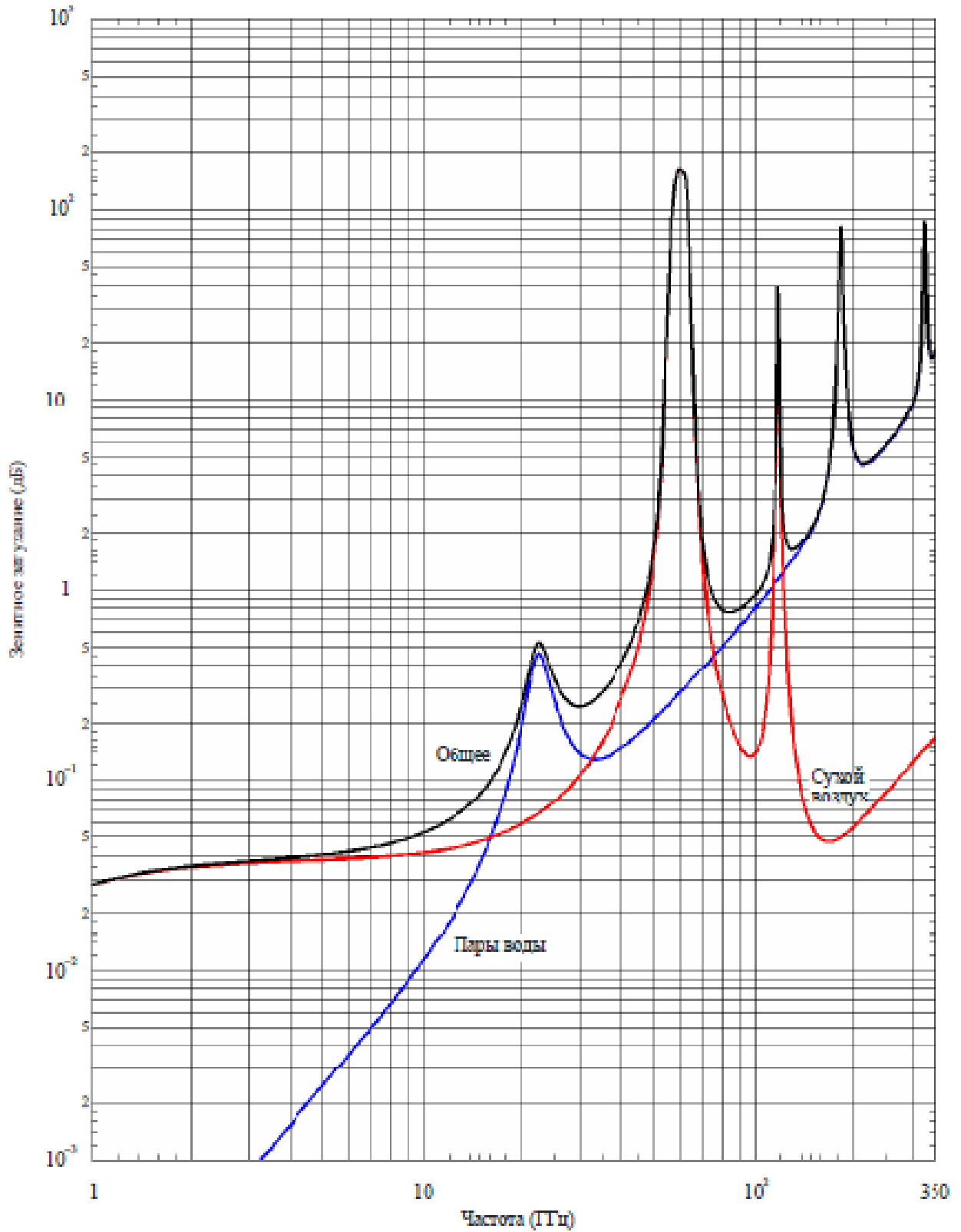
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.1
(обязательное)

Погонное затухание в атмосферных газах (ITU-R P.676-9)



ПРИЛОЖЕНИЕ Б.2
(обязательное)

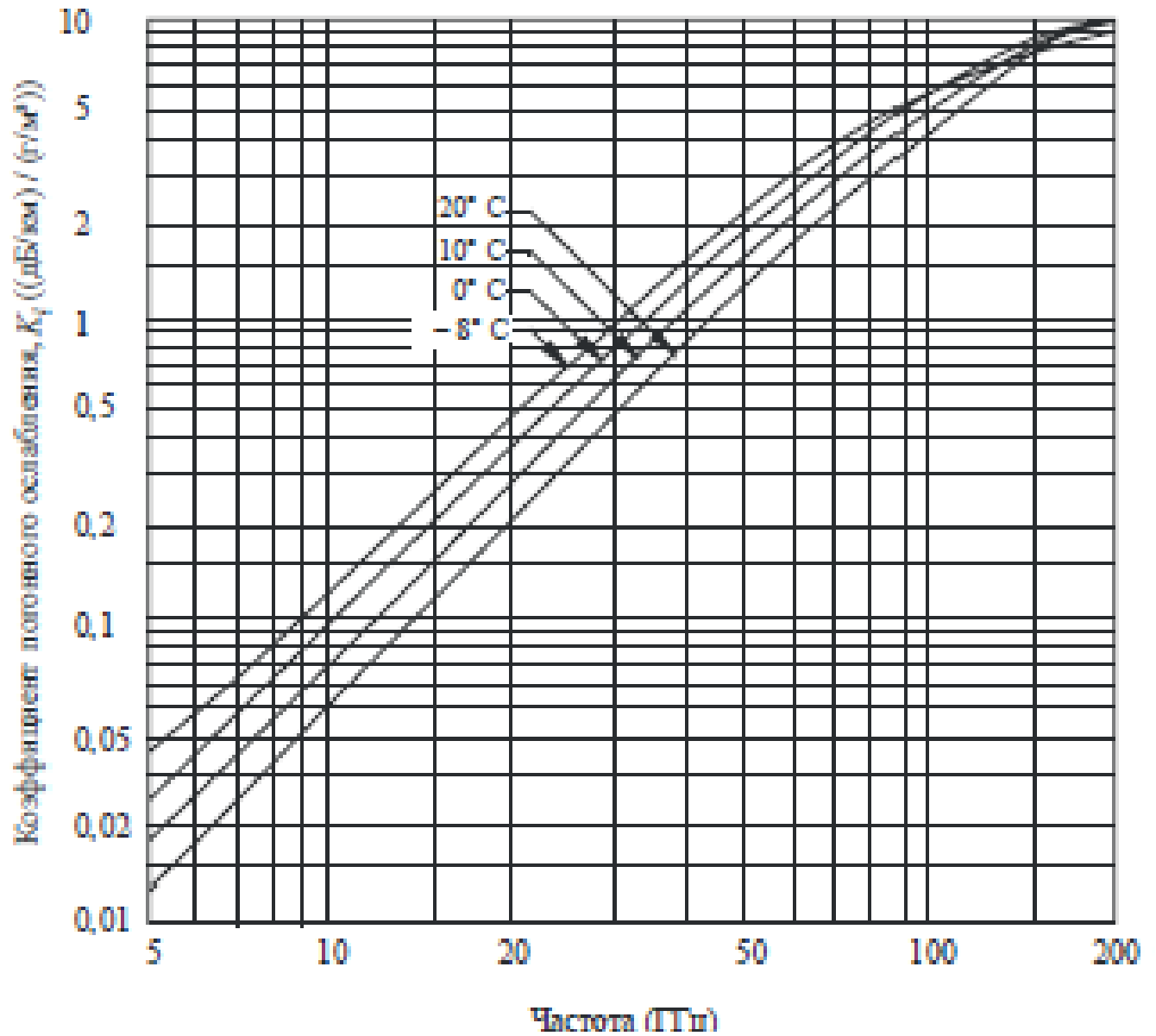
Общее зенитное затухание в атмосферных газах (ITU-R P.676-9)



Давление у поверхности: 1 013 гПа
Температура у поверхности: 15° С
Влажность у поверхности: 7,5 г/м³

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(обязательное)

Коэффициент погонного затухания в тумане и облаках (ITU-R P.840-5)

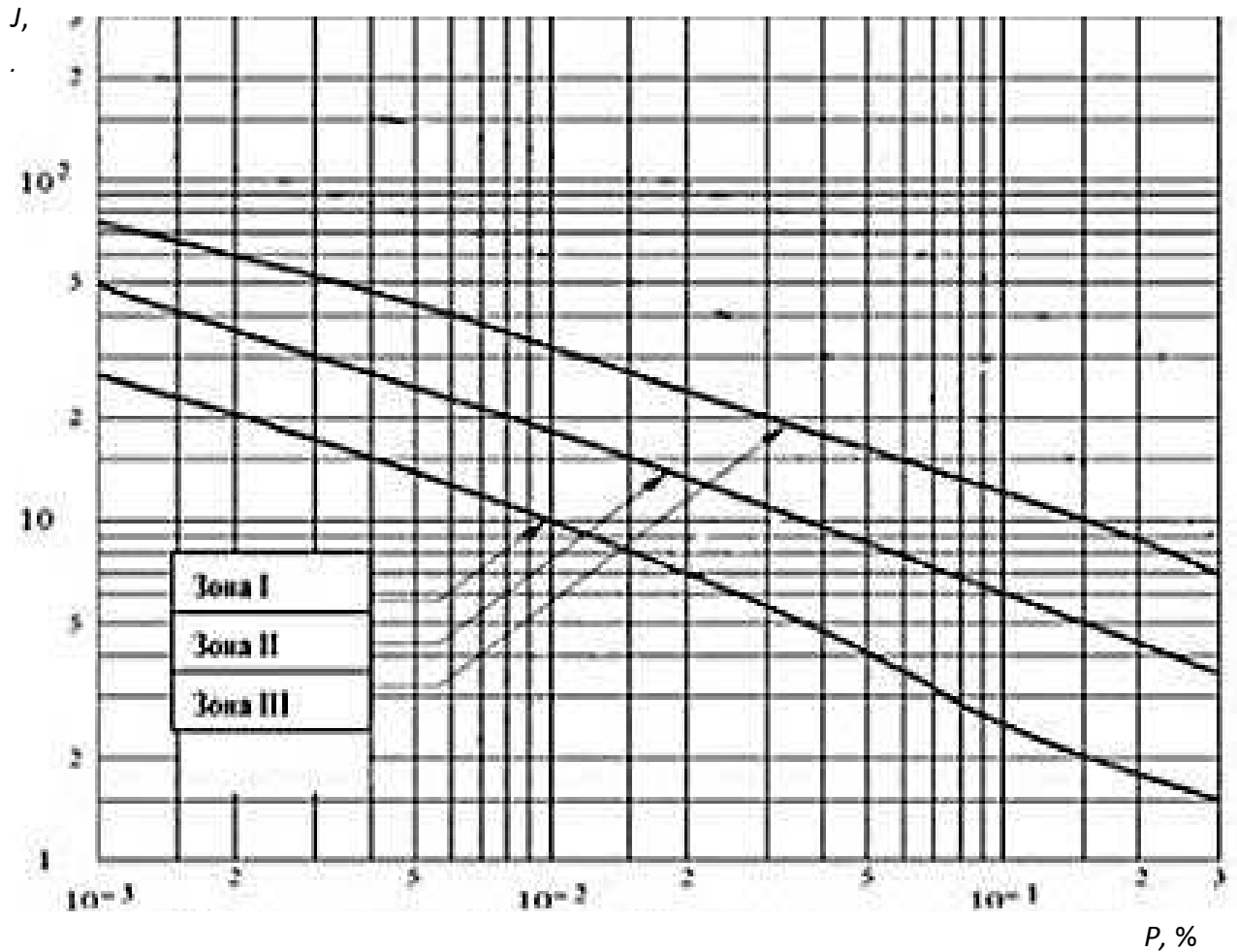


ПРИЛОЖЕНИЕ Г.1
(обязательное)
Дождевые зоны РФ



ПРИЛОЖЕНИЕ Г.2
(обязательное)

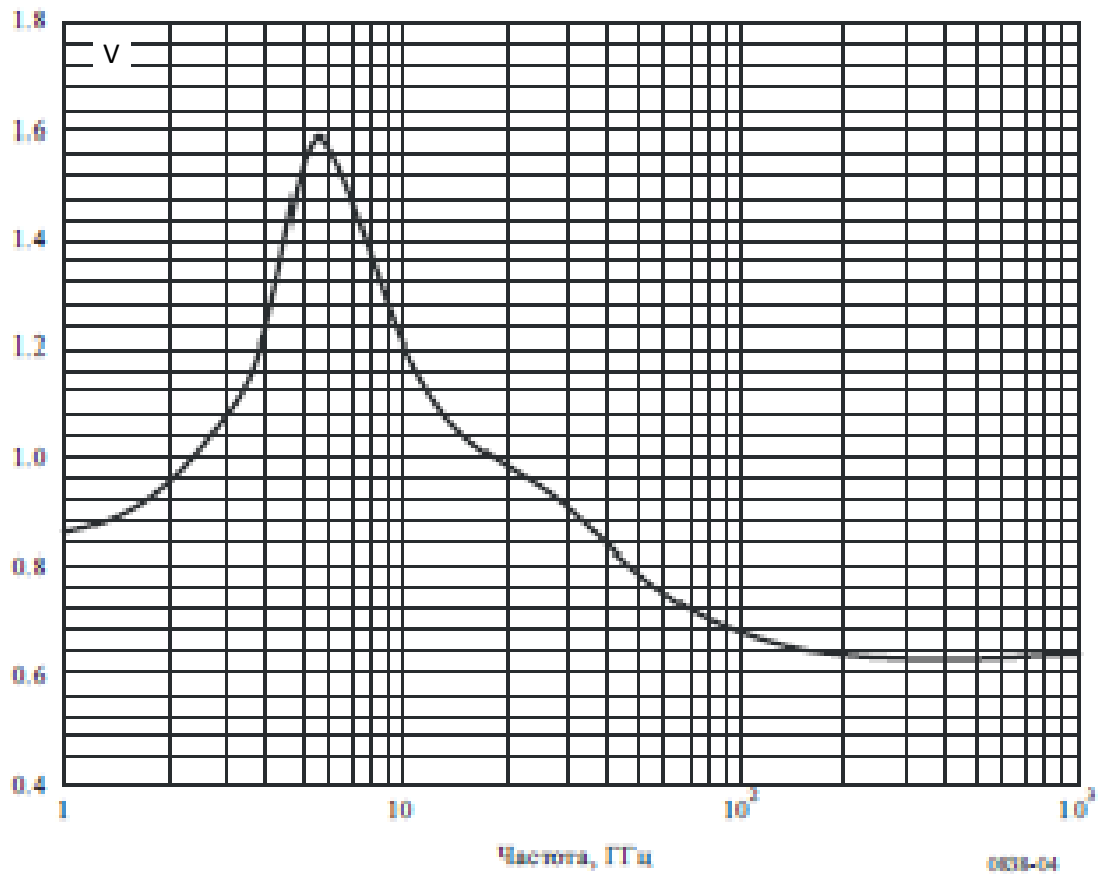
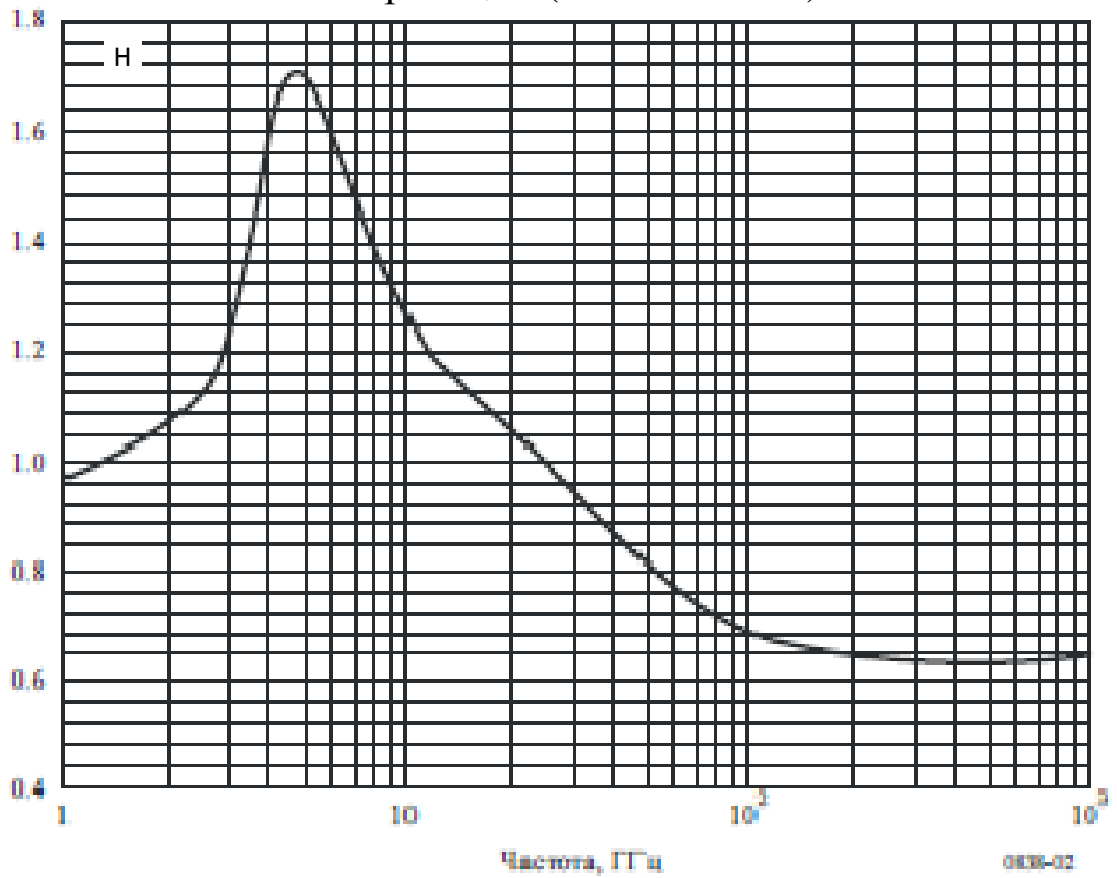
Вероятность дождя заданной интенсивности в среднем году в дождевых зонах РФ



Параметр	Зона I		Зона II		Зона III	
Вероятность дождя заданной интенсивности в среднем году на территории РФ, %	0,01	0,5	0,01	0,5	0,01	0,5
Интенсивность, мм/ч	10	1	17	3,5	32	7

ПРИЛОЖЕНИЕ Д.1

(обязательное)

Значение коэффициента a для горизонтальной и вертикальной поляризаций (ITU-RP.838-3)

ПРИЛОЖЕНИЕ Д.2
(обязательное)

Значение коэффициента b для горизонтальной и вертикальной поляризаций (ITU-RP.838-3)

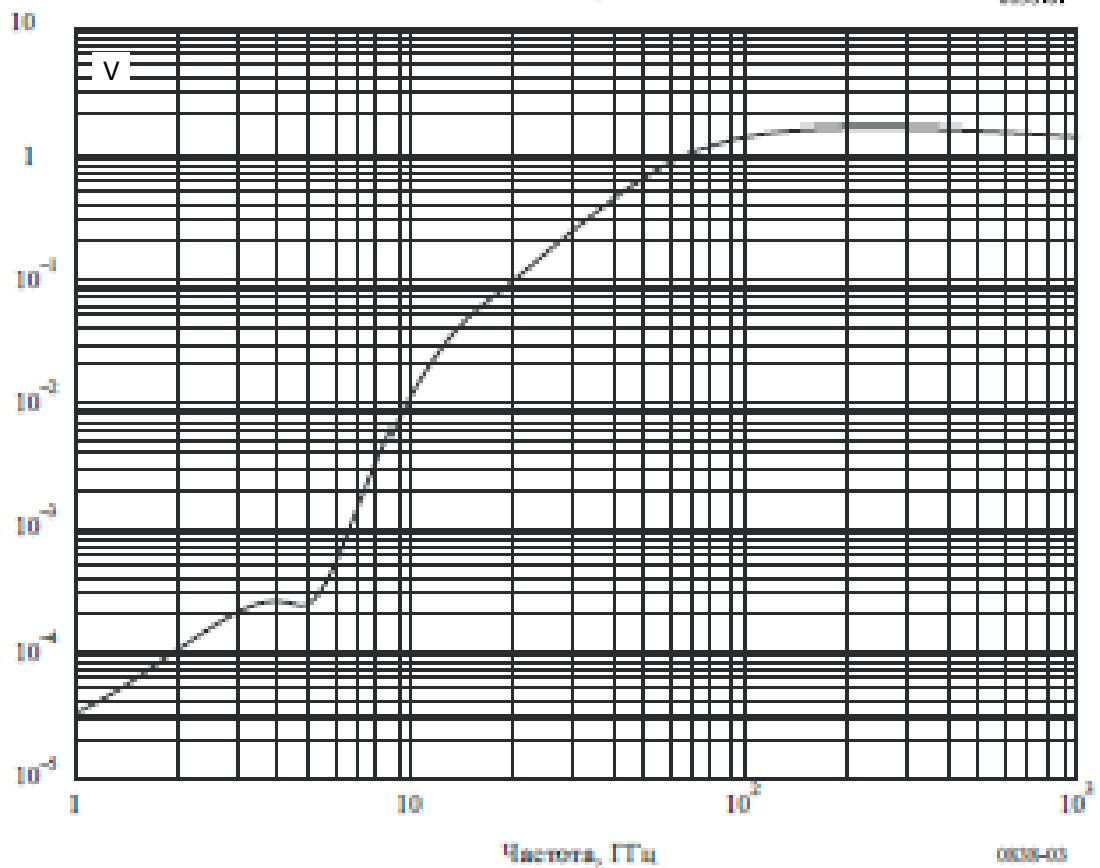
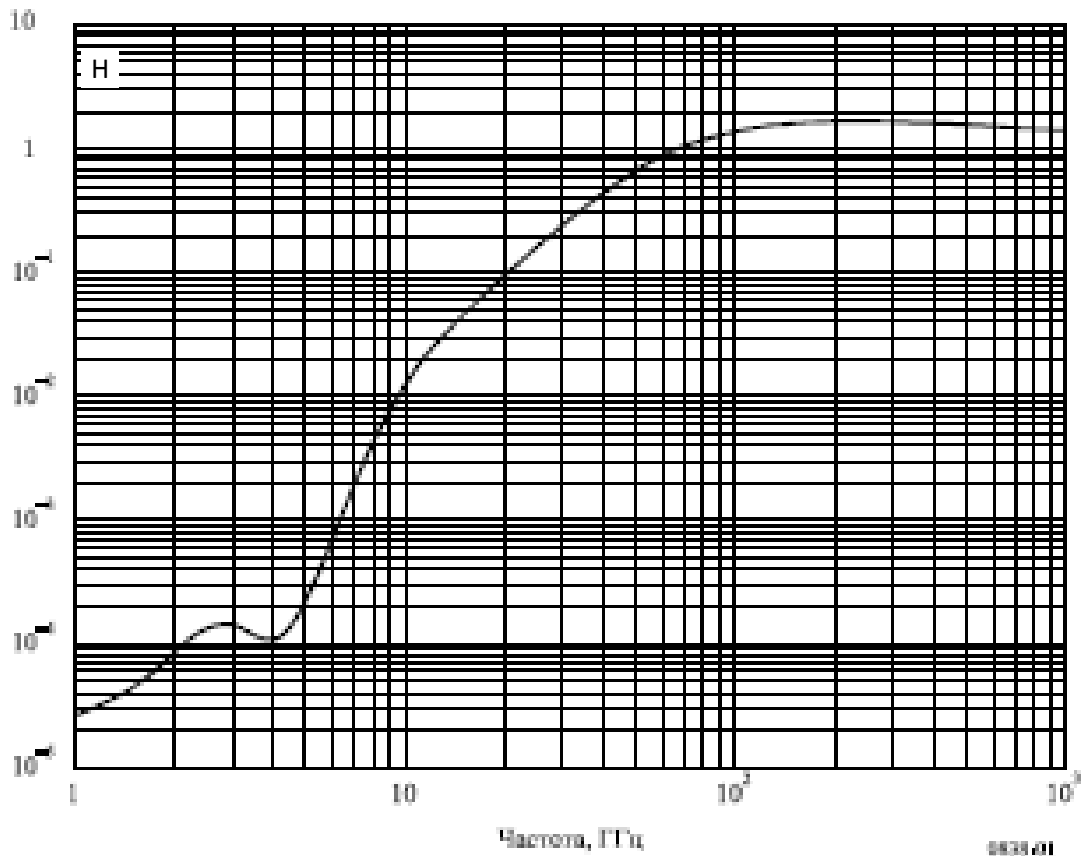


Таблица Д.1 – Значения коэффициентов a и b для горизонтальной и вертикальной поляризации (ITU-RP.838-3)

Частота, ГГц	b_H	a_H	b_V	a_V	Частота, ГГц	b_H	a_H	b_V	a_V
1	0,0000259	0,9691	0,0000308	0,8592	30	0,2403	0,9485	0,2291	0,9129
1,5	0,0000443	1,0185	0,0000574	0,8957	31	0,2588	0,9392	0,2465	0,9055
2	0,0000847	1,0604	0,0000998	0,9490	32	0,2778	0,9302	0,2646	0,8981
2,5	0,0001321	1,1209	0,0001464	1,0085	33	0,2972	0,9214	0,2833	0,8907
3	0,0001390	1,2322	0,0001942	1,0688	34	0,3171	0,9129	0,3026	0,8834
3,5	0,0001155	1,4189	0,0002346	1,1387	35	0,3374	0,9047	0,3221	0,8761
4	0,0001071	1,6009	0,0002461	1,2176	36	0,3580	0,8967	0,3427	0,8690
4,5	0,0001340	1,6948	0,0002347	1,3987	37	0,3789	0,8890	0,3633	0,8621
5	0,0002162	1,6969	0,0002428	1,5317	38	0,4001	0,8816	0,3844	0,8552
5,5	0,0003909	1,6499	0,0003115	1,5882	39	0,4215	0,8743	0,4058	0,8486
6	0,0007056	1,5900	0,0004878	1,5728	40	0,4431	0,8673	0,4274	0,8421
7	0,001915	1,4810	0,001425	1,4745	41	0,4647	0,8605	0,4492	0,8357
8	0,004115	1,3905	0,003450	1,3797	42	0,4865	0,8539	0,4712	0,8296
9	0,007535	1,3155	0,006691	1,2895	43	0,5084	0,8476	0,4932	0,8236
10	0,01217	1,2571	0,01129	1,2156	44	0,5302	0,8414	0,5153	0,8179
11	0,01772	1,2140	0,01731	1,1617	45	0,5521	0,8355	0,5375	0,8123
12	0,02286	1,1825	0,02455	1,1216	46	0,5738	0,8297	0,5596	0,8069
13	0,03041	1,1586	0,03266	1,0901	47	0,5956	0,8241	0,5817	0,8017
14	0,03738	1,1396	0,04126	1,0646	48	0,6172	0,8187	0,6037	0,7967
15	0,04481	1,1233	0,05008	1,0440	49	0,6386	0,8134	0,6255	0,7918
16	0,05282	1,1086	0,05899	1,0273	50	0,6600	0,8084	0,6472	0,7871
17	0,06146	1,0949	0,06797	1,0137	51	0,6811	0,8034	0,6687	0,7826
18	0,07078	1,0818	0,07708	1,0025	52	0,7020	0,7987	0,6901	0,7783
19	0,08081	1,0691	0,08642	0,9930	53	0,7228	0,7941	0,7112	0,7741
20	0,09164	1,0568	0,09611	0,9847	54	0,7433	0,7896	0,7321	0,7700
21	0,1032	1,0447	0,1063	0,9771	55	0,7635	0,7853	0,7527	0,7661
22	0,1155	1,0329	0,1170	0,9700	56	0,7835	0,7811	0,7730	0,7623
23	0,1286	1,0214	0,1284	0,9630	57	0,8032	0,7771	0,7931	0,7587
24	0,1425	1,0101	0,1404	0,9561	58	0,8226	0,7731	0,8129	0,7552
25	0,1571	0,9991	0,1533	0,9491	59	0,8418	0,7693	0,8324	0,7518
26	0,1724	0,9884	0,1669	0,9421	60	0,8606	0,7656	0,8515	0,7486
27	0,1884	0,9780	0,1813	0,9349	61	0,8791	0,7621	0,8704	0,7454
28	0,2051	0,9679	0,1964	0,9277	62	0,8974	0,7586	0,8889	0,7424
29	0,2224	0,9580	0,2124	0,9203	63	0,9153	0,7552	0,9071	0,7395
					64	0,9328	0,7520	0,9250	0,7366
					65	0,9501	0,7488	0,9425	0,7339

ПРИЛОЖЕНИЕ Е.1

(обязательное)

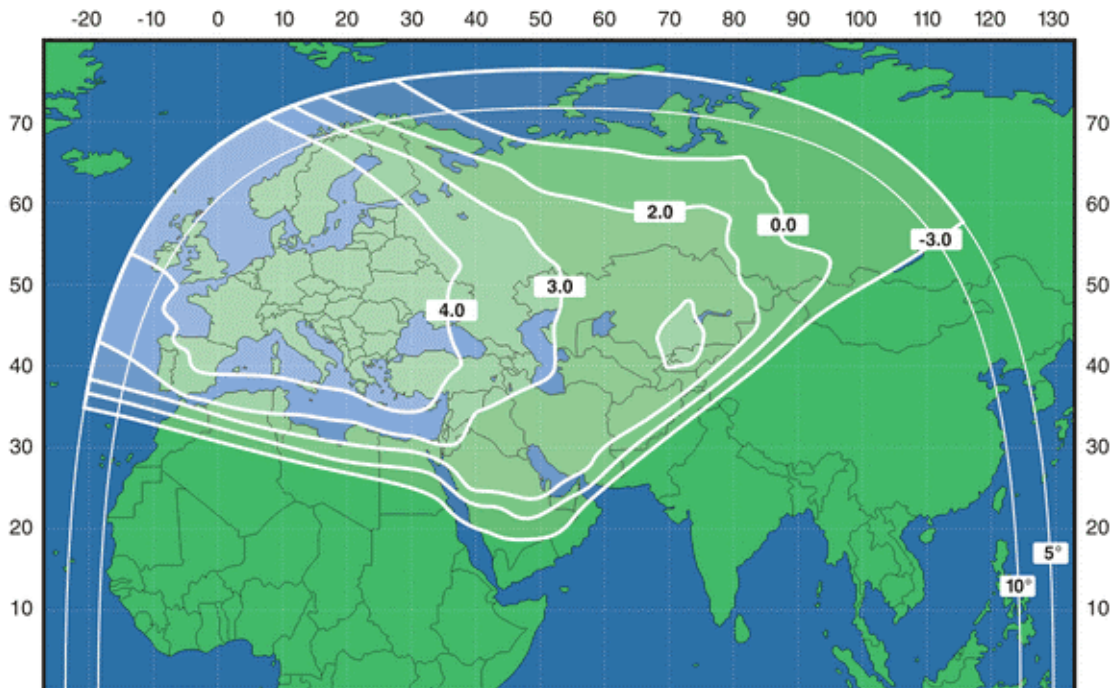
Зоны обслуживания спутника «Экспресс-АМ-6» (53⁰ в.д.) (Ки-диапазон)

Рисунок Е.1.1 – Зоны обслуживания спутника «Экспресс-АМ6» на прием (G/T, дБК)

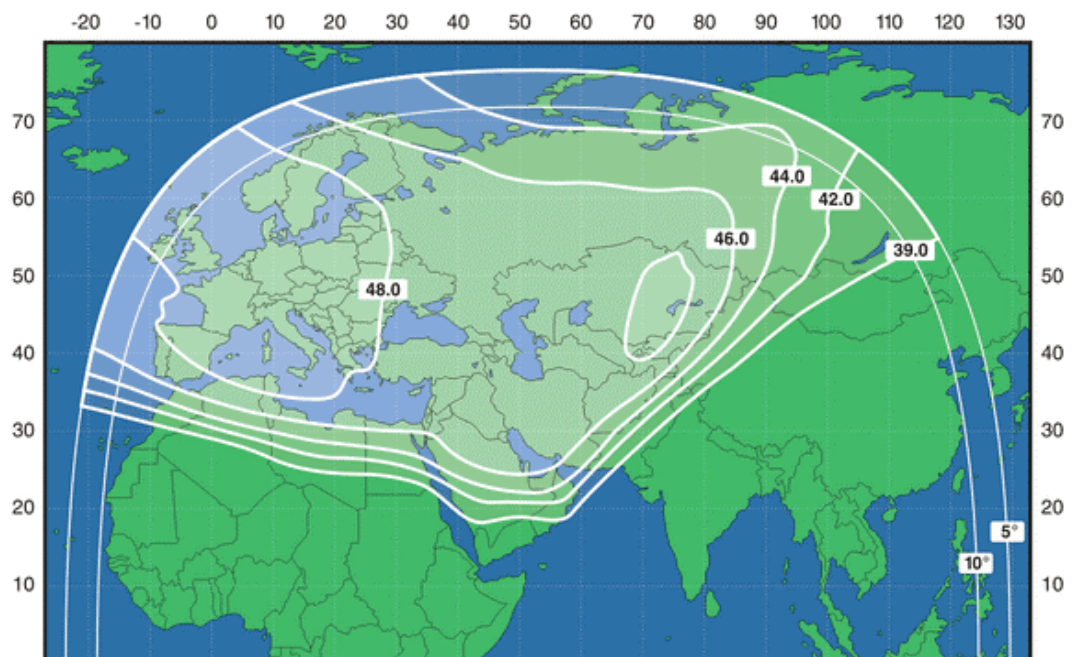


Рисунок Е.1.2 – Зоны обслуживания спутника «Экспресс-АМ6» на передачу (ЭИИМ, дБВт)

ПРИЛОЖЕНИЕ Е.2

(обязательное)

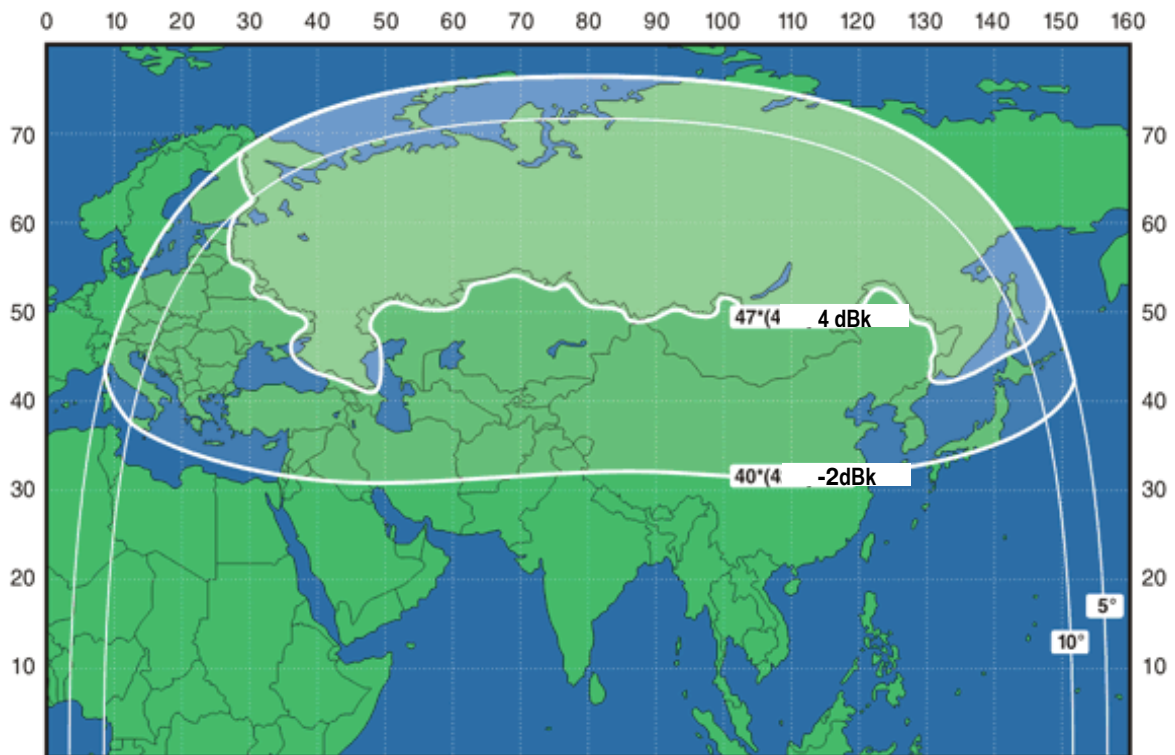
Зоны обслуживания спутника «Экспресс-АМ2» (80⁰ в.д.)(Ку-диапазон)

Рисунок Е.2.1 – Зоны обслуживания спутника «Экспресс-АМ2» на прием (G/T, дБк)

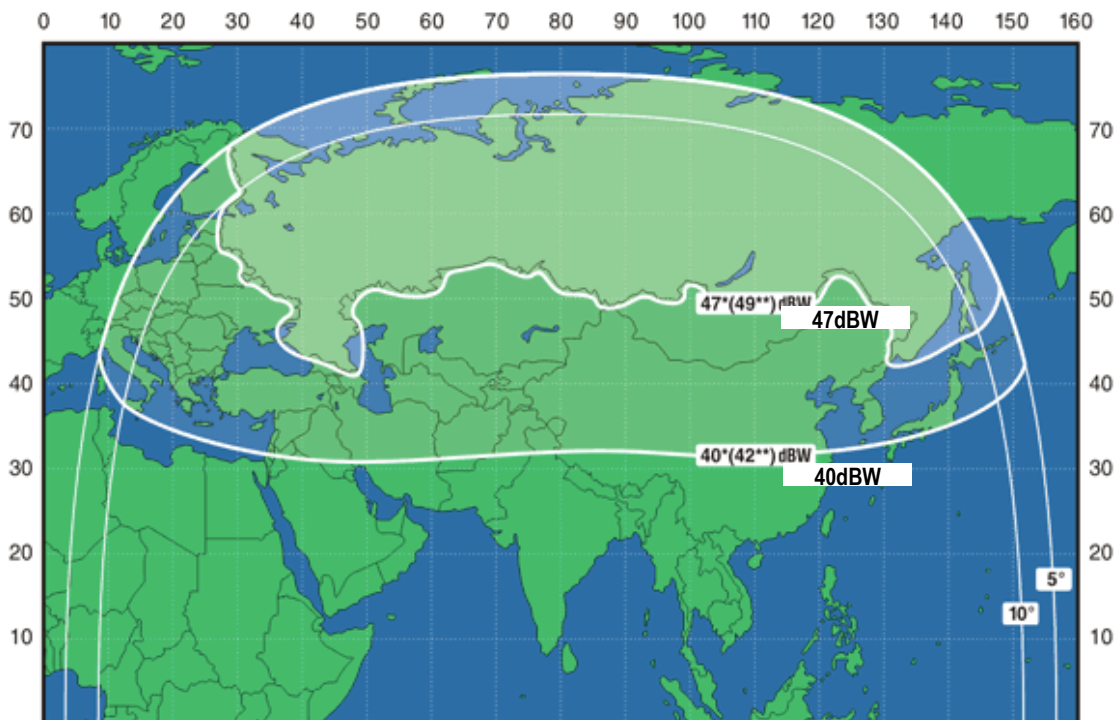


Рисунок Е.2.2 – Зоны обслуживания спутника «Экспресс-АМ2» на передачу (ЭИИМ, дБВт)

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж
(обязательное)

Сравнительные показатели эффективности сигналов и методов кодирования

Таблица Ж.1- Сравнительные показатели эффективности сигналов и методов кодирования, применяемых в СЛС

Тип сигнала	Требуемое отношение сигнал/шум E_b/N_0 для обеспечения вероятности ошибки $P_{ош}$, дБ					Результир ующая скорость кодирова ния (r_{FEC})	Символьн ая скорость ($1/T_s$), бит/с	Спектраль ная эффе ктив ность, (бит/с)/ Гц	Занимаем ая полоса частот (В), Гц	Порого вое значе ние $E_b/N_{ош}$ (по Шен нону)	$E_b/N_{ош}$, дБ	Проигрыш Δh по отношению к пределу Шеннона при $P_{ош} = 10^{-6}$, дБ
	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}							
ФМ-2 (теория)	8,4	9,6	10,6	11,3	12,0	1	R	1	1,40 R	1	0	10,6
ФМ-2, Turbo, $r = 21/44^*$	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	0,48	2,1 R	0,48	2,94 R	0,82	-0,85	3,7
ФМ-2, Turbo, $r = 5/16^*$	2,0	2,2	2,4	2,6	2,7	0,31	3,2 R	0,31	4,48 R	0,77	-1,12	3,5
ФМ-4 (теория)	8,4	9,6	10,6	11,3	12,0	1	0,5 R	2	0,70 R	1,5	1,76	8,8
ФМ-4, Витерби, $r = 1/2$	4,7	5,4	6,1	6,7	7,2	0,50	R	1,0	1,40 R	1	0	6,1
ФМ-4, Витерби, $r = 3/4$	6,1	6,8	7,6	8,3	8,8	0,75	0,67 R	1,5	0,94 R	1,22	0,86	6,7
ФМ-4, Витерби, $r = 7/8$	7,2	8,0	8,7	9,4	10,3	0,875	0,57 R	1,75	0,80 R	1,35	1,31	7,4
ФМ-4, Витерби, $r = 1/2$, RS(219, 201, 9)	-	-	4,1	4,2	4,4	0,46	1,09 R	0,92	1,53 R	0,97	-0,13	4,2
ФМ-4, Витерби, $r = 3/4$, RS(219, 201, 9)	-	-	5,6	5,8	6,0	0,69	0,72 R	1,38	1,01 R	1,16	0,65	4,9
ФМ-4, Turbo, $r = 1/2^*$	-	2,8	2,9	3,1	3,2	0,48	1,05 R	0,96	1,47 R	0,99	-0,07	3,0

Продолжение таблицы Ж.1

ФМ-4, Turbo, r = ¾*	3,5	3,6	3,8	4,1	4,4	0,75	0,67 R	1,5	0,94 R	1,22	0,86	2,9
ФМ-4, Turbo, r = 7/8*	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	0,875	0,57 R	1,75	0,80 R	1,35	1,31	3,0
ФМ-4, Turbo, r = 0,95*	5,9	6,2	6,4	6,7	6,9	0,95	0,53 R	1,90	0,74 R	1,44	1,58	4,8
ФМ-8 (теория)	11,8	13,0	14,0	14,7	15,4	1	0,33 R	3	0,46 R	2,33	3,68	10,3
ФМ-8, ТСМ, r = 2/3	7,0	7,8	8,7	9,5	10,2	0,67	0,5 R	2,0	0,70 R	1,5	1,76	6,9
ФМ-8, ТСМ, r = 2/3, RS (219, 201, 9)	5,5	5,8	6,2	6,5	6,7	0,61	0,55 R	1,83	0,77 R	1,40	1,45	4,7
ФМ-8, Turbo, r = ¾*	5,7	5,9	6,2	6,4	6,8	0,75	0,44 R	2,25	0,62 R	1,67	2,23	4,0
ФМ-8, Turbor = 7/8*	6,8	6,9	7,0	7,1	7,2	0,875	0,38 R	2,62	0,53 R	1,97	2,93	4,1
ФМ-8, Turbo, r = 0,95*	8,8	9,1	9,3	9,8	10,3	0,95	0,35 R	2,85	0,49 R	2,18	3,38	5,9
КАМ-16 (теория)	12,4	13,6	14,6	5,3	16,0	1	0,25 R	4	0,35 R	3,75	5,74	8,9
КАМ-16, Витерби, r = ¾	9,1	10,0	10,8	11,7	12,6	0,75	0,33 R	3,0	0,46 R	2,33	3,68	7,1
КАМ-16, Витерби, r = 7/8	10,4	11,2	12,0	12,8	13,6	0,875	0,29 R	3,5	0,41 R	2,95	4,69	7,3
КАМ-16, Витерби, r = ¾, RS(219, 201, 9)	7,9	8,1	8,4	8,6	8,8	0,69	0,36 R	2,75	0,50 R	2,08	3,19	5,2
КАМ-16, Витерби, r = 7/8, RS(219, 201, 9)	9,3	9,6	9,8	10,0	10,3	0,80	0,31 R	3,21	0,43 R	2,57	4,10	5,7
КАМ-16, Turbo, r = ¾*	6,8	7,1	7,4	7,8	8,2	0,75	0,33 R	3,0	0,46 R	2,33	3,68	3,7
КАМ-16, Turbo, r = 7/8*	7,8	7,9	8,1	8,2	8,3	0,875	0,29 R	3,5	0,41 R	2,95	4,69	3,4

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

(обязательное)

Взаимная зависимость энергетического запаса на участках СЛС
«ЗС₁-ИСЗ» И «ИСЗ-ЗС₂»

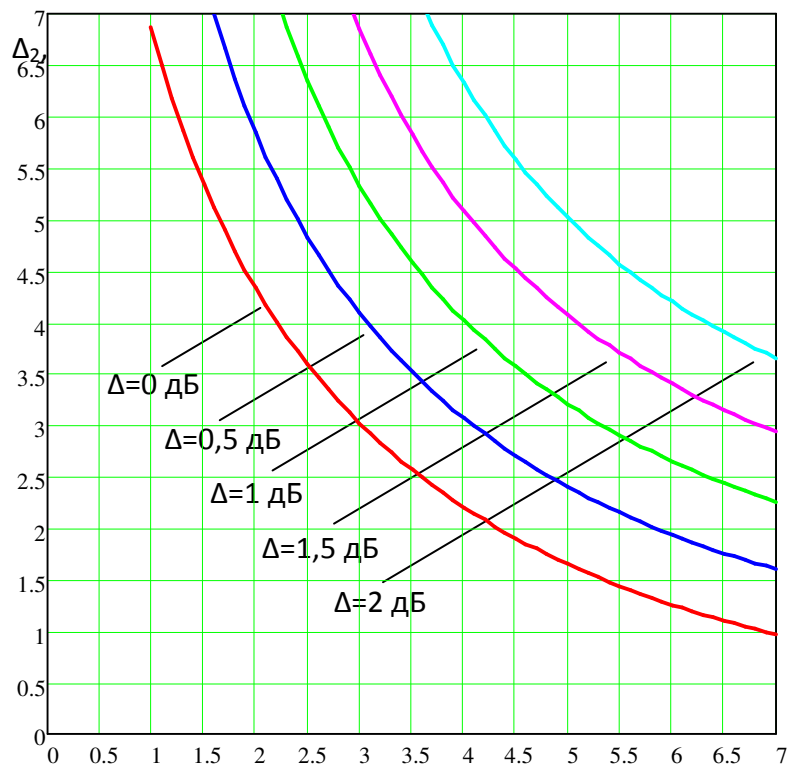


Рисунок 3.1 – Взаимная зависимость энергетического запаса на участках Δ_1 , дБ

СЛС «ЗС₁-ИСЗ» (Δ₁) и «ИСЗ-ЗС₂» (Δ₂) для различных значений результирующего энергетического запаса (Δ) для СЛС в целом