

**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ ИМЕНИ МУХАММАДА АЛ-ХОРАЗМИЙ**

**Пулатов Ш.У., Ибраимов Р.Р., Писецкий Ю.В., Гафуров А.Ш.**

**Методическое указание для выполнения практических заданий  
по дисциплине  
РАДИОРЕЛЕЙНАЯ И СПУТНИКОВАЯ СВЯЗЬ**

**для магистрантов специальности 70611701 - Системы мобильной связи**

**Ташкент 2024**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	3
<b>1. Расчет пролёта радиорелейной линии.</b>	4
1.1. Построение продольного профиля пролета.	5
1.2. Выбор оптимальных высот подвеса антенн.	6
1.3. Расчет запаса на замирание.	10
1.4. Расчет времени ухудшения связи из-за дождя	11
1.5. Ухудшения связи, вызванное субрефракцией радиоволн	14
1.6. Проверка нормы на неготовность линии.	17
1.7. Расчет времени ухудшения радиосвязи из-за многолучевого распространения	19
Контрольные вопросы	21
<b>2. Энергетический расчет спутниковой линии связи.</b>	22
2.1. Энергетический расчет линии «вниз»	25
2.2. Энергетический расчет линии «вверх»	29
2.3. Построение диаграмм уровней мощности сигнала на участках «вниз» и «вверх»	31
Контрольные вопросы	33
<b>ЛИТЕРАТУРА</b>	34

## ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей данного методического указания для выполнения практических заданий по дисциплине РАДИОРЕЛЕЙНАЯ И СПУТНИКОВАЯ СВЯЗЬ является расчет устойчивости связи на пролете РРЛ и определение параметров спутниковой системы связи.

За последние годы широкое распространение получили радиорелейные линии связи (РРЛ), которые позволяют передавать телевизионные программы и одновременно сотни и тысячи телефонных сообщений на огромные расстояния. РРЛ относятся к наземным беспроводным системам, которые среди современных методов передачи информации играют весьма значительную роль, успешно конкурируя с волоконно-оптическими и спутниковыми структурами, особенно для связи на небольшие расстояния. Связь на расстояния до нескольких тысяч километров обеспечивают микроволновые радиорелейные системы связи, скорость работы которых превышает сотни мегабит в секунду.

Современные системы спутниковой связи (ССС), различаются по назначению, обслуживаемой территории, составу, числу и пропускной способности каналов. Для передачи информации между ИСЗ могут организовываться линии межспутниковой связи, повышающие гибкость спутниковых систем.

В первом задании необходимо по известным высотным отметкам земли и указанным расстояниям от начала пролета построить чертёж продольного профиля земли и рассчитать устойчивость связи на пролете.

Во втором задании необходимо выполнять энергетический расчет участка спутниковой линии. Спутниковая линия состоит из двух участков: «вверх» - передающая ЗС – бортовой ретранслятор и «вниз» - бортовой ретранслятор – приемная земная станция.

# **1. Расчет пролёта радиорелейной линии.**

## **Методические указания к расчету задания.**

### **Цель работы.**

Изучение принципов построения продольного профиля пролета радиорелейной линии и условия выполнения устойчивости связи на пролете радиорелейной линии прямой видимости с передачей цифровых сообщений.

### **Задание.**

1. Ознакомиться с особенностями построения продольного профиля пролета.
2. Произвести расчет и выбор высот подвеса антенн продольного профиля пролета.
3. Произвести расчет запаса на замирание.
4. Произвести расчет времени ухудшения связи из-за дождя.
5. Произвести расчеты с учетом ухудшения связи, вызванное субрефракцией радиоволн.
6. Произвести расчеты нормы на неготовность линии
7. Произвести расчеты времени ухудшения радиосвязи из-за многолучевого распространения
8. Составить отчет.

### **Содержание отчёта.**

1. Цель работы.
2. Исходные данные для расчетов.
3. Расчеты по всем пунктам задания.
4. Выводы по проведенным расчетам.

### **Исходные данные для расчета:**

длина пролета  $R_0=30$  км,

частотный диапазон  $\Delta F=7,5$  ГГц.

По выбранному частотному диапазону подходит аппаратура NERA: NL 187 с техническими характеристиками:

Диапазон частот $f$ , ГГц	7,125 – 7,725
Коэффициент системы $S_G$ , дБ	117
Мощность передатчика $P_{\text{прд}}$ , дБ	28
Диаметр антенны $D$ , м	1,2
Коэффициент усиления антенны $G$ , дБ	45,4

### 1.1. Построение продольного профиля пролета.

Продольный профиль интервала представляет собой вычерченный в определенном масштабе вертикальный разрез местности по линии, соединяющей две соседние радиорелейные станции. Продольные профили интервалов РРЛ полно и наглядно характеризуют рельеф местности на каждом интервале связи и являются основными рабочими документами, позволяющими выполнить расчет устойчивости работы радиорелейной линии при заданных нормах на ее качественные показатели.

Построение продольных профилей производится в прямоугольной системе координат с применением разных масштабов по горизонтали и вертикали. Высоты препятствий на поверхности Земли измеряются в метрах, а расстояния между ними радиорелейными станциями – в километрах. Таким образом, высоты откладываются на профиле не по линиям, проходящим через центр Земли (т.е. по радиусу Земли), а по вертикали (по оси ординат), и отсчет их ведется не от горизонтальной линии профиля, а от линии кривизны земной поверхности, принимаемой за линию уровня моря или за условный нулевой уровень. Расстояния же между станциями откладываются не по криволинейной поверхности, а по горизонтали (оси абсцисс). При таком построении профиля земная поверхность изображается не окружностью, а параболой. Построение дуги

земной кривизны (параболы) производится после определения расстояний между станциями и максимальной разности высот на поверхности земли, так как в зависимости от расстояния меняется масштаб по вертикали. Расстояния между станциями, а также наиболее низкие ( $h_{\min}$ ) и наиболее высокие ( $h_{\max}$ ) точки профиля интервала РРЛ связи определяются по данным топографических карт, и затем вычисляется максимальная разность высот в метрах.

После выбора масштабов производится построение дуги земной кривизны.

Линия, изображающая на профиле уровень моря (дуга земной кривизны) или условный нулевой уровень (условный горизонт) и имеющая вид параболы, рассчитывается с достаточной для практических расчетов степенью точности по формуле:

$$x_{\text{МАКС}} = 1,96 \cdot 10^{-2} \cdot R_0^2, \quad (1.1)$$

где  $R_0$  — длина пролета РРЛ, выраженная в км.

Для сокращения размеров чертежа высотные отметки отсчитываются от линии условного горизонта, которая выбирается в зависимости от рельефа местности. Полученная кривая характеризует профиль интервала данного участка РРЛ.

## 1.2. Выбор оптимальных высот подвеса антенн.

Из-за неравномерности вертикального градиента диэлектрической проницаемости атмосферы радиолуч получает искривление, что приводит к ухудшению радиосвязи. Если он встречается с естественным препятствием, то связь нарушается. Поэтому необходимо правильно определить

минимальный просвет трассы путем оптимального выбора высот подвеса антенн.

Радиолуч перемещается внутри зоны Френеля, которая представляет собой эллипсоид вращения в точке приема и передачи. Минимальный радиус зоны Френеля определяется по формуле:

$$H_0 = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot R_0 \cdot \lambda \cdot k \cdot (1-k)}, \quad (1.2)$$

где  $\lambda = c/f$  – длина волны, м;

$k = \frac{R(H_{\max})}{R_0}$  – относительное расстояние до препятствия.

Среднее значение изменения просвета за счет рефракции, существующее в течение 80% времени, вычисляется по формуле:

$$\Delta H(\bar{g} + \sigma_{R_0}) = -\frac{R_0^2}{4} \cdot (\bar{g} + \sigma_{R_0}) \cdot k \cdot (1-k), \quad (1.3)$$

Где  $\bar{g}$  и  $\sigma_{R_0}$  – соответственно среднее значение и стандартное отклонение вертикального градиента проницаемости.

При длине пролета меньше 50 км стандартное отклонение должно определяться по формуле:

$$\sigma_{R_0} = \left( 10 \cdot 10^{-8} + \frac{\bar{g}}{3.1} \right) \cdot \left( \frac{1}{y} - 1 \right) + \frac{\sigma}{y}, \quad (1.4)$$

где  $\sigma$  – значение стандартного отклонения, м<sup>-1</sup>;

y – находится по рисунку 1.1.

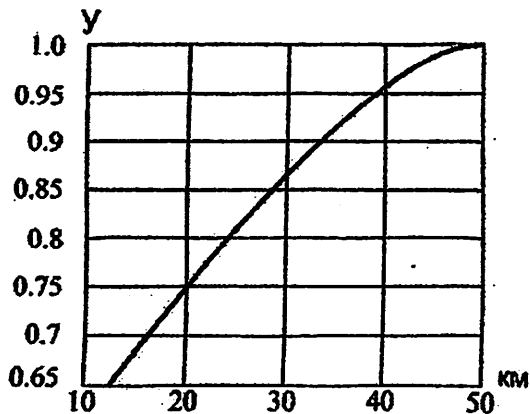


Рис. 1.1. К определению параметра  $y$ .

Просвет в отсутствии рефракции радиоволн (при  $g=0$ ) рассчитывается по формуле

$$H(0) = H_0 - \Delta H(\bar{g} + \sigma_{R_0}) \quad (1.5)$$

*Пример.* Для Самаркандской области Республики Узбекистан:

$$\bar{g} = 7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1} \quad \text{и} \quad \sigma = 9 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$$

$$k = 15/35 = 0,4, \quad H_0 = \sqrt{35/3 \cdot 10^3 \cdot 0,04 \cdot 0,4 \cdot (1 - 0,4)} = 10,58 \text{ м}$$

$$\sigma_{R_0} = \left( 10 \cdot 10^{-8} + \frac{-7 \cdot 10^{-8}}{3,1} \right) \cdot \left( \frac{1}{0,92} - 1 \right) + \frac{9 \cdot 10^{-8}}{0,92} = 10,46 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$$

$$\Delta H(\bar{g} + \sigma_{R_0}) = -\frac{(35 \cdot 10^3)^2}{4} \cdot (-7 \cdot 10^{-8} + 10,46 \cdot 10^{-8}) \cdot 0,4 \cdot (1 - 0,4) = -2,54 \text{ м}$$

$$H(0) = 10,58 + 2,54 = 13,12 \text{ м}$$

Высоты подвеса антенны определим из рисунка 1.2. Для этого от критической точки профиля откладываем расстояние  $H(0)$ , и через данную точку проводится луч, соединяющий антенны.





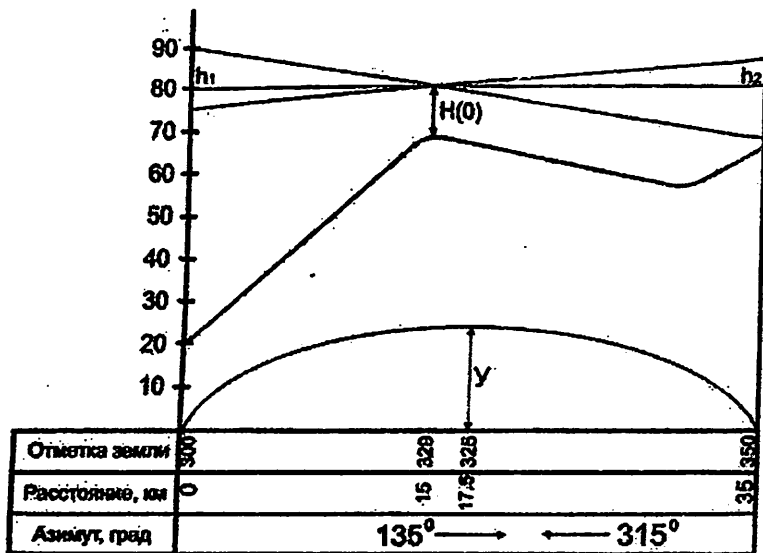


Рис. 1.3. Выбор высот подвеса антенн.

Для этого от критической точки профиля откладывается расстояние  $\Delta y = H(0)$  и через данную точку проводится три произвольных луча. Выбирается тот луч, у которого

$$h_1 + h_2 = \min,$$

где  $h_1$  – высота подвеса передающей антенны,  $h_2$  – высота подвеса приемной антенны.

### 1.3. Расчет запаса на замирание.

Расчет запаса на замирание производится по формуле:

$$F_i = S_G + G_{\text{ПРД}} + G_{\text{ПРМ}} - 2\eta - L_0, \quad (1.7)$$

где  $S_G$  – коэффициент системы, дБ;

$G_{\text{прд}} = G_{\text{прм}}$  – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн,

дБ;

$2\eta \approx 5 \text{ дБ}$  – коэффициент полезного действия антенно-фидерного тракта;

$L_0$  – затухание радиоволн в свободном пространстве, дБ.

$$L_0 = 20[\lg(f) + \lg(d)] + 32,45, \quad (1.8)$$

где  $f$  – частота передачи, МГц;

$d=R_0$  – расстояние между передающей и приемной антеннами (длина пролета), км.

*Пример.* Расчет  $L_0, F_t$ :

$$L_0 = 20[\lg(7,5 \cdot 10^3) + \lg(30)] + 32,45 = 20 \cdot (3,875 + 1,477) + 32,45 = 139,494 \text{ дБ};$$

$$F_t = 117 + 45,4 + 45,4 - 5 - 139,494 = 63,31 \text{ дБ}.$$

#### 1.4. Расчет времени ухудшения связи из-за дождя.

Чем выше частота радионизлучения, тем сильнее влияет на ослабление сигнала размер капель и интенсивность дождя. Поэтому при расчете времени ослабления необходимо учитывать климатическую зону в зависимости от интенсивности дождя в течение 0,01% времени.

Территория СНГ разделена на 16 климатических зон. Казахстан относится к зоне Е, для которой интенсивность осадков = 22 мм/час.

Коэффициенты регрессии для оценки затухания в зависимости от поляризации волны представлены в таблице 8.

Так как интенсивность дождя неравномерно распределяется вдоль трассы, определяем эффективную длину пролета:

$$d_e = r \cdot R_0, \quad (1.9)$$

где  $R_0$  – длина пролета, км;

$$r = \frac{1}{1 + R_0/d_0} \text{ – коэффициент уменьшения;}$$

$$d_0 = 35e^{-0,015R_{0,01}} \text{ – опорное расстояние, км.}$$

Удельное затухание в дожде в зависимости от поляризации волны (дБ):

$$\gamma = k \cdot R_{0,01}^\alpha \quad (1.10)$$

определяется для горизонтальной и вертикальной поляризации и выбирается наименьшее из них

$$\gamma_H = k_H \cdot R_{0,01}^{\alpha_H}, \quad (1.11, a)$$

$$\gamma_V = k_V \cdot R_{0,01}^{\alpha_V}, \quad (1.11, б)$$

где  $k_i$ ,  $k_v$ ,  $\alpha_i$ ,  $\alpha_v$  – коэффициенты регрессии.

Таблица 1.1

Коэффициенты регрессии для оценки затухания.

Частота $f$ , ГГц	Горизонтальная поляризация		Вертикальная поляризация	
	$k_i$	$\alpha_i$	$k_v$	$\alpha_v$
1	0,0000387	0,912	0,0000352	0,880
2	0,0001540	0,963	0,000138	0,923
4	0,00065	1,121	0,000591	1,075
6	0,00175	1,308	0,00155	1,265
7	0,00301	1,332	0,00265	1,312
8	0,00454	1,327	0,00395	1,31
10	0,101	1,276	0,00887	1,264
12	0,0188	1,217	0,0168	1,2
15	0,0367	1,154	0,0335	1,128
20	0,0751	1,099	0,0691	1,065

Продолжение таблицы 1.1.

25	0,124	1,061	0,113	1,03
30	0,187	1,021	0,167	1
35	0,283	0,979	0,233	0,963
40	0,35	0,939	0,51	0,929

Затухание на трассе, превышающее 0,01% времени, определяется по формуле:

$$A_{0,01} = \gamma \cdot d, \quad (1.12)$$

Время, в течение которого ослабление сигнала больше, чем запас на замирание

$$T_g = 10^{11,628 \left[ -0,546 + \sqrt{0,29812 - 0,1724g \left( 0,12 \frac{A_{0,01}}{F_t} \right)} \right]}, \quad (1.13)$$

при  $A_{0,01}/F_t < 0,155$  принимаем  $A_{0,01}/F_t = 0,155$ .

Пример. Для  $f=7$  ГГц:

$$\gamma_{\Gamma} = 0,00301 \cdot 22^{1,332} = 0,18 \text{ дБ/км};$$

$$\gamma_{\nu} = 0,00265 \cdot 22^{1,312} = 0,15 \text{ дБ/км}.$$

Примечание: так как величины очень малы, мы выбираем тип поляризации в соответствии с приведенным ранее частотным планом.

Горизонтальная поляризация:  $d_0 = 35 \cdot e^{-0,015 \cdot 22} = 25,16 \text{ км}$ ,

$$r = \frac{1}{1 + 35/25,16} = 0,42, \quad d = 0,42 \cdot 35 = 14,7 \text{ км},$$

$$A_{0,01} = 0,18 \cdot 14,7 = 2,64 \text{ дБ}, \quad \frac{A_{0,01}}{F_t} = \frac{2,64}{67,57} = 0,04 < 0,155$$

$$T_g = 1,39 \cdot 10^{-7} \%$$

### 1.5. Ухудшения связи, вызванное субрефракцией радиоволн.

Стандартная атмосфера имеет наибольшую плотность у поверхности Земли, поэтому радиолучи изгибаются к низу. В результате просвет на пролете, определяемый по минимальному радиусу зоны Френеля, не имеет постоянной величины, т.к. плотность атмосферы изменяется и зависит от времени суток и состояния атмосферы.

Среднее значение просвета на пролете:

$$H(\bar{g}) = H(0) + \Delta H(\bar{g}) = H(0) - \frac{R_0^2}{4} \cdot (\bar{g}) \cdot k \cdot (1-k) \quad (1.14)$$

Относительный просвет:

$$p(\bar{g}) = \frac{H(\bar{g})}{H_0} \quad (1.15)$$

На чертеже профиля пролета проводим прямую параллельно радиолучу на расстоянии  $\Delta y = H_0$  от вершины препятствия и находим ширину препятствия  $r$  (см. рисунок 2.2).

Относительная длина препятствия:

$$l = r/R_0 \quad (1.16)$$

Параметр  $\mu$ , характеризующий аппроксимирующую среду:

$$\mu = \sqrt[3]{\frac{k^2(1-k)^2}{l^2}} \cdot \sqrt[3]{\frac{64\pi \cdot \alpha}{3}} \quad (1.17)$$

где  $\alpha = 0,5$  (при остром препятствии) или  $\alpha = 1$  (при спокойном профиле).

Значение относительного просвета  $p(g_0)$ , при котором наступает глубокое замирание сигнала, вызванное экранировкой препятствием минимальной зоны Френеля:

$$p(g_0) = \frac{V_0 - V_{\min}}{V_0} \quad (1.18)$$

где  $V_0$  – множитель ослабления при  $H(0)=0$ , определяемый из рисунка 1.4 по значению  $\mu$ .

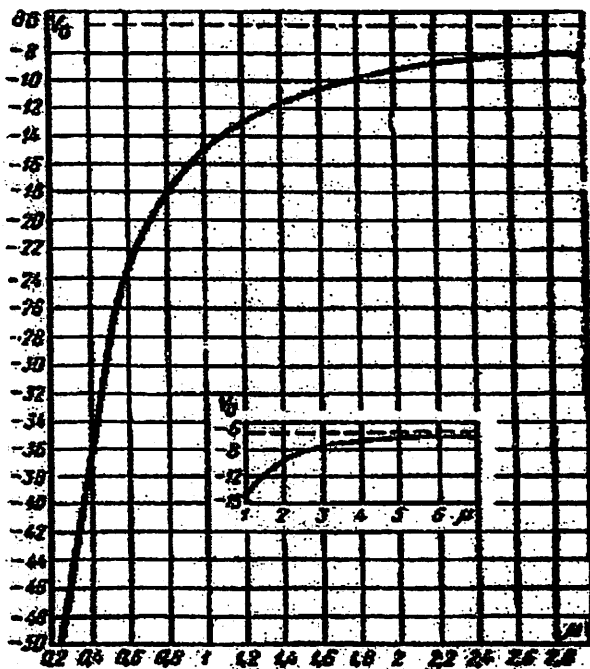


Рис. 1.4. Зависимость множителя ослабления от аппроксимирующего параметра  $\mu$ .

$V_{\min}$  – минимальный допустимый множитель ослабления определяется по формуле:

$$V_{\min}^2 = -F_t \Rightarrow V_{\min} \approx -\frac{F_t}{2} \quad (1.19)$$

Параметр  $\Psi$  определяется по формуле:

$$\Psi = 2,31 \cdot A \cdot [p(\bar{g}) - p(g_0)] \quad (1.20)$$

$$A = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{\lambda}{R_0^2 \cdot k(1-k)}}$$

где

Процент времени ухудшения связи, вызванного субрефракцией радиоволн,  $T_0(V_{\min})$ , определяется по рисунку 1.5.

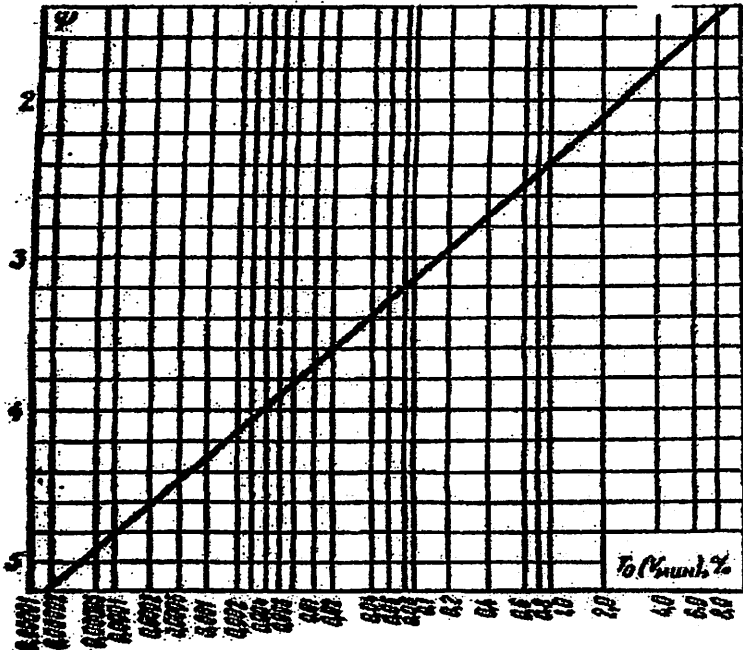


Рис. 1.5. К расчету времени ухудшения связи, вызванного субрефракцией радиоволн.

Пример:  $r=18,75$  км.

$$\Delta H(\bar{g}) = -\frac{(35 \cdot 10^3)^2}{4} \cdot (-7 \cdot 10^{-8}) \cdot 0,4(1-0,4) = 5,14 \text{ м}$$



$$H(\bar{g}) = 13,12 + 5,14 = 18,26 \text{ м}, \quad p(\bar{g}) = \frac{18,26}{10,58} = 1,73, \quad l = \frac{18,75}{35} = 0,54$$

Принимаем  $\alpha = 1$ , тогда  $\mu = \sqrt[3]{\frac{0,4^2(1-0,4)^2}{0,54^2}} \cdot \sqrt[3]{\frac{64 \cdot 3,14 \cdot 1^2}{3}} = 1,16$

$$V_{\text{MIN}} = -\frac{67,57}{2} = -31,29 \text{ дБ}, \quad V_0 = -13 \text{ дБ}, \quad p(g_0) = \frac{-13 - (-31,29)}{-13} = -1,41$$

$$A = \frac{1}{10,46 \cdot 10^{-8}} \sqrt{\frac{0,04}{(30 \cdot 10^3)^3 \cdot 0,4(1-0,4)}} = 0,69$$

$$\psi = 2,31 \cdot 0,69 \cdot [1,73 - (-1,41)] = 5,005$$

$$T_0(V_{\text{MIN}}) = 0,00004\%$$

Оптимизация высот подвеса антенн проводится, если  $T_0(V_{\text{min}}) \geq 0,003\%$ .

Принимаем  $T_0(V_{\text{min}}) = 0,001$ , при этом  $\psi = 4,3$  по графику на рисунке 2.5. Из формулы 2.20 находим  $p(\bar{g})$ ,  $H(\bar{g})$ . Определяем  $\Delta h$  и на эту величину увеличиваем  $h_1$  и  $h_2$  на пролете.

### 1.6. Проверка нормы на неготовность линии.

Характеристики неготовности для ГЭЦТ (гипотетический эталонный цифровой тракт) установлены в рекомендации 557МСЭ-Р.

ГЦЭТ считается неготовой, если в течение 10 последовательных секунд возникли следующие условия или одно из них:

- передача цифрового сигнала прервана
- в каждой секунде BER хуже  $10^{-3}$ .

Неготовность аппаратуры уплотнения исключается. Характеристики неготовности делятся на неготовность оборудования и неготовность, вызванную условиями распространения радиоволн, например, величина неготовности, вызванной дождем, составляет 30-50%.

Характеристики готовности ГЭЦТ протяженностью 2500 км определяются величиной 99,7%, причем эти проценты определяются в течение достаточно большого интервала времени. Этот интервал должен составлять более года, характеристики неготовности определяются, таким образом, величиной 0,3%.

Норма на неготовность:

$$UR_{\text{доп}} = \frac{0,3 \cdot R_0}{2500} > T_0 + T_f, \quad (1.21)$$

где  $R_0$  – длина пролета, км;

2500 – длина эталонной гипотетической линии.

*Пример.* 
$$UR_{\text{доп}} = \frac{0,3 \cdot 35}{2500} = 0,0042\%$$

$$T_0 + T_f = 1,32 \cdot 10^{-7} + 1,39 \cdot 10^{-7} = 2,71 \cdot 10^{-7} \%$$

$$4,2 \cdot 10^{-3} > 2,71 \cdot 10^{-7}, \text{ условие (2.21) выполняется.}$$

Учитывая увеличение  $N(g)$  для получения  $T_0(V_{\text{min}}) < 0,003\%$ , указываем оптимальные высоты. Опоры в основном предоставляют трубчатую мачту с основанием диаметра 2,5 м, которая может состоять из секций длиной 6,5 м и 11 м.

*Пример.* Для  $h_1=65$  м – шесть секций по 11 м; для  $h_2=15$  м: 1 секция – 11 м и 1 секция – 6,5 м.

### 1.7. Расчет времени ухудшения радиосвязи из-за многолучевого распространения.

При моделировании радиолиний протяженностью более чем несколько километров должны учитываться четыре механизма замирания в чистой атмосфере, обусловленные чрезвычайно преломляющими слоями:

- расширение луча;
- развязка в антенне;
- поверхностное многолучевое распространение;
- атмосферное многолучевое распространение.

Большинство этих механизмов возникают сами по себе или в комбинации с другими механизмами. Сильные частотно-избирательные затухания возникают, когда расфокусировка прямого луча сочетается с отражением сигнала от поверхности, что вызывает замирание вследствие многолучевого распространения. Мерцающие замирания, вызванные небольшими турбулентными возмущениями в атмосфере, всегда имеют место при этих механизмах, но на частотах ниже 400 ГГц их влияние на общее распределение замираний не существенно. На больших глубинах замирания процент времени Т<sub>инт</sub>, в течение которого в узкополосных системах не превышает уровень принимаемого сигнала в средний худший месяц, может быть определен с помощью следующего приближенного асимптотического выражения:

$$T_{\text{инт}} = K \cdot Q \cdot f^B \cdot d^C \cdot 10^{-A/10}, \quad (1.22)$$

где –  $A=F_1$  – запас на замирание, дБ;

$d$  – длина пролета, км;

$f$  – частота, ГГц;

$K$  – коэффициент, учитывающий влияние климата и рельефа местности;

$Q$  – коэффициент, учитывающий другие параметры трассы;

$B=0,89$ ;  $C=3,6$  – коэффициенты, учитывающие региональные эффекты.

Коэффициент, учитывающий влияние климата и рельефа местности:

$$K = P_L^{1,5} \cdot 10^{(-6,5 - C_{LAT} - C_{LON})}, \quad (1.23)$$

где  $P_L=5\%=0,05$  – процент времени с вертикальным градиентом рефракции;

$C_{LAT}=C_{LON}=0$  для Казахстана.

Коэффициент, учитывающий другие параметры трассы:

$$Q = (1 + |E_p|)^{-1,4}, \quad (1.24)$$

где  $|E_p| = \frac{h_1 - h_2}{R_0}$  – наклон радиотрассы, мрад (здесь  $h_1, h_2$  в м;  $d$  в км).

Пример.  $K = 0,05^{1,5} \cdot 10^{-6,5} = 3 \cdot 10^{-9}$ ,  $E_p = \frac{75 - 15}{35} = 1,71$ ,

$$Q = (1 + 1,71)^{-1,4} = 0,24$$

$$T_{\text{квт}} = 3 \cdot 10^{-9} \cdot 0,24 \cdot 7^{0,89} \cdot 35^{3,6} \cdot 10^{-67,57 \cdot 10} = 2,48 \cdot 10^{-10} \%$$

**Проверка норм на допустимое время ухудшения связи из-за многолучевого распространения радиоволн.**

Норма на допустимое время ухудшения связи для высшего качества связи:

$$SES = \frac{0,054 \cdot R_0}{2500} > T_{\text{квт}} \quad (1.25)$$

Пример.  $SES = \frac{0,054 \cdot 35}{2500} = 7,56 \cdot 10^{-4} \%$

$$7,56 \cdot 10^{-4} > 2,48 \cdot 10^{-10}, \text{ условие выполняется.}$$

### **Выводы о результатах расчета.**

В данном задании были рассчитаны условия выполнения устойчивости связи на пролете радиорелейной линии прямой видимости с передачей цифровых сообщений.

По полученным результатам можно сделать вывод, что все нормы на готовность выполняются даже на самых протяженных пролетах. Замирания в дожде были снижены за счет правильного выбора поляризации, из-за субрефракции радиоволн – за счет выбора оптимального уровня подвеса антенн.

### **Контрольные вопросы.**

1. Нормы на качественные показатели ЦРРЛ.
2. Как характеризуется и как определяется устойчивость работы ЦРРЛ?
3. Поясните показатель готовности (ПНГ) каналов ЦРРЛ.
4. Поясните показатель качества по ошибкам (ПКО) каналов ЦРРЛ.
5. Какие особенности диапазонов рабочих частот, освоенных микроволновой радиосвязью?
6. Как выбираются место расположения станций ЦРРЛ?
7. Как выбираются высоты подвеса антенн ЦРРЛ?
8. Как рассчитываются уровни сигналов на интервале ЦРРЛ?
9. Как учитываются атмосферные потери на интервале ЦРРЛ?
10. Какие существуют методы повышения устойчивости связи на пролетах ЦРРЛ?

## **2. Энергетический расчет спутниковой линии связи.**

### **Методические указания к расчету задания.**

#### **Цель работы.**

Изучение принципов энергетических расчетов линий «вниз» и «вверх» с построением диаграмм уровней мощности сигнала на участках «вниз» и «вверх».

#### **Задание.**

1. Определить значение мощности передатчика и приемника на линии «вниз», при которых спутниковый канал надежно работает в условиях помех и не содержит излишних энергетических запасов.
2. Определить значение мощности передатчика и приемника на линии «вверх», при которых спутниковый канал надежно работает в условиях помех и не содержит излишних энергетических запасов.
3. Построить диаграмму уровней сигнала на линиях «вверх» и «вниз» для заданной спутниковой системы.
4. Составить отчет.

#### **Содержание отчёта.**

1. Цель работы.
2. Исходные данные для расчетов.
3. Расчеты по всем пунктам задания.
4. Выводы по проведенным расчетам.

**Исходные данные для расчета:**  
диапазон частот

параметры передающей космической станции:

- координата 103° в.д.;
- коэффициент усиления антенны (передача) 28 дБ;
- КПД<sub>АФТ КС</sub> 0,8.

параметры приемной земной станции:

- координаты 35° в.д., 60° с.ш.;
- диаметр антенны 3 м;
- отношение  $P_c/P_{ш}$  на приеме 16 дБ (40 раз);
- коэффициент шума приемника  $K_{ш}=7$  дБ;
- эффективная полоса частот 36 МГц;
- КПД<sub>АФТ ЗС</sub> 0,9;
- шумовая температура антенны 60 К.

В расчетах необходимо учесть дополнительное ослабление энергии радиоволн на участках: поглощение в осадках – 0,8 дБ, поляризационные потери – 0,9 дБ, потери за счет рефракции – 0,2 дБ.

Коэффициент запаса для линии «вверх»  $a=6$  дБ.

Коэффициент запаса для линии «вниз»  $b=1,2$  дБ.

Варианты для расчетов заданий по исходным данным.

Таблица 2.1.

Варианты заданий.

Варианты	1	2	3	4	5
Пролеты	А - В	В - С	С - D	D - E	E - A

Таблица 2.2.

## Параметры передающих ЗС.

Система	A	B	C	D	E
Координаты	78° в.д. 42° с.ш.	52° в.д. 47° с.ш.	43° в.д. 69° с.ш.	65° в.д. 45° с.ш.	55° в.д. 50° с.ш.
Диапазон $f$ , ГГц	14/11	14/11	14/11	14/11	14/11
Диаметр антенны $D_A$ , м	6	10	9	8	3
Эффективная полоса частот $\Delta f_{ш}$ , МГц	36	33	36	72	36
Спектральная плотность мощности $S$ , дБВт/Гц	-32	-33	-34	-30	-34
Отношение сигнал/шум $R_c/R_{ш}$ , дБ	16	16,5	15	14	17
КПД АФТ	0,95	0,90	0,85	0,90	0,80

Таблица 2.3.

## Параметры бортовых ретрансляторов КС.

Система	A	B	C	D	E	
Координаты	103° в.д.	101° в.д.	95° в.д.	85° в.д.	66° в.д.	
Диапазон $f$ , ГГц	14/11	14/11	14/11	14/11	14/11	
Коэффициент усиления антенны $G$ , дБ	Прием	33	35	28	30	29
	Передача	28	30	25	27	26
Спектральная плотность мощности $S$ , дБВт/Гц	-54	-53	-52	-51	-50	
Коэффициент шума приемника КШ	8	7,5	6	5	7	
Шумовая температура антенны $T_A$ , К	40	50	55	60	45	
КПД АФТ	0,80	0,90	0,90	0,85	0,80	
Шумовая температура СЛ ТЭЛ, К	100	95	90	100	110	



Таблица 2.4.

## Параметры приемных ЗС.

Система	А	В	С	Д	Е
Координаты	35° в.д. 60° с.ш.	85° в.д. 45° с.ш.	73° в.д. 49° с.ш.	52° в.д. 47° с.ш.	78° в.д. 42° с.ш.
Диапазон f, ГГц	14/11	14/11	14/11	14/11	14/11
Диаметр антенны DА, м	3	8	9	10	6
Эффективная полоса частот Δfш, МГц	36	72	36	33	36
Коэффициент шума приемника КШ	6	8	7	5	7,5
Шумовая температура антенны ТА, К	60	58	70	80	90
КПД АФТ	0,90	0,80	0,85	0,90	0,85

## 2.1. Энергетический расчет линии «вниз».

Линии спутниковой связи состоят из двух участков: Земля-Спутник и Спутник-Земля. В энергетическом смысле оба участка оказываются напряженными, первый – из-за стремления к уменьшению мощности передатчиков и упрощению земных станций (в особенности в системах с большим числом малых приемопередающих земных станций, работающих в необслуживаемом режиме), второй – из-за ограничений на массу, габаритные размеры и энергопотребление бортового ретранслятора, лимитирующих его мощность.

Основная особенность спутниковых линий – наличие больших потерь сигнала, обусловленных затуханием (ослаблением и рассеянием) его энергии на трассах большой физической протяженности. Так, при высоте орбиты ИСЗ 36 тыс. км затухание сигнала на трассе может достигать 200 дБ. Помимо

этого, основного затухания, в пространстве сигнал в линиях спутниковой связи подвержен влиянию большого числа других факторов, таких как поглощение в атмосфере, фарадеевское вращение плоскости поляризации, рефракция, деполяризация и т.д. С другой стороны, на приемное устройство спутника и земной станции кроме собственных флуктуационных шумов воздействуют разного рода помехи в виде излучения Космоса, Солнца и планет. В этих условиях правильный и точный учет влияния всех факторов позволяет осуществить оптимальное проектирование системы, обеспечить ее уверенную работу и в то же время исключить излишние энергетические запасы, приводящие к неоправданному увеличению сложности земной и бортовой аппаратуры.

Расстояние между передающей (КС) и приемной (ЗС) антеннами:

$$d_1 = 42644 \cdot \sqrt{1 - 0,2954 \cdot \cos(\psi)}, \quad (2.1)$$

где  $\cos(\psi) = \cos(\xi_{зс}) \cdot \cos(\beta)$ ;

$\xi_{зс}$  – широта земной станции;

$\beta = \beta_{кс} - \beta_{зс}$  – разность долгот земной и космической станциями.

$$\beta = \beta_{кс} - \beta_{зс} = 103^\circ - 35^\circ = 68^\circ, \quad \cos(\psi) = \cos(60^\circ) \cdot \cos(68^\circ) = 0,1875.$$

Тогда  $d_1 = 42644 \cdot \sqrt{1 - 0,2954 \cdot 0,1875} = 4144593154$  км.

Ослабление сигнала:

$$L_0 = \frac{16 \cdot \pi^2 \cdot d^2}{\lambda^2}, \quad (2.2)$$

где  $d$  – расстояние между КС и ЗС;

$\lambda$  – длина волны.

$$\lambda_1 = \frac{c}{f_1} = \frac{3 \cdot 10^8}{11 \cdot 10^9} = 0,0273 \text{ м}$$

$$L_{01} = \frac{16 \cdot 3.14^2 \cdot (41445.93154 \cdot 10^3)^2}{0.0273^2} = 3.636 \cdot 10^{20} \text{ раз}$$

или в децибелах:  $L_0 = 10 \cdot \lg(3.636 \cdot 10^{20}) = 205.606 \text{ дБ}$

Дополнительное ослабление на трассе:

в дополнительных потерях сигнала учитываются поглощение в атмосфере (осадки)  $L_A$ , потери из-за несогласованности поляризации антенн  $L_{\Pi}$  и потери из-за рефракции  $L_P$ :

$$L_{\text{доп}} = L_A + L_{\Pi} + L_P, \quad (2.3)$$

$$L_{\text{доп}} = 0.8 + 0.9 + 0.2 = 1.9 \text{ дБ} (1.5488 \text{ раз})$$

Суммарная шумовая температура приемного тракта:

$$T_{\Sigma} = T_A + T_0 \cdot \frac{1-\eta}{\eta} + \frac{T_{\text{ш}}}{\eta}, \quad (2.4)$$

где  $T_A = 60 \text{ К}$  – шумовая температура приемной антенны;

$T_0 \approx 290 \text{ К}$ ;

$T_{\text{ш}} = (K_{\text{ш}} - 1) \cdot T_0$  – собственная шумовая температура приемника.

$$T_{\text{ш}} = (6 - 1) \cdot 290 = 1450 \text{ К},$$

$$T_{\Sigma} = 60 + 290 \cdot \frac{(1-0.9)}{0.9} + \frac{1450}{0.9} = 1703.33 \text{ К}.$$

Коэффициент усиления антенны ЗС:

$$G_{\Sigma} = \frac{10 \cdot g \cdot D_{\Lambda}^2}{\lambda^2}, \quad (2.5)$$

где  $\xi$  – коэффициент использования поверхности антенны (0,6...0,8);

$D_A$  – диаметр антенны ЗС.

$$G_{ЗС} = \frac{10 \cdot 0.8 \cdot 3^2}{0.0273^2} = 96606,7 \text{ (49.85 дБ)}$$

Мощность передатчика КС:

$$P_{\text{прд(КС)}} = \frac{L_{\text{ол}} \cdot L_{\text{доп}} \cdot k \cdot T_z \cdot \Delta f_{\text{ш}} \cdot b \cdot \left( \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\Sigma}}{G_{\text{прд}} \cdot G_{\text{прм}} \cdot \eta_{\text{прд}} \cdot \eta_{\text{прм}}}, \quad (2.6)$$

где  $\Delta f_{\text{ш}}$  – шумовая полоса приемника;

$b = 1.2 \text{ дБ (1.3183)}$  – коэффициент запаса для линии «вниз».

Коэффициент усиления антенны передатчика (КС) равен 28 дБ

( $10^{\frac{28}{10}} = 631 \text{ раз}$ ), КПД<sub>АФТ</sub> для приемной ЗС и КС равен 0.9. Тогда подставив в формулу (2.6) данные, получим:

$$P_{\text{прд(КС)}} = \frac{(3.636 \cdot 10^{20}) \cdot 1.5488 \cdot (1.5488 \cdot 10^{-23}) \cdot 1703.33 \cdot (36 \cdot 10^6) \cdot 1.3183 \cdot 40}{631 \cdot 96606.7 \cdot 0.9 \cdot 0.8} = 642.6 \text{ Вт}$$

Суммарная мощность шумов на входе приемника:

$$P_{\text{ш}} = k \cdot T_z \cdot \Delta f_{\text{ш}}, \quad (2.7)$$

$$P_{\text{ш}} = (1.38 \cdot 10^{-23}) \cdot 1703.33 \cdot (36 \cdot 10^6) = 0.85 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}$$

## 2.2. Энергетический расчет линии «вверх».

Исходные данные: диапазон частот 14↑/11↓ ГГц.

Параметры передающей земной станции: координаты 78° в.д. 42° с.ш.; диаметр антенны 3 м; отношение Pс/Pш на передаче 16 дБ (40 раза); КПД<sub>лот</sub> ЗС = 0,95.

Параметры приемной космической станции: координата 103° в.д.; коэффициент усиления антенны 33 дБ; коэффициент шума приемника K<sub>ш</sub>=8; эффективная полоса частот 36 МГц; КПД<sub>лот</sub> КС = 0,8.

Расстояние между передающей (ЗС) и приемной (КС) антеннами определяется по формуле (2.1):

$$\beta = \beta_{кx} - \beta_{xc} = 103^\circ - 78^\circ = 25^\circ, \quad \cos(\psi) = \cos(42^\circ) \cdot \cos(25^\circ) = 0.673.$$

$$\text{Тогда } d_1 = 42644 \cdot \sqrt{1 - 0.2954 \cdot 0.673} = 38170.55 \text{ км}.$$

Ослабление сигнала рассчитывается по формуле (2.2):

$$\lambda_1 = \frac{c}{f_1} = \frac{3 \cdot 10^8}{14 \cdot 10^9} = 0.0214 \text{ м}$$

$$L_{от} = \frac{16 \cdot 3.14^2 \cdot (38170.55 \cdot 10^3)^2}{0.0214^2} = 5.02 \cdot 10^{20} \text{ раз (207 дБ)}$$

Дополнительное ослабление на трассе, учитывающих поглощение в атмосфере (осадки)  $L_A$ , потери из-за несогласованности поляризации антенн  $L_1$  и потери из-за рефракции  $L_D$ , рассчитывается по формуле (2.3).

$$L_{доп} = 0.8 + 0.9 + 0.2 = 1.9 \text{ дБ (1.5488 раз)}$$

Суммарная шумовая температура приемного тракта рассчитывается по формуле (2.4):

$$T_{ш} = (8-1) \cdot 290 = 2030 \text{ К},$$

$$T_E = 40 + 290 \cdot \frac{(1-0.8)}{0.8} + \frac{2030}{0.8} = 2650 \text{ К}$$

Коэффициент усиления антенны ЗС определяется по формуле (2.5).

$$G_{\text{х}} = \frac{10 \cdot 0.8 \cdot 3^2}{0.0214^2} = 157219 \text{ (52 дБ)}$$

Мощность передатчика ЗС:

$$P_{\text{прд(зс)}} = \frac{L_{\text{от}} \cdot L_{\text{доп}} \cdot k \cdot T_E \cdot \Delta f_{\text{м.к.с}} \cdot a \cdot \left( \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}} \right)_{\Sigma}}{G_{\text{прд}} \cdot G_{\text{прм}} \cdot \eta_{\text{прд}} \cdot \eta_{\text{прм}}}, \quad (2.8)$$

где  $a=6$  дБ (3.9811) – коэффициент запаса для линии «вверх».

Коэффициент усиления антенны приемника (КС) равен 33 дБ

( $10^{\frac{33}{10}} = 1995$  раз), КПДАФТ для передающей ЗС равен 0.8.

$$P_{\text{прд(зс)}} = \frac{(5.02 \cdot 10^{20}) \cdot 1.5488 \cdot (1.38 \cdot 10^{-23}) \cdot 2650 \cdot (36 \cdot 10^6) \cdot 3.9811 \cdot 40}{157219 \cdot 1995 \cdot 0.8 \cdot 0.95} = 683.8 \text{ Вт}$$

Суммарная мощность шумов на входе приемника определяется по формуле (2.7):  $P_{\text{ш}} = (1.38 \cdot 10^{-23}) \cdot 2650 \cdot (36 \cdot 10^6) = 1.31 \cdot 10^{-12}$

### 2.3. Построение диаграмм уровней мощности сигнала на участках «вниз» и «вверх».

На рисунках 2.1, 2.2 приведены схемы построения диаграммы уровней по расчетным данным задания.

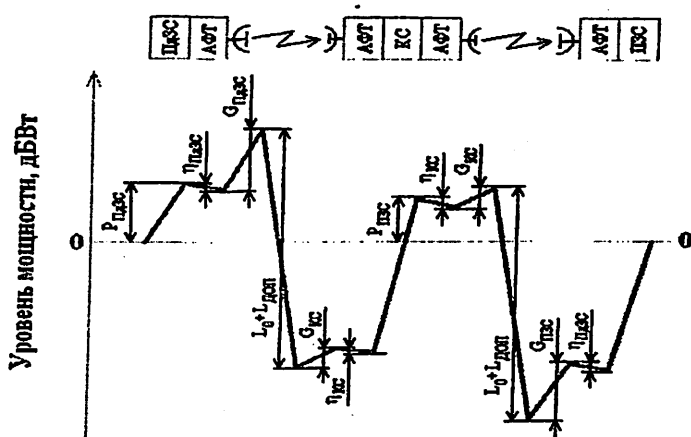


Рис. 1.2. Построение диаграммы уровней на участках «вверх» и «вниз» по схеме устройств спутниковой линии.

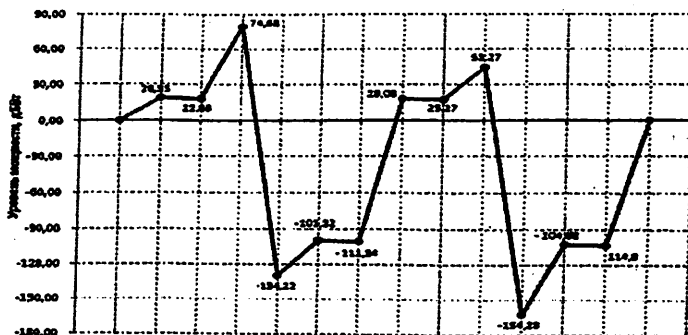


Рис. 2.2. Построение диаграммы уровней на участках «вверх» и «вниз» по произведенным расчетам.

### **Выводы о результатах расчета.**

Задачей энергетического расчёта спутниковой линии связи «вниз» было определение основных энергетических параметров, обеспечивающих требуемое качество передачи сигналов по спутниковой линии связи.

Вывод о степени влияния проектируемой системы на существующую основывается на вычислении приращения шумовой температуры приёмного тракта, подверженного влиянию. Расчет показал, что между системами требуется коррекция, так как степень влияния превышает допустимое значение температуры при отсутствии влияния.

Широкому использованию ИСЗ для целей связи и передачи данных способствуют такие преимущества спутниковой связи, как:

- высокая "связность" - возможность быстро соединять между собой сотни ЗС, удаленных на значительные расстояния;
- гибкость сети по отношению к изменениям ее конфигурации и графика отдельных ЗС;
- независимость в широких пределах затрат на канал от расстояния между абонентами;
- незначительное влияние атмосферы и географических особенностей окружающей местности на устойчивость связи;
- небольшие затраты энергии на поддержание ИСЗ на орбите.



### **Контрольные вопросы.**

1. Расчет общего ослабления энергии радиоволн.
2. Потери в спокойной атмосфере.
3. Потери из-за несогласованности поляризаций антенн.
4. Потери из-за неточности наведения антенн.
5. Расчёт потерь в дожде.
6. Определение обобщенных энергетических параметров ЗС и КС.
7. Требуемое значение добротности ХЗС.
8. Диаметр антенны ХЗС и мощность передатчика.
9. Проверка уровня ППМ КС у поверхности Земли.
10. Построение диаграммы уровней.

## ЛИТЕРАТУРА.

1. А.Н.Арипов, И.М.Арипов. Цифровые радиорелейные системы связи. Т.: «Sharq», 2015, 432 с.
2. М.М. Маковеева. Радиорелейные линии связи. Учебник для ВУЗов. - М.: Радио и связь, 1998г.
3. Данилович О.С. Курс лекций по ЦРРЛ за 1995 г.
4. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
5. Лобач В.С. Цифровые микроволновые системы связи: методические указания к курсовому проектированию (спец. 201000, 201000) / – СПбГУТ,1993.
6. Спутниковая связь и вещание: Справочник. – 3-е изд., с.74 перераб. и доп. В.А. Бартенев и др; Под ред. Л.Я. Кантора. -М.: Радио и связь, 2007.
7. Спутниковая связь и вещание. Справочник. / Под ред. Кантора Л.Я.: Москва 1997г.
8. Маковеева М.М., Сорокин А.С. Проектирование систем спутниковой связи и спутникового вещания. Учебное пособие. МИС 1991г.
9. Р.Р. Ибраимов. Мобильные и спутниковые системы связи. Ташкент, 2009.
10. Сомов А.М., Корнев С.Ф. Спутниковые системы связи. Учебное пособие для вузов. Под ред. А.М. Сомова. М.,2014 г. 244 стр.
11. И.Ю. Сухорукова, С.С. Тарасов. Проектирование цифровых систем спутниковой связи. Учебное пособие, МТУСИ, 2012.
12. Рекомендации ITU-R S.614-3, P.618-5, P.838, PN.837-1
13. Мордухович Л.Г., Степанов А.П. Системы радиосвязи. Курсовое проектирование. Учебное пособие для вузов. М.: Радио и связь. 1987г.

**Методическое указание  
для практических работ  
по дисциплине**

**РАДИОРЕЛЕЙНАЯ И СПУТНИКОВАЯ СВЯЗЬ**

Для магистрантов по направлению  
70611701 - Системы мобильной связи

Рассмотрено на заседании кафедры «ТМС»  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 года (протокол № \_\_\_\_\_)

Рассмотрено на заседании факультета «РиМС»  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 года (протокол № \_\_\_\_\_)

Рассмотрено и одобрено на  
научно-методическом совете ТУИТ  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 года (протокол № \_\_\_\_\_)

Составители: Пулатов Ш.У.  
Ибраимов Р.Р.  
Писецкий Ю.В.  
Гафуров А.Ш.

Ответственный редактор: Пулатов Ш.У.

Формат 60x84 1/16. Печ. лист 2,25.  
Заказ № 15. Тираж 20.  
Отпечатано в «Редакционно издательском»  
отделе при ТУИТ.  
Ташкент ул. Амир Темур, 108.