

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«СЕТИ И СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ»**

Бишкек 2016

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЕСТЕСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра «Сети связи и системы коммуникаций»

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«СЕТИ И СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ»**

Бишкек 2016

УДК 621.396.4
У 91

Рецензенты:

И. В. Зимин – канд. техн. наук, заведующий кафедрой
«Телекоммуникаций» КГТУ им. И. Раззакова,
С. М. Токтогонов – канд. физ.-мат. наук, доц., заведующий кафедрой
«Сети связи и системы телекоммуникаций» КРСУ им. Б. Н. Ельцина,
М. О. Оконов – канд. техн. наук, доц. кафедры «Сети связи системы
телекоммуникаций» КРСУ им. Б. Н. Ельцина

Составитель
Н. И. Кравченко

Рекомендованы к изданию кафедрой
«Сети связи и системы коммуникаций»

У 91 Учебно-методические указания к практическим работам по дисциплине «Сети и системы радиосвязи» / сост. Н. И. Кравченко. Бишкек: КРСУ, 2016. 61 с.

В данных учебно-методических указаниях по дисциплине «Сети и системы радиосвязи» рассмотрены вопросы построения и расчеты основных параметров современных сетей и систем радиосвязи. В практических работах исследуются радиорелейные, сотовые и спутниковые сети связи и их характеристики. Затронуты вопросы основ проектирования, моделирования и построения сетей и систем радиосвязи. Результаты расчета подтверждаются построением графиков.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1	
Построение профиля пролета. Расчет минимальнодопустимого множителя ослабления в РРЛ	5
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2	
Исследование и расчет сетей сотовой связи.....	17
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3	
Расчет геометрических параметров ЗО. Построение ЗО в спутниковой проекции	30
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4	
Расчет пропускной способности и составление плана частот ствола при МДЧР-ОКН. Расчет энергетических соотношений. Построение ДУ.....	39
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5	
Расчет сеанса связи и трассы пролета ИСЗ	52
ЛИТЕРАТУРА	60

ВВЕДЕНИЕ

За небольшое время устройства радиосвязи прочно вошли в быт людей, обеспечив получение и передачу информации без привязки к конкретному местонахождению, интегрировались в современные глобальные сети и системы передачи данных.

При моделировании радиорелейных сетей необходимо построение профиля пролета, расчет минимально допустимого множителя ослабления. При расчете сотовых сетей радиосвязи определяется выбор конфигурации сети, распределения частот между базовыми станциями и др.

Наряду с расчетами наземных сетей связи широко рассмотрены вопросы расчета сетей спутниковой связи (ССС), так как при больших расстояниях между населенными пунктами качество наземных станций оставляет желать лучшего. На сегодняшний день существует большое количество СССР, основанных на различных спутниковых системах, различных принципах и предназначенных для различных применений.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

Построение профиля пролета. Расчет минимально допустимого множителя ослабления в радиорелейных линиях связи (РРЛ)

Цель работы.

Получить навыки расчета по проектированию радиорелейных линий. Построение профиля пролета и расчета минимально допустимого множителя ослабления в РРЛ.

Теоретические сведения.

Основной задачей, которую приходится решать при моделировании РРЛ связи, является такой выбор мест установки радиорелейных станций, который обеспечивает высокий и стабильный уровень высокочастотных сигналов на входах приемников всех станций. При этом надежность и качество связи моделируемой РРЛ полностью должны удовлетворять заданным нормам на её качественные показатели.

Первым этапом процесса проектирования является выбор оптимальной трассы, числа и места расположения промежуточных станций.

Трассой называется расположение РРЛ связи на местности или карте.

Выбор трассы – определение места расположения узловых и промежуточных станций, следовательно, определение числа интервалов линии и их протяженности при заданных оконечных пунктах РРЛ.

Процесс моделирования трасс РРЛ связи осуществляется примерно в такой последовательности. Сначала производится предварительный выбор по картам мест установки радиорелейных станций и построение профилей каждого интервала линии.

Профилем интервала называется вертикальный разрез местности с указанием на нем гор, леса, высотных строений и т. д.

Далее производятся расчеты:

- множителя ослабления поля на каждом интервале линии;
- уровня сигналов;
- определяются оптимальные высоты подвеса антенных опор;
- рассчитываются надежность и устойчивость связи.

Выбор оптимальной трассы и мест расположения станций РРЛ.

При выборе оптимальной трассы расположение на местности всех станций РРЛ должно выбираться, исходя из технико-экономических соображений, удобства эксплуатации будущей РРЛ и возможности обеспечения необходимой устойчивости связи на всех интервалах линии, пролегающих в разных климатических районах. Для выполнения этих требований

необходимо, чтобы станции РРЛ располагались в пунктах, удобных для их эксплуатации. Хорошие подъездные дороги, близко расположенные линии электропередачи для питания электроэнергией аппаратуры станций; расположение станции недалеко от населенных пунктов, что позволит легко обеспечить радио и телевизионным вещанием отдельные населенные пункты, через которые проходит трасса РРЛ.

Радиорелейные трассы должны располагаться зигзагообразно (т. е. трасса должна иметь вид ломаной кривой) с тем, чтобы исключить возможность приема сигналов приемниками станций, расположенными через три интервала.

Площадки для строительства радиорелейных станций желательно выбирать, если это возможно, на возвышенностях. При этом антенные опоры (мачты или башни) будут невысокими, что экономически выгодно. Выбор мест расположения площадок под радиорелейные станции должен быть таким, чтобы отсутствовали неблагоприятные условия распространения радиоволн, а это значит, чтобы трасса РРЛ проходила по возможности по наиболее пересеченной местности с лесными массивами, от которых отраженные лучи хорошо рассеиваются. При выборе трасс следует избегать болотистых местностей, больших водных пространств, а также естественных и искусственных препятствий (горные вершины, высокие строения). Кроме того, для уменьшения влияния отраженных лучей желательно на участках РРЛ выбирать антенные опоры разной высоты, причем этот выбор должен производиться так, чтобы точки отражения от равнинных участков земли располагались ближе к станциям с низкими антенными опорами.

Выбранные таким образом точки установки радиорелейных станций соединяют прямыми линиями, определяющими на карте трассу будущей линии связи.

Высоты точек местности, на которых располагаются антенные опоры, можно принять равными высоте ближайшей горизонтали. Средними высотами местных предметов задайтесь произвольно, ориентируясь на следующие величины:

- строений в сельской местности – 6–8 м,
- строений в поселках городского типа – 10–20 м,
- строений в городе – 20–30 м,
- леса на низких местах – 10–15 м.

Ориентировочный выбор высот подвеса антенн.

После вычерчивания профилей интервалов (по данным задания или по данным, полученным с карты местности) необходимо определить ори-

ентировочные значения высот подвеса антенн. При этом нужно руководствоваться величиной просвета между линией прямой видимости и профилем трассы.

Ориентировочное значение просвета для коротко-пролетных микроволновых систем связи должно быть численно равно радиусу первой зоны Френеля, который определяется по формуле

$$R_{1\phi} = 17.3 \sqrt{\frac{R_0 k(1-k)}{f}}, \quad (1.1)$$

где R_0 – протяженность пролета, км,

f – рабочая частота, ГГц,

$k = \frac{R_1}{R_0}$ – относительная координата наивысшей точки на трассе.

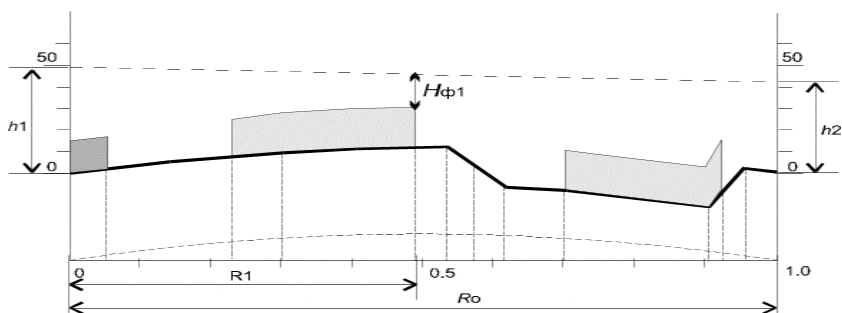


Рис. 1.1. Выбор высот подвеса антенн

Отложите на профилях величины $R_{1\phi}$, как показано на рис. 1.1, проведите линии прямой видимости и определите ориентировочные значения высот подвеса антенн h_1 и h_2 .

Основная сложность расчетов РРЛ определяется тем, что траектория распространения электромагнитной волны непрямолинейна, случайна и зависит от состояния атмосферы, от величины градиента диэлектрической проницаемости атмосферы (g). Это явление называется *атмосферной рефракцией*.

Выбор высот подвеса антенн (h) определяется высотой просвета при нулевой рефракции $H(0)$, которая откладывается вертикально вверх от самой высокой точки профиля (вершины препятствия) и зависит от радиуса минимальной зоны Френеля H_0 . Через эту точку проводят линию, соединяющую центры антенн на станциях, ограничивающих пролёт.

Замирания сигнала на пролете РРЛ и их влияние на качество связи

Из-за замирания (ослабления) сигнала имеются непрерывные колебания на входе ПРМ. Эти колебания вызывают колебания мощности сигнала на выходе ПРД. Глубокие замирания снижают качество связи и могут привести к ее срыву.

Допустимое качество связи РРЛ определяется минимально допустимым отношением мощности сигнала к мощности шума на выходе канала.

Рассмотрим структурную схему приемной части оконечного ретранслятора РРЛ, содержащего телефонный ствол (ТФ) с частотой f_1 и телевизионный ствол (ТВ) с частотой f_2 (рис. 1.2).

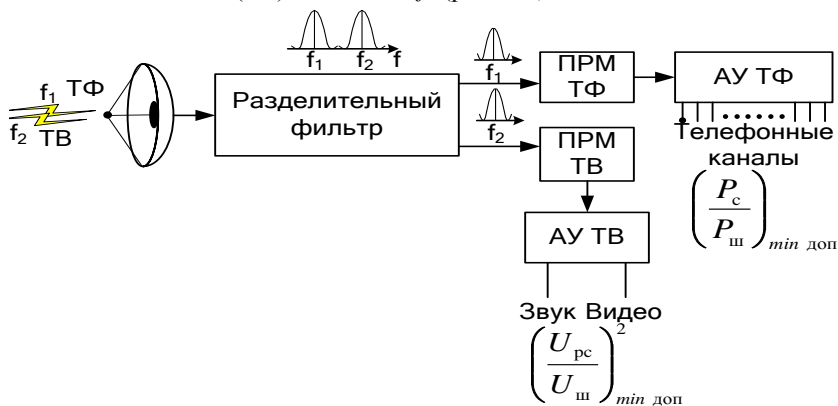


Рис. 1.2. Оконечный ретранслятор

ПРМ ТФ, ПРМ ТВ – приемники телефонного и телевизионного стволов;

АУ ТФ, АУ ТВ – аппаратура уплотнения (разуплотнения) телефонного и телевизионного стволов;

U_{pc} – напряжение размаха сигнала; $U_{ш}$ – напряжение теплового шума.

На выходе телефонного и телевизионного стволов соотношение сигнал-шум должно быть не меньше определенного уровня.

В соответствии с нормами ЕАСС (Единая автоматизированная система связи), для РРЛ длиной 2500 км, качество связи будет нормальным в течение 99,9 % времени, если выполняется условие:

$$\text{Для ТФ ствола, } 10 \lg \left(\frac{P_{\text{pc}}}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{min доп}}^2 \geq 44 \text{ дБ}$$

$$\text{Для ТВ ствола } 10 \lg \left(\frac{U_{\text{pc}}}{U_{\text{ш}}} \right)_{\text{min доп}}^2 \geq 49 \text{ дБ}$$

Минимально допустимый множитель ослабления в РРЛ.

Устойчивость связи на радиолиниях в значительной степени определяется замираниями сигнала на трассе. Их оценка производится при помощи множителя ослабления V , который показывает, во сколько раз реальная напряженность поля в месте приема отличается от напряженности поля в свободном пространстве $E_{\text{св}}$

$$V = \frac{E_{\text{реал}}}{E_{\text{св}}} - \text{дополнительное ослабление сигнала}$$

При глубоких замираниях мощность сигнала на входе ПРМ оценивается как:

$$P_{\text{с вх}} < P_{\text{с min доп}},$$

А минимально допустимый множитель поля V :

$$V < V_{\text{min доп}},$$

Критерий устойчивой связи на РРЛ.

Связь на РРЛ считается устойчивой, если выполняется условие:

$$T_{\Sigma}(V_{\text{min}}) \leq T_{\text{доп}},$$

где V_{min} – допустимый множитель ослабления сигнала на трассе РРЛ;

$T_{\Sigma}(V_{\text{min}})$ – суммарный расчетный процент времени ухудшения качества связи на трассе РРЛ из-за глубоких замираний;

$T_{\text{доп}} = 0,1 \%$ – это допустимый процент времени ухудшения качества связи для любого месяца года.

Причина замираний сигнала на пролете РРЛ и расчет времени с ухудшенным качеством связи $T(V_{\text{min}})$

При распространении сигнала от ПРД к ПРМ со скоростью света (300 тыс. км/сек), возможны отражения от местных предметов, т. е. от земли и зданий.

Отраженный сигнал запаздывает, поэтому он может прийти в точку приема в противофазе с основным сигналом и ослабить его. Чтобы сигнал

не ослаблялся из-за местных предметов надо достаточно высоко поднять антенны.

Рассмотрим профиль пролета с минимально допустимой зоной Френеля (рис. 1.3).

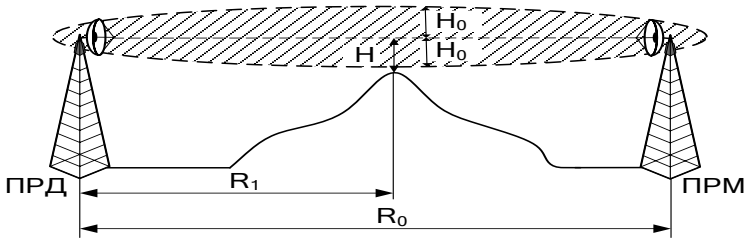


Рис. 1.3. Профиль пролета РРЛ с минимальной зоной Френеля:
 R_0 – пролет РРЛ; H – просвет; H_0 – минимальная (первая) зона Френеля.

Минимальную зону Френеля можно определить по формуле:

$$H_0 = \sqrt{\frac{1}{3} R_0 \lambda K (1 - K)}, \text{ где } K = \frac{R_1}{R_0} \quad (1.2)$$

Просвет H должен быть больше радиуса минимальной зоны Френеля. Если $H > H_0$, то будет напряженность поля свободного пространства $E_{св}$, т. к. отражений от местных предметов не возникнет и соответственно не будет ослабления принятого сигнала.

Если же $H < H_0$, то возникают отражения от Земли, и сигнал, отраженный от земной поверхности, может прийти в противофазе с сигналом, идущим по прямой линии. При складывании этих двух сигналов происходит ослабление результирующего принятого сигнала. Также замирания сигнала происходят во время дождя. Так как сигнал может отражаться от капель дождя или от облаков. И эти сигналы могут прийти в противофазе и также ослабить принятый сигнал.

Замирания могут происходить из-за разной диэлектрической проницаемости среды, в которой проходит сигнал.

Расчетная часть.

1. Профиль пролета для РРЛ.

1.1. Построим профиль пролета для РРЛ, для чего рассчитаем и построим линию условного нулевого уровня, высоту текущей точки которой

находят по формуле: $y = \frac{R_0^2}{2a} k_i (1 - k_i)$; где $k_i = \frac{R_i}{R_0}$ – относительная координата текущей точки на оси абсцисс;

R_0 – длина интервала;

R_i – расстояние до текущей точки;

$a = 6370$ км – геометрический радиус Земли.

Результаты расчета профиля интервала с учетом условного нулевого уровня занесём в таблицу 1.1 и построим профиль пролета РРЛ, как на рис. 1.4.

Таблица 1.1

Расчет профиля пролета РРЛ

	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
h_i , м											
y_i , м											
$y_i + h_i$, м											

1.2. Высота подвеса антенн для РРЛ

Выбор высот подвеса антенн (h) определяется высотой просвета при нулевой рефракции $H(0)$, которая откладывается вертикально вверх от самой высокой точки профиля (вершины препятствия). Через эту точку проводим линию, соединяющую центры антенн на станциях, ограничивающих пролет.

В лабораторной работе предусмотрен расчет пролетов первого типа. На пролетах 1 типа местность пересеченная (нет зеркального отражения от Земли).

$$\text{Величина } H(0) \text{ вычисляется: } H(0) = H_0 + d - \Delta H(g + \sigma), \quad (1.3)$$

где H_0 – радиус минимальной зоны Френеля:

$$H_0 = \sqrt{\frac{1}{3} (R_0 \lambda k (1 - k))} \text{ (м)}$$

$\Delta H(g + \sigma) = -\left(\frac{R_0^2}{4}\right) (g + \sigma) k (1 - k)$ (м) – изменение просвета на пролете за счет атмосферной рефракции;

$k = k_i$ для наивысшей точки пролета;

d – средняя ошибка топографической карты (для данной работы принять $d = 9$ м); λ – средняя длина волны (м).

Аналитически найдем высоты подвес антенн (см. рис. 1.4).

Проведем через крайние точки профиля полета линию AB . Высоты подвеса антенн должны быть примерно одинаковыми. Построим линию CD , которая будет $CD \parallel AB$ и через точку E . Полученный четырехугольник $ABCD$ параллелограмм, из этого следует $AB=CD$, $AC=BD=EN$.

Проведем через т. B линию AB параллельно горизонтали и найдем tg угла β .

$$\tan\beta = (AA') / (A'B)$$

$$NM = MB \tan\beta \text{ (м)},$$

Координаты точки E определяются высотой просвета при нулевой рефракции $H(0)$, которая откладывается вертикально вверх от самой высокой точки профиля:

$$т. E = (y_{0.3} + h_{0.3}) + H(0) \text{ (м)}.$$

Найдем высоту подвеса антенн $AC=BD=EN$;

$EN = OE - OM - NM$ (м). Таким образом, находим высоту левой и правой антенн.

2. Расчет минимально допустимых множителей ослабления рабочих стволов и запаса на замирание РРЛ.

2.1. Расчет для телефонного ствола

Для ТФ-ствола АРРЛ минимально допустимый множитель ослабления определяют по формуле:

$$20 \lg V_{\min}^{\text{ТФ}} = 10 \lg P_{\text{п}} / P_{\text{тш}} + L_0 - G_{\Sigma} - K_{\text{ТФ}} P, \quad (1.4)$$

где $10 \lg P_{\text{п}} / P_{\text{тш}} = 44$ дБ – мощность шумов;

$P_{\text{п}} = 1 \text{ мВт} = 10^9 \text{ пВт}$ – полезная мощность на выходе каждого ТФ-канала;

$P_{\text{тш}} = 40000 \text{ пВт}$ – максимальная допустимая мощность тепловых шумов;

$K_{\text{ТФ}}$ – коэффициент системы для ТФ-ствола (140,3 дБ);

L_0 – основные потери передачи в открытом пространстве;

$G_{\Sigma} = G_1 + G_2$ – суммарный коэффициент усиления антенн,

$$(44,8 + 44,8 = 89,6 \text{ дБ});$$

$b_{\Sigma} = b_1 + b_2$ – потери в антенно-волноводном тракте на полете (6,23 + 6,23 = 12,46 дБ).

Основные потери передачи в открытом пространстве рассчитывают по формуле:

$$L_0 = 20 \lg \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R_0}{\lambda} \right), \text{ (дБ)} \quad (1.5)$$

2.2 Расчет для телевизионного ствола

Для ТВ-ствола АРРЛ минимально допустимый множитель ослабления определяют по формуле:

$$20 \lg V_{\min}^{\text{ТВ}} = 20 \lg \frac{U_{\text{рс}}}{U_{\text{ш}}} + L_0 + b_{\Sigma} - G_{\Sigma} - K_{\text{ТВ}}$$
$$20 \lg \frac{U_{\text{рс}}}{U_{\text{ш}}} = 49 \text{ дБ}$$

$U_{\text{рс}}$ – размах яркостного сигнала; $U_{\text{ш}}$ – шумовое напряжение;
 $K_{\text{ТВ}}$ – коэффициент системы для ТВ-ствола (158,7 дБ).

Для ствола ЦРРЛ запас на замирание при $k_{\text{ош}} = 10^{-3}$ определяют по формуле:

$M = P_{\text{прм}} - P_{\text{с пор}}$; где $P_{\text{с пор}}$ – пороговая мощность сигнала, при которой соблюдается вероятность ошибки $P_{\text{ош}} < 10^{-3}$ (120 дБВт)

$P_{\text{прм}}$ – мощность сигнала на входе приемника при отсутствии замирания, рассчитывают по формуле: $P_{\text{прм}} = P_{\text{пд}} + G_{\Sigma} - L_0 - b_{\Sigma} - L_{\text{доп}}$;

где $P_{\text{пд}}$ – мощность передатчика (–4,5 дБВ); $L_{\text{доп}}$ – дополнительные потери, складываются из потерь в антенных обтекателях и потерь от перепада высот приемной и передающей антенны (1 дБ).

$$P \text{ [дБм]} = 10 \lg (P \text{ [мВт]} / P \text{ [мВт]}) = 10^{0,1 P \text{ [дБм]}}$$

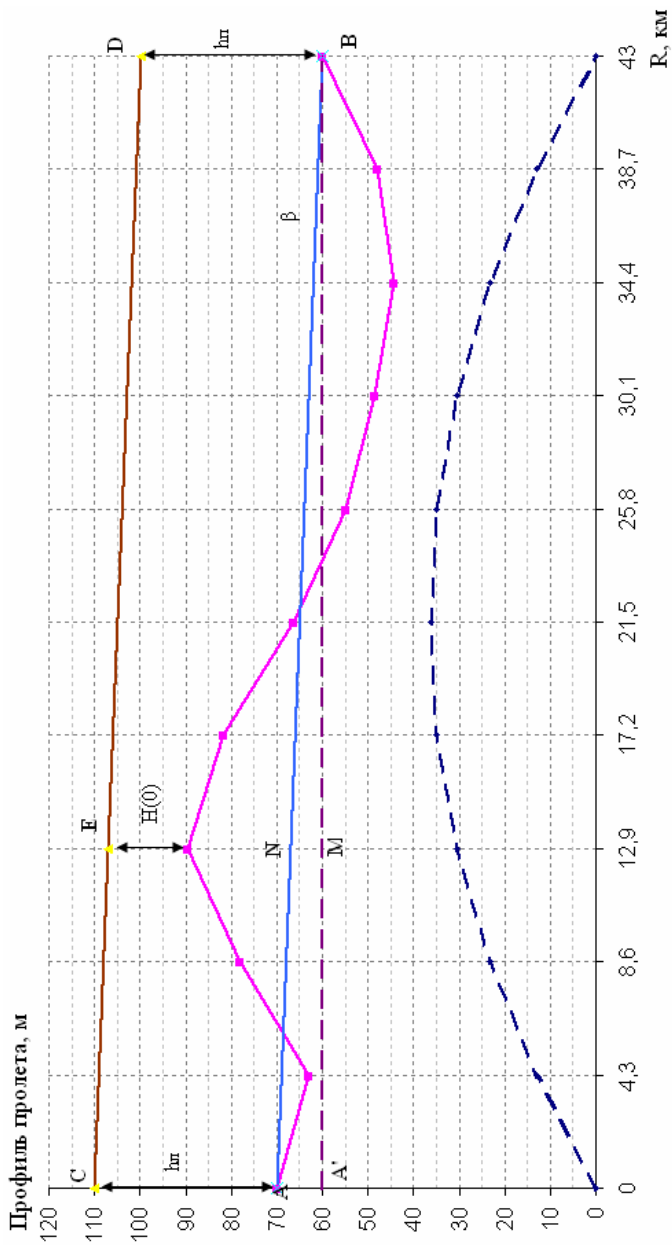


Рис. 1.4. Расчет запаса на замирания для ЦРРЛ

Таблица 1.2

Среднее значение градиента g и стандартное отклонение σ

№ варианта	Среднее значение градиента $g = 10^{-8}$, 1 л/м	Стандартное отклонение $\sigma = 10^{-8}$, 1 л/м
1, 11	-6	6,5
2, 12	-7	9,5
3, 13	-8	7
4, 14	-9	8
5, 15	-10	9
6, 16	-6,5	8,5
7, 17	-7,6	7,5
8, 18	-8,4	7,8
9, 19	-8,8	8,7
10, 20	-9,5	6,7

Длина волны $\lambda = c / f$

Контрольные вопросы.

1. Что называется трассой расположения РРЛ.
2. Дать определение профиль интервала.
3. Алгоритм расчета профиля пролета.
4. Критерии при выборе оптимальной трассы.
5. Назовите явления атмосферной рефракции.
6. Расскажите работу схемы оконечного ретранслятора

Приложение

Таблица 1.3

Данные профилей интервалов – высотные отметки профилей

№ варианта	Высотные отметки, в м для относительных координат k											Длина интервала, км
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
1	50	40	35	45	50	55	60	40	35	50	55	38,1
2	70	65	35	40	70	65	50	30	40	50	50	36,4
3	115	110	90	120	110	105	100	90	70	90	100	31,6
4	225	215	210	195	160	180	225	210	200	205	215	33,5
5	165	160	120	140	145	155	160	170	160	140	170	37,1
6	80	75	35	55	75	75	80	75	60	60	75	35,2
7	90	90	80	95	85	60	45	70	80	60	95	32,9
8	335	325	300	320	340	335	320	270	320	250	325	24,1
9	340	300	330	345	340	335	300	290	270	300	320	22,2
10	460	400	450	470	475	400	380	360	330	380	400	20,2
11	85	90	60	70	90	95	90	50	80	90	90	24,1
12	80	70	40	80	85	90	85	70	65	40	60	38,1
13	450	420	400	430	380	420	460	470	440	450	460	36,4
14	430	420	300	350	390	450	460	470	430	330	450	31,6
15	445	300	360	420	360	430	465	440	340	400	450	33,5
16	460	450	330	400	340	400	465	450	430	425	450	37,1
17	470	400	460	380	480	475	460	370	446	400	465	35,2
18	485	440	400	470	490	500	550	540	530	430	535	32,9
19	495	485	420	470	480	465	430	360	400	450	460	24,1
20	95	100	85	90	120	130	140	160	150	135	155	22,2

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

Исследование и расчет сетей сотовой связи

Цель работы.

Исследование и расчет сотовых сетей, частотно-территориальное планирование сетей радиосвязи, т. е. выбор структуры (конфигурации) сети, места установки базовых станций, выбор типа, высоты и ориентации антенн, распределение частот между базовыми станциями.

Теоретическая часть.

Для уменьшения капитальных затрат должна осуществляться оптимизация частотно-территориального плана, т. е. необходимо разработать план, обеспечивающий заданную зону обслуживания, емкость сети, требуемое качество обслуживания при минимальном числе базовых станций и используемых частот. Планирование должно обеспечивать внутри-системную и межсистемную электромагнитную совместимость (ЭМС) радиосредств. В первом случае обеспечивается ЭМС между радиостанциями проектируемой сети, во втором – между радиосредствами проектируемой сети и радиосредствами других систем, работающими в общих и смежных полосах частот и являющимися потенциальными источниками помех.

Методы повышения емкости и качества обслуживания системы сотовой связи.

Емкость системы сотовой связи, определяемая числом абонентов, которых она способна обслужить без нарушения параметров качества, является важнейшей характеристикой коммерческой радиосети, поэтому при проектировании и развитии системы сотовой связи в подавляющем большинстве случаев значительная часть усилий направляется именно на достижение наибольшей емкости.

Фактически и сама система сотовой связи, основанная на принципе использования повторяющихся частот, появилась в ответ на потребность общества в построении эффективной системы массового обслуживания при использовании жестко ограниченной полосы частот.

Существует несколько основных способов повышения емкости системы сотовой связи.

Первый – повторное использование частот.

Второй способ представляет собой совершенствование методов обработки сигналов, в частности переход от аналоговой обработки к цифровой. При этом происходит переход к более совершенным методам множественного или, иначе, многостанционного доступа – от FDMA (частотного разделения каналов связи) к TDMA (временному разделению каналов связи), а затем к CDMA (кодovому разделению каналов связи).

Третьим способом является использование секторных антенн для разделения зоны обслуживания внутри соты на три или более сектора и использование в каждом секторе своей полосы частот. Этот способ фактически дает те же результаты, что и простое повторное использование частот.

Четвертый способ заключается в дроблении ячеек, т. е. к переходу к меньшим по размерам ячейкам в районах с более интенсивным трафиком, при сохранении коэффициента повторного использования частот. Число базовых станций при этом увеличивается, однако снижается мощность излучения как базовых, так и мобильных станций. Дробление соты, как правило, выполняется путем создания сот меньшего размера в определенной части ее зоны покрытия. Радиусы меньших сот принимаются равными половине радиуса исходной соты, а их площади, соответственно, становятся меньше в четыре раза.

Большие соты используются в районах с небольшим трафиком, а меньшие – в зонах с более интенсивным трафиком – рис. 2.1.

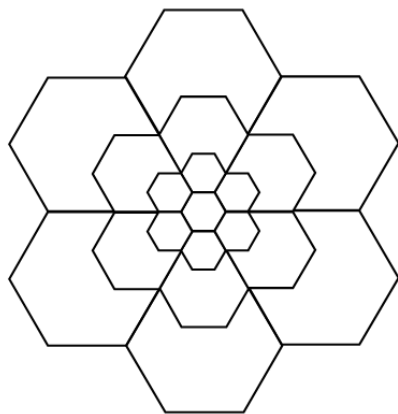


Рис. 2.1. Использование ячеек с меньшим размером в районах с интенсивным трафиком

1. Исходные данные для планирования сети.

Исходные данные для планирования содержат общие характеристики сети связи: число и частоты разрешенных радиоканалов, план сети с указанием АТС общего пользования, электропитанию, возможности размещения оборудования, антенн и др. пунктов размещения БС, отвечающих требованиям по наличию линий связи. В качестве технических основ

для планирования используются характеристики предполагаемых для использования стандартов, приемопередающего оборудования и антенн, условия распространения радиоволн, необходимая напряженность поля полезного сигнала, нагрузка на одного абонента и т. д. Перечень параметров, которые необходимо учитывать при планировании сетей подвижной радиосвязи и абонентского доступа, приведен в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Тип информации	Параметры
Планируемая территория	Площадь зоны покрытия, численность населения для выбранного района/города/области;
Параметры нагрузки	Нагрузка на одного абонента; Плотность абонентов на планируемой территории; Требования к росту нагрузки; Начальная емкость сети.
Оборудование	Краткий перечень технических параметров, используемых при планировании; Стоимость оборудования; Антенно-мачтовые сооружения.
Другие критерии сетевого проекта	Битовая вероятность ошибки; Процент уменьшения зоны покрытия ячейки из-за помех.
Вопросы регламентации	Наличие частотного ресурса и возможные ограничения при получении лицензии на использование радиочастотного ресурса; Возможные ограничения, связанные с размещением и размерами антенно-мачтовых сооружений.
Параметры, связанные с распространением радиоволн	Варианты моделей распространения радиоволн; Запас на временные замирания; Запас на затенение.

Параметры, учитываемые при планировании сетей подвижной связи.

3. Первоначальное построение сети. Выбор кластера.

Чтобы разделить территорию на соты оптимально, то есть без перекрытия или пропусков участков, могут быть использованы различные геометрические фигуры, наиболее близко аппроксимирующие окружность. Примерами таких фигур являются треугольник, квадрат и шестиугольник. Наиболее подходящей фигурой является шестиугольник. Это объясняется тем, что при использовании ненаправленной антенны, расположенной в центре ячейки зона покрытия будет представлять собой окружность, площадь которого наиболее близка к площади шестиугольника.

При частотно-территориальном планировании сетей сотовой связи используется понятие кластера. **Кластером** называется совокупность ближайших ячеек, в которых используются различные частотные каналы. **Размерностью кластера** называется количество ячеек, входящих в его состав. Размерность кластера определяется исходя из следующего соотношения:

$$K = i^2 + ij + j^2 \quad (2.1)$$

где i, j – целые числа.

Расстояние между ячейками, использующими одни и те же группы частот, зависит от частотного диапазона, допустимого уровня помех и количества базовых станций, расположенных вокруг данной ячейки. Использование ячеек, в которых базовые станции имеют ненаправленные антенны, приводит к тому, что сигнал от базовых станций имеет одинаковую мощность во всех направлениях. В этом случае помеха в абонентский терминал будет приходить от шести базовых станций (рис. 2.2).

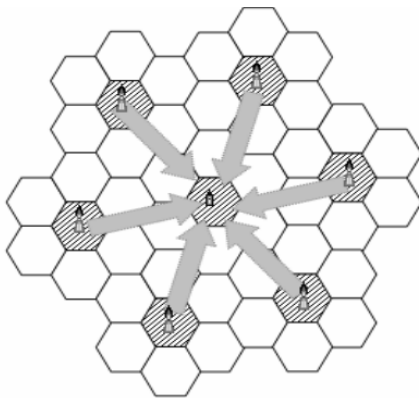


Рис. 2.2. Помехи по основному каналу приема

Снижение уровня помех достигается за счет использования направленных антенн. Так, в кластерах, использующих трех- и шестисекторные антенны, на входе абонентского терминала приходят две и одна помеха соответственно.

Снижение уровня помех достигается за счет использования направленных антенн. Типы кластеров и соответствующее распределение групп частот в них определяют модели повторного использования частот. Если число секторов в ячейке $M = 1$ (антенна ненаправленная) и ширина диаграммы направленности (ДН) по уровню составляет $2\theta_{0,5} = 360^\circ$;

При $M = 3$ ячейка состоит из трех секторов, а ширина ДН антенн в каждом секторе $2\theta_{0,5} = 120^\circ$;

Если $M = 6$ – имеется шесть секторов, при этом ширина ДН каждой антенны $2\theta_{0,5} = 60^\circ$.

Главным критерием при выборе размерности кластера является выполнение требований по допустимому отношению сигнал/помеха (С/И) в точке приема в основном канале.

Для выбора кластера необходимо также задать требования к вероятности события, когда отношение сигнал/помеха в точке приема окажется ниже порогового. Эта величина характеризует устойчивость связи при перемещении подвижного абонента в зоне обслуживания сети. Обычно эту вероятность задают на уровне 0,1...0,15.

Показатель, связывающий значение радиуса ячейки R и расстояние D между ячейками с повторяющимися частотами, называется **относительным расстоянием** повторного использования частотных каналов и определяется по формуле:

$$q = \frac{D}{R} = \sqrt{3K} \quad (2.2)$$

На основе экспериментальных данных установлено, что в большинстве случаев затухание сигнала в системах подвижной связи обратно пропорционально d^2 ,

где d – расстояние от источника помехи.

4. Определение пространственных параметров сети

Под пространственными параметрами сети необходимо понимать:

- число абонентов, обслуживаемых одной БС;
- число базовых станций в проектируемой сети;
- радиус ячейки.

Пространственные параметры сети для выбранного типа кластера и фиксированном числе каналов связи зависят от допустимой телефонной

нагрузки при заданной вероятности отказа в обслуживании (блокирования вызова). Эта величина рассчитывается по формуле Эрланга.

Определение пространственных параметров сети начинается с расчета общего числа частотных каналов n_k , выделяемых для развертывания сети на выбранной территории:

$$n_k = MKn_c, \quad (2.3)$$

где M – число секторов в ячейке;

K – размерность кластера;

n_c – количество радиоканалов на 1 сектор.

Минимальная полоса частот, необходимая для развертывания сети составляет:

$$\Delta F = n_k f_k, \quad (2.4)$$

где f_k – полоса частот, занимаемая одним частотным каналом.

Общее число разговорных каналов в одном секторе равно:

$$N_s = n_a n_c, \quad (2.5)$$

где n_a – число разговорных каналов, приходящихся на одну несущую. Общее число каналов для каждого сектора или зоны обслуживания включает, помимо каналов связи, каналы управления и сигнализации.

Для определения телефонной нагрузки в одном секторе одной ячейки используется одно из следующих выражений:

$$A = N_n \left[1 - \sqrt{1 - \left(P_B \sqrt{\frac{N_n \pi}{2}} \right)^{\frac{1}{N_n}}} \right], \text{ при } P_B \leq \sqrt{\frac{2}{N_n \pi}}, \quad (2.6)$$

$$A = N_n + \sqrt{\frac{\pi}{2}} + 2N_n \ln \left(P_B \sqrt{N_n \frac{\pi}{2}} \right) - \sqrt{\frac{\pi}{2}}, \text{ при } P_B > \sqrt{\frac{2}{N_n \pi}}, \quad (2.7)$$

Количество абонентов, которые могут обслуживаться в одной ячейке

$$N_{аб} = \frac{A}{\beta} M, \quad (2.8)$$

где β – телефонная активность одного абонента в час наибольшей нагрузки (ЧНН). Рассчитанное значение числа абонентов необходимо округлять в большую сторону.

Общее количество базовых станций

$$N_{\text{БС}} = \frac{N_a}{N_{\text{аб}}} \quad (2.9)$$

где N_a – общее число абонентов в проектируемой сети.

Исходя из того, что фигурой обозначающей ячейку, обычно выбирают шестиугольник, радиус зоны покрытия одной базовой станции определяется из соотношения:

$$R_c = \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{S_t}{N_{\text{БС}}}}, \quad (2.10)$$

где S_t – площадь территории, на которой проектируется сеть.

Линии радиосвязи, входящие в состав сотовых подвижных систем электросвязи обычно работают в диапазонах ультравысоких частот и сверхвысоких частот и соответственно в диапазонах дециметровых и сантиметровых волн. Параметры радиоканала, определенные при распространении радиоволн в свободном пространстве не могут быть полностью использованы для расчета радиолиний, так как не учитывают специфику систем подвижной радиосвязи. Поэтому расчет осуществляется с применением моделей предсказания уровня принимаемого радиосигнала. Такими моделями являются метод Окамура, метод Хата, метод Ли и многие другие. Для расчета уровня сигнала на входе приемника будем использовать модель Окамура-Хата, которая рекомендована Международным Союзом Электросвязи (МСЭ-ITU).

Расчет запаса $Z_{\text{БС-АС}}$ и $Z_{\text{АС-БС}}$ определяется следующими дополнительными потерями при распространении радиоволн:

- потери, связанные с проникновением волны в здание L_b ;
- потери в теле абонента W_a , принимаемые 3 дБ;
- поправка, связанная с требуемым процентом покрытия местоположений C_l , определяемая по таблицам в справочниках.

$$\text{Таким образом: } Z = L_b + W_a + C_l \quad (2.11)$$

5. *Составление частотно-территориального плана сети.*

После нахождения основных параметров частотно-территориального плана известна размерность кластера и возможная секторизация ячеек в проектируемой сети. Зная число частотных каналов приходящихся на каждую базовую станцию, формируются группы частот, приходящие

на каждую базовую станцию. При распределении имеющегося частотного ресурса должны быть сведены к минимуму помехи между ячейками, в которых применяются соседние частотные каналы, а также интермодуляционные помехи между частотными каналами, задействованными в одном секторе ячейки.

6. Построение зон покрытия для сетей сотовой связи.

Зоной покрытия называется территория, на которой значение напряженности поля от полезной станции $E_{\text{пол}}$ превышает минимально необходимую для приема сигнала напряженность поля E_{min}

$$E_{\text{пол}} \geq E_{\text{min}} \quad (2.12)$$

Минимально необходимая напряженность поля в месте приема зависит от необходимой мощности полезного сигнала на входе приемника:

$$E_{\text{min}} = 77,2 + 20 \lg(f_{\text{н}}) + P_{\text{min}} + Z, \quad (2.13)$$

где $f_{\text{н}}$ – несущая частота, МГц.

При прогнозировании напряженности поля в соответствии с Рекомендацией ИТУ–Р Р.1546 считается, что высота приемной антенны составляет 10 м. Если высота подвеса антенны не равна 10 м, должна использоваться поправка, которая зависит от окружения приемной антенны. Для абонентской станции, расположенной на высоте 1,5 м поправка составляет –25,3 дБ. Для базовой станции, расположенной на высоте 40 м поправка составляет +6,5 дБ.

Напряженность поля, создаваемая полезной станцией на расстоянии R от передатчика, определяется по формуле:

$$E_{\text{пол}} = P_{\text{изл}} + E(50; 50) + F(\Theta_{\text{tca}}) - 60 - 2,15, \quad (2.14)$$

где $E_{\text{пол}}$ – полезная напряженность поля в дБмкВ/м на расстоянии R от передатчика;

$P_{\text{изл}}$ – мощность излучения базовой станции в дБм;

$E(50; 50)$ – медианное значение полезной напряженности поля в дБмкВ/м для 50 % мест и 50 % времени, определенное по кривым распространения для соответствующего частотного диапазона и эффективной высоты передающей антенны h_1 , на расстоянии R от передатчика,

$F(\Theta_{\text{tca}})$ – поправка по углу просвета местности, учитывающая возможное затенение приемной антенны рельефом местности или зданиями, дБ.

Расчетная часть:

Для разработки частотно-территориального плана (ЧТП) сети сотовой связи необходимо рассчитать сеть:

1. Вычислить нагрузку абонентов;
2. Определить размерность кластера сети;
3. Определить число каналов связи;
4. Определить число частотных каналов;
5. Определить количество необходимых базовых станций;
6. Определить потери и вычислить радиусы сот;
7. Для плотной городской застройки;
8. Для городской застройки;
9. Для пригорода;
10. Составить ЧТП;
11. Вычислить отношения сигнал/шум (SNR S/N), сигнал/помех (SIR S/I).

1. Количество потенциальных абонентов рассчитывается: 80 % от N_n

$$N_{аб} = 0,8 N_n \text{ человек,} \quad (2.15)$$

где N_n – количество населения.

2. Нагрузка абонентов:

$$A = N_{аб} \beta, \text{ Эрланг,} \quad (2.16)$$

где β – активность 1 абонента в ЧНН (час наибольшей нагрузки)
 $\beta = 0,03 \dots 0,1$, Эрланг

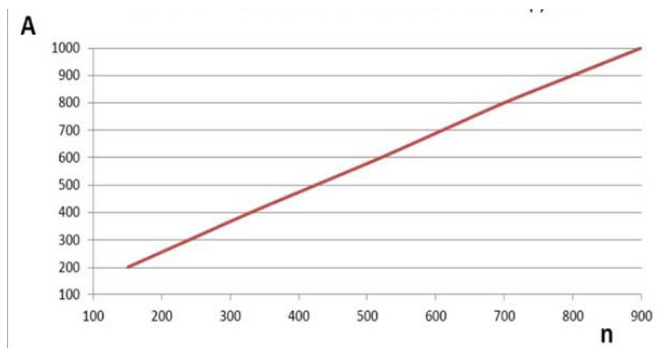


Рис. 2.2. Зависимость количества каналов n от нагрузки A

Эрланг = 1 часо-занятие/час

Примечание: так как график является практически линейным, то вне диапазона n находить через пропорцию.

Число частотных каналов:

$$n_f = n/n_a, \quad (2.17)$$

где n_a – количество абонентов, использующих один частотный канал совместно, $n_a = 8$ (8 абонентов делят 1 частотный канал).

Для секторных сот:

$$n_f = \frac{n}{N M}, \quad (2.18)$$

где $M=3$ количество секторов в соте,

$N=3$ – размерность кластера.

Количество необходимых базовых станций:

$$N_{БС} = \frac{n_f}{n_{fБС}}, \quad (2.19)$$

где $n_{fБС}$ – количество частотных каналов 1 базовой станции ($n_{fБС}=11$).

3. Определение потерь сигнала при распространении по методу Окамура-Хата в диапазоне частот 1500.. 2000 МГц:

Для городской застройки

$$L_{Г} = 46,3 + 33,9 \lg f - 13,82 \lg h_{эф} - a - h_m + (44,9 + 6,55 \lg h_{эф}) \lg d, \text{ дБ} \quad (2.20)$$

где f – средняя частота, МГц

$h_{эф}$ – высота антенны базовой станции, м;

d – расстояние от базовой станции (БС) до мобильной станции (МС), 10 км;

h_m – высота антенны МС над землей, 72 м;

a – поправка на размер города.

Для среднего города:

$$a = (1,1 \lg f - 0,7) h_m - (1,56 \lg f - 0,8) \text{ дБ} \quad (2.21)$$

Для большого города:

$$a = 3,2 [\lg (11,75 h_m)]^2 - 4,97 \quad (2.22)$$

Для плотной городской застройки:

$$L_{ПГ} = L_{Г} + 3 \text{ дБ} \quad (2.23)$$

Для пригорода:

$$L_{ПР} = L_{Г} - 2 \left(\lg \frac{f}{28} \right)^2 - 5,4 \text{ дБ} \quad (2.24)$$

Для сельской местности:

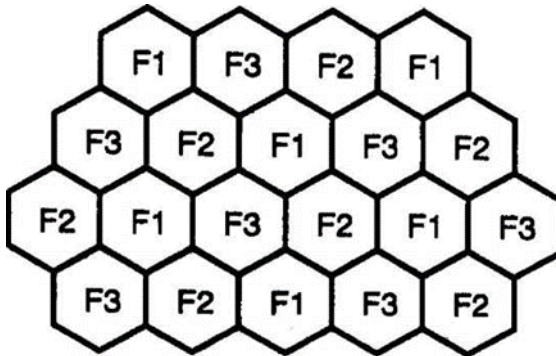
$$L_{СМ} = L_{Г} - 4,78 (\lg f)^2 + 18,33 \lg f - 35,94 \text{ дБ}$$

Для водного пространства:

$$L_{ВП} = L_{Г} - 4,78 (\lg f)^2 + 18,33 \lg f - 40,94 \text{ дБ}$$

4. Составить ЧТП базовых станций.

F1, F2, F3 – частоты



Построение сот для трех частот.

5. Вычислить SIR и SNR:

$$SIR = 10 \lg \left(\frac{R_0^{-4}}{\sum_{i=1}^m R_i^{-4}} \right), \text{ дБ} \quad (2.25)$$

где R_0 – радиус основной ячейки;

R – расстояние от рассматриваемой БС до мешающей БС;

m – количество мешающих станций.

Для ненаправленных антенн в ячейке отношение сигнал/помеха должно быть $SIR > 14,27$ дБ.

Вычислить SNR

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{сигнал}}}{P_{\text{шум}}} \right)$$

Стандарт – GSM-1800; Ширина канала – 200 кГц; Частоты uplink – 1710–1785 МГц;

Частоты downlink – 1805–1880 МГц

Таблица 2.2

Исходные данные

Вариант	N_n , тыс. чел.	$P_{БС}$, Вт	$P_{МС}$, дБВт	$G_{БС}$, дБ	Тип местности
1	10	5	-110	12	Город
2	11	10	-110	13	Сельская местность
3	12	15	-110	14	пригород
4	13	20	-110	15	Город
5	14	25	-110	12	Сельская местность
6	15	30	-110	13	пригород
7	16	35	-110	14	Город
8	17	40	-110	15	Сельская местность
9	18	45	-110	12	пригород
10	19	50	-110	13	Город
11	20	5	-120	14	Сельская местность
12	21	10	-120	15	пригород
13	22	15	-120	12	Город
14	23	20	-120	13	Сельская местность
15	24	25	-120	14	пригород
16	25	30	-120	15	Город
17	26	35	-120	12	Сельская местность
18	27	40	-120	13	пригород
19	28	45	-120	14	Город
20	29	50	-120	15	Сельская местность

Таблица 2.3

Частотный план

№ БС № кластера	№ nf	Частота uplink, МГц	Частота downlink, МГц

Контрольные вопросы.

1. Принцип построения сотовых сетей.
2. Дать определение сотам и кластерам.
3. Как вычислить нагрузку абонентов?
4. Как определяется размер кластера в сети?
5. Как определяется число частотных каналов в сети?
6. Определение количества базовых станций.
7. Как определять потери и вычислять радиус сот?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3

Расчет геометрических параметров зон обслуживания (ЗО). Построение ЗО в спутниковой проекции

Цель работы.

Ознакомиться с сетями спутниковой связи. Научиться производить расчеты геометрических параметров зон обслуживания и построение зон обслуживания в спутниковой проекции.

Теоретические сведения.

3.1. Общие положения о спутниковых сетях связи (ССС).

Спутник Земли является ретранслятором сигналов излучаемых земными станциями (ЗС). В настоящее время искусственные спутники Земли (ИСЗ) вращаются либо по круговым орбитам, либо по эллиптическим орбитам на разной высоте. Круговая экваториальная орбита на высоте $H = 36000$ километров является геостационарной орбитой (ГЕО) (рис. 3.1).

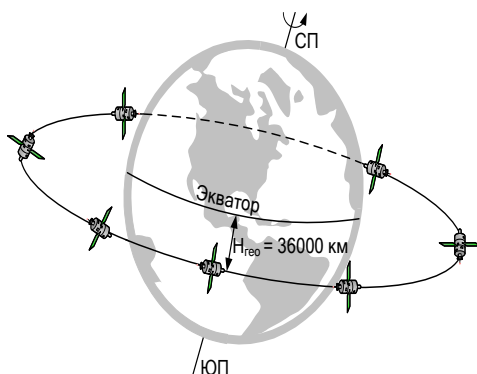


Рис. 3.1. Геостационарная орбита

Если искусственный спутник находится на геостационарной орбите, то угловая скорость этого ИСЗ будет совпадать с угловой скоростью Земли, и с поверхности земли он будет казаться неподвижным. Угол наклона орбиты (φ) по отношению к поверхности экватора называют наклоном. У экваториальных орбит угол $\varphi = 0^\circ$. Если угол $\varphi = 90^\circ$, то в этом случае ИСЗ движется по полярной орбите, остальные орбиты называются наклонными. Эллиптическая орбита характеризуется наклоном (φ), высотой Апогея (Ап) $H_{ап}$ и высотой Перигея (Пер) $H_{пер}$ над поверхностью Земли. Линия, соединяющая высоты Апогея и Перигея называется линией Апсида (рис. 3.2). При пролете поля тяготения Солнца,

Луны, планет и магнитное поле Земли вызывают изменение параметров эллиптической орбиты ИСЗ во времени. Если угол $\varphi = 63,4^\circ$, то эти изменения будут минимальны.

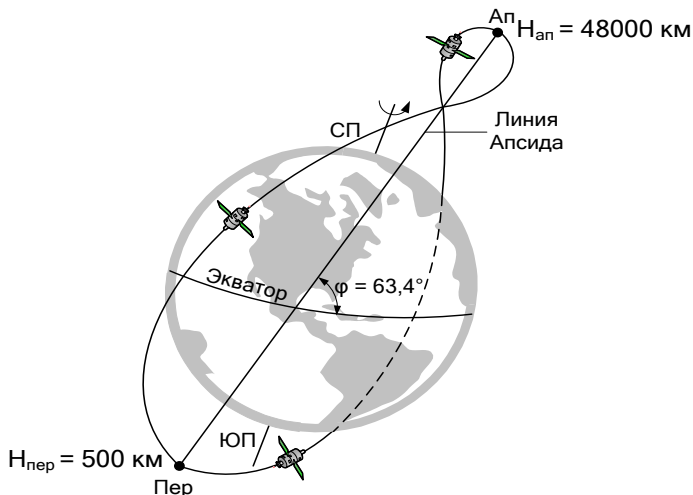


Рис. 3.2. Эллиптическая орбита типа «Молния»

Высокоэллиптическая орбита типа «Молния» была у Советского ИСЗ «Молния» со следующими параметрами: высота Перигея $H_{пер} = 500$ км, высота Апогея $H_{ап} = 48000$ км, и угол $\varphi = 63,4^\circ$. Апогей орбиты находится над северным полушарием. Период обращения спутника равен 12 часов. За сутки ИСЗ совершает два оборота. Поэтому каждые сутки ИСЗ виден в одно и тоже время, в одних и тех же районах Земли. Сеанс связи продолжается 8 часов, когда ИСЗ хорошо виден со всей территории России. Три ИСЗ на такой эллиптической орбите поддерживают связь круглосуточно.

На ЗС антенны непрерывно следят за ИСЗ. Но если ИСЗ находится на геостационарной орбите, то антенны ЗС неподвижны и направлены в одну точку, где находится ИСЗ над экватором. Точность поддержания ИСЗ на орбите раньше была $\pm 1^\circ$. При этом на геостационарной орбите можно было разместить 180 спутников. В настоящее время точность поддержания ИСЗ на орбите равна $\pm 0,5^\circ$, что позволяет разместить на геостационарной орбите 360 спутников. В новых разработках ИСЗ, указанная точность будет повышаться. Территория, с которой виден ИСЗ при минимальных углах места, называется зоной видимости (рис. 3.3).

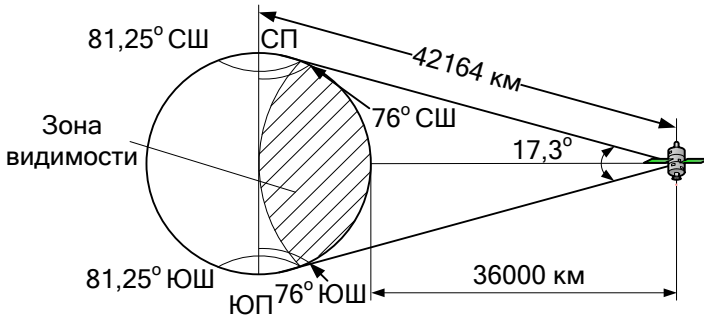


Рис. 3.3. Зона видимости ИСЗ

Таким образом, три спутника, размещенные на геостационарной орбите, под углом 120° , обеспечат полный охват земной поверхности, за исключением небольших областей в районе Северного и Южного полюсов. Горизонтальный охват обеспечивается между $81,25^\circ$ северной и южной широт, т. е. приблизительно 98 % земной поверхности. Максимальный от горизонта до горизонта обзор земной поверхности с одного спутника (тангенциальный охват) будет составлять 18101 км.

Если угол места $\alpha < 5^\circ$, то резко увеличивается влияние шумового излучения Земли, особенно на частоте до 6 ГГц (рис. 3.4). На частотах более 10 ГГц угол места α необходимо поднять до 10° , т. к. при увеличении шумовой температуры, уменьшается чувствительность приемника ЗС и качество приема.

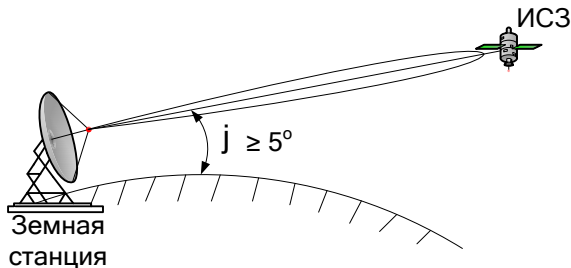


Рис. 3.4. Угол места антенны земной станции

Также при малых углах места возникает ослабление сигнала в атмосферной влаге. Если на ИСЗ установлена антенна с шириной диаграммы направленности $\varphi = 17,3^\circ$, то в зоне видимости оказывается $1/3$ поверхности Земли, т. е. все ЗС расположенные в зоне видимости могут поддерживать связь между собой через этот ИСЗ. Если на ИСЗ установлена антенна с диаграммой направленности $\varphi < 17,3^\circ$, то освещается только часть зоны видимости (рис. 3.5). Эта зона называется зоной покрытия (рис. 3.3). Если $\varphi = 17,3^\circ$, тогда зона видимости совпадает с зоной покрытия. При узконаправленных антеннах, размещенных на ИСЗ, устанавливается связь только между теми ЗС, которые находятся в зоне покрытия. Иначе ИСЗ называют спутниковым ретранслятором (СР) или космической станцией (КС), или космическим аппаратом (КА). Если у КС зона видимости совпадает с зоной покрытия, то это глобальная антенна с глобальной зоной покрытия. Глобальные антенны применяют для международных ССС. Для решения разных задач на современных многофункциональных ИСЗ устанавливают глобальные и узконаправленные антенны. Узконаправленные антенны могут иметь несколько десятков узких лучей, они направлены в определенные участки Земли. Эти антенны называют многолучевыми антеннами (МЛА). Переключение узконаправленных лучей в различные точки Земли осуществляется электронным путем. Если зоны покрытия МЛА не перекрываются, то передачу во всех лучах можно вести на одной и той же частоте. Часть зоны покрытия, на которой установлена ЗС, называется зоной обслуживания.

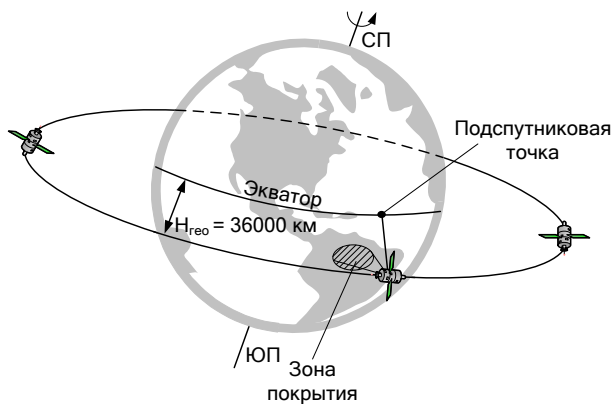


Рис. 3.5. Зона покрытия ИСЗ

Расчет зоны обслуживания

Перед расчетом ЗО следует определить координаты (широту и долготу) крайних ее точек. Это делается с помощью обычной географической карты.

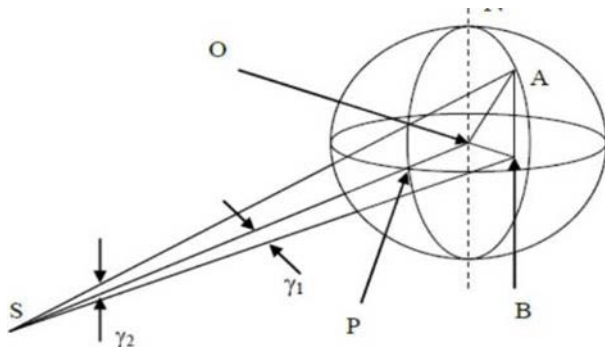


Рис. 3.6. К расчету ЗО

Как минимум, определяются (или задаются в исходных данных) четыре точки: самая северная (точка 1), самая южная (точка 2), самая западная (точка 3) и восточная (точка 4). Эти точки должны попасть в луч антенны КС. В ортогональной плоскости имеет в простейшем случае сечение этого луча форму эллипса, однако на сферической поверхности Земли контуры луча будут искажены. При расчетах зон обслуживания часто пользуются сферической системой координат с началом в точке размещения спутника (S), показанной на рисунке 3.6. В этой системе координат положение любой точки на поверхности Земли полностью определяется значением двух углов: углом γ_1 – в плоскости экватора и углом γ_2 – в плоскости, перпендикулярной к плоскости экватора.

Положение ЗС (точка А на рис. 3.6.) определяется ее долготой $\lambda_{зс}$ и широтой $\varphi_{зс}$, а положение подспутниковой точки (точка Р на рис. 3.6) долготой $\gamma_{сп}$ и широтой $\varphi_{сп}$. Для ИСЗ, расположенного на геостационарной орбите $\varphi_{сп} = 0$.

На рис. 3.6 также показаны центр Земли (точка О), северный полюс (точка N) и проекция точки А на плоскость экватора (точка В). Для определения параметров луча КС (ширины ДН антенны) географические координаты крайних точек ЗО (точки 1, 2, 3, 4) следует пересчитать в углы γ_1 и γ_2 сферической системы координат (угловой спутниковой проекции) по формулам:

$$\gamma_1 = \arcsin [(R \cos \varphi_{3c} \sin \Delta \lambda) / 1] \text{ град.} \quad (3.1)$$

$$\gamma_2 = \arctg [(R \sin \varphi_{3c}) / 1] \text{ град.} \quad (3.2)$$

где $l = \sqrt{r^2 + R^2 \cdot \cos^2 \varphi_{3c} - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos \varphi_{3c} \cdot \cos \Delta \lambda}$, км расстояние от точки расположения спутника S до точки В (линия SB на рис. 3.6); $\Delta \lambda = \lambda_{3c} - \lambda_{сп.}$, град. – разность долгот ЗС и КС; φ_{3c} , град. – широта ЗС; $R = 6378$ км – радиус Земли; $r = 35786$ км – радиус геостационарной орбиты (ГО).

Далее точки 1...4 наносят на проекцию с координатами γ_1 и γ_2 (см. рис. 3.7). Вокруг этих точек описывают эллипс возможно меньшего размера. Можно считать, что этот эллипс является границей ЗО зон видимости спутника, а его оси Q_a и Q_b выраженные в градусах, численно равны ширине ДН антенны КС по уровню половинной мощности в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Q_a и Q_b определяются графически из рис. 3.7 и соответствуют ДН антенны (Q_a и Q_b), необходимой для охвата заданной ЗО.

Коэффициент усиления передающей антенны КС рассчитывается по формуле:

$$g_{нд.кc} = 45 - 10 \cdot \log \theta_a - 10 \cdot \log \theta_b \text{ дБ,} \quad (3.3)$$

где θ_a и θ_b подставляются в градусах.

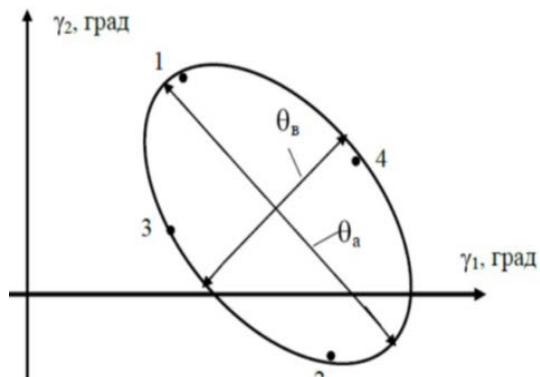


Рис. 3.7. К определению ДН антенны КС

Расчет геометрических соотношений

В пределах ЗО размещают указанное в исходных данных количество ЗС.

Далее для каждой ЗС рассчитываются:

– наклонная дальность (линия SA) – расстояние между точкой расположения ЗС (точка A) и точкой расположения спутника (точка S)

$$d = \sqrt{(l_2 + R_2 \sin^2 \varphi_{3c})} = \sqrt{(r_2 + R_2 - 2 R r \cos \varphi_{3c} \cos \Delta \lambda)}, \quad \text{км} \quad (3.4)$$

Угол места (угол β) – угол между касательной к земной поверхности и направлением на спутник (линия SA)

$$B = \arctg [(\cos \delta - 0,15) / \sin \delta], \quad \text{град.} \quad (3.5)$$

где δ центральный угол – угол, образованный лучами, проведенными из центр Земли, между направлением на ЗС (линия OA) и направлением на подспутниковую точку (линия OP).

$$\delta = \arccos (\cos \varphi_{3c} \cdot \cos \Delta \lambda), \quad \text{град.} \quad (3.6)$$

– *азимут* – угол, отсчитываемый в горизонтальной плоскости по часовой стрелке между направлением на Северный полюс и проекцией направления на КС, опущенную на плоскость, касательную к поверхности Земли.

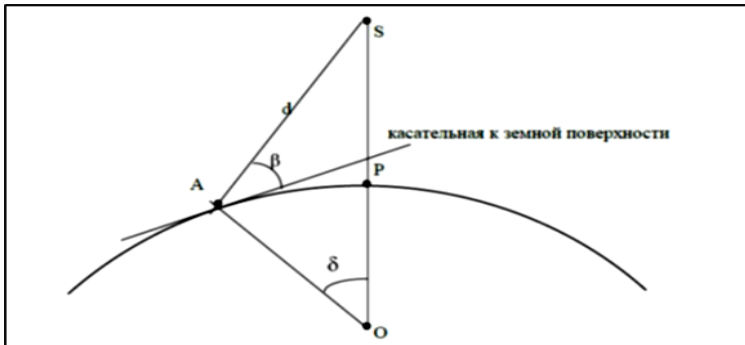


Рис. 3.8. Угол места, наклонная дальность, центральный угол

Для ЗС, находящихся в северном полушарии:

$$A = \begin{cases} 180 - \arccos(\tan\varphi_{зс}/\tan\delta), & \text{при } \Delta\lambda \leq 0 \\ 180 + \arccos(\tan\varphi_{зс}/\tan\delta), & \text{при } \Delta\lambda > 0 \end{cases} \text{град.} \quad (3.7)$$

Результаты расчетов сводятся в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

Расположение ЗС	$\Delta\lambda$ град	l км	γ_1 град	γ_2 град	d км	δ град	β град	A град
ЗС ₁								
ЗС ₂								
ЗС _N								

Для выбора лучшей ЗС (ЛЗС) и худшей ЗС (ХЗС) сравнивают все полученные значения β и d . Для ХЗС β – минимален, а d – максимальна. Для ЛЗС – наоборот: β – максимален, а d – минимальна.

Таблица 3.2

№	Название спутника	Координаты
1	Ямал 201	90° E
2	Thaicom 3	78° E
3	Экспресс МД1	80° E
4	Asiasat 5	100,5° E
5	Ямал 202	49° E
6	Интелсат 15	85,2° E
7	Vonum 1	56° E
8	Express AM22	53° E
9	ABS	75° E

Контрольные вопросы.

1. Что называется геостационарной орбитой?
2. Что называется зоной видимости ИСЗ.
3. Порядок расчета диаграммы направленности антенны КС.
4. Определения угла места, наклонной дальности и центрального угла.
5. Вывод по определению лучшей и худшей наземной станции.

Варианты

№ Ва-ри-анта	Спутник	ЗС1	ЗС2
1	Ямал 201	43,0 ⁰ СШ 75,7 ⁰ ВД	75,7 ⁰ СШ 43,0 ⁰ ВД
2	Thaico m 3	44,0 ⁰ СШ 75,7 ⁰ ВД	76,7 ⁰ СШ 43,0 ⁰ ВД
3	Экспресс МД1	45,0 ⁰ СШ 76,7 ⁰ ВД	77,7 ⁰ СШ 43,0 ⁰ ВД
4	Asiasat5	46,0 ⁰ СШ 77,7 ⁰ ВД	78,7 ⁰ СШ 49,0 ⁰ ВД
5	Ямал 202	41,0 ⁰ СШ 73,7 ⁰ ВД	74,7 ⁰ СШ 43,0 ⁰ ВД
6	Интелс ат 15	40,0 ⁰ СШ 72,7 ⁰ ВД	73,7 ⁰ СШ 43,0 ⁰ ВД
7	Вонум 1	43,0 ⁰ СШ 73,7 ⁰ ВД	72,7 ⁰ СШ 43,0 ⁰ ВД
8	Express AM22	43,0 ⁰ СШ 72,7 ⁰ ВД	71,7 ⁰ СШ 43,0 ⁰ ВД
9	ABS	43,0 ⁰ СШ 71,7 ⁰ ВД	70,7 ⁰ СШ 43,0 ⁰ ВД
10	Ямал 201	43,0 ⁰ СШ 70,7 ⁰ ВД	74,7 ⁰ СШ 43,0 ⁰ ВД
11	Thaico m 3	43,0 ⁰ СШ 75,7 ⁰ ВД	74,7 ⁰ СШ 42,0 ⁰ ВД
12	Экспресс МД1	43,0 ⁰ СШ 76,7 ⁰ ВД	74,7 ⁰ СШ 41,0 ⁰ ВД
13	Asiasat5	43,0 ⁰ СШ 77,7 ⁰ ВД	74,7 ⁰ СШ 40,0 ⁰ ВД
14	Ямал 202	43,0 ⁰ СШ 78,7 ⁰ ВД	74,7 ⁰ СШ 44,0 ⁰ ВД
15	Интелс ат 15	43,0 ⁰ СШ 79,7 ⁰ ВД	74,7 ⁰ СШ 45,0 ⁰ ВД
16	Вонум 1	44,0 ⁰ СШ 74,7 ⁰ ВД	74,7 ⁰ СШ 43,0 ⁰ ВД
17	Express AM22	45,0 ⁰ СШ 74,7 ⁰ ВД	74,7 ⁰ СШ 46,0 ⁰ ВД
18	ABS	46,0 ⁰ СШ 74,7 ⁰ ВД	74,7 ⁰ СШ 47,0 ⁰ ВД
19	Ямал 201	47,0 ⁰ СШ 74,7 ⁰ ВД	74,7 ⁰ СШ 48,0 ⁰ ВД
20	Thaico m 3	48,0 ⁰ СШ 74,7 ⁰ ВД	74,7 ⁰ СШ 49,0 ⁰ ВД

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4

Расчет пропускной способности и составление плана частот ствола при многостанционном доступе с частотным разделением каналов.

Расчет энергетических соотношений.

Построение диаграммы уровней (ДУ)

Теоретическая часть.

4.1. Выбор диапазона частот для ССС

Так как антенна ЗС направлена в космос, то ее шумовая температура зависит от шумового излучения космоса и атмосферы. Эта шумовая температура учитывается при выборе диапазона частот. Также учитывают ослабление сигнала в атмосфере и гидрометеорах. Поглощения радиоволн в спокойной атмосфере (без дождя) значительно ниже, чем при осадках. Гидрометеоры в тропосфере (капли дождя и тумана, снег и пр.) рассеивают энергию радиоволн, длина волны которых, соизмерима с размерами гидрометеоров. Ослабление сигнала в зависимости от интенсивности дождя J для разных частот различно.

4.2. Множитель ослабления в дожде и учет шумов космических источников

Для ССС множитель ослабления в дожде будет равен:

$$V_d = L_d \cdot R_d, \quad (4.1)$$

где R_d – длина трассы, где идет дождь [км]; L_d – ослабление в дожде [дБ].

Множитель ослабления показывает, на сколько сигнал ослабнет в дожде.

При горизонтальной поляризации антенны, капли дождя расщепляются, и ослабление сигнала возрастает по сравнению с вертикальной поляризацией в 1,15 раз. Кроме того, необходимо учитывать эффективные температуры шумов космических источников на входе антенны ЗС. В целом при учете ослаблений в гидрометеорах и шумов космических источников для ССС наиболее подходит диапазон частот от 1 ГГц до 10 ГГц.

В России для ССС «Молния-1» использовалась частота $f = 1$ ГГц. «Молния-3» работает на частоте $f = 6$ ГГц. ССС «Горизонт» работает в диапазоне 6/4 ГГц. Частота $f = 6$ ГГц используется на участке земля-космос, а $f = 4$ ГГц – космос-земля.

Так как диапазон от 1 ГГц до 6 ГГц в настоящее время занят, а новые ССС продолжают создавать, то стали использовать диапазон 14/11 ГГц и 30/20 ГГц. Потери сигналов, при распространении в этих более высокочастотных диапазонах возрастают и становятся сложнее

создавать и эксплуатировать аппаратуру. Но при этом коэффициент усиления антенн возрастает при тех же ее размерах, и это позволяет компенсировать часть потерь.

4.3. Запаздывание сигналов при распространении от ЗС к ИСЗ и от ИСЗ к ЗС. Возникновение эха сигнала

Время распространения сигнала в ССС определяется длиной пути L_c .

$$L_c > 2H_{исз}, \tag{4.2}$$

где $H_{исз}$ – высота орбиты спутника.

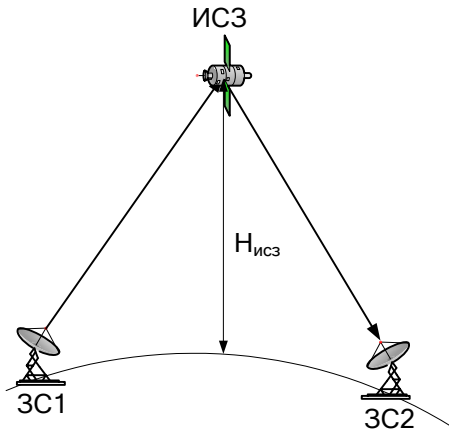


Рис. 4.1. Путь распространения сигнала от ЗС1 к ЗС2

Путь, по которому распространяется сигнал в ССС, показан на рис. 4.1. Время распространения сигнала излучаемого земной станцией равно:

$$t_{распр} = \frac{L_c}{c}, \tag{4.3}$$

Для геостационарного спутника

$$t_{распр} = \frac{2 \cdot 36 \cdot 10^3 \text{ км}}{3 \cdot 10^5 \text{ км/с}} = 240 \text{ мс}$$

При передаче телевизионных сигналов такое запаздывание не имеет значения. При дуплексной связи абонент будет ожидать двойное время.

$$t_{\text{ожид}} = 2t_{\text{распр}} \approx (500 \div 600) \text{ мс.}$$

При разговоре через спутник возникают паузы, и нарушается естественность речи.

В аппаратуре приемника ЗС часть принятого сигнала просачивается в передающую аппаратуру, т. е. сигнал возвращается говорящему абоненту с запаздыванием на время распространения сигнала, и воспринимается как эхо. Для устранения мешающего влияния эхо-сигнала включают эхозаградители. При времени распространения 500 мс создают эхозаградители, в которых этот сигнал ослабляется на 60 дБ.

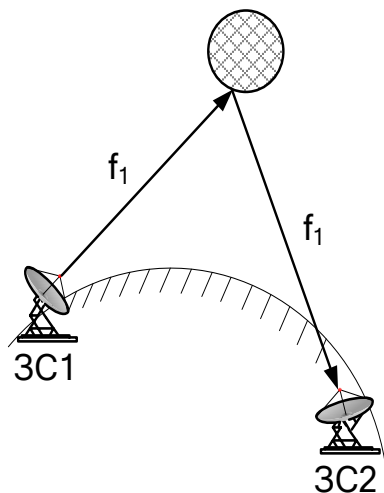


Рис. 4.2. Пассивный ретранслятор

Ретрансляторы на ИСЗ могут быть как пассивными, так и активными. В качестве пассивного ретранслятора могут быть планеты, метеориты и гидрометеоры (рис. 4.2). Пассивные ретрансляторы в настоящее время не применяют, потому что принятый сигнал будет весьма слабым.

Переизлучаемый сигнал после усиления в активном ретрансляторе будет достаточного уровня для его приема на ЗС. Такие ретрансляторы называют ретрансляторами прямого усиления (рис. 4.3).

Переизлучаемый сигнал, после усиления в таком активном ретрансляторе, (т. е. ИСЗ) на промежуточной частоте смещается на $(1,5 \div 2)$ ГГц.

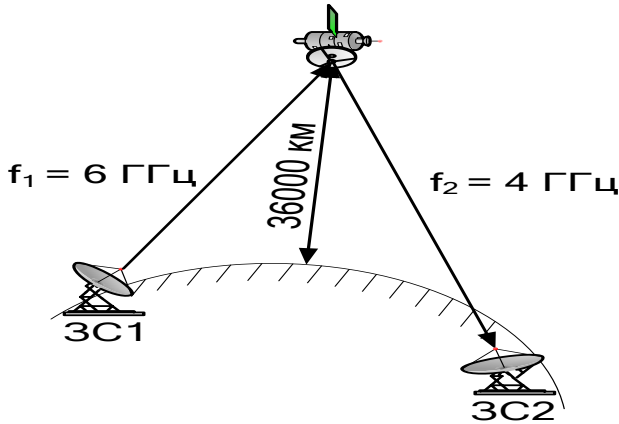


Рис. 4.3. Активный ретранслятор

4.4 Методы многостанционного доступа

Многостанционный доступ (МД) позволяет работать через один ИСЗ всем ЗС, расположенным в зоне обслуживания, как составной части зоны покрытия. На ИСЗ имеется одна приемо-передающая антенна для работы со всеми ЗС.

Используют системы многостанционного доступа с кодовым разделением (МДКР), системы многостанционного доступа с частотным разделением (МДЧР) и временным разделением (МДВР). МДКР осуществляется на основе использования шумоподобных сигналов (ШПС) и является наиболее перспективным для современных ССС. При МДЧР, полосу пропускания частот ретранслятора, т. е. ИСЗ $\Delta f_{исз}$ делят между всеми ЗС, число которых обозначают $N_{зс}$.

Пример распределения полосы частот при МДЧР показан на рис. 4.4.

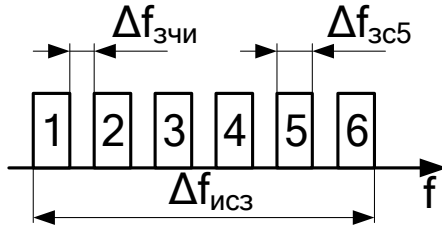


Рис. 4.4. Пример разделения полосы пропускания частот ретранслятора $\Delta f_{исз}$ между ЗС при МДЧР

Каждой ЗС выделяется соответствующая полоса частот $\Delta f_{зсз}$. Полосы частот, выделенные ЗС, отделены друг от друга защитными частотными интервалами (ЗЧИ) $\Delta f_{зчи}$, которые необходимы для устранения переходных помех между сигналами в соседних частотных полосах ЗС. Переходные помехи возникают при одновременном прохождении сигналов всех ЗС через нелинейный передатчик ретранслятора на ИСЗ.

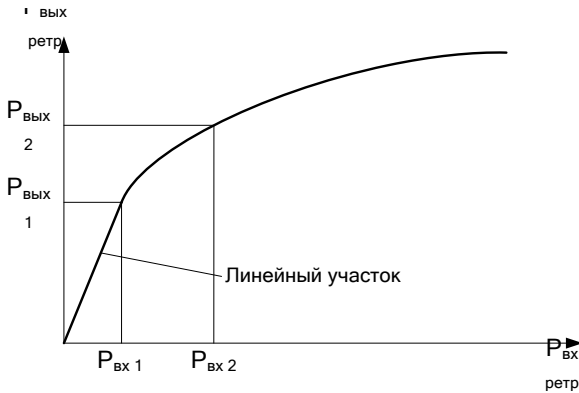


Рис. 4.5. Нелинейная характеристика передатчика ретранслятора

На нелинейном участке характеристики передатчика (рис. 4.5) образуются переходные помехи, т. е. гармоники, которые попадают в полосы пропускания других ЗС. Поэтому и вводят ЗЧИ, но это уменьшает пропускную способность ретранслятора, т. е. снижает эффективность использования его полосы частот $\Delta f_{исз}$.

При МДЧР, на входе приемника ИСЗ необходимо поддерживать уровни мощностей всех принимаемых сигналов ЗС одинаковыми с точностью до 0,5 дБ, это необходимо для того, чтобы не возникало подавления

слабого сигнала сильным, при прохождении через нелинейный передатчик ИСЗ.

Хотя уровни сигналов всех передатчиков ЗС и одинаковы, но условия распространения сигналов от ЗС к ИСЗ различны. Кроме того, путь у сигналов от ЗС к ИСЗ разный. Для поддержания равенства мощностей сигналов на входе приемника ИСЗ, на каждой ЗС измеряют ослабление сигнала на участке ЗС – ИСЗ, а затем автоматически регулируют выходную мощность передатчика ЗС до требуемого уровня.

На один телефонный канал выделяется одна несущая частота. Такие каналы называют ОКН («один канал на несущую»). Например, если скорость передачи информации $R = 64$ кбит/с, и если в приемнике используется цифровая модуляция ИКМ – ОФМ (импульсно-кодовая модуляция и относительно-фазовая модуляция) с четырьмя уровнями квантования, то необходимо выделить на один телефонный канал (ТФ) полосу частот $\Delta f_{\text{ТФ}} = 45$ кГц, при этом уже учитывается и ЗЧИ.

Допустим, что каждый частотный ствол ретранслятора (транспондер) имеет полосу пропускания частот $\Delta f_{\text{см}} = 36$ МГц, то тогда в нем можно будет разместить ТФ в количестве

$$N_{\text{ТФ}}^{\text{КАН}} = \frac{36 \cdot 10^3}{45} = 800,$$

т. е. в таком частотном стволе можно разместить всего 800 телефонных каналов, каждый из которых занимает полосу частот $\Delta f_{\text{ТФ}} = 45$ кГц.

Практическая часть.

Определение необходимой полосы частот и требуемого отношения несущая / шум.

На передающем конце СЛС (спутниковая линия связи) (на передающей ЗС) и на приемном конце (на приемной ЗС) происходит преобразование скорости передачи цифрового сигнала в соответствии с рис. 4.б, где обозначено:

$V_{\text{ис}}$ – скорость передачи одного информационного потока (задана в исходных данных);

$V_{\text{вх}}$ – скорость передачи входного потока;

$V_{\text{к}}$ – скорость передачи цифрового потока на выходе помехоустойчивого кодера с учетом скорости кодирования R (R задана в исходных данных);

$V_{\text{сс}}$ – скорость передачи сигналов служебной связи;

$V_{\text{рк}}$ – результирующая скорость передачи в радиоканале с модуляцией 4ФМ.

Ширина спектра модулированного радиосигнала численно равна результирующей скорости передачи с учетом коэффициента скругления спектра:

$$P_c = B_{pk} (1+\alpha), \text{ Гц} \quad (4.1)$$

где α – коэффициент скругления спектра (задан в исходных данных);

$$B_{pk} = B_k / \log_2 M, \text{ бит/сек}, \quad (4.2)$$

где $M = 4$ в случае использования модуляции 4ФМ;

$$B_k = \frac{B_{вх}}{R}, \text{ бит/сек}, \quad (4.3)$$

где R – скорость кода (при каскадном кодировании $R = R_{внутр} \cdot R_{внешн}$),

$$B_{вх} = B_{цс} + B_{сс}.$$

При IDR сигналы служебной связи с $B_{сс} = 96$ кбит/с добавляются, если

$$B_{цс} > 1544 \text{ кбит/с}.$$

При меньших $B_{цс}$, сигналы служебной связи не добавляют, т. е. $B_{сс} = 0$.

С учетом необходимых при МДЧР защитных частотных интервалов полоса частот, требуемая для передачи одной несущей:

$$P1 = (1,1 \dots 1,3) \cdot P_c, \text{ Гц} \quad (4.4)$$

Значение $K_{осн} = 10^{-7}$ соответствует условиям отсутствия осадков («ясное небо») и является достоверным в период готовности в течение более 10 % любого месяца, а значение $K_{осн} = 10^{-3}$ соответствует условиям наличия осадков («ухудшение погоды») и является достоверным в период готовности в течение более 0,03 % любого месяца.

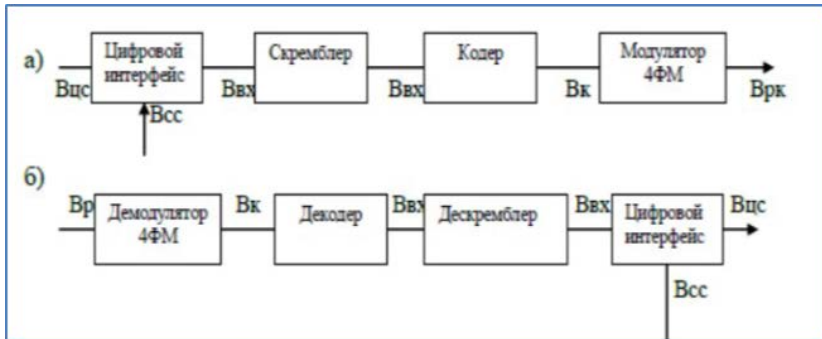


Рис. 4.6. Преобразование скорости цифрового потока:
а) на передаче, б) на приеме.

Требуемое значение, для обеспечения заданной достоверности h , на входе демодулятора приемной ЗС определяется из таблицы 4.1 в зависимости от кодовой скорости R и требуемого коэффициента ошибок $K_{ош}$ ЦС на выходе декодера. Данные приведены для модуляции 4ФМ, декодирования по алгоритму Витерби и учитывают погрешности аппаратурной реализации.

Таблица 4.1

Коэффициент ошибок $K_{ош}$	$h_{доп}$ дБ		
	$R = 1/2$	$R = 3/4$	$R = 7/8$
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 приёмной ЗС помимо полезного сигнала и теплового шума, могут присутствовать также мешающие сигналы от других систем связи и интермодуляционные шумы, возникающие в передатчиках КС и ЗС, работающих в многосигнальном режиме.

В первом приближении эти дополнительные помехи могут быть учтены прибавкой к $h_{доп}$ из таблицы 4.1 запаса $\Delta_{доп} = 1...2$ дБ.

Требуемое отношение $h_m = h_{доп} + \Delta_{доп}$.

Чтобы обеспечить требуемое отношение $q_{г}$ в конце СЛС, состоящей из двух участков: участок “вверх”(↑) и участок “вниз”(↓), на каждом оно должно обеспечиваться с запасом. На участке ↑ энергетический потенциал обеспечить легче, поэтому коэффициент энергетического запаса

на этом участке выбирают больше: $a = 5 \dots 10$, а на участке \downarrow коэффициент энергетического запаса b рассчитывают:

$$b = \frac{a}{a-1} \quad (4.5)$$

и распределяют требуемое отношение q_f по участкам:

$$q_{f\uparrow} = q_{f\uparrow} + 10 \cdot \log a, \text{ дБГц}, \quad (4.6)$$

$$q_{f\downarrow} = q_{f\downarrow} + 10 \cdot \log b, \text{ дБГц}, \quad (4.7)$$

План частот.

При составлении частотного плана ствола:

- спектр, модулированной несущей, изображать в виде равнобедренного треугольника, основание которого численно равно P_c ;
- номинальные значения несущих частот привязать к сетке, кратной 1 кГц, и представить в виде таблицы;

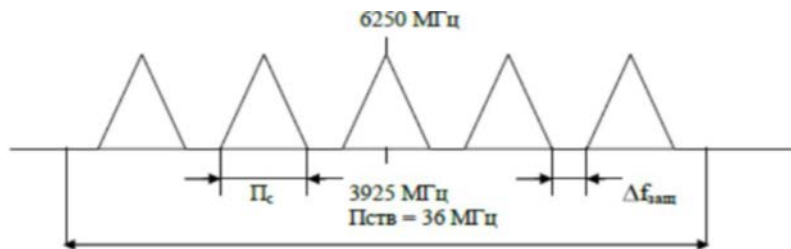


Рис. 4.7. Пример плана частот 11 ствола спутника «Горизонт» для 5 несущих

– для нечетного количества несущих частот начинать построение, откладывая влево и вправо от центральной частоты значение $P_c/2$, далее отложить влево и вправо значение защитной полосы $f_{\text{защ}}$, которое определяется $f_{\text{защ}} = P_{\uparrow} - P_c$ (рис. 4.7) – для четного количества несущих в центре расположить защитную полосу.

Энергетический расчёт.

Цель энергетического расчёта – определение основных параметров ЗС: добротности, ЭИИ (эквивалентная изотропно-излучаемая мощность), диаметра антенны, мощности передатчика, эквивалентной шумовой температуры, обеспечивающих требуемые значения коэффициента ошибок $K_{\text{ош}} = 10^{-7}$ и $K_{\text{ош}} = 10^{-3}$ в заданных процентах времени месяца. Расчёт начинают с определения ослабления сигналов на участках "вверх" и "вниз" как в условиях «ясного неба» (отсутствия дождя), так и при дожде заданной

интенсивности. Обычно расчёты проводят для «худшей» ЗС (ХЗС), находящейся на краю ЗО.

Расчет общего ослабления энергии радиоволн на каждом участке:

$$L_p = L_0 + L_{\text{доп}}, \text{ дБ} \quad (4.9)$$

здесь L_0 – ослабление сигнала в свободном пространстве:

$$L_0 = 20 \log \frac{(4 \cdot \pi \cdot d)}{\lambda}, \text{ дБ} \quad (4.10)$$

где d – наклонная дальность;

λ – длина волны, $\lambda = c / f$.

Следует иметь в виду, что на линии "вверх" и "вниз" используются разные частоты, а d и λ надо подставлять в одинаковых единицах измерения, например в метрах.

$$L_{\text{доп}} = L_{\text{атм}} + L_{\text{д}} + L_{\text{н}} + L_{\text{п}}, \text{ дБ} \quad (4.11)$$

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

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

$L_{\text{н}}$ – потери из-за неточности наведения антенн, дБ;

$L_{\text{п}}$ – поляризационные потери, дБ.

Величина $L_{\text{доп}}$ зависит от рабочей частоты, угла места, характеристик антенн и систем их наведения. Кроме того, потери в осадках зависят от климатического района, в котором находится ЗС, и изменяются во времени.

Потери в спокойной атмосфере возникают из-за поглощения сигнала в кислороде и водяных парах. В таблице 4.2 приведены значения $L_{\text{атм}}$ в дБ для наиболее часто используемых диапазонов частот.

В СССР применяют как круговую (на частотах до 10 ГГц обязательно), так и линейную (выше 10 ГГц) поляризацию волн. Потери возникают при несовпадении параметров поляризации приёмной антенны и волны в точке приёма. Например, углов поворота плоскостей поляризации, в случае линейной поляризации или различно эллиптичности в случае круговой поляризации, деполяризации радиоволн в осадках. На практике удаётся свести эти потери до величины $L = 0,2 \dots 0,5$ дБ.

Потери из-за неточности наведения антенн.

Потери из-за неточности наведения антенн ЗС на ИСЗ определяются угловым отклонением оси главного лепестка ДН от истинного

направления на ИСЗ, а также шириной и формой главного лепестка ДН антенны. Для снижения этих потерь антенны большого диаметра снабжаются системами точного автоматического наведения на ИСЗ. В существующих системах потери наведения составляют $L_n = 0,15 \dots 0,3$ дБ

Таблица 4.2

Потери из-за несогласованности поляризаций антенн

Угол места, град →	S	10	45	90
Частота, ГГц	Потери в спокойной атмосфере, дБ			
4	0,6	0,25	0,1	0,06
11	1,1	0,6	0,15	0,1
20	7,0	3,0	0,8	0,5

Расчёт потерь в дожде.

Потери L_d связаны с поглощением и рассеянием энергии радиоволн каплями дождя и могут быть рассчитаны. Для расчёта необходимы следующие исходные данные:

- координаты ЗС – $\varphi_{зс}$ – широта (положительна для Северного полушария и отрицательна для Южного), $\lambda_{зс}$ – долгота, $h_{зс}$ – высота над уровнем моря (в км);
- рабочая частота – f , угол места – β , процент времени месяца (или года), для которого определяются потери – $T_{мес}$ (или $T_{года}$).

ССС, входящие в состав сетей общего пользования обычно проектируют:

- в условиях «ясного неба» $K_{ош}=10^{-7}$;
- в условиях дождя $K_{ош}=10^{-3}$.

Для корпоративных и ведомственных ССС могут быть установлены другие, как более мягкие, так и более жёсткие нормы.

Пример построения диаграммы уровней показан на рис. 4.8.

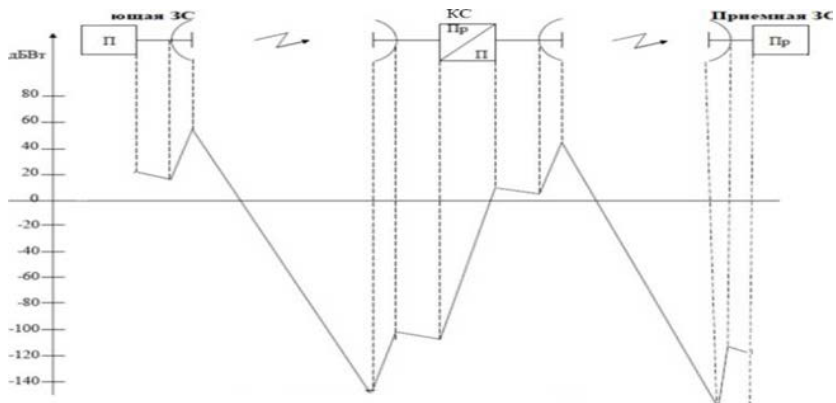


Рис. 4.8. Диаграмма уровней

Задание.

Рассчитать и построить **в масштабе** диаграмму уровней, определить будет ли работать спутниковая линия связи. Варианты заданий приведены в таблице 4.3. Угол места $P = 45^0$, $L_d = 1,5$ дБ.

Контрольные вопросы.

1. Чему равна ширина спектра радиосигнала?
2. Как рассчитывается коэффициент энергетического запаса?
3. Как определяется множитель ослабления в дожде и учет шумов космических источников?
4. Путь распространения сигнала от ЗС1 к ЗС2.
5. Методы многостанционного доступа.
6. Многостанционный доступ с частотным разделением.

Таблица 4.3

Варианты заданий

№ Вари- анта	$P_{\text{пер}}$ Вт	$P_{\text{пор}}$ дБВт	$b_{\text{зс}}$ дБ	$b_{\text{кс}}$ дБ	$G_{\text{зс}}$ дБ	$G_{\text{кс}}$ дБ	f_{\uparrow} ГГц	f_{\downarrow} ГГц	d1 км	d2 км
1	60	-120	0,8	0,2	15	18	6	12	36000	35900
2	70	-120	0,9	0,3	16	17	7	13	36000	35900
3	80	-120	1,0	0,4	17	16	8	14	36000	35900
4	90	-120	1,1	0,5	18	15	9	12	36000	35900
5	100	-120	1,2	0,6	15	18	10	13	36000	35900
6	110	-120	1,3	0,2	16	17	11	14	36000	35900
7	120	-120	1,4	0,3	17	16	6	12	36000	35900
8	130	-120	1,5	0,4	18	15	7	13	36000	35900
9	140	-120	0,8	0,5	15	18	8	14	36000	35900
10	150	-120	0,9	0,6	16	17	9	12	36000	35900
11	60	-120	1,0	0,2	17	16	10	13	36000	35900
12	70	-120	1,1	0,3	18	15	11	14	36000	35900
13	80	-120	1,2	0,4	15	18	6	12	36000	35900
14	90	-120	1,3	0,5	16	17	7	13	36000	35900
15	100	-120	1,4	0,6	17	16	8	14	36000	35900
16	110	-120	1,5	0,2	18	15	9	12	36000	35900
17	120	-120	0,8	0,3	15	18	10	13	36000	35900
18	130	-120	0,9	0,4	16	17	11	14	36000	35900
19	140	-120	1,0	0,5	17	16	6	12	36000	35900
20	150	-120	1,1	0,6	18	15	7	13	36000	35900

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5

Расчет сеанса связи и трассы пролета ИСЗ

Цель работы.

Научиться производить расчеты спутниковых линий связи, а также их основных систем по данным параметрам.

Теоретическая часть.

Энергетический расчет спутниковых линий связи. Расчет сигнала на входе приемника.

На рис. 5.1 представлена структурная схема ССС.

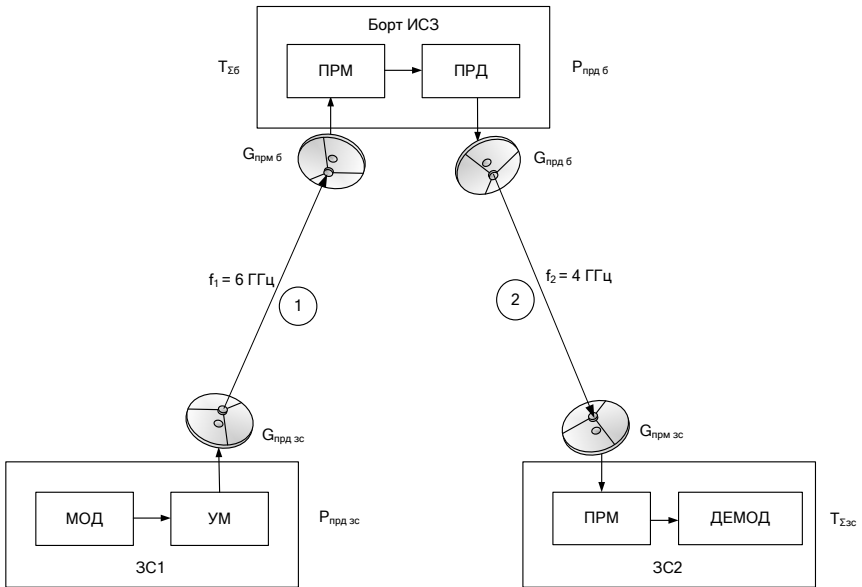


Рис. 5.1. Структурная схема ССС

Передающая станция характеризуется эквивалентной изотропно-излучаемой мощностью (ЭИИМ). Она измеряется в дБ·Вт.

Для ЗС1 ЭИИМ будет равна:

$$P_{\text{ЭИИМ ЗС}} = P_{\text{прд ЗС}} + G_{\text{прд ЗС}} - L_{\text{Ф прд ЗС}}$$

Для ИСЗ:

$$P_{\text{ЭИМ Б}} = P_{\text{ПРД Б}} + G_{\text{ПРД Б}} - L_{\text{Ф ПРД Б}}.$$

Мощность полезного сигнала на входе бортового приемника равна:

$$P_{\text{С ВХ Б}} = P_{\text{ЭИМ ЗС}} + G_{\text{ПРМ Б}} - L_{\text{Ф ПРМ Б}} - L_{\Sigma 1},$$

где $L_{\Sigma 1}$ – суммарные потери на 1-м участке ЗС1-ИСЗ.

$$L_{\Sigma 1} = L_{\text{СВ}} + L_{\text{АТМ}} + L_{\text{Д}} + L_{\text{ПОЛ}}$$

Ослабление энергии в свободном пространстве определяется уменьшением плотности мощности при удалении от излучателя. Хотя ослабление в свободном пространстве $L_{\text{СВ}}$.

$$L_{\text{СВ}} = \left(\frac{4\pi R_0}{\lambda} \right)^2,$$

где R_0 – расстояние между ЗС и ИСЗ в км; λ – длина волны;

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^{10} \text{ [см/с]}}{\lambda \text{ [см]}};$$

$L_{\text{СВ}}$ – потери в свободном пространстве; $L_{\text{АТМ}}$ – потери, обусловленные поглощением радиоволн в атмосфере без дождя; $L_{\text{Д}}$ – потери в дожде и других гидрометеорах; $L_{\text{ПОЛ}}$ – потери из-за несовпадения плоскостей поляризации сигнала и антенны.

Мощность полезного сигнала на входе приемника ЗС₂ равна:

$$P_{\text{С ВХ ЗС2}} = P_{\text{ЭИМ Б}} + G_{\text{ПРМ ЗС2}} - L_{\text{Ф ПРМ ЗС2}} - L_{\Sigma 2},$$

где $L_{\Sigma 2}$ – суммарные потери при распространении на 2-м участке ИСЗ-ЗС2.

В атмосфере кислород и водяные пары поглощают энергию радиоволн. Потери при распространении в атмосфере зависят от пути сигнала в атмосфере, и определяются углом места α .

Толщина дождевой зоны при $\alpha = 10^\circ$ составляет обычно 2 км, тогда мощность принятого сигнала на входе приемника ИСЗ будет равна:

$$P_{\text{С ВХ Б}} = P_{\text{ЭИМ ЗС}} + G_{\text{ПРМ Б}} - L_{\text{Ф ПРМ Б}} - L_{\Sigma 1}.$$

Оценка чувствительности приемника на ИСЗ и ЗС.

Чувствительность приемника определяется минимальным уровнем полезного сигнала ($P_{\text{С min}}$), который может выделить приемник на фоне шумов. Уровень шумов определяется в основном эффективной шумовой температурой антенны $T_{\text{а}}$.

Суммарная эффективная шумовая температура антенны $T_{\text{а\Sigma}}$ учитывает влияние антенны, фидера и приемника (рис. 5.2).

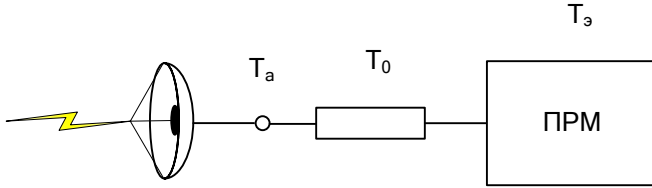


Рис. 5.2. Суммарная эффективная шумовая температура антенны $T_{a\Sigma}$

$$T_{a\Sigma} = T_a + T_0 + T_э,$$

где T_a – эффективная шумовая температура антенны (ЭШТ); T_0 – шумовая температура фидера; $T_э$ – шум-фактор приемника.

Антенна ЗС направлена на ИСЗ, она принимает кроме полезного сигнала еще и шумы космоса и атмосферы. По боковым лепесткам диаграммы направленности антенна ЗС принимает шумы Земли.

Эффективная шумовая температура антенны ЗС равна:

$$T_{a\Sigma \text{ ЗС}} = T_k + T_{\text{атм}}(\alpha) + \varepsilon T_{\text{зем}} + \Delta T,$$

Шумовую температуру атмосферы $T_{\text{атм}}(\alpha)$ и шумовую температуру космоса T_k можно определить по графикам в справочниках. Если $f = 6$ ГГц и $\alpha = 10^\circ$, то $T_{\text{атм}} = 30$ К, $T_k \leq 10$ К и $T_{\text{зем}} = 290$ К; $\varepsilon = 0,3$ коэффициент, учитывающий прием шумов $T_{\text{зем}}$ основным боковым лепестком диаграммы направленности антенны; $\Delta T \approx 0$, т. к. приращение шумов из-за омических потерь в антенне равно $\Delta T = 2$ К.

Рассмотрим чувствительность приемника ИСЗ.

Эффективная шумовая температура антенны ИСЗ главным лепестком диаграммы направленности ориентирована на Землю. И при учете всех факторов, суммарная ЭШТ может быть определена из выражения:

$$T_{a\Sigma \text{ исз}} = T_{\text{зем}} + T_{\text{атм}} + 2\varepsilon \cdot T_k = 290 + 90 + 30 = 410^\circ\text{C}.$$

Мощность тепловых шумов на входе приемника определяется выражением:

$$P_{\text{ш вх прм}} = k \cdot T_{a\Sigma} \cdot \Delta f_{\text{упч}}, \text{ где } k = 1,23 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}} \text{ градус} - \text{постоянная Больц-мана.}$$

$\Delta f_{\text{упч}}$ – шумовая полоса пропускания приемника на выходе УПЧ, в которой измеряют шумы. Чувствительность приемника характеризует его способность принимать слабые сигналы. Она ограничена шумами антенны и входных каскадов приемника. Мощность пороговой чувствительности равна: $P_{\text{порог}} \approx 10 \cdot P_{\text{ш вх прм}}$.

Практическая часть.

Уравнения связи для двух участков.

Эквивалентная изотропно-излучаемая мощность (ЭИИМ) передающей станции: $P_{\text{эиим}} = P_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot D_{\text{пер}}$, Вт (5.1),

где $P_{\text{пер}}$ – эффективная мощность сигнала на выходе передатчика;

$\eta_{\text{пер}}$ – коэффициент передачи (по мощности) волноводного тракта, между передатчиком и антенной;

$D_{\text{пер}}$ – коэффициент усиления передающей антенны относительно изотропного излучателя.

Затухание энергии в свободном пространстве, определяемое уменьшением плотности потока мощности при удалении от излучателя определяется по формуле:

$$L_0 = \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \right)^2, \text{ раз} \quad (5.2)$$

где λ – длина волны ($\lambda = c/f$, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с);

d – наклонная дальность (расстояние между передающей и приемной антеннами). Кроме этих основных потерь, на трассе присутствуют и дополнительные потери $L_{\text{доп}}$, полное значение потерь на трассе:

$$L_{\Sigma} = L_0 \cdot L_{\text{доп}}, \text{ раз} \quad (5.3)$$

Эффективная площадь аппаратуры антенны $S_{\text{пр}}$, связана коэффициентом усиления $D_{\text{пр}}$ соотношением:

$$D_{\text{пр}} = 4 \cdot \pi \cdot S_{\text{пр}} / \lambda, \text{ раз} \quad (5.4)$$

Мощность передатчика:

$$P_{\text{пер}} = \frac{4\pi d^2 L_{\text{доп}} P_{\text{пр}}}{D_{\text{пер}} \cdot S_{\text{пр}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}}}, \text{ Вт} \quad (5.5)$$

Формула (5.5) позволяет определить необходимую мощность передатчика по заданному значению мощности сигнала на входе приемника. Следует отметить, что в нее не входит длина волны. Следовательно, когда передающая антенна имеет постоянный коэффициент усиления на всех частотах, а приемная – эффективную постоянную площадь аппаратуры (может эффективно работать по мере возрастания частоты), мощность сигнала на входе приемника в первом приближении не зависит от частоты.

5.2. Прохождение сигналов в системах космической связи.

На распространение радиоволн, на линиях Земля – космос (или космос Земля), заметное влияние оказывает атмосфера Земли – как ионосфера, так и тропосфера. Это влияние особенно заметно на частотах от 10 ГГц и выше, а также при малых углах прихода волны (малых углах места антенны земной станции).

Влияние ионосферы может проявляться в поглощении энергии, дисперсии сигнала, т. е. неравномерном времени задержки в полосе, «мерцании» сигнала, вызванном рассеянием локальными нерегулярностями концентрации электронов, вращении плоскости поляризации линейно поляризованной волны. Все эти эффекты обратно пропорциональны квадрату частоты сигнала, а дисперсия – кубу частоты. Поэтому космические службы, работающие на частотах выше 1 ГГц, могут не учитывать влияние ионосферы, за исключением вращения плоскости поляризации. Изменение вращения носит регулярный характер, подчиняющийся суточному и сезонному ходу, циклам солнечной активности, а также подвержено значительным и непредсказуемым отклонениям от регулярного хода в малых процентах времени.

5.3. Расчет ослабления уровня сигнала в атмосфере.

Применение круговой поляризации волны позволяет полностью устранить влияние этого явления. Изменения уровня сигнала могут быть вызваны интерференцией прямой волны и волны, отраженной от земной поверхности. Основное поглощение энергии сигнала вызывают кислород и водяной пар. На рисунке 5.3 показаны теоретические зависимости погонного ослабления уровня сигнала, дБ/км, от частоты при стандартном давлении воздуха, температуре 20° С и концентрации p водяного пара 7,5 г/м³.

На линиях связи Земля – космос волна проходит через всю толщу тропосферы, и на ее пути содержание кислорода и водяного пара существенно меняется, поэтому для расчета ослабления сигнала применяется концепция эквивалентной высоты кислорода и водяного пара, в пределах которой их содержание принимается постоянным.

Величина ослабления сигнала A_a определяется формулой:

$$A_a = \frac{h_{O_2}Y_{O_2} + h_{H_2O}Y_{H_2O}}{\sin\theta}, \text{ дБ} \quad (5.6)$$

при $\theta > 10^\circ$.

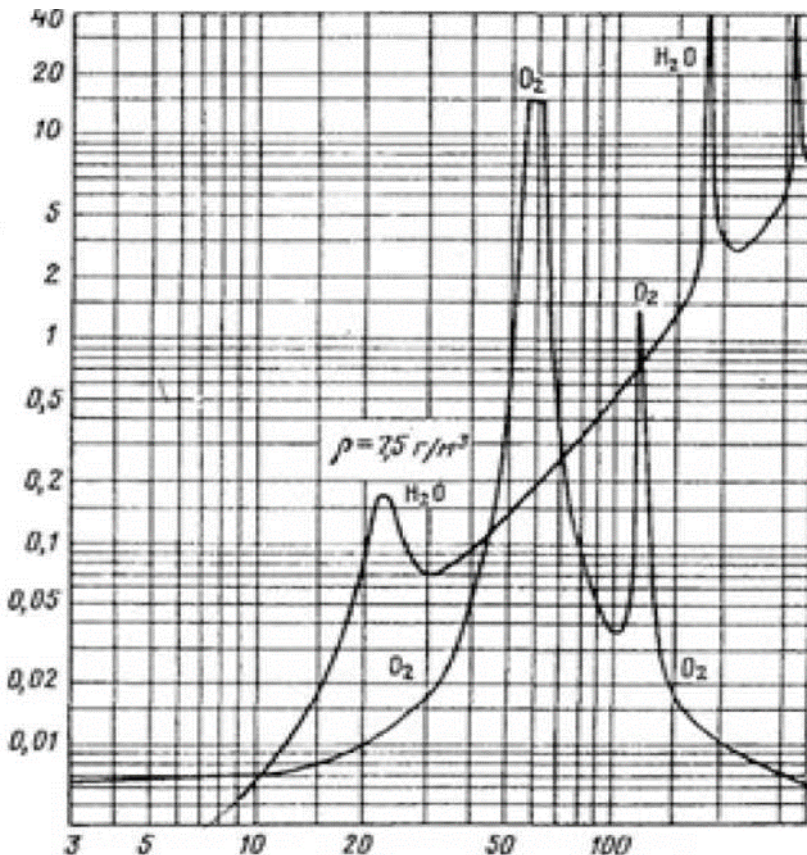


Рис. 5.3. Зависимости погонного ослабления уровня сигналов от частоты при стандартном давлении воздуха, температуре 20°C и концентрации водяного пара $7,5\text{ г/м}^3$

- где θ – угол места антенны земной станции;
 R – эквивалентный радиус Земли с учетом рефракции (8500 км);
 Y_{O_2} – погонное ослабление в кислороде, (дБ/км), определяется по графику на рисунке 5.3 в зависимости от частоты;
 Y_{H_2O} – погонное ослабление в водяном паре, дБ/км, определяется по $\rho/7,5$, учитывающее влагосодержание водяного пара ρ , которое может отличаться от значения $7,5\text{ г/м}^3$, указанного на графике;
 h_{O_2} – эквивалентная высота кислорода, (км)
 $h_{O_2} = 6$ км, при $f < 50$ ГГц;
 h_{H_2O} – эквивалентная высота водяного пара (км)

5.4. Расчет ослабления уровня сигнала, в зоне дождя.

Ослабление уровня сигнала при прохождении радиоволн через зону дождя вызвано рассеянием электромагнитной энергии частицами, при этом каждая частица рассеивает энергию в разных направлениях, вследствие чего энергия, приходящая в точку приема, уменьшается. Кроме того, энергия поглощается в частицах дождя, что вызывает ослабление уровня сигнала. Интенсивность рассеяния и поглощения зависит от количества частиц в единице объема, отношения размеров этих частиц к длине волны, размеров области, занятой частицами, и их электрических свойств, зависящих от температуры. Количество частиц в единице объема и их размеры характеризуются интенсивностью дождя. Интенсивность дождя различна в разных географических районах и в разное время года.

5.5. Электромагнитная совместимость двух спутниковых систем.

Расчет электромагнитной совместимости основан на представлении, что по мере возрастания уровня мешающего излучения, увеличивается шумовая температура системы, подвергающейся помехам.

Согласно этому методу, рассчитывается кажущееся увеличение эквивалентной шумовой температуры, обусловленное помехами, создаваемыми мешающей станцией и отношение этого увеличения к эквивалентной шумовой температуре спутниковой линии, выраженной в процентах.

Задание:

Рассчитать требуемую мощность передатчика согласно варианту таблицы 5.1.

Таблица 5.1

№ Варианта	d, км	дБ	P дБВт	G _{пер} дБ	м ²	'Ппер' %	%
1	36000	20	-120	23	3	85	87
2	37000	21	-120	24	3,5	86	88
3	38000	22	-120	25	4	87	89
4	39000	23	-120	20	4,5	88	90
5	40000	24	-120	21	3	89	91
6	36000	25	-120	22	3,5	90	85
7	37000	20	-120	23	4	91	86
8	38000	21	-120	24	4,5	85	87
9	39000	22	-120	25	3	86	88
10	40000	23	-120	20	3,5	87	89
11	36000	24	-120	21	4	88	90
12	37000	25	-120	22	4,5	89	91

13	38000	20	-120	23	3	90	85
14	39000	21	-120	24	3,5	91	86
15	40000	22	-120	25	4	85	87
16	36000	23	-120	20	4,5	86	88
17	37000	24	-120	21	3	87	89
18	38000	25	-120	22	3,5	88	90
19	39000	20	-120	23	4	89	91
20	40000	21	-120	24	4,5	90	85

Примечание:

$$D_{пер} = 10^{0,05G_{пер}}, \text{ раз.} \quad (5.7)$$

Контрольные вопросы.

1. Как организована спутниковая сеть связи?
2. Чем характеризуется передающая станция?
3. В каких единицах измеряется и как определяется ЭИИМ?
4. Определить мощность полезного сигнала на входе приемника ЗС₂?
5. Оценка чувствительности приемника на ИСЗ и ЗС.
6. Эффективная шумовая температура антенны ЗС и ИСЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Телекоммуникационные системы и сети: учебное пособие в 3 томах. Т. 2. Радиосвязь, радиовещание и телевидение / под ред. В. П. Шувалова. М.: Горячая линия – Телеком, 2005.
2. *Зеленский А. А., Солодовник В. Ф.* Системы радиосвязи: учеб. пособие. Ч. 1. Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т "Харьковский авиац. ин-т", 2002.
3. *Крухмалев В. В., Гордиенко В. Н., Моченов А. Д. и др.* Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 510 с.
4. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. учебное пособие для вузов / В. Ю. Бабков, М. А. Вознюк, П. А. Михайлов. 2-е изд., испр. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 224 с.
5. Элементы частотно-территориального планирования сетей сотовой связи: методическое руководство к лабораторной работе № 65 / В. М. Драгонов, Д. А. Маковеенко. Одесса, 2009.
6. Форум: 5fan.ru. Три этапа планирования сетей связи. Отличия в планировании сетей GSM, WCDMA и LTE.
7. Исследование потерь при распространении радиосигнала сотовой связи на основе статистических моделей. М. П. Савченко, О. В. Старовойтова. Вестник Балтийского государственного университета им. И. Канта. 2011. Вып. 5. С. 44–49.
8. Системы мобильной связи. Часть 1. Принципы организации, функционирования и частотного планирования систем мобильной связи: учебное пособие по дисциплине «Системы мобильной связи» для студентов заочной формы обучения / сост. А. В. Печаткин; РГАТА. Рыбинск, 2008. 122 с.
9. *Григорьев В. А., Лагунко О. И., Раснаев Ю. А.* Сети и системы радиодоступа. М.: Эко-Трендз 2005. 384 с.; ил.
10. *Сухорукова И. Ю.* Физические основы спутниковой связи: учебное пособие. М.: МТУСИ, 2004.
11. *Маковеева М. М.* Принципы построения и расчета цифровых радиорелейных систем: учебное пособие. М.: МТУСИ, 2000.
12. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование: учебное пособие для вузов / В. Ю. Бабков, М. А. Вознюк, П. А. Михайлов. 2-е изд., испр. М.: Горячая линия – Телеком, 2007.
13. Электромагнитная совместимость систем спутниковой связи / под ред. Л. Я. Кантора и В. В. Ноздрина. М.: НИИР, 2009.

Составитель
Наталья Ивановна Кравченко

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«СЕТИ И СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ»

Редактор *А. И. Шевченко*
Компьютерная верстка *Д. В. Шевченко*

Подписано в печать 7.07.16
Формат 60x84¹/₁₆
Офсетная печать. Объем 4,0 п.л.
Тираж 100 экз. Заказ 227

Отпечатано в типографии КРСУ
720048, г. Бишкек, ул. Горького, 2