

**МИНИСТЕРСТВО ПО РАЗВИТИЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И КОММУНИКАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Факультет «Телекоммуникационные технологии»

**Кафедра «Технологии
мобильной связи»**

**Методические указания
к практическим занятиям
по курсу
«Спутниковые системы связи»**

Ташкент 2015

Данные методические указания представляют собой сборник задач к практическим занятиям, предназначенные для закрепления знаний по дисциплине «Спутниковые системы связи», которые в свою очередь базируются на ряде предыдущих дисциплин, таких как «Физика», «Теоретические основы телекоммуникационных систем», «Радиорелейные и спутниковые системы связи» и др.

Каждую тему предваряет краткое теоретическое введение, достаточное для решения и усвоения предложенных задач.

Сборник лабораторных работ может быть использован при подготовке бакалавров по следующим направлениям образования:

5311200 - Телевидение, радиосвязь и радиовещание,
5311400 - Мобильные системы связи, 5311300 -
Телекоммуникации и др.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Требования к качественным характеристикам телекоммуникационных каналов.....	5
2. Надежность канала связи.....	11
3. Электромагнитная совместимость спутниковых телекоммуникационных систем.....	16
4. Доплеровское смещение частоты сигналов.....	27
5. Выражение радиотехнических величин в децибелах.....	32
6. Мощность принятого сигнала и шума.....	37
7. Мощность теплового шума.....	44
8. Основные параметры радиолиний, определяющие энергетические потенциалы.....	49
9. Помехозащищенность радиолинии.....	63
10. Литература.....	67

ВВЕДЕНИЕ

Наступивший XXI век получил определение «Век глобального информационного общества», так как революционизирующая роль информатизации возрастает, и уже стала определяющей в развитии общества, в прогрессе, науке и технике. Развитие современной цивилизации характеризуется увеличением роли информатизации в жизни общества, возрастанием доли информационно-телекоммуникационных технологий, созданием глобального информационного пространства, обеспечивающего эффективное информационное взаимодействие людей.

Конвергенция телекоммуникационных технологий стала реальностью в настоящее время, привело к созданию современных систем.

Одним из разновидностей систем связи является спутниковая система связи, предоставляющая круг возможностей, как для потребителей, так и для поставщиков телекоммуникационных услуг.

Спутниковые системы связи (ССС) известны давно, и используются для передачи различных сигналов на протяженные расстояния. С момента своего появления спутниковая связь стремительно развивалась, и по мере накопления опыта, совершенствования аппаратуры, развития методов передачи сигналов произошел переход от отдельных линий спутниковой связи к локальным и глобальным системам.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Требования к качественным характеристикам телекоммуникационных каналов.....	5
2. Надежность канала связи.....	11
3. Электромагнитная совместимость спутниковых телекоммуникационных систем.....	16
4. Доплеровское смещение частоты сигналов.....	27
5. Выражение радиотехнических величин в децибелах.....	32
6. Мощность принятого сигнала и шума.....	37
7. Мощность теплового шума.....	44
8. Основные параметры радиолиний, определяющие энергетические потенциалы.....	49
9. Помехозащищенность радиолинии.....	63
10. Литература.....	67

ВВЕДЕНИЕ

Наступивший XXI век получил определение «Век глобального информационного общества», так как революционизирующая роль информатизации возрастает, и уже стала определяющей в развитии общества, в прогрессе, науке и технике. Развитие современной цивилизации характеризуется увеличением роли информатизации в жизни общества, возрастанием доли информационно-телекоммуникационных технологий, созданием глобального информационного пространства, обеспечивающего эффективное информационное взаимодействие людей.

Конвергенция телекоммуникационных технологий стала реальностью в настоящее время, привело к созданию современных систем.

Одним из разновидностей систем связи является спутниковая система связи, предоставляющая круг возможностей, как для потребителей, так и для поставщиков телекоммуникационных услуг.

Спутниковые системы связи (ССС) известны давно, и используются для передачи различных сигналов на протяженные расстояния. С момента своего появления спутниковая связь стремительно развивалась, и по мере накопления опыта, совершенствования аппаратуры, развития методов передачи сигналов произошел переход от отдельных линий спутниковой связи к локальным и глобальным системам.

Такие темпы развития ССС объясняются рядом достоинств которыми они обладают. К ним, в частности, относятся относительная большая пропускная способность, неограниченные перекрываемые пространства, высокое качество и надежность каналов связи. Эти достоинства, которые определяют широкие возможности спутниковой связи, делают ее уникальным и эффективным средством связи. Спутниковая связь в настоящее время является одним из видов международной и национальной связи на большие и средние расстояния.

Данное методическое пособие представляет собой сборник задач предназначенным для закрепления знаний по дисциплине «Спутниковые системы связи», которые в свою очередь базируются на ряде предыдущих дисциплинах, таких как «Физика», «Теоретические основы телекоммуникационных систем», «Радиорелейные и спутниковые системы связи» и др.

Каждую тему предваряет краткое теоретическое введение, достаточное для решения и усвоения предложенных задач.

1. Требования к качественным характеристикам телекоммуникационных каналов

Ранее каналы связи создавались как специализированные для передачи того или иного вида информации и требования к каналу связи определялись требованиями к качеству передаваемой специфической информации.

Отдельные каналы связи создавались для передачи телеграфной информации (текста), телефонного сигнала (критерий разборчивости речи), телевизионных сигналов, сигналов телеуправления, телеметрии и др. В настоящее время подавляющее большинство телекоммуникационных систем, в том числе и спутниковых, создаются на базе универсальных интегрированных цифровых каналов связи, предназначенных для передачи любых видов информации: текста, речевых сигналов, изображений, видео и др. (мультимедийные телекоммуникационные каналы).

Требования, предъявляемые к характеристикам телекоммуникационных каналов, позволяют с запасом обеспечить высококачественную передачу всех основных сообщений.

Телекоммуникационный канал характеризуется величиной максимальной скорости передачи информации, помехоустойчивостью приема сигналов (вероятностью ошибки на бит) и надежностью функционирования канала связи (готовностью канала связи).

Качественные характеристики телекоммуникационных каналов цифровых задаются следующим образом.

Для волоконно-оптических каналов связи частота появления ошибок BER или вероятность ошибки на бит информации p не должна превышать величины $p = 10^{-9}$. Для телекоммуникационных каналов фиксированной связи длиной 2500 км, спутниковых и радиорелейных линий связи величина BER не должна превышать:

- 10^{-6} - 10^{-7} в течение не менее 80% времени любого месяца;
- 10^{-4} в течение не более 0,3% времени любого месяца;
- 10^{-3} в течение не более 0,01% времени любого года.

Состояние канала связи при вероятности ошибки $p > 10^{-3}$ называется прерыванием канала связи и относится к так называемым кратковременным прерываниям.

Для этих же телекоммуникационных каналов готовность канала связи должна быть не менее 0,99—0,995. Эта величина определяется процентом времени появления долговременных прерываний (более 10 с) за счет неблагоприятных условий распространения радиосигналов, отказов аппаратуры, ошибок действия персонала и др.

Для отдельных видов сообщений, таких как сигналы управления и сигнализации сети связи,

передача банковских данных, передача команд боевого управления в военных телекоммуникационных сетях и др. не допускается возникновение ложных или трансформированных сообщений, которые должны обнаруживаться и стираться.

Высокая надежность приема таких сообщений достигается за счет переспроса и повторной передачи сообщений (метод кодирования ARQ — Automatic Repeat Request по международной классификации).

Основным методом обеспечения высокой достоверности и надежности передачи сообщений является использование кодирования передаваемых сообщений с обнаружением ошибок информационных бит при приеме, стирание недостоверных сообщений и повторной их передачей по каналу связи. Отметим, что использование классических помехоустойчивых кодов с исправлением ошибок не решает задачу стирания недостоверных сообщений и не гарантирует предотвращения появления ложных и трансформированных сообщений.

Принимаем, что ошибки при приеме информационных бит являются независимыми, так что вероятность появления ровно i ошибочных бит в слове из n бит определяется выражением

$$P(n, i) = C_n^i p^i (1 - p)^{n-i}$$

где p есть вероятность ошибки на бит в канале связи.

Код с обнаружением ошибок с минимальным хэмминговым расстоянием d_x обнаруживает все ошибки с кратностью $t = d_x/2$ и менее (d_x - четное число).

Пример решения задачи

Задача. Для спутникового канала связи с вероятностью ошибки на бит $p = 10^{-9}$ определить минимальное хэмминговое расстояние $(n; k)$ кода с обнаружением ошибок, обеспечивающего вероятность необнаруженной ошибки 10^{-12} .

Решение. Вероятность того, что в кодовом слове из n бит будет более t ошибок равна

$$P_{\text{ош}} = \sum_{i=t+1}^n C_n^i p^i (1-p)^{n-i} \approx C_n^{t+1} p^{t+1} (1-p)^{n-t-1} \approx \\ \approx C_n^{t+1} p^{t+1} = C_n^{t+1} (10^{-9})^{t+1}$$

Величина $P_{\text{ош}}$ должна быть менее или равна 10^{-12} .

$C_n^{t+1} (10^{-9})^{t+1} \leq 10^{-12}$. Отсюда получаем $t = 1$ при условии, что $C_n^2 = \frac{(n-1)n}{2} \approx \frac{n^2}{2} < 10^6$, т. е. $n < 1410$, что всегда выполняется на практике. Тогда $d_x = 2$.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Для спутникового канала связи с вероятностью ошибки на бит $p = 10^{-10}$ определить минимальное хэмминговоe расстояние $(n; k)$ кода с обнаружением ошибок, обеспечивающего вероятность необнаруженной ошибки 10^{-15} .

Задача 2. Для радиоканала с вероятностью ошибки на бит $p \leq 10^{-3}$ и длиной пакета из $n = 64$ бит определить минимальное хэмминговоe расстояние кода с обнаружением ошибок, обеспечивающего вероятность необнаруженной ошибки в пакете:

- 10^{-6} ;
- 10^{-9} .

Задача 3. Для радиоканала с вероятностью ошибки на бит $p \leq 10^{-6}$ и длиной пакета из $n = 128$ бит определить минимальное хэмминговоe расстояние кода с обнаружением ошибок, обеспечивающего вероятность необнаруженной ошибки в пакете:

- 10^{-6} ;
- 10^{-9} .

Задача 4. Определить вероятность того, что в слове из n бит будут искажены не менее чем i бит $P_{\text{ош}}$ ($t \geq i$), где t - число обнаруживаемых ошибочных бит. Ошибки независимы. Вероятность ошибки на бит $p < 1$.

Задача 5. Для радиоканала с вероятностью ошибки на бит $p < 10^{-9}$ и длиной пакета из $n = 256$ бит определить минимальное хэммингово расстояние кода, обнаруживающего ошибки и обеспечивающего вероятность необнаруженной ошибки в пакете, равной 10^{-12} .

Задача 6. Нарисовать функциональные схемы кодера и декодера, обнаруживающего ошибки, для циклического систематического $(n; k)$ кода.

Задача 7. В радиоканале при воздействии организованной шумовой помехи (или срыве синхронизации канала синхронизации слов) вероятность ошибки на бит $p = 0,5$.

Определить число избыточных бит r , которое необходимо добавить к пакету информационных бит k для обнаружения ошибок, чтобы за время передачи пакета вероятность формирования ложной команды не превышала величины $p = 10^{-9}$.

Задача 8. В радиоканале при воздействии организованной шумовой помехи (или срыве синхронизации канала синхронизации слов) вероятность ошибки на бит $p = 0,7$.

Определить число избыточных бит r , которое необходимо добавить к пакету информационных бит k для обнаружения ошибок, чтобы за время передачи пакета вероятность формирования ложной команды не превышала величины $p = 10^{-12}$.

2. Надежность канала связи

Готовность или коэффициент готовности канала связи определяется через относительное время (или через вероятность) безотказной работы канала связи:

$$A = (T - T_n) / T,$$

где T — требуемое время работы канала связи, T_n — суммарное время перерывов связи.

Зная требуемый коэффициент готовности, можно определить требования к надежности аппаратуры канала связи, которую характеризуют средним временем безотказной работы T_0 .

Для аппаратуры без ремонта (восстановления) во время выполнения задания (самолетная, ракетная, спутниковая аппаратура) надежность аппаратуры в соответствии с экспоненциальным законом надежности характеризуется вероятностью безотказной работы за время T выполнения задания $P_0(T) = e^{-T/T_0}$.

Надежность аппаратуры с возможностью ее восстановления характеризуется коэффициентом готовности аппаратуры

$$A_r = T_0 / (T_0 + T_v),$$

где T_0 — среднее время безотказной работы аппаратура,

T_v — время восстановления аппаратуры.

Пример решения задачи

Задача. В приемную антенну стационарной станции спутниковой связи, работающей с геостационарным КА, два раза в год шумы Солнца попадают в основной лепесток диаграммы направленности на время 30 мин в день в течении 5 дней подряд в дни как весеннего так и осеннего равноденствий. При этом прием сигналов с геостационарного КА становится невозможным.

Определить готовность (относительно с время работоспособности) спутниковых линий связи, ограничиваемую воздействием шумов Солнца.

Решение. $T_{\text{п}} = 0,5 \text{ часа} \times 10 = 5 \text{ часов}$.

Готовность (надежность) линий спутниковой связи за год работы составляет $T = 365$ дней. Значит готовность линии связи будет определена как:

$$A = \frac{T - T_{\text{п}}}{T} = \frac{365 \cdot 24 - 5}{365 \cdot 24} = 0,999.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Для устройства, установленном на борту летательного аппарата, принимаем, что за время полета летательного аппарата, которая составляет 5 часов, вероятность безотказной работы должна быть не менее $P_0(T) = 0,999$. Определить требования, предъявляемые к надежности данного устройства (требуемое среднее время безотказной работы).

Задача 2. Для устройства, установленном на борту летательного аппарата, принимаем, что за время полета летательного аппарата, которая составляет 10 часов, вероятность безотказной работы должна быть не менее $P_0(T) = 0,998$. Определить требования, предъявляемые к надежности данного устройства (требуемое среднее время безотказной работы).

Задача 3. Для устройства, установленном на борту летательного аппарата, принимаем, что за время полета летательного аппарата, которая составляет 15 часов, вероятность безотказной работы должна быть не менее $P_0(T) = 0,997$. Определить требования, предъявляемые к надежности данного устройства (требуемое среднее время безотказной работы).

Задача 4. Судовая станция морской спутниковой связи должна создаваться без резервирования аппаратуры. Время восстановления отказавшей аппаратуры по международным требованиям составляет не более четырех суток (время движения судна до ближайшего порта, куда могут быть доставлены типовые элементы замены для неисправных блоков).

Для коэффициента готовности $A_r = 0,99$ определить требования к надежности (T_0) разрабатываемой аппаратуры станции спутниковой связи.

Задача 5. Судовая станция морской спутниковой связи должна создаваться без резервирования аппаратуры. Время восстановления отказавшей аппаратуры по международным требованиям составляет не более четырех суток (время движения судна до ближайшего порта, куда могут быть доставлены типовые элементы замены для неисправных блоков).

Для коэффициента готовности $A_r = 0,98$ определить требования к надежности (T_0) разрабатываемой аппаратуры станции спутниковой связи.

Задача 6. Наземная станция спутниковой связи должна иметь коэффициент готовности аппаратуры $A_r = 0,997$. Время восстановления аппаратуры

принять равным одним суткам (время доставки запчастей самолетом).

Определить требуемое среднее время безотказной работы, предъявляемое к разрабатываемой аппаратуре станции спутниковой связи.

Задача 7. Наземная станция спутниковой связи должна иметь коэффициент готовности аппаратуры $A_r = 0,998$. Время восстановления аппаратуры принять равным одним суткам (время доставки запчастей самолетом).

Определить требуемое среднее время безотказной работы, предъявляемое к разрабатываемой аппаратуре станции спутниковой связи.

Задача 8. Наземная станция спутниковой связи должна иметь коэффициент готовности аппаратуры $A_r = 0,999$. Время восстановления аппаратуры принять равным одним суткам (время доставки запчастей самолетом).

Определить требуемое среднее время безотказной работы, предъявляемое к разрабатываемой аппаратуре станции спутниковой связи.

3. Электромагнитная совместимость спутниковых телекоммуникационных систем

Спутниковые системы фиксированной связи и спутникового вещательного телевидения с использованием КА на геостационарной орбите могут использовать одни и те же полосы рабочих частот независимо от местоположения наземных станций.

Это оказывается возможным, если спутниковые телекоммуникационные системы используют КА в разных точках стояния на геостационарной орбите, с тем, чтобы сигналы от всех КА других спутниковых телекоммуникационных систем воздействовали на наземную станцию спутниковой связи по боковым лепесткам диаграммы направленности ее приемной антенны, а передающая антенна спутниковой наземной станции облучала все другие КА только боковыми лепестками своей диаграммы направленности. Диаметр апертуры антенны наземной станции определяется шириной диаграммы направленности основного лепестка антенны, которая, в свою очередь определяется величиной углового разноса соседних КА на геостационарной орбите.

На сегодня минимальный диаметр антенны наземной станции спутниковой связи ограничивается не энергетическими характеристиками ретранслятора КА, а техническими требованиями по обеспечению электромагнитной совместимости спутниковых

телекоммуникационных систем, работающих в одних и тех же полосах рабочих частот.

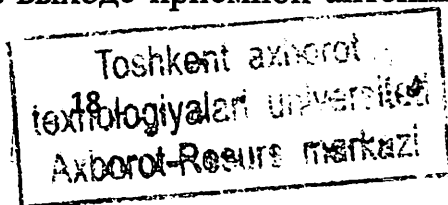
Для спутниковых систем фиксированной связи должны выполняться два критерия:

1. Уровень помех, создаваемой одной системой спутниковой связи, не должен увеличивать спектральную плотность шума на выходе приемной антенны наземной станции другой системы спутниковой связи более чем на 4%. При этом мешающие сигналы от системы спутниковой связи рассматриваются как шумовые с равномерной спектральной плотностью в полосе излучаемых сигналов.
2. Огибающая боковых лепестков передающей и приемной антенн наземной станции спутниковой связи относительно изотропного излучателя не должна превышать следующих величин в дБ при $d/\lambda \leq 100$:

$$G(\theta) \leq \begin{cases} 2 + 15 \lg(d/\lambda) \\ 49 - 10 \lg(d/\lambda) - 25 \lg \theta \\ 10 - 10 \lg(d/\lambda) \end{cases}$$

где θ есть угол, отсчитываемый от направления максимума диаграммы направленности антенны, d — диаметр апертуры, λ — длина волны.

Рассмотрим первый критерий. Обозначим спектральную плотность помехи от другой системы спутниковой связи на выходе приемной антенны как



$N_{\text{оп}}$ и мощность помехи в полосе сигнала Δf как $P_{\text{п}} = N_{\text{оп}} \Delta f$.

Отношение мощности принимаемого полезного сигнала P_c к мощности собственного шума и помехи в полосе принимаемого сигнала на выходе приемной антенны должно удовлетворять соотношению

$$\frac{P_c}{N_0 \Delta f + N_{\text{оп}} \Delta f} = h_{\text{пор}}^2,$$

где $h_{\text{пор}}^2$ — требуемое пороговое отношение сигнал-шум для обеспечения заданной вероятности ошибки на бит.

Имеем следующие равенства:

$$\frac{P_c}{P_{\text{п}} (1 + N_0 / N_{\text{оп}})} = h_{\text{пор}}^2;$$

$$\frac{P_c}{P_{\text{п}}} = 26 h_{\text{пор}}^2;$$

$$\frac{P_c}{P_{\text{п}}} = 14 + h_{\text{пор}}^2, \text{ дБ},$$

где $N_{\text{оп}} / N_0 = 0,04$.

Отсюда, принимая для вероятности ошибки на бит $p = 10^{-6}$ и кодирования без избыточности $h_{\text{пор}}^2 = 12$ дБ, получим требование для расчета защитного отношения сигнал - помеха $P_c / P_{\text{п}} > 26$ дБ.

Для помехоустойчивого кодирования сообщений с $h_{\text{пор}}^2 = 6$ дБ получим требование $P_c / P_{\text{п}} > 20$ дБ.

Пример решения задачи

Задача. Для однородных спутниковых систем фиксированной связи с идентичными наземными станциями спутниковой связи вывести выражение для защитного отношения сигнал - помеха в зависимости от коэффициента усиления приемных и передающих антенн наземных станций спутниковой связи при следующих условиях:

- дальности связи от всех наземных станций до КА одинаковы;
- среда распространения сигналов без потерь;
- все КА разных систем спутниковой связи одинаковы и имеют угловой разнос на геостационарной орбите $\Delta\varphi$.

Определить минимальный диаметр антенны наземной станции с круглой апертурой при следующих условиях:

- диапазон частот 11/14 ГГц;
- $\Delta\varphi = 2,5^\circ$;
- требуемое защитное отношение сигнал— помеха $P_s/P_n > 20$ дБ;
- уровни боковых лепестков диаграммы направленности антенны соответствуют выражению условия относительно изотропного излучателя.

При таких же условиях определить минимальный диаметр антенны наземной станции, работающей в диапазоне частот 20/30 ГГц.

Решение. Методика расчета электромагнитной совместимости

спутниковых систем связи основана на расчете помехи от одной другой системы спутниковой связи с КА, имеющего ближайший угловой разнос на геостационарной орбите относительно рассматриваемого КА.

Схема возникновения помехи в приемнике станции № 2 от излучений станции № 1 другой спутниковой системы связи показана на рис. 3.1.

Станции № 1 и № 2 двух спутниковых систем связи работают на одних и тех же рабочих частотах. Сигнал от мешающей станции № 1 приходит в приемник станции № 2 по двум путям.

Первый путь: станция № 1 - КА2 - станция № 2.

Второй путь: станция № 1 - КА1 - станция № 2.

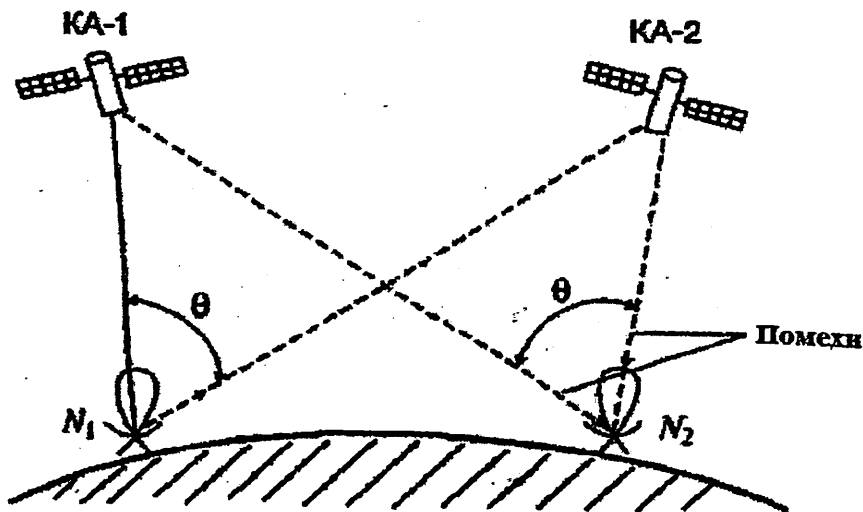


Рис. 3.1. Пути помех станции №2 от станции №1

По условиям задачи для идентичных станций спутниковой связи и одинаковых дальностей от станций спутниковой связи до КА при расчетах отношений сигнал - помеха достаточно учитывать только коэффициенты усиления приемных и передающих антенн наземных станций по основному и боковым лепесткам диаграмм

направленностей. Диаграмму направленности антенн КА принимаем достаточно широкой, так что ее коэффициент усиления одинаков для направлений на станцию № 1 и № 2.

Мощность полезного сигнала на выходе приемной антенны станции № 2 пропорциональна величине $G_{\Pi} G_{\text{пр}}$, где $G_{\Pi} = G_{\Pi}(0)$ и $G_{\text{пр}} = G_{\text{пр}}(0)$ коэффициенты усиления передающей и приемной антенны наземной станции в основном лепестке диаграммы направленности антенн. Мощность помехи по первому пути пропорциональна $G_{\Pi}(\theta) G_{\text{пр}}$, по второму пути - $G_{\Pi} G_{\text{пр}}(\theta)$, где $G_{\Pi}(\theta)$ и $G_{\text{пр}}(\theta)$ коэффициенты усиления передающей и приемной антенны наземных станций в направлении θ (по боковым лепесткам диаграммы направленности антенн). Тогда для защитного отношения сигнал - помеха справедливо соотношение

$$\frac{P_c}{P_{\Pi}} = \frac{G_{\Pi} G_{\text{пр}}}{G_{\Pi}(\theta) G_{\text{пр}} + G_{\Pi} G_{\text{пр}}(\theta)}$$

В частности, если помеха по пути № 1 отсутствует, что соответствует случаю

непосредственного спутникового телевидения, защитное отношение сигнал—помеха имеет простой вид $P_c/P_n = G_{пр}/G_{пр}(\theta)$. Для нашего случая телекоммуникационной спутниковой системы выражение для защитного отношения сигнал - помеха целесообразно привести к аналогичному виду.

Обозначим частоту приема наземной станции через $f_{пр}$, частоту передачи - через $f_{п}$.

Тогда $G_{пр}/G_{п} = (f_{пр}/f_{п})^2$ и можно записать

$$\frac{P_c}{P_n} = \frac{G_{пр}/G_{пр}(\theta)}{1 + [G_{п}(\theta)/G_{пр}(\theta)](f_{пр}/f_{п})^2}$$

Из выражения условия относительно изотропного излучателя для уровня боковых лепестков можно определить, что отношение $G_{пр}/G_{пр}(\theta)$ зависит от отношения длин волн на передачу и прием при одном и том же значении θ , так что $G_{пр}/G_{пр}(\theta) = f_{пр}/f_{п}$ и получим

$$\frac{P_c}{P_n} = \frac{G_{пр}/G_{пр}(\theta)}{1 + (f_{пр}/f_{п})^3}$$

Для диапазона частот 11/14 ГГц, где 11 ГГц есть частота приема наземной станции, 14 ГГц — частота передачи наземной станции, можно записать:

$$\frac{P_c}{P_n} = 0,485 \frac{G_{пр}}{G_{пр}(\theta)}$$

Для диапазона частот 20/30 ГГц:

$$\frac{P_c}{P_n} = 0,3 \frac{G_{\text{пр}}}{G_{\text{пр}}(\theta)}$$

Из этих уравнений для защитного отношения $P_c/P_n = 20$ дБ необходимо определить диаметры антенн наземных станций, которые обеспечивают это заданное защитное отношение. Выразим коэффициент усиления приемной антенны с круглой апертурой через ее диаметр d . Имеем $G_{\text{пр}} = k_{\text{ин}} \pi^2 (d/\lambda)$, где $k_{\text{ин}}$ - коэффициент использования поверхности антенны. Для типового значения $k_{\text{ин}} = 0,6$ получим в дБ: $G_{\text{пр}} = 7,7 + 20 \lg (d/\lambda)$.

Для $G_{\text{пр}}(\theta)$ имеем $G_{\text{пр}}(\theta) = 49 - 10 \lg (d/\lambda) - 25 \lg \theta$. Тогда $G_{\text{пр}}/G_{\text{пр}}(\theta) = -41,3 + 30 \lg (d/\lambda) + 25 \lg \theta$.

Можно принять, что угол θ между двумя КА относительно наземной станции близок к углу $\Delta\varphi$ между двумя КА относительно центра Земли, так что в выше написанном выражении можно записать по условиям задачи $\theta = 2,5^\circ$. Окончательно найдем $d = 1,77$ м для диапазона частот 11/14 ГГц, и $d = 1,15$ м для диапазона частот 20/30 ГГц.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Согласно предыдущего рассмотренного примера задачи определить минимальный диаметр антенны наземной станции с круговой апертурой при следующих условиях:

- диапазон частот в районе 4/6 ГГц,
- $\Delta\varphi = 5,5^\circ$;
- требуемое защитное отношение сигнал—помеха $P_s/P_n > 25$ дБ;

При таких же условиях определить минимальный диаметр антенны наземной станции, работающей в диапазоне частот 11/14 ГГц.

Задача 2. Согласно предыдущего рассмотренного примера задачи необходимо определить минимальный диаметр антенны наземной станции с круговой апертурой при следующих условиях:

- диапазон частот в районе 11/14 ГГц,
- $\Delta\varphi = 3,5^\circ$;
- требуемое защитное отношение сигнал—помеха $P_s/P_n > 15$ дБ;

При таких же условиях определить минимальный диаметр антенны наземной станции, работающей в диапазоне частот 20/30 ГГц.

Задача 3. Рассматривается приемник наземной станции приема спутниковых телевизионных сигналов на частоте 12 ГГц. КА систем непосредственного телевизионного вещания располагаются на геостационарной орбите с угловым разнесом 6° .

Определить диаметры антенн наземного приемника с круглой апертурой, при которых все КА непосредственного ТВ вещания будут попадать в нули диаграммы направленности антенны приемника.

Задача 4. Рассматривается приемник наземной станции приема спутниковых телевизионных сигналов на частоте 4 ГГц. КА систем непосредственного телевизионного вещания располагаются на геостационарной орбите с угловым разносом 6° .

Определить диаметры антенн наземного приемника с круглой апертурой, при которых все КА непосредственного ТВ вещания будут попадать в нули диаграммы направленности антенны приемника.

Задача 5. Рассматривается приемник наземной станции приема спутниковых телевизионных сигналов на частоте 6 ГГц. КА систем непосредственного телевизионного вещания располагаются на геостационарной орбите с угловым разносом 6° .

Определить диаметры антенн наземного приемника с круглой апертурой, при которых все КА непосредственного ТВ вещания будут попадать в нули диаграммы направленности антенны приемника.

Задача 6. Аналогично рассматривается приемник наземной приемной спутниковой станции для приема телевизионных сигналов на частоте 4 ГГц. КА систем непосредственного телевизионного вещания располагаются на геостационарной орбите с угловым разносом 15° .

Определить необходимый диаметр антенны наземного приемника с круглой апертурой, при

которых все КА непосредственного ТВ вещания будут попадать в нули диаграммы направленности антенны приемника.

Задача 7. Аналогично рассматривается приемник наземной приемной спутниковой станции для приема телевизионных сигналов на частоте 11 ГГц. КА систем непосредственного телевизионного вещания располагаются на геостационарной орбите с угловым разносом 10° .

Определить необходимый диаметр антенны наземного приемника с круглой апертурой, при которых все КА непосредственного ТВ вещания будут попадать в нули диаграммы направленности антенны приемника.

Задача 8. Аналогично рассматривается приемник наземной приемной спутниковой станции для приема телевизионных сигналов на частоте 12 ГГц. КА систем непосредственного телевизионного вещания располагаются на геостационарной орбите с угловым разносом 9° .

Определить необходимый диаметр антенны наземного приемника с круглой апертурой, при которых все КА непосредственного ТВ вещания будут попадать в нули диаграммы направленности антенны приемника.

4. Доплеровское смещение частоты сигналов

Эффект Доплера является одним из особенностей систем связи через ИСЗ, вызываемое движением спутника относительно ЗС. Обозначим через v_r ту компоненту скорости движения ИСЗ, которая совпадает с линией радиосвязи и условимся считать величину v_r отрицательной в случае уменьшения расстояния между ИСЗ и ЗС и положительной при увеличении этого расстояния.

Известно, что при движении источника сигнала со скоростью $\pm v_r$ частота принимаемых колебаний f связана с частотой излучаемых колебаний f_0 соотношением

$$f = f_0 / (1 \pm v_r/c)$$

где c – скорость света.

Обычно всегда выполняется условие $v_r/c \ll 1$, поэтому при движении источника сигнала в сторону приемника $f = f_0 / (1 \pm v_r/c)$. Отсюда изменение частоты, вызванное эффектом Доплера.

$$\delta f_0 = f - f_0 = \pm f_0 v_r/c.$$

Наиболее сильно эффект Доплера будет проявляться в системах связи, использующих не геостационарные орбиты.

В системах связи с геостационарными орбитами эффект Доплера может иметь место при коррекции положения спутника на орбите.

Отметим, что эффект Доплера приводит не только к изменению частоты излучаемых колебаний, а следовательно, и несущей частоты, но и вызывает

деформацию спектра передаваемого сообщения. Так, если осуществлялась модуляция с частотой F , то принятое колебание на выходе детектора с учетом эффекта Доплера будет иметь частоту $f = f(1 \pm v_r/c)$. Поэтому при модуляции колебаниями с частотами $f_1 = 1$ кГц и $f_2 = 10^4$ кГц на выходе детектора при $v_r/c = 10^{-5}$ получим соответственно частоты 1000 ± 10^{-2} Гц и $10^7 \pm 100$ Гц.

Пример решения задачи

Задача. За счет малого перемещения геостационарного КА в направлении север—юг дальность связи до наземной станции меняется по синусоидальному закону с периодом 24 часа и амплитудой 100 км.

Определить максимальный доплеровский сдвиг и уравнение для доплеровского смещения частоты как функции времени. Определить доплеровский сдвиг на частоте радиосигнала 11 ГГц.

Решение. Дальность связи $r = A \sin(2\pi ft)$, где $A = 100$ км; $f = 1/T$, где $T = 24$ часа. Скорость изменения

дальности
$$V = \frac{dr}{dt} = A \frac{2\pi}{T} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right).$$
 Максимальное

значение скорости есть
$$V_{\text{макс}} = A \frac{2\pi}{T} = 7,3 \text{ м/с}$$

Отсюда максимальный доплеровский сдвиг частоты есть $\Delta f_d = f \frac{V_{\text{МАКС}}}{c} = 2,4 \cdot 10^{-8} f$, где f - частота радиосигнала. Относительный доплеровский

сдвиг частоты равен $\frac{\Delta f_d(t)}{f} = 2,4 \cdot 10^{-8} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$.

На частоте 11 ГГц максимальный доплеровский сдвиг частоты равен 264 Гц.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Выразите доплеровское смещение частоты Δf_d в зависимости от значения радиальной скорости v движения передатчика или приемника двумя способами:

- через частоту радиосигнала и отношение v/c скорости света;

- через отношение v/λ , где λ — длина волны.

Задача 2. Определить максимальный доплеровский сдвиг радиосигнала при авиационной радиосвязи на частоте 300 МГц и скорости самолета 800 км/ч.

Задача 3. Определить максимальный доплеровский сдвиг радиосигнала при авиационной радиосвязи на частоте 700 МГц и скорости самолета 900 км/ч.

Задача 4. Определить максимальный доплеровский сдвиг радиосигнала при авиационной радиосвязи на частоте 950 МГц и скорости самолета 840 км/ч.

Задача 5. Определить максимальный доплеровский сдвиг радиосигнала при авиационной радиосвязи на частоте 900 МГц и скорости самолета 250 км/ч.

Задача 6. Изобразите примерный ход во времени относительного доплеровского смещения частоты для низколетящего КА при его прохождении в плоскости, проходящей через наземную космическую станцию при следующих исходных данных:

- высота круговой орбиты КА 700 км;
- скорость движения КА 8 км/с.
- частота радиосигнала равна 2 ГГц.

Задача 7. Изобразите примерный ход во времени относительного доплеровского смещения частоты для низколетящего КА при его прохождении в плоскости, проходящей через наземную космическую станцию при следующих исходных данных:

- высота круговой орбиты КА 1500 км;
- скорость движения КА 8,3 км/с.
- частота радиосигнала равна 4 ГГц.

Задача 8. Изобразите примерный ход во времени относительного доплеровского смещения частоты для низколетящего КА при его прохождении в плоскости, проходящей через наземную космическую станцию при следующих исходных данных:

- высота круговой орбиты КА 3600 км;
- скорость движения КА 8,3 км/с.
- частота радиосигнала равна 12 ГГц.

5. Выражение радиотехнических величин в децибелах

Очень большие и очень малые величины в радиотехнике принято выражать в децибелах. В децибелах отношение двух величин $N = N_1/N_2$, где N_1 и N_2 , имеют одинаковую размерность, выражают следующим образом: N [дБ] = $10 \lg N$.

Например, отношение мощностей сигнал-шум $h^2 = P_c/P_{ш}$ в децибелах есть h^2 [дБ] = $10 \lg (P_c/P_{ш})$. Для видеоимпульсов и шумов в видеотракте можно записать $P_c/P_{ш} = U_c^2/U_{ш}^2$, где $P_c = U_c^2$ на единичном сопротивлении, $U_{ш}$ — эффективное напряжение шума. Тогда

$$h^2 \text{ [дБ]} = 10 \lg \frac{P_c}{P_{ш}} = 10 \lg \left(\frac{U_c}{U_{ш}} \right)^2 = 20 \lg \frac{U_c}{U_{ш}}$$

Во многих случаях удобно положить в отношении двух величин N_1/N_2 величину $N_2 = 1$ (1 Вт). Тогда, соответственно N [дБ] имеет размерность дБВт.

Если N_2 , положить равной, например, одному милливатту, то размерность N [дБ] записывается как дБм (децибел милливатт).

Пример решения задачи

Задача. Вычислить с помощью калькулятора значения в дБ чисел $N = 1, 2, 3, 10$, округлить эти значения до целых чисел и записать в табл. 5.1:

Таблица 5.1

N	1	2	3	10
Точное значение N [дБ]				
Округленное до целого значения N дБ]				

Используя представление N в виде произведения или частного отделения нескольких чисел, найти с помощью табл. 5.2 округленные значения N в дБ.

Таблица 5.2

N	4	5	6	8	12	1,25	1,5
N, дБ							

Решение. Результаты решения представлены в табл. 5.3 и 5.4.

Таблица 5.3

N	1	2	3	10
Точное значение N [дБ]	0	3,01	4,77	10
Округленное до целого значения N [дБ]	0	3	5	10

Таблица 5.4

N	4	5	6	8	12	1,25	1,5
N, дБ	6	7	8	9	11	1	2

$$10 \lg 4 = 10 \lg (2 \cdot 2) = 10 \lg 2 + 10 \lg 2 = 6 \text{ дБ}$$

$$10 \lg 5 = 10 \lg (10/2) = 10 \lg 10 - 10 \lg 2 = 7 \text{ дБ}$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Вычислить с помощью калькулятора значения в дБ чисел N округлить эти значения до целых чисел и записать в табл. 5. 5:

Таблица 5.5

N	1,5	2,7	3,8	11
Точное значение N [дБ]				
Округленное до целого значения N [дБ]				

Используя представление N в виде произведения или частного отделения нескольких чисел, найти с помощью табл. 5.6 округленные значения N в дБ.

Таблица 5.6

N	4,5	5,5	6,7	8,9	12,4	1,75	1,9
N, дБ							

Задача 2.

1. Выразить мощность излучаемого сигнала в дБВт и дБм для заданной излучаемой мощности P , Вт, указанной в табл. 5.7.

Таблица 5.7

P , Вт	1	25	30	50	100	1000	0,5
P , дБВт							

2. Выразить постоянную Больцмана

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц} \cdot \text{град}}$$

в децибелах.

3. Пик-фактор телефонного сигнала $y = 6$ (отношение максимального значения амплитуды сигнала к среднеквадратичному значению амплитуды).

Найти значение пик-фактора y в дБ.

Задача 3.

1. Выразить мощность излучаемого сигнала в дБВт и дБм для заданной излучаемой мощности P , Вт, указанной в табл. 5.8.

Таблица 5.8

P , Вт	2	27	35	58	150	1100	0,9
P , дБВт							

2. Выразить постоянную Больцмана в децибелах.
3. Пик-фактор телефонного сигнала $\gamma = 7$ (отношение максимального значения амплитуды сигнала к среднеквадратичному значению амплитуды).
Найти значение пик-фактора γ в дБ.

Задача 4.

1. Выразить мощность излучаемого сигнала в дБВт и дБм для заданной излучаемой мощности P , Вт, указанной в табл. 5.9.

Таблица 9

P , Вт	3	25	37	59	120	1300	1,8
P , дБВт							

2. Выразить постоянную Больцмана в децибелах.
3. Пик-фактор телефонного сигнала $\gamma = 9$ (отношение максимального значения амплитуды сигнала к среднеквадратичному значению амплитуды).
Найти значение пик-фактора γ в дБ.

6. Мощность принятого сигнала и шума

Основная задача расчета канала – определить, что система связи будет работать согласно плана, т.е. качество сообщений (достоверность передачи) будет удовлетворять заданным требованиям. Расчет канала отслеживает, все потери и прибыли передаваемого сигнала. Вычисления показывают, чему равно отношение энергии сигнала в приемнике и какой запас прочности.

В системах радиосвязи несущая распространяется от передатчика с помощью передающей антенны. Приемная антенна принимает сигнал и преобразует в электрический сигнал. Уравнение, связывающее приемник с передатчиком, обычно начинается с рассмотрения ненаправленного источника радиоизлучения, равномерно передающего в радиан. Поскольку площадь поверхностной сферы равна $4\pi d^2$, то плотность мощности $p(d)$ сферы в источнике излучения связана с переданной мощностью P_t .

$$p(d) = \frac{P_t}{4\pi d^2}, \text{ Вт/м}^2$$

Для d , значение превышающая длину распространения волны, извлеченную на принимающей антенне, равна

$$P_r = p(d) A_{er} = \frac{P_t A_e}{4\pi d^2}$$

Параметр A_e – параметр захвата передающей антенны.

Параметр антенны, который связывает выходную мощность с мощностью изотропного излучателя и именуется коэффициентом направленного действия (КНД).

Таким образом, максимальный коэффициент направленного действия антенны можно рассматривать как результат концентрации изотропного излучателя в некоторой ограниченной области, и тем самым определяется эффективная излучаемая мощность изотропного излучателя EIRP.

Если антенна передатчика имеет коэффициент направленного действия, то мы заменяем P_t на EIRP, что дает следующее:

$$P_r = \text{EIRP} \frac{A_e}{4\pi d^2}$$

И это все определяет как:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$$

Эффективность изотропной антенны можно вычислить, предположив что $G=1$. Что позволяет получить следующее выражение:

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

И это дает возможность нахождения принятого сигнала P_r .

$$P_r = \frac{\text{EIRP}}{(4\pi d/\lambda)^2}$$

Здесь совокупность данных $(4\pi d/\lambda)$ называется потерями в свободном пространстве, и обозначается как L_s . Если для принятия сигнала используется не изотропная антенна, то мы определим сигнал, сконцентрированный в одном направлении и имеющий более общую формулу подсчета:

$$P_r = \text{EIRP} * G_r * \lambda / (4\pi d)^2$$

Пример решения задачи

Задача. Предложите эксперимент для потери в тракте L_s при частотах $f_1 = 30$ МГц и $f_2 = 60$ МГц, если расстояние между передатчиком и приемником равно 100 км. В обоих случаях необходимо определить эффективную площадь принимающей антенны и вычислить потери в тракте.

Решение. Два канала измерения L_s для частот f_1 и f_2 показаны на рис. 2.

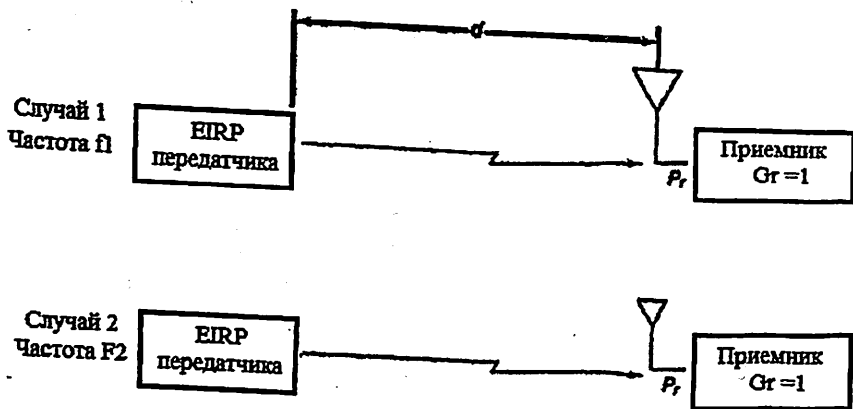


Рис. 2. Предлагаемый элемент измерения потерь для двух различных частот

Для обоих приемников удельная мощность одинакова и равна следующему:

$$P_r = \frac{\text{EIRP} A_{er}}{4\pi r^2}$$

Это снижение удельной происходит исключительно в следствии закона обратных квадратов. Действительная мощность, полученная каждым приемником, находится, как показано на рис. 2, постпредством умножения плотности мощности в приемнике на эффективную плотность собирающей антенны A_{er} . Поскольку потери в тракте определены для $G_r = 1$, эффективные площади A_{er1} и A_{er2} для частот f_1 и f_2 :

$$A_{er} = \frac{\lambda^2}{4\pi} = \frac{(c/f)^2}{4\pi}$$

$$A_{\text{er1}} = \frac{(3 \times 10^8 / 30 \times 10^6)^2}{4\pi} = 8 \text{ м}^2$$

$$A_{\text{er2}} = \frac{(3 \times 10^8 / 60 \times 10^6)^2}{4\pi} = 2 \text{ м}^2$$

Далее для обоих случаев находим потери в тракте:

$$L_{r1} = 10 \times \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda_1} \right)^2 = 10 \times \lg \left(\frac{4\pi \times 10^5}{3 \times 10^8 / 30 \times 10^6} \right)^2 = 102 \text{ дБ}$$

$$L_{r2} = 10 \times \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda_2} \right)^2 = 10 \times \lg \left(\frac{4\pi \times 10^5}{3 \times 10^8 / 60 \times 10^6} \right)^2 = 108 \text{ дБ}$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Расстояние между передатчиком и приемником составляет 100 км, и связь осуществляется на частотах $f_1 = 30$ МГц и $f_2 = 65$ МГц. В обоих случаях необходимо определить эффективную площадь принимающей антенны и вычислить потери в тракте L_s в дБ.

Задача 2. Расстояние между передатчиком и приемником составляет 150 км, и связь осуществляется на частотах $f_1 = 35$ МГц и $f_2 = 68$ МГц. В обоих случаях необходимо определить

эффективную площадь принимающей антенны и вычислить потери в тракте L_s в дБ.

Задача 3. Расстояние между передатчиком и приемником составляет 70 км, и связь осуществляется на частотах $f_1 = 28$ МГц и $f_2 = 67$ МГц. В обоих случаях необходимо определить эффективную площадь принимающей антенны и вычислить потери в тракте L_s в дБ.

Задача 4. Чему равно значение потерь в свободном пространстве для несущей частоты 100 МГц и расстоянии 300 км.

Задача 5. Чему равно значение потерь в свободном пространстве для несущей частоты 250 МГц и расстоянии 200 км.

Задача 6. Чему равно значение потерь в свободном пространстве для несущей частоты 450 МГц и расстоянии 70 км.

Задача 7. Выходная мощность передатчика равна 10 Вт. Пусть передающая и принимающая антенна является изотропными. Вычислить принятую мощность в дБВт.

Задача 8. Выходная мощность передатчика равна 20 Вт. Пусть передающая и принимающая антенна является изотропными. Вычислить принятую мощность в дБВт.

Задача 9. Выходная мощность передатчика равна 30 Вт. Пусть передающая и принимающая антенна является изотропными. Вычислить принятую мощность в дБВт.

Задача 10. Выходная мощность передатчика равна 40 Вт. Чему равна принятая мощность в дБВт?

Задача 11. Для изотропной передающей антенны, излучающая мощность P_n и свободного пространства без потерь, выведите формулу для плотности потока мощности через единичную площадку на расстоянии r от передающей антенны.

7. Мощность теплового шума

Тепловой шум вызывается тепловым движением электронов во всех входящих элементах. Он создается в местах соединения антенны и приемника и в первых каскадах усиления. Спектральная плотность мощности шума постоянна для всех частот, что определило названием белый шум. Процесс теплового шума в приемниках системы связи моделируется как процесс аддитивного белого гауссового шума.

Физической моделью теплового шума - это генератор шума со среднеквадратичским напряжением холостого хода, равным $4kTW$, где k равна значению $1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К, T -температура, Кельвин, W - ширина полосы пропускания, Герц, R -сопротивление, Ом.

Максимальная мощность теплового шума N , которую можно подать с выхода генератора шума на вход усилителя, равна

$$N = kTW$$

Следовательно, максимальная номинальная спектральная плотность мощности шума N_0 равна

$$N_0 = \frac{N}{W} = kT$$

Пример решения задачи

Задача. Используя генератор со среднеквадратическим напряжением, равным $4kTW$, покажите что максимальная мощность шума, которую можно подать из такого источника на усилитель, равна $N_j = kTW$.

Решение. Теорема из области теории электрических цепей утверждает, что максимальная мощность подается на нагрузку, если полный импеданс нагрузки равен комплексному импедансу генератора. В нашем случае импеданс генератора — это активное сопротивление, R , следовательно, условие передачи максимальной мощности удовлетворяется, если сопротивление усилителя равно R . Таким образом, мощность шума, поданную на вход усилителя, можно выразить следующим образом:

$$N_j = \frac{(\sqrt{4kT^0WR}/2)^2}{R} = \frac{4kT^0WR}{4R} = kT^0W$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Входное сопротивление усилителя равно 50 Ом, усиление – 60 дБ, а ширина полосы – 10 кГц. Если со входом соединяется сопротивлением 50 Ом с температурой 290 К, среднеквадратическое значение мощности шума на выходе равно 10 мкВ. Определить эффективную шумовую температуру усилителя.

Задача 2. Входное сопротивление усилителя равно 75 Ом, усиление – 40 дБ, а ширина полосы – 25 кГц. Если со входом соединяется сопротивлением 75 Ом с температурой 295 К, среднеквадратическое значение мощности шума на выходе равно 15 мкВ. Определить эффективную шумовую температуру усилителя.

Задача 3. Входное сопротивление усилителя равно 300 Ом, усиление – 50 дБ, а ширина полосы – 20 кГц. Если со входом соединяется сопротивлением 300 Ом с температурой 290 К, среднеквадратическое значение мощности шума на выходе равно 20 мкВ. Определить эффективную шумовую температуру усилителя.

Задача 4. Входное сопротивление усилителя равно 50 Ом, усиление – 90 дБ, а ширина полосы – 30 кГц. Если со входом соединяется сопротивлением 50 Ом с температурой 290 К, среднеквадратическое значение мощности шума на выходе равно 25 мкВ.

Определить эффективную шумовую температуру усилителя.

Задача 5. Входное сопротивление усилителя равно 75 Ом , усиление – 45 дБ , а ширина полосы – 20 кГц . Если со входом соединяется сопротивлением 75 Ом с температурой 293 К , среднеквадратическое значение мощности шума на выходе равно 15 мкВ . Определить эффективную шумовую температуру усилителя.

Задача 6. Входное сопротивление усилителя равно 140 Ом , усиление – 65 дБ , а ширина полосы – 20 кГц . Если со входом соединяется сопротивлением 140 Ом с температурой 290 К , среднеквадратическое значение мощности шума на выходе равно 35 мкВ . Определить эффективную шумовую температуру усилителя.

Задача 7. Входное сопротивление усилителя равно 75 Ом , усиление – 48 дБ , а ширина полосы – 25 кГц . Если со входом соединяется сопротивлением 75 Ом с температурой 297 К , среднеквадратическое значение мощности шума на выходе равно 45 мкВ . Определить эффективную шумовую температуру усилителя.

Задача 8. Входное сопротивление усилителя равно 50 Ом , усиление – 75 дБ , а ширина полосы – 65 кГц . Если со входом соединяется сопротивлением 50 Ом с температурой 290 К , среднеквадратическое

значение мощности шума на выходе равно 40 мкВ.
Определить эффективную шумовую температуру
усилителя.

8. Основные параметры радиолиний, определяющие энергетические потенциалы

Энергетический потенциал радиолинии определяется величиной отношения энергии бита E_b к спектральной плотности шумов N_0 ($h_2 = E_b / N_0$) на выходе приемной антенны радиостанции в зависимости от параметров радиолинии: мощности излучения передающей станции, коэффициентов усиления передающей и приемной антенн, дальности радиосвязи, условий распространения радиосигнала, уровня шумов приемной системы, методов модуляции и кодирования.

Если передающее устройство с изотропной антенной излучает в свободное пространство мощность P_n , то в точке приема, находящейся на расстоянии r от передатчика, плотность потока мощности, проходящую через единичную площадку (вектор Пойнтинга) есть $p_0 = P_n / 4\pi r^2$. Если антенна передающей станции имеет коэффициент усиления G_n и максимум диаграммы направленности передающей антенны направлен на приемник, то $p_0 = P_n G_n / 4\pi r^2$, где $P_n G_n$ называется эквивалентной изотропно излучаемой мощностью (ЭИИМ).

Мощность, перехватываемая приемной антенной, есть $P_c = p_0 S_{пр}$, где $S_{пр}$ - эффективная площадь приемной антенны, P_c - мощность на выходе приемной антенны. Например, для параболической круглой приемной антенны с диаметром апертуры эффективная площадь антенны

есть $S_{\text{пр}} = k_{\text{ин}} \pi d/4$, где $k_{\text{ин}}$ — коэффициент использования поверхности антенны ($k_{\text{ин}} = 0,56$).

В общем случае $S_{\text{пр}} = (\lambda^2/4\pi) G_{\text{пр}}$, где λ — длина волны, $G_{\text{пр}}$ — коэффициент усиления приемной антенны.

Обозначим через L — коэффициент, характеризующий все потери в мощности сигнала на трассе распространения радиосигнала от антенны передатчика до выхода приемной антенны за счет поглощения радиосигнала в атмосфере Земли, рассогласования поляризационных характеристик передающей и приемной антенн, погрешностей наведения приемной и передающей антенн друг на друга, потерь при ослаблении сигнала при его замираниях и др. Тогда

$$P_c = \frac{P_n G_n S_{\text{пр}}}{4\pi r^2 L} = \frac{P_n G_n G_{\text{пр}} \lambda^2}{(4\pi r)^2 L}$$

Спектральную плотность шумов, приведенную к выходу приемной антенны, обозначим через N_0 , где $N_0 = kT$, где k — постоянная Больцмана, T — шумовая температура приемной системы. Тогда

$$\frac{P_c}{N_0} = \frac{P_n G_n G_{\text{пр}} \lambda^2}{(4\pi r)^2 kTL}$$

Умножим левую и правую часть равенства на τ_0 — длительность информационного бита, $\tau_0 = 1/R$, где R — скорость передачи информации.

$$\frac{P_c \tau_0}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} = h^2 = \frac{P_n G_n G_{\text{пр}} \lambda^2}{(4\pi r)^2 kTRL}$$

Соотношения между параметрами выше полученного уравнения принято записывать в децибелах следующим образом

$$P_{\Pi} G_{\Pi} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 - 228,6 - \frac{G_{\Pi P}}{T} + h^2 + R + L, \text{ дБ}$$

где $(4\pi r/\lambda)^2$ называется ослаблением сигнала в свободном пространстве для изотропных передающей и приемной антенн. Постоянная Больцмана $10 \lg k = -228,6$. Параметр $G_{\Pi P}/T$ называется добротностью приемной системы.

Шумовая температура приемной системы, приведенная к выходу приемной антенны, равна

$$T = T_A + \frac{(1 - \eta_{\Phi}) T_0}{\eta_{\Phi}} + \frac{T_{\Pi P}}{\eta_{\Phi}}$$

где T_A — шумовая температура, приемной антенны, η_{Φ} — коэффициент передачи фидера, T_0 — температура окружающей фидер среды, $T_{\Pi P}$ — шумовая температура приемника, которая фактически определяется шумами входного малошумящего усилителя (МШУ).

Величина $(1 - \eta_{\Phi}) T_0 = T_{\Phi}$ есть шумовая температура фидера, т.е. фидер на своем выходе создает мощность шумов в некоторой полосе частот Δf , равную $k T_{\Phi} \Delta f$. Потери мощности в фидере есть $L_{\Phi} = 1/\eta_{\Phi}$ и $T_{\Phi} = (1 - 1/L_{\Phi}) T_0$.

Шумы приемной антенны есть шумы принимаемых излучений внешних источников, таких как космические шумы, шумы атмосферы и Земли.

Внешние шумы характеризуют своей яркостной температурой T_j , определяемой термодинамической температурой эквивалентного абсолютно черного тела.

Шумовая температура в главном лепестке диаграммы направленности направленной приемной антенны есть $T_A = \eta_A T_j$, где $\eta_A = 0,7$ — доля мощности, излучаемой антенной в главном лепестке диаграммы направленности, как если бы приемная антенна использовалась в качестве передающей, T_j — яркостная температура внешних излучений, принимаемых в главном лепестке диаграммы направленности антенны.

Шумы атмосферы — это шумы трассы распространения радиосигнала, рассматриваемой как фидер. Тогда яркостная температура атмосферы есть $T_A = (1 - 1/L_A) T_m$, где $T_m = 275$ К, L_A — потери сигнала в атмосфере за счет поглощения радиосигнала.

В заключении рассмотрим распространение радиосигнала в однородной среде вдоль пространственной координаты x . Обозначим плотность потока мощности при $x = 0$ как P_{cc} , а в точке x как P_c . Уменьшение мощности сигнала вдоль оси x за счет его поглощения или рассеяния на малом отрезке пути dx есть $-dP_c/dx$. Тогда для однородной среды можно записать уравнение

$$-\frac{dP_c}{dx} = \mu P_c$$

где μ есть сечение процесса поглощения или рассеяния радиосигнала или удельный (погонный) коэффициент поглощения ($\mu = \mu_n$) или рассеяния ($\mu = \mu_p$), показывающей долю поглощенного или рассеянного сигнала.

Далее для простоты будем рассматривать только процесс поглощения радиосигнала. Величина $1/\mu$ (как будет видно при решении задачи) имеет размерность длины и называется длиной свободного пробега излучения в среде $\Lambda = 1/\mu$.

Пример решения задачи

Задача. Провести расчет энергетических потенциалов радиолиний «Ретранслятор КА— наземная станция» системы спутниковой связи с геостационарным КА и определить необходимый диаметр зеркальной приемной антенны стационарной наземной станции спутниковой связи при следующих условиях:

- диапазон частот 4/6 ГГц;
- угловая зона обслуживания КА $5^\circ \times 10^\circ$;
- станция спутниковой связи находится на краю зоны обслуживания и работает при угле места 5° ;
- мощность ствола ретранслятора в квазилинейном режиме равна 8 Вт. Ствол предназначен для организации 800 каналов с МДЧР со скоростью 64 кбит/с в каждом канале. Изучаемая мощность для станций, находящихся на краю зоны обслуживания увеличивается по сравнению со

станциями в середине зоны обслуживания. Принять, что для рассматриваемой наземной станции выделяется мощность ретранслятора 0,02 Вт;

- наземная станция одноканальная и работает на прием (и передачу) со скоростью 64 кбит/с. Требуемая вероятность ошибки на бит — не более 10^{-6} . Метод приема сигнала — когерентный.

Остальные необходимые параметры радиолинии рассчитать или задать при выполнении расчета энергетического потенциала радиолинии.

Решение. Для расчета радиолинии и требуемых параметров наземной станции используем выражение

$$P_n G_n = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 - 228,6 - \frac{G_{np}}{T} + h^2 + R + L, \text{ дБ}$$

Из этого выражения необходимо определить требуемый коэффициент усиления приемной антенны и затем диаметр антенны.

Определим численные значения параметров, входящих в уравнение:

$$\begin{aligned} G_n &= 44,44 - 10 \lg \theta_{01} - 10 \lg \theta_{02} = \\ &= 44,44 - 10 \lg 5^\circ - 10 \lg 10^\circ = 27,4 \text{ дБ} \end{aligned}$$

Наземная станция находится на краю зоны обслуживания, где принимаем, что коэффициент усиления антенны КА на 3 дБ меньше и равен 24,4

дБ. Для одной станции на ее рабочей частоте выделяется мощность 0,02 Вт. Тогда мощность составляет $P_{п} = 24 - 17 = 7,4$ дБВт.

- для угла места наземной станции 5° получаем дальность связи $r = 40000$ км и для частоты радиолинии на частоте 4 ГГц получаем

$$\left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) = 196,5 \text{ дБ};$$

- шумовая температура приемной системы

$$T = T_A + \frac{(1 - \eta_{\phi}) T_0}{\eta_{\phi}} + \frac{T_{\text{ПР}}}{\eta_{\phi}}$$

где $T_A = \eta_{\phi} T_{\text{я}}$, и $\eta_{\phi} = 0,75$, $T_A \approx T_{\text{я}}$, где T_A при угле места 5° равно 30 К., остальные шумы можно пренебречь. Шумы Земли, принимаемые боковыми лепестками ДН, можно пренебречь, считая уровень боковых лепестков очень малыми. Тогда $T_A \approx 35$ К.

Значение в фидере предположим равным 0,3 дБ, $T_0 = 290$ К, $T_{\text{п}} = 40$ К, тогда

$$T = 23 + \frac{1 - 0,93}{0,93} \cdot 290 + \frac{40}{0,93} = 90 \text{ К} \approx 100 \text{ К} = 20 \text{ дБК}$$

- для вероятности ошибки на бит 10^{-6} и кода без избыточности $h^2 = 10,5$ дБ + $L_{\text{дем}}$, где $L_{\text{дем}}$ — ослабление в демодуляторе за счет шумов. Принимаем $h^2 = 11$ дБ;
- $R = 64$ кбит/с;
- Потери L в радиолинии складываются за счет переизлучения шумов (≈ 1 дБ), перекрестных

помех в ретрансляторе ($\approx 0,3$ дБ для выбранного квазилинейного режима ретранслятора), рассогласования поляризационных характеристик антенны ретранслятора и наземных станций ($\approx 0,25$ дБ), неточности позиции антенны наземной станции на КА ($\approx 0,25$ дБ). Итого предположим $L = 1,8$ дБ.

Мы получаем

$$G_{\text{пр}} = -P_{\text{л}} G_{\text{п}} + \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 + T + h^2 + R + L =$$

$$= -7,4 + 196,5 - 228,6 + 20 + 11 + 48 + 1,8 = 41,3 \text{ дБ}$$

Имеем $G_{\text{пр}} = k_{\text{ип}} \pi^2 \left(\frac{d}{\lambda} \right)^2$. Отсюда $d = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{G_{\text{пр}}}{k_{\text{ип}}}}$.

Для $G_{\text{пр}} = 41,3$ дБ, $k_{\text{ип}} = 0,6$ получим $d = 3,6$ м.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Провести расчет энергетических потенциалов радиолиний «Ретранслятор КА— наземная станция» системы спутниковой связи с геостационарным КА и определить необходимый диаметр зеркальной приемной антенны стационарной наземной станции спутниковой связи при следующих условиях:

- диапазон частот 11/14 ГГц;
- угловая зона обслуживания КА $6^\circ \times 15^\circ$;
- станция спутниковой связи находится на краю зоны обслуживания и работает при угле места 7° ;

- мощность ствола ретранслятора в квазилинейном режиме равна 10 Вт. Ствол предназначен для организации 900 каналов с МДЧР со скоростью 128 кбит/с в каждом канале. Изучаемая мощность для станций, находящихся на краю зоны обслуживания увеличивается по сравнению со станциями в середине зоны обслуживания. Принять, что для рассматриваемой наземной станции выделяется мощность ретранслятора 0,05 Вт;
- наземная станция одноканальная и работает на прием (и передачу) со скоростью 128 кбит/с. Требуемая вероятность ошибки на бит — не более 10^{-9} . Метод приема сигнала — когерентный.

Остальные необходимые параметры радиолинии рассчитать или задать при выполнении расчета энергетического потенциала радиолинии.

Задача 2. Провести расчет энергетических потенциалов радиолиний «Ретранслятор КА— наземная станция» системы спутниковой связи с геостационарным КА и определить необходимый диаметр зеркальной приемной антенны стационарной наземной станции спутниковой связи при следующих условиях:

- диапазон частот 11/14 ГГц;
- угловая зона обслуживания КА $8^\circ \times 12^\circ$;
- станция спутниковой связи находится на краю зоны обслуживания и работает при угле места 3° ;

- мощность ствола ретранслятора в квазилинейном режиме равна 5 Вт. Ствол предназначен для организации 1200 каналов с МДЧР со скоростью 128 кбит/с в каждом канале. Изучаемая мощность для станций, находящихся на краю зоны обслуживания увеличивается по сравнению со станциями в середине зоны обслуживания. Принять, что для рассматриваемой наземной станции выделяется мощность ретранслятора 0,06 Вт;
- наземная станция одноканальная и работает на прием (и передачу) со скоростью 128 кбит/с. Требуемая вероятность ошибки на бит — не более 10^{-6} . Метод приема сигнала — когерентный.

Остальные необходимые параметры радиолинии рассчитать или задать при выполнении расчета энергетического потенциала радиолинии.

Задача 3. Для изотропной передающей антенны, излучающей мощность P_{Π} и свободного пространства без потерь выведите формулу для плотности потока мощности через единичную площадку на расстоянии r от передающей антенны.

$$-\frac{dP_c}{dx} = \mu P_c$$

Задача 4. Разделить в уравнении переменные и проинтегрировать обе части уравнения. Решить уравнение и найти выражение для P_c как функцию от P_{co} , μ и x .

2. Определить в дБ ослабление радиосигнала L_{Π}

$$L_{\Pi} = 10 \lg(P_{\text{со}}/P_c) = \gamma_{\Pi} x,$$

и найти выражение для γ_{Π} — удельного поглощения в дБ/км — (для x , выраженного в км) через ранее определенную величину μ .

Задача 5. Определить коэффициент усиления круглой зеркальной антенны на частоте 4 ГГц при КИП $k_{\text{ип}} = 0,6$ для диаметров апертуры, указанных в табл. 6.1.

Таблица 6.1

d, м	1,5	2,4	4,8	7	12
G, дБ					

Задача 6. Определить коэффициент усиления круглой зеркальной антенны на частоте 6 ГГц при КИП $k_{\text{ип}} = 0,65$ для диаметров апертуры, указанных в табл. 6.2.

Таблица 6.2

d, м	1,6	2,5	4,7	7,5	12,5
G, дБ					

Задача 7. Определить коэффициент усиления круглой зеркальной антенны на частоте 8 ГГц при КИП $k_{\text{ип}} = 0,65$ для диаметров апертуры, указанных в табл. 6.3.

Таблица 6.3

d, м	1,7	2,8	4,5	7,5	16
G, дБ					

Задача 8. Ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности в одной плоскости определяется выражением $\theta_n = 70\lambda/d$ град, где λ — длина волны, d — размер апертуры в данной плоскости.

Коэффициент усиления антенны, создающий эллиптический луч с шириной θ_{01} и θ_{02} по главным осям эллипса, определяется согласно рекомендациям МСЭ выражением:

$$G = 44,44 - 10 \lg \theta_{01} - 10 \lg \theta_{02}$$

Требуется определить:

1. Коэффициент усиления антенны ретранслятора КА:

- а) с глобальным лучом $\theta_0 = 17^\circ$;
- б) с эллиптическим лучом $5^\circ \times 11^\circ$.

2. Коэффициент усиления антенны с прямоугольной апертурой 15 см x 25 см на частоте 10 ГГц.

Задача 9. Определить яркостную температуру трассы распространения радиосигнала в дожде, если ослабление радиосигнала в дожде составляет: а) 10 дБ; б) 30 дБ.

Задача 10. Определить яркостную температуру трассы распространения радиосигнала в дожде, если ослабление радиосигнала в дожде составляет: а) 20 дБ; б) 40 дБ.

Задача 11. Определить яркостную температуру трассы распространения радиосигнала в дожде, если ослабление радиосигнала в дожде составляет: а) 30 дБ; б) 50 дБ.

Задача 12. В существующей системе спутниковой связи используются наземные станции с зеркальной антенной с добротностью $G_{\text{пр}}/T$. При модернизации наземной станции удалось уменьшить шумовую температуру приемной системы в два раза.

Можно ли теперь выпускать модернизированные станции с меньшим диаметром апертуры антенны?

Если да, то во сколько раз можно уменьшить диаметр апертуры антенны? Во сколько раз в этом случае нужно увеличить мощность передатчика наземной станции?

Задача 13. Для систем наземной радиосвязи с мобильными терминалами, которые характеризуются всенаправленными передающими и приемными антеннами базовой станции и терминалов (в азимутальной плоскости или во всей сфере), определить как при одинаковых $P_{\text{п}}$, g и L будет изменяться принимаемая мощность сигнала при изменении диапазона частот радиолинии.

Какие диапазоны частот: метровый, дециметровый, сантиметровый, миллиметровый или оптический являются наиболее выгодными при создании таких систем радиосвязи?

Задача 14. Для систем радиосвязи «Точка—точка» (радиорелейные линии связи, межспутниковая связь) фиксируются диаметры апертур передающих и приемных антенн исходя из-за массогабаритных ограничений.

Для мощности полезного сигнала на выходе приемной антенны, определить при одинаковых $P_{\text{п}}$, g и L как будет изменяться мощность принимаемого сигнала $P_{\text{с}}$ при переходе от метрового диапазона длин волн к дециметровому, сантиметровому, миллиметровому и оптическому диапазонам волн.

Как изменятся результаты сравнения при учете быстрого увеличения потерь сигнала L на частотах выше 10 ГГц?

9. Помехозащищенность радиолинии

Способность радиолинии работать в условиях воздействия естественных помех называется помехоустойчивостью. Способность радиолинии работать в условиях воздействия организованных помех называется помехозащищенностью.

Помехозащита разделяется на два класса: 1) пространственная помехозащита (за счет низкого уровня боковых лепестков приемной антенны, по которым действует помеха, формирование «нулей» диаграммы направленности приемной антенны в направлении на источник помех); 2) сигнальная помехозащита за счет широкополосных методов модуляции.

При сигнальной помехозащите спектр излучаемого сигнала искусственно расширяется за счет применения фазоманипулированных псевдослучайных сигналов (ПШС) или псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ).

Из теории потенциальной помехоустойчивости следует, что вероятность ошибки на бит определяется только энергией бита и не зависит от формы сигнала (с широкополосной модуляцией, узкополосной модуляцией и др.)

$$N_{\text{оп}} = P_{\text{п}} / \Delta f,$$

где P_{π} — мощность помехи на выходе приемной антенны, Δf — полоса частот широкополосного сигнала.

При $N_{\text{оп}} \gg N_0$ для значения $h^2_{\text{пор}}$ получим

$$h^2_{\text{пор}} = \frac{E_6}{N_{\text{оп}}} = \frac{P_c \tau_0}{P_{\pi} / \Delta f} = \frac{P_c \Delta f}{P_{\pi} R}$$

где $\tau_0 = 1/R$ — длительность информационного бита, R — скорость передачи информации.

Отсюда следует, что помехозащита радиолинии повышается при уменьшении скорости передачи информации R , расширении полосы частот широкополосного сигнала Δf и уменьшении величины $N_{\text{пор}}$.

Если на входе приемника ствола спутникового ретранслятора с прямой ретрансляцией сигналов возникла преднамеренная помеха, то она будет переизлучаться ретранслятором, затрачивая некоторую мощность ретранслятора на ее переизлучение. Этот эффект называется отбором мощности ретранслятора помехой. Воздействие преднамеренной помехи наиболее разрушительно, когда напряжение сигнала плюс помеха переводят усилитель мощности в режим насыщения. Чтобы не допустить работу усилителя мощности в режиме насыщения, а обеспечить его работу в линейном режиме, в состав усилительных трактов вводят АРУ.

Пример решения задачи

Задача. Станция помех находится на расстоянии 30 км от нашей станции спутниковой связи, работающей в режиме ППРЧ. Каково допустимое максимальное время передачи сообщений на одной частоте, чтобы исключить воздействие ретранслированных помех на радиолинию?

Решение. Время запаздывания ретранслированного сигнала составляет $\tau_3 = \Delta r/c$, где $\Delta r = 30$ км, c — скорость света. Тогда $\tau_3 = 100$ мкс и время передачи сигнала на одной частоте в данном режиме не должно превышать этой величины.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Станция помех находится на расстоянии 45 км от нашей станции спутниковой связи, работающей в режиме ППРЧ. Каково допустимое максимальное время передачи сообщений на одной частоте, чтобы исключить воздействие ретранслированных помех на радиолинию?

Задача 2. При передаче команд управления полетом летательного аппарата требуется обеспечить помехозащищенность передаваемых сигналов с вероятностью ложного формирования сигнала не более 10^{-9} . При помехоустойчивом способе

обеспечения защищенности канала, определить число избыточных бит кода с обнаружением ошибок, которое нужно передавать с каждым сигналом.

Задача 3. При передаче команд управления полетом летательного аппарата требуется обеспечить помехозащищенность передаваемых сигналов с вероятностью ложного формирования сигнала не более 10^{-6} . При помехоустойчивом способе обеспечения защищенности канала, определить число избыточных бит кода с обнаружением ошибок, которое нужно передавать с каждым сигналом.

Задача 4. Станция помех находится на расстоянии 75 км от нашей станции спутниковой связи, работающей в режиме ППРЧ. Каково допустимое максимальное время передачи сообщений на одной частоте, чтобы исключить воздействие ретранслированных помех на радиолинию?

Задача 5. Перевозимая станция помех системе спутниковой связи в диапазоне частот 8 ГГц для постановки помех спутниковому ретранслятору имеет антенну диаметром 5 м и мощность излучения 10 кВт. Определите ЭИИМ станции помех.

Задача 6. Перевозимая станция помех системе спутниковой связи в диапазоне частот 12 ГГц для постановки помех спутниковому ретранслятору имеет

антенну диаметром 15 м и мощность излучения 15 кВт. Определите ЭИИМ станции помех.

Задача 7. Для дополнительной защиты радиолинии от узкополосных помех при использовании ПШС предложите свои варианты построения устройства, вырезающего узкополосные помехи из спектра псевдошумового сигнала.


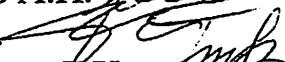

Литература

1. Системы радиосвязи. Учебник для вузов. Н.И. Калашников, Э.И. Крупицкий, И.Д. Дороднов. М.: Радио и связь, 1988.
2. Системы связи и радиорелейные линии. Учебник для вузов. А.С. Немировский, Е.В. Рыжков. М.: Связь, 1980.
3. Цифровая связь. Учебник для вузов. Бернанд Скляр. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.
4. Телекоммуникационные системы. Сборник задач. Учебное пособие. И.М. Тепляков. М.: Издательское предприятие «Радиософт», 2008.

**Методические указания
к практическим занятиям
по курсу
«Спутниковые системы связи»**

Рассмотрено на заседании кафедры ТМС
« 24 » апреля 2014 года (протокол № 33)

Рекомендовано к печати научно –
методическим советом ФТТ ТУИТ
(протокол № от .)

Составитель: ст. преп. Хатамов А.П. 
Редактор проф. Ибраимов А.П. 
Корректор ст. преп. Хамда – Зода Л.Х. 

Формат 60x84 1/16
Заказ № - 104 . Тираж - 30

Отпечатано в Издательско полиграфическом
центре «ALQASHI» при ТУИТ
Ташкент ул. Амир Темура, 108