

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет инфокоммуникаций

Кафедра инфокоммуникационных технологий

Э. Б. Липкович

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ
СПУТНИКОВОГО МУЛЬТИМЕДИЙНОГО ВЕЩАНИЯ
И ИНТЕРАКТИВНОЙ СВЯЗИ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики
и радиоэлектроники в качестве учебно-методического пособия
для направления специальности 1-45 01 01-04 «Инфокоммуникационные
технологии (цифровое теле- и радиовещание)»*

Минск БГУИР 2017

УДК 654.197.6(076.8)
ББК 32.948я73
Л61

Рецензенты:

кафедра лазерной техники и технологии Белорусского национального
технического университета (протокол №4 от 14.12.2016);

старший научный сотрудник научно-исследовательской
лаборатории электромагнитных измерений научно-исследовательского
испытательного центра ОАО «Гипросвязь»,
кандидат технических наук А. В. Ковалев

Липкович, Э. Б.

Л61 Проектирование цифровых систем спутникового мультимедийного
вещания и интерактивной связи : учеб.-метод. пособие / Э. Б. Липкович. –
Минск : БГУИР, 2017. – 67 с. : ил.
ISBN 978-985-543-337-9.

Содержатся методические указания и порядок выполнения курсовых работ по системам цифрового спутникового многопрограммного вещания и высокоскоростного обмена информацией между медиацентрами и абонентским оборудованием. Представлены математические модели расчетов энергетических, информационных, системных и технических характеристик спутниковых радиотрактов. Приведены примеры расчетов по разделам курсового проектирования. Издание может быть полезным для дипломников и магистрантов.

УДК 654.197.6(076.8)
ББК 32.948я73

ISBN 978-985-543-337-9

© Липкович Э. Б., 2017
© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. СТРУКТУРА КУРСОВОЙ РАБОТЫ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ.....	8
1.1. Цель работы, содержание и требования к оформлению	8
1.2. Задание на курсовое проектирование.....	10
2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕСТРОЙКИ И НАВЕДЕНИЯ ПРИЕМНОЙ АНТЕННЫ НА ГЕОСТАЦИОНАРНЫЕ СПУТНИКИ	13
2.1. Общие положения, исходные данные	13
2.2. Порядок расчета.....	13
3. РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СПУТНИКОВОЙ РАДИОЛИНИИ	17
3.1. Общие положения, задачи расчета, исходные данные	17
3.2. Порядок расчета	18
4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТ УСТАНОВКИ ПРИЕМНЫХ АНТЕНН	27
4.1. Исходные положения	27
4.2. Порядок расчета.....	28
5. РАСЧЕТ СИСТЕМНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ РАДИОКАНАЛОВ И ПРИЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	31
5.1. Общие положения, задачи расчета, исходные данные	31
5.2. Порядок расчета характеристик приемной системы	33
5.2.1. Расчет шумовых показателей приемной системы	33
5.2.2. Расчет энергетических показателей спутникового приема с декодированием по алгоритму Витерби	34
5.2.3. Расчет информационных показателей спутникового приема с декодированием по алгоритму Витерби.....	40
5.2.4. Расчет параметров приема по стандарту DVB-S2	41
5.2.5. Расчет параметров приемной антенны и уровня сигнала на входе цифрового приемника	45
6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ ПЕРЕДАТЧИКА ЗЕМНОЙ СТАНЦИИ И ПАРАМЕТРОВ БОРТОВОГО РЕТРАНСЛЯТОРА.....	48
6.1. Общие положения, исходные данные	48
6.2. Порядок расчета выходной мощности передающей станции.....	50
6.3. Порядок расчета параметров бортового ретранслятора.....	52
6.4. Порядок расчета общего числа VSAT-станций в зоне обслуживания.....	54
7. РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ МЕШАЮЩИХ СПУТНИКОВ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИЕМНЫХ СИСТЕМ	55
7.1. Общие положения, задачи, исходные данные.....	55
7.2. Порядок расчета.....	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	60
ПРИЛОЖЕНИЕ. Пример формирования сведений о рабочем спутнике	61
ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ	63
ЛИТЕРАТУРА	64

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые технологии многопрограммного цифрового телерадиовещания, обмена информацией и высокоскоростного доступа к медиаресурсам обладают уникальной возможностью охватить высококачественным обслуживанием значительное число пользователей, в том числе находящихся в районах со сложным рельефом местности, невысокой плотностью населения, суровыми климатическими условиями и низким уровнем развития наземной телекоммуникационной инфраструктуры [1, 2].

Спутниковая индустрия с ее средствами вывода спутников на орбиту, космическим сегментом и многообразием передающих и приемных наземных систем развивается в мире достаточно динамично. Общемировой доход только от телерадиовещания, стационарной и подвижной связи, широкополосного обмена информацией и доступа к медиаресурсам посредством спутниковых систем составляет около 120...130 млрд дол. в год, из них 80 % дохода приносит многопрограммное цифровое вещание через искусственные спутники Земли (ИСЗ). Успехи в данной сфере услуг объясняются ежегодным ростом объема и качества ТВ-программ, внедрением новых решений в технику цифровой обработки и сжатия видео- и аудиоданных, использованием полосноберегающих видов модуляции и канального кодирования, увеличением скорости доставки данных, а также ростом спроса на трафик и видеоконтент операторов кабельных, эфирных и IPTV-сетей для реализации трансляций по наземным сетям.

Цифровое спутниковое вещание организуется в соответствии с требованиями стандартов DVB-S, DVB-DSNG и DVB-S2 [3–5] при использовании форматов компрессии видеоданных MPEG-2 и MPEG-4/H.264 AVC, помехоустойчивого кодирования и многопозиционных видов модуляции. Часть ТВ-программ шифруется при передаче и для их просмотра требуется декодирующий модуль с абонентской картой доступа. Объем трансляций с передающего центра вещания зависит от характеристик спутниковых радиоканалов, их числа, используемых способов цифровой обработки аудио- и видеоданных, параметров кодирования и модуляции. Скорость передачи данных на одну ТВ-программу в формате высокого разрешения (HD) должна быть почти в 4 раза выше, чем в формате стандартного разрешения (SD), и равняться 2,4...2,6 Мбит/с. Тем не менее за счет повышения качества изображения число транслируемых программ с HD-разрешением по стандарту DVB-S2 устойчиво растет и в среднем составляет около 20 % от общего объема вещания. Дальнейшее улучшение качества изображения связывают с внедрением нового стандарта UltraHD с форматом сжатия видеоданных H.265/HEVC (High Efficiency Video Coding – высокоэффективное кодирование). Однако из-за технических проблем создания контента с требуемыми характеристиками, необходимости использования телевизоров с видеодекодерами соответствующего формата и разрешением 4K (3940×2160 пикселей), а также из-за большой скорости данных, отводимой на программу (около 36 Мбит/с), число трансляций в стандарте UHD пока ограничено.

Ретрансляция сигналов телерадиовещания и интерактивной связи, осуществляемая через спутник, чаще всего прозрачная, реже с обработкой на борту. Прием сигналов ведется на фиксированные или перестраиваемые антенны телецентров, головных станций распределительных сетей, приемных установок коллективного и индивидуального пользования.

Наряду с доставкой сигналов мультимедийного вещания на спутник от стационарных земных станций широко используются передвижные телевизионные станции (ПТС) для организации внестудийных телерепортажей с мест событий. Процесс организации и проведения телерепортажей предполагает аренду на сеанс связи части полосы канала у оператора спутниковой сети. Передача аудиовизуальной информации от ПТС через спутник осуществляется на приемное оборудование телецентра, что позволяет использовать при телерепортажах экономичные по полосе высокоформатные виды фазовой (PSK-8), квадратурной амплитудной (QAM-16) и амплитудно-фазовой (APSK-16, APSK-32) модуляции стандартов DVB-S2 и DVB-DSNG.

Спутниковый обмен информацией и высокоскоростной доступ к мультимедийным ресурсам считается одним из перспективных трендов в спутниковой отрасли. К настоящему времени созданы специализированные высокоинформативные спутниковые сети (Ka-Sat, Astra2Connect, HughesNet, ViaSat и др.) и выведено на орбиту достаточно большое число спутников с радиостволами мультимедийных услуг, включая российские спутники Экспресс-AM5/AT2 (140° в. д.), Экспресс-AM6 (53° в. д.), Экспресс-AM8 (14° з. д.). В значительной части этих спутников используются радиостволы Ka-диапазона частот (27,5...31,0 ГГц на линии «вверх» и 17,7...21,2 ГГц на линии «вниз»), что объясняется их широкополосностью (полоса частот 150...400 МГц) и высокой энергетической эффективностью благодаря высокой допустимой плотности потока мощности у поверхности Земли в этом диапазоне.

Основой наземного сегмента интерактивной связи является центральная станция сопряжения (ЦСС), которая осуществляет взаимосвязь между наземными сетями (центрами) общего пользования, бортовым оборудованием и значительным числом спутниковых интерактивных терминалов (СИТ) или малогабаритных VSAT (Very Small Aperture Terminal) – станций, находящихся в зоне обслуживания. ЦСС распределяет частотный ресурс системы, управляет работой удаленных станций, осуществляет мониторинг их технического состояния и аутентификацию пользователей для отправки в их адрес затребованной информации. Число ретрансляторов на спутнике, поддерживающих интерактивную передачу, зависит от решаемых задач оператором сети и может составлять некоторую долю частотно-энергетического ресурса или весь ресурс ИСЗ.

Создаваемые специализированные мультисервисные сети характеризуются высокой общей скоростью передачи данных (более 20 Гбит/с) и рассчитаны на охват обслуживанием свыше сотни тысяч пользователей. Новое поколение высокоэффективных спутников мультимедийных услуг с многолучевыми антеннами, сотовым покрытием территории и повторным использованием частот в сотах получили название HTS (High Throughput Satellites) [6]. Они использу-

ют частотное, поляризационное и пространственное разделение сигналов по лучам, имеют широкополосные каналы связи в Ku- и Ka-диапазонах частот (14/11 ГГц и 30/20 ГГц соответственно) и могут производить обработку сигналов на борту. Благодаря небольшим размерам лучей ($0,5...0,8^\circ$) и зон покрытия (500...800 км) достигается высокий энергетический потенциал радиолиний и возможность снижения размеров приемопередающих антенн земных станций [7]. По сравнению с традиционным типом ИСЗ с прозрачной ретрансляцией и контурными антеннами на борту многолучевые HTS позволяют более чем на порядок снизить стоимость передачи единицы информации, уменьшить затраты на абонентское оборудование, осуществить избирательное распределение спутниковой мощности по лучам, в зависимости от плотности проживания населения на территории обслуживания, и повысить надежность связи за счет резервирования лучей.

Скорость передачи данных по прямым спутниковым каналам в адрес VSAT-станций и приемных терминалов корпоративных и индивидуальных пользователей может составлять 50...200 Мбит/с, в обратных запросных каналах – 2...8 Мбит/с. Способы помехоустойчивого кодирования и модуляции в прямых каналах устанавливаются в соответствии с положениями стандарта DVB-RCS [8] и DVB-S2, в обратных каналах могут использоваться сверточные коды, турбокоды, составные коды (PC+CK, BCH+LDPC) и модуляция несущей QPSK или PSK-8. Выходные интерфейсы спутниковых терминалов поддерживают соединения с локальной сетью, сервером, телевизором, маршрутизатором и компьютером [8]. Для борьбы с заметными потерями на радиолиниях в Ka-диапазоне частот, вследствие поглощения электромагнитной энергии осадками (5...30 дБ), стандартом DVB-S2 рекомендован адаптивный режим передачи (ACM – Adaptive Modulation and Coding). В этом режиме при возникновении неблагоприятных погодных условий осуществляется автоматическое и адресное изменение параметров кодирования и модуляции на стороне центральной станции в соответствии с управляющими сигналами, поступающими от периферийных терминалов [5].

Помимо стационарного режима работы пользовательских устройств, в спутниковой сети получили развитие мобильные технологии на базе VSAT-станций для широкополосной радиосвязи в транспортной отрасли. Антенные блоки станций устанавливаются на подвижные средства (морские и речные суда, железнодорожные поезда, автомобильный транспорт и др.) и служат для автоматического слежения за положением ИСЗ на орбите при различных маневрах транспорта. Для этих систем в Ka-диапазоне выделены полосы частот на линии «вверх» 29,5...30,0 ГГц и на линии «вниз» 19,7...20,2 ГГц. Эффективность данного направления напрямую зависит от емкости мультисервисной сети, поскольку стоимость услуг широкополосного доступа к информационным ресурсам заметно снижается только при использовании высокоинформационных ИСЗ с высокой энергетической и пропускной способностью [9, 10].

В данном учебно-методическом пособии предлагается достаточно большое число тем, связанных с использованием ИСЗ на геостационарной орбите и

излагается методика расчета параметров устройств, радиоканалов и систем спутникового цифрового многопрограммного вещания, интерактивной связи и высокоскоростного доступа к информационным ресурсам.

В тексте пояснительной записки следует изложить принципы построения и основы функционирования конкретной спутниковой системы, описать технические характеристики спутника, определить параметры наведения антенны земной станции (ЗС) на ИСЗ, выполнить расчеты энергетических и системных показателей радиоканалов, оценить помехоустойчивость приемной системы, произвести выбор типового оборудования и устройств, близких по техническим характеристикам к рассчитанным в работе.

Библиотека БГУИР

1. СТРУКТУРА КУРСОВОЙ РАБОТЫ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1.1. Цель работы, содержание и требования к оформлению

Цель курсовой работы состоит в изложении концепции построения и принципов функционирования проектируемой спутниковой системы, включая определение ее основных показателей при организации приема мультимедийной информации с ИСЗ.

Курсовая работа должна раскрывать заданную тему, базироваться на характеристиках указанного в задании геостационарного спутника, использовать современные технологии построения и методы расчета базовых показателей систем и содержать согласованные с преподавателем разделы из числа представленных в данном учебно-методическом пособии. Типовой вариант содержания проекта для студентов дневной формы обучения следующий.

Введение

1. Принципы организации сети цифрового спутникового мультимедийного вещания и высокоскоростного доступа к информационным ресурсам.

2. Конструктивные и технические характеристики спутника.

3. Концепция построения проектируемой системы и особенности ее функционирования.

4. Расчет параметров перестройки и наведения приемной антенны на геостационарные спутники.

5. Расчет энергетических параметров спутниковой радиолинии.

6. Определение мест установки приемных антенн.

7. Расчет системных показателей спутниковых радиоканалов и приемного оборудования.

8. Расчет выходной мощности передатчика земной станции.

9. Расчет влияния мешающих спутников на помехоустойчивость приемной системы.

10. Выбор оборудования и устройств разрабатываемой системы.

Заключение

Приложения

Список использованных источников

Во введении рассматривается состояние и тенденции развития цифрового спутникового мультимедийного вещания, передачи данных и интерактивной связи.

В разделе 1, в зависимости от темы задания, приводится структурная схема сети цифрового спутникового вещания и описывается технология доставки ТВ-программ пользователям по спутниковым каналам стандартов DVB-S и DVB-S2 либо приводятся структурные схемы интерактивного доступа к информационным ресурсам и описывается технология высокоскоростного обмена данными.

В разделе 2 излагаются сведения, касающиеся конструктивных и технических характеристик спутника, включая планы частот на радиолиниях. В таблицу сводятся необходимые для расчетов данные: диапазон рабочих частот, ширина полосы радиоканала Δf_k , символьная скорость V_c , относительная скорость кода $R_{ск}$ (FEC), вид поляризации, значение эквивалентной изотропно-излучаемой мощности (ЭИИМ), форматы сжатия видеоданных (MPEG-2, MPEG-4/H.264), стандарты вещания (DVB-S, DVB-S2) и качество транслируемых программ (SD, HD, 3D). Представляются карты зон обслуживания спутником с указанием на них точек приема.

В разделе 3 обсуждается назначение проектируемой системы, приводится структура ее построения и излагается принцип ее функционирования. Структурные схемы базовых устройств или всей системы копируются в виде чертежей и выносятся в приложения (формат А3).

В разделе 4 выполняется расчет параметров перестройки и наведения антенны приемной системы на ИСЗ. Для точки приема определяются угол обзора дуги геостационарной орбиты, угол разнесения и крайние позиции видимых спутников на орбите.

В разделе 5 рассчитываются энергетические потери радиосигналов на спутниковой радиолинии, плотность потока мощности у поверхности Земли и эквивалентная шумовая температура (ЭШТ) приемной антенны. Приводится схема передачи сигналов через ИСЗ и на ней указываются рассчитанные параметры.

В разделе 6 на основании плана застройки участка микрорайона или карты жилого массива уточняется (определяется) точка установки антенны на здании и рассчитывается длина соединительной линии между антенной и цифровым приемным оборудованием.

В разделе 7 рассчитываются системные показатели приемной станции и спутниковых радиоканалов стандартов DVB-S/S2.

В разделе 8 определяется выходная мощность передатчика земной станции вещания или спутникового абонентского терминала интерактивной связи.

В разделе 9 определяется влияние мешающих спутников на помехоустойчивость приемной системы.

В разделе 10 выбираются типовые устройства проектируемой системы и указываются их характеристики.

В заключении приводятся выводы по проделанной при курсовом проектировании работе.

В разделе «Приложения» приводятся структурные схемы базовых устройств проектируемой системы, структура головной станции или схема организации сети спутникового обмена информацией (2 листа формата А3).

В разделе «Список использованных источников» приводится перечень технических материалов, использованных при написании проекта, в том числе ссылки на информационные ресурсы сети Интернет по теме.

Пояснительная записка работы должна состоять из титульного листа с указанием темы проектирования, задания с указанием исходных данных, со-

держания с указанием страниц разделов, расчетно-пояснительного текста, заключения, приложений и списка литературы. Общий объем записки к проекту 30–35 страниц.

Все расчеты, приведенные в тексте, выполняются по формулам, записанным в общем виде, в которые подставляются численные значения. Рисунки и таблицы нумеруют по порядку в пределах раздела. Заключение, приложения и список литературы размещают на отдельных страницах. Список используемых источников следует выполнять по ГОСТ 7.1–2003. Полный объем требований к оформлению пояснительной записки и чертежей изложен в стандарте предприятия СТП 01–2013.

1.2. Задание на курсовое проектирование

Задание включает наименование темы, тип геостационарного спутника, населенный пункт приема и исходные технические данные, необходимые для выполнения расчетов (табл. 1.1 и 1.2). Часть исходных данных устанавливается в процессе проектирования самостоятельно на основании характеристик рассматриваемой спутниковой системы.

Таблица 1.1

Исходные данные для проектирования

Наименование тем курсовых работ	Исходные данные				
	$n_{ш.к}$, дБ	$K_{п.к}$, дБ	$n_{ш.т}$, дБ	$P_{ош.в} / P_{ош.п}$	Вид модуляции
1	2	3	4	5	6
1. Спутниковая приемная установка с позиционируемой антенной	0,5	50	10	$10^{-4} / 10^{-7}$	QPSK/ PSK-8
2. Спутниковая приемная установка с DVB-PSI-картой для компьютера	0,6	52	12	$2 \cdot 10^{-4} / 10^{-7}$	QPSK/ PSK-8
3. Спутниковая приемная установка с несколькими конверторами	0,4	55	10	$2 \cdot 10^{-5} / 8 \cdot 10^{-7}$	QPSK/ PSK-8
4. Двухантенная спутниковая приемная установка коллективного пользования	0,5	55	8	$6 \cdot 10^{-5} / 5 \cdot 10^{-8}$	QPSK/ PSK-8
5. Спутниковая приемная установка для гостиничного комплекса	0,5	50	10	$8 \cdot 10^{-5} / 10^{-7}$	QPSK/ PSK-8
6. Коллективная система спутникового приема с трансмодуляцией сигналов	0,6	52	10	$5 \cdot 10^{-5} / 6 \cdot 10^{-7}$	QPSK/ PSK-8
7. Высокочастотный тракт приемной установки спутникового вещания	0,4	50	10	$10^{-4} / 5 \cdot 10^{-7}$	QPSK/ PSK-8
8. Спутниковая система внестудийного сбора новостей	0,5	55	12	$10^{-4} / 2 \cdot 10^{-7}$	QPSK/ APSK-8
9. Передвижная станция для спутниковых трансляций с мест событий	0,5	52	10	$5 \cdot 10^{-5} / 2 \cdot 10^{-7}$	PSK-8/ APSK-16
10. Центральная станция сопряжения интерактивной спутниковой сети	0,4	50	12	$10^{-5} / 8 \cdot 10^{-8}$	PSK-8/ PSK-8

Окончание табл. 1.1

1	2	3	4	5	6
11. Абонентский терминал спутниковой интерактивной сети	0,5	52	10	$10^{-4}/10^{-7}$	QPSK/ PSK-8
12. VSAT-станция спутниковой сети Ка-диапазона	0,4	50	8	$2 \cdot 10^{-4}/6 \cdot 10^{-8}$	QPSK/ QPSK
13. Спутниковая система высокоскоростного доступа к информационным ресурсам	0,4	55	10	$10^{-5}/10^{-7}$	QPSK/ PSK-8
14. Гибридная спутниковая система обмена информацией и инструментального контроля	0,5	55	10	$5 \cdot 10^{-6}/2 \cdot 10^{-7}$	QPSK/ PSK-8
15. Спутниковая система связи с подвижными объектами	0,6	54	8	$10^{-5}/10^{-7}$	PSK-8/ APSK-16
16. Спутниковый доступ в Интернет с мобильных комплексов	0,6	52	8	$2 \cdot 10^{-5}/2 \cdot 10^{-7}$	QPSK/ PSK-8
17. Спутниковая система видеоконтроля за удаленными объектами	0,5	52	12	$10^{-4}/10^{-7}$	PSK-8/ APSK-16
18. Спутниковая система дистанционного обучения и видео-конференц-связи	0,4	50	10	$2 \cdot 10^{-4}/7 \cdot 10^{-8}$	QPSK/ PSK-8
19. Головная станция системы IPTV с антенным спутниковым комплексом	0,3	55	10	$10^{-5}/8 \cdot 10^{-8}$	QPSK/ PSK-8
20. Многоточечная распределительная система типа MMDS	0,4	52	10	$2 \cdot 10^{-5}/10^{-7}$	QPSK/ PSK-8
21. Профессиональная станция приема сигналов цифрового вещания в форматах DVB-S и DVB-S2	0,3	55	10	$5 \cdot 10^{-5}/8 \cdot 10^{-8}$	QPSK/ PSK-8/ APSK-16
22. Спутниковая система с многолучевой антенной Ка-диапазона для интерактивной связи	0,8	50	12	$7 \cdot 10^{-4}/5 \cdot 10^{-8}$	QPSK/ PSK-8/ APSK-16
23. Мобильная VSAT-станция спутникового обмена информацией	0,7	60	10	$2 \cdot 10^{-4}/2 \cdot 10^{-7}$	PSK-8/ PSK-8
24. Спутниковая система доступа в Интернет с морских транспортных средств	0,4	55	8	$10^{-5}/8 \cdot 10^{-8}$	QPSK/ APSK-16
25. Головная станция спутникового вещания с многоканальной трансмодуляцией сигналов	0,4	55	8	$2 \cdot 10^{-5}/6 \cdot 10^{-8}$	QPSK/ PSK-8
26. Головная станция видеоинформационной распределительной системы (MVDS)	0,6	52	10	$10^{-6}/10^{-7}$	QPSK/ PSK-8

В табл. 1.1 приняты следующие обозначения: $n_{ш.к}$ – коэффициент шума конвертора, дБ; $K_{п.к}$ – коэффициент передачи конвертора, дБ; $n_{ш.т}$ – коэффициент шума цифрового приемника (тюнера), дБ; $P_{ош.в}$ – вероятность битовой ошибки на выходе первой ступени декодирования по алгоритму Витерби с мягким решением [3]; $P_{ош.п}$ – вероятность пакетной ошибки на выходе декодера BCH в системе DVB-S2 [5]. Вид модуляции: в числителе приведен используемый вид в спутниковых каналах стандарта DVB-S для организации приема сиг-

налов или ТВ-программ с декодированием по алгоритму Витерби, в знаменателе – для каналов стандарта DVB-S2.

Таблица 1.2

Типы спутников и пункты приема

Тип спутника и его координаты	Варианты мест приема			
	№1	№2	№3	№4
1. Экспресс AM5/AT2, 140° в. д.	Хабаровск	Чита	Магадан	Курильск
2. Экспресс AM3, 103° в. д.	Братск	Улан-Уде	Верхоянск	Дальнегорск
3. Экспресс AM33, 96,5° в. д.	Красноярск	Иркутск	Томск	Омск
4. Ямал 401, 90° в. д.	Челябинск	Надым	Курган	Нижневартовск
5. Ямал 300К, 90° в. д.	Красноярск	Игарка	Минусинск	Новокузнецк
6. Intelsat 15, 85° в. д.	Архангельск	Ярославль	Вологда	Владимир
7. ABS 2, 75° в. д.	Хабаровск	Иркутск	Игарка	Владивосток
8. Intelsat 902, 62° в. д.	София	Прага	Варшава	Берлин
9. Intelsat 904, 60° в. д.	Брянск	Псков	Рига	Калининград
10. NSS 12, 57° в. д.	Ашхабад	Душанбе	Ташкент	Бишкек
11. Экспресс АТ1, 56° в. д.	Тобольск	Братск	Томск	Новосибирск
12. Ямал 402, 55° в. д.	Уфа	Казань	Самара	Ижевск
13. Экспресс AM6, 53° в. д.	Минск	Рига	Гродно	Прага
14. Ямал 202, 49° в. д.	Москва	Курск	Киев	Санкт-Петербург
15. Azerspace 1, 46° в. д.	Харьков	Баку	Керчь	Астрахань
16. Turksat 3A/4A, 42° в. д.	Париж	Рим	Афины	Будапешт
17. Экспресс AM7, 40° в. д.	Саратов	Вологда	Ярославль	Тула
18. Eutelsat 36B/Экспресс АМУ1 36° в. д.	Вологда	Киров	Уфа	Воронеж
19. Astra 5B, 31,5° в. д.	Кишинев	Одесса	София	Тирасполь
20. Astra 1KR/1L/1M/, 19,2° в. д.	Белград	Стокгольм	Гамбург	Ливерпуль
21. Eutelsat 16A/16B, 16° в. д.	Рим	Манчестер	Брест	София
22. Eutelsat HotBird, 13° в. д.	Париж	Милан	Женева	Гродно
23. Eutelsat 10A, 10° в. д.	Мадрид	Краков	Вена	Дрезден
24. Eutelsat 9A, 9° в. д.	Турин	Бонн	Цюрих	Загреб
25. Eutelsat 7A/7B, 7° в. д.	Гродно	Брест	Рим	Кишинев
26. Astra 4A/SES 5, 5° в. д.	Гомель	Львов	Киев	Донецк
27. Thor 5/6, 1° з. д.	Осло	Таллин	Мурманск	Стокгольм
28. Amos 3/7, 4° з. д.	Брянск	Москва	Владимир	Курск
29. Atlantic Bird 2, 8° з. д.	Париж	Лондон	Бонн	Брест
30. Экспресс AM44, 11° з. д.	Бухарест	Вена	Берлин	Женева
31. Экспресс AM8, 14° з. д.	Мюнхен	Берлин	Лондон	Барселона

Примечание. Перечень действующих геостационарных спутников представлен на сайте www.satbeams.com. Зоны обслуживания приведены на сайтах: www.sat-media.net/map/map.htm; www.sattvinfo.net.

2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕСТРОЙКИ И НАВЕДЕНИЯ ПРИЕМНОЙ АНТЕННЫ НА ГЕОСТАЦИОНАРНЫЕ СПУТНИКИ

2.1. Общие положения, исходные данные

Прием сигналов цифрового многопрограммного спутникового вещания, мультимедийных приложений и высокоскоростных данных может осуществляться на стационарные и оперативно перестраиваемые антенны. Для правильной настройки приемной антенны на требуемые геостационарные спутники необходимы предварительные расчеты диапазона перестройки антенны и координат ее наведения (угол места и азимутальное смещение) на требуемый ИСЗ.

Методика расчета строится на положениях и формулах, приведенных в теоретических разделах работы [1]. В контрольном примере расчета предполагается, что прием сигналов осуществляется в г. Минске ($\varphi_3 = 27,58^\circ$ в. д. и $\psi = 53,84^\circ$ с. ш.) с ИСЗ Eutelsat 7A ($\varphi_c = 7^\circ$ в. д.). Для наведения и перестройки антенны используется модифицированное одноприводное опорно-поворотное устройство (ОПУ) с полярной подвеской. Минимальный угол места антенны, ниже которого прием сигналов с геостационарных ИСЗ считается нецелесообразным, принят $\varepsilon_{\min} = 5^\circ$.

2.2. Порядок расчета

1. Определить максимальный угловой обзор видимой части дуги геостационарной орбиты (ГО) с точки приема, который характеризуется топоцентрическим углом:

$$\theta_{\text{Обmax}} = 2 \arccos(0,153 \operatorname{tg} \psi), \text{ град.}$$

Для точки приема с $\psi = 53,84^\circ$ с. ш. значение $\theta_{\text{Обmax}} = 155,83^\circ$.

2. Определить фактический угловой обзор дуги ГО, в пределах которого возможен прием сигналов с ИСЗ под углами мест, превышающими ε_{\min} :

$$\theta_{\text{Об}} = 2 \arccos(\operatorname{tg} \psi / \operatorname{tg} \alpha_{\text{П}}), \text{ град. ;}$$

$$\alpha_{\text{П}} = 90^\circ - [\varepsilon_{\min} + \arcsin(A \operatorname{cose} \varepsilon_{\min})], \text{ град.}$$

Для $\psi = 53,84^\circ$ с. ш., $A = 0,1511$, $\varepsilon_{\min} = 5^\circ$, значение центрального угла $\alpha_{\text{П}} = 76,34^\circ$ и $\theta_{\text{Об}} = 141,15^\circ$.

3. Определить геоцентрический угол с вершиной в центре Земли, который устанавливает угловое разнесение между крайними позициями спутников, находящихся под углами мест $\varepsilon = \varepsilon_{\min}$:

$$\theta_{\text{Р}} = 2 \arccos(\operatorname{cose} \alpha_{\text{П}} / \operatorname{cose} \psi), \text{ град.}$$

Расчетное значение $\theta_p = 132,81^\circ$.

4. Определить на ГО крайние позиции спутников, с которых доступен прием сигналов в точке размещения ЗС:

$$\varphi_{\text{С.ВОСТ}} = \varphi_3 + \theta_p/2, \text{ град};$$

$$\varphi_{\text{С.ЗАП}} = \varphi_3 - \theta_p/2, \text{ град}.$$

Для приема в г. Минске $\varphi_{\text{С.ВОСТ.}} = 93,99^\circ$ в. д. и $\varphi_{\text{С.ЗАП}} = 38,83^\circ$ з. д.

5. Определить для координат точки приема угол места (возвышения) антенны, под которым на ГО находится заданный спутник:

$$\varepsilon = \arctg[(-A + \cos\alpha)/\sin\alpha], \text{ град};$$

$$\alpha = \arccos(\cos\psi \cdot \cos|\varphi_{\text{С}} - \varphi_3|), \text{ град}.$$

В результате расчета $\varepsilon = 25,72^\circ$ и $\alpha = 56,46^\circ$.

6. Для малых углов мест наведения антенн на требуемый ИСЗ ($\varepsilon \leq 10^\circ$) уточнить значение угла ε с учетом атмосферной рефракции:

$$\varepsilon_p = 0,5 (\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + 4,13}), \text{ град}.$$

7. Определить для координат точки приема максимальный угол места антенны в направлении на ГО:

$$\varepsilon_{\text{max}} = \arctg[(-A + \cos\psi)/\sin\psi], \text{ град}.$$

Расчетное значение $\varepsilon_{\text{max}} = 28,53^\circ$.

8. Определить для точки приема азимут β и величину азимутального смещения $\Delta\beta$, задаваемого углом между проекциями направлений на юг и спутник:

$$\beta = 180^\circ \pm \Delta\beta, \text{ град};$$

$$\Delta\beta = \arctg[(\text{tg}|\varphi_{\text{С}} - \varphi_3|)/\sin\psi], \text{ град}.$$

В результате расчета $\Delta\beta = 24,94^\circ$ и $\beta = 204,94^\circ$.

9. Проверить выполнение условия:

$$\Delta\beta \geq |\varphi_{\text{С}} - \varphi_3|.$$

Условие выполняется, т. к. $24,94^\circ > 20,58^\circ$. Этот результат означает, что при наведении антенны в г. Минске на ИСЗ Eutelsat 7A ее угол поворота отно-

сительно проекции на юг больше на $4,36^\circ$, чем разность между позицией ИСЗ и долготой ЗС.

10. Указать на видимой части дуги ГО позицию заданного ИСЗ и рассчитанные показатели наведения и перестройки антенны. Результаты вычислений по данным контрольного примера отражены на рис. 2.1.

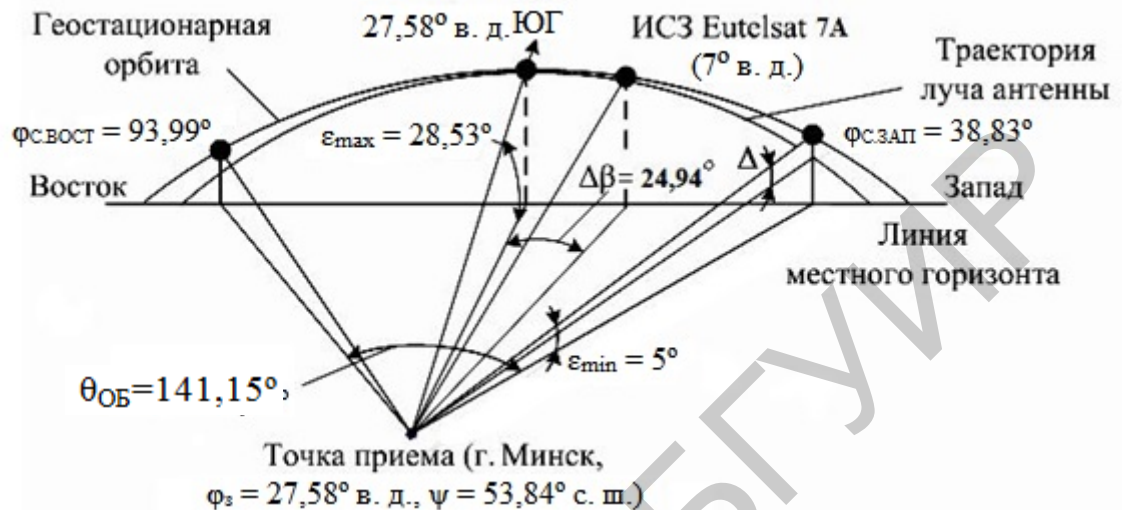


Рис. 2.1. Параметры наведения и перестройки антенны

11. Вычислить в секторе радиовидимости угловую ошибку, которая возникает при наведении антенны на крайние позиции ИСЗ при использовании ОПУ с полярной подвеской:

$$\Delta = \theta_{\text{ОБ}}(\xi - \eta)/360, \text{ град};$$

$$\xi = \arctg[(1 + A \cos \psi)/A \sin \psi], \text{ град};$$

$$\eta = \arctg[(1 - A \cos \psi)/A \sin \psi], \text{ град}.$$

В результате расчета $\xi = 83,61^\circ$, $\eta = 82,37^\circ$ и $\Delta = 0,49^\circ$.

12. Для минимизации угловой ошибки при наведении антенны на крайние позиции ИСЗ рассчитать необходимое угловое смещение оси модифицированного ОПУ с полярной подвеской относительно направления на Полярную звезду (ПЗ):

$$\Delta\gamma = (\xi - \eta)/2, \text{ град}.$$

Расчетное значение $\Delta\gamma = 0,62^\circ$.

13. Определить скорректированный угол наклона оси модифицированного ОПУ относительно горизонтальной плоскости для точки приема:

$$\psi_{\text{н}} = \psi + \Delta\gamma, \text{ град}.$$

Расчетное значение $\psi_H = 54,46^\circ$.

14. Определить скорректированный угол склонения ОПУ между осью вращения и линией, параллельной раскрытию зеркала антенны:

$$\theta_{\text{с.кор}} = 90 - [(\xi + \eta)/2], \text{ град.}$$

Расчетное значение $\theta_{\text{с.кор}} = 7,01^\circ$.

15. Проверить выполнение условия:

$$\psi_H + \theta_{\text{с.кор}} + \varepsilon_{\text{max}} = 90^\circ.$$

Условие выполняется, т. к. $54,46^\circ + 7,01^\circ + 28,53^\circ = 90^\circ$.

16. Представить упрощенную конструкцию антенной системы с модифицированной полярной подвеской и указать на ней рассчитанные значения.

На рис. 2.2 приведена антенная система с модифицированным одноприводным ОПУ при ее размещении в плоскости «Север – Юг».

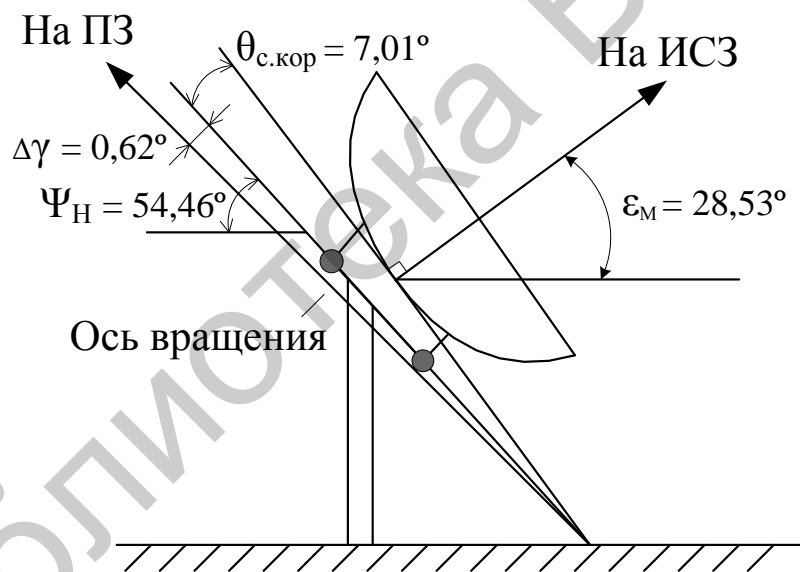


Рис. 2.2. Антенная система с модифицированной полярной подвеской

3. РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СПУТНИКОВОЙ РАДИОЛИНИИ

3.1. Общие положения, задачи расчета, исходные данные

При распространении радиосигналов от земной станции к ИСЗ и от бортового ретранслятора к приемной антенне ЗС возникают существенные потери излучаемых мощностей. Причины обусловлены расходимостью фронта излучения в свободном пространстве, поглощением энергии в атмосфере, тумане, дождях и мокром снеге, неточностью наведения антенны ЗС на ИСЗ, несоответствием плоскостей поляризации антенн ИСЗ и ЗС, наличием атмосферной рефракции, ионосферного воздействия и др. [1, 2, 11, 12]. Чем меньше угол места антенны, под которым виден спутник с точки размещения ЗС, тем больший путь проходит радиосигнал в слоях атмосферы и осадках и тем выше его дополнительные энергетические потери по сравнению с затуханием в свободном пространстве и выше уровень внешних тепловых шумов, поступающих на вход антенны приемной системы. Кроме того, потери энергии в свободном пространстве и основная часть дополнительных потерь увеличиваются с ростом частоты. Наибольший уровень дополнительных потерь на радиолиниях вносятся осадками.

В зависимости от типа спутниковой службы, диапазона рабочих частот и способа приема расчеты потерь в осадках проводятся с учетом требований на допустимый процент времени снижения качества принимаемых сигналов (табл. 3.1) для среднего года T_r (%) или наилучшего месяца года T_m (%).

Величина T_r (%) взаимосвязана с коэффициентом готовности радиолинии $K_{\text{гот}}$ соотношением

$$T_r (\%) = (1 - K_{\text{гот}}) 100 \%,$$

где $t_{\text{п}}$ – допустимое суммарное время перерывов связи за год из-за осадков, ч (8760 – число часов в году); для T_r (%) = 0,05 % $K_{\text{гот}} = 1 - 5 \cdot 10^{-4} = 0,9995$ и величина $t_{\text{п}} = 4,38$ ч.

Если при коллективном и профессиональном приеме сигналов коэффициент готовности не задан и величина $t_{\text{п}}$ не определена, то можно воспользоваться данными табл. 3.1 для T_r (%).

При работе спутниковой системы в полосах частот, выделенных для разных служб (рис. 3.1), величина T_r (%) или T_m (%) устанавливается по меньшему из требуемых значений.

Основой для расчета потерь в осадках служит Рекомендация МСЭ-R P.618-10 [13], в которой допустимый процент времени превышения потерь в дождях принят 0,01 % времени среднего года. Для других допустимых процентов времени, принадлежащих среднему году или наилучшему месяцу года, предусматривается пересчет полученных значений.

Таблица 3.1

Допустимый процент времени превышения потерь в осадках

Частотный диапазон, ГГц	Тип спутниковой службы				
	ФСС (плано- вые полосы частот)	ФСС (неплановые полосы частот), способ приема			РСС
		индивид.	коллективн.	профессион.	
3,4...8,0	$T_r (\%) = 0,05 \%$	$T_r (\%) = 0,1 \%$	$T_r (\%) = 0,05 \%$	$T_r (\%) = 0,01 \%$	-
10,7...18,1	$T_r (\%) = 0,1 \%$	$T_r (\%) = 0,1 \%$	$T_r (\%) = 0,05 \%$	$T_r (\%) = 0,01 \%$	$T_m (\%) = 1 \%$
17,7...31,0	$T_r (\%) = 0,1 \%$	$T_r (\%) = 0,1 \%$	$T_r (\%) = 0,05 \%$	$T_r (\%) = 0,01 \%$	-

Цель проводимых расчетов состоит в определении суммарных потерь на спутниковой радиолинии, величины плотности потока мощности (ППМ) у поверхности Земли и ЭШТ приемной антенны.

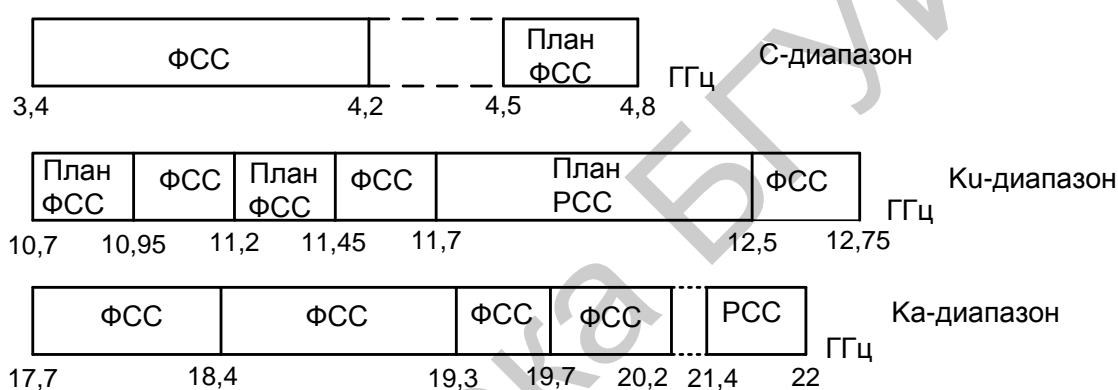


Рис. 3.1. Распределение частотных полос для радиолиний ИСЗ – ЗС

В контрольном примере полагаем, что прием мультимедийной информации осуществляется с ИСЗ «Ka-Sat» (9° в. д.) компании Eutelsat на абонентские терминалы в полосе частот $17,7...20,2$ ГГц в г. Минске ($\varphi_3 = 27,58^\circ$ в. д. и $\psi = 53,84^\circ$ с. ш.). Ширина полосы радиоканала $\Delta f_K = 250$ МГц. Угол места, под которым виден спутник с точки приема, $\varepsilon = 26,56^\circ$. Относительное угловое отклонение оси главного направления ДН антенны от истинного направления на спутник $\varphi_{\Sigma}/\theta_{0,5} = 0,1$. Угловое смещение между векторами поляризации антенны спутника и антенны приемной станции $\theta_{\Pi} = 10^\circ$. Усредненная по поверхности зеркала антенны относительная высота неровностей $\bar{\delta}_0/\lambda = 0,01$. Потери в облучателе и волноводных соединителях $a_{OB} = 0,15$ дБ. Радиус Земли $R_3 = 6\,371$ км, высота геостационарной орбиты $H = 35\,786$ км, $A = 0,1511$.

3.2. Порядок расчета

1. Определить наклонную дальность между позицией спутника и точкой приема:

$$r = (R_3 + H)\sqrt{1 + A^2 - 2A\cos\alpha} = 42\,636\sqrt{1 - 0,2954 \cdot \cos\alpha}, \text{ км};$$

$$\cos\alpha = \cos\psi \cdot \cos|\varphi_C - \varphi_3|.$$

Для исходных данных $r = 38\,952$ км.

2. Определить энергетические потери мощности радиосигнала в свободном пространстве на линии от спутника к ЗС, обусловленные расходимостью фронта излучения бортовой антенной:

$$a_0 = 92,4 + 20 \cdot \lg f_p + 20 \lg r, \text{ дБ},$$

где f_p – рабочая частота, ГГц; r – наклонная дальность, км.

На верхней частоте рабочего диапазона ($f_p = 20,2$ ГГц) $a_0 = 210,3$ дБ.

3. Определить потери мощности радиосигнала в спокойной атмосфере вследствие поглощения части его энергии толщей кислорода и водяными парами атмосферы:

$$a_{\text{АТМ}} = \gamma_K l_1 + \gamma_B l_2, \text{ дБ};$$

$$l_i = (h_i - h_{\text{ЗС}}) / \sin\epsilon, \text{ км}.$$

Для $f_p \leq 60$ ГГц принять высоту слоя кислорода $h_1 = 6$ км, эквивалентную высоту водяного пара рассчитать по формуле

$$h_2 = 2,2 + 3 / [3 + (f_p - 22,3)^2], \text{ км}.$$

Высота размещения приемного оборудования $h_{\text{ЗС}}$ берется относительно уровня моря.

Значения погонных потерь в кислороде и водяных парах атмосферы определяются по следующим формулам [14]:

$$\gamma_K = \left(7,19 \cdot 10^{-3} + \frac{6,09}{f_p^2 + 0,227} + \frac{4,81}{(f_p - 57)^2 + 1,5} \right) f_p^2 10^{-3}, \text{ дБ/км};$$

$$\gamma_B = \left(0,067 + \frac{3,6}{8,5 + (f_p - 22,3)^2} + \frac{10,6}{9 + (f_p - 188,3)^2} \right) f_p^2 p 10^{-4}, \text{ дБ/км},$$

где $p = 7,5$ – влажность воздуха при температуре 20°C на уровне Земли, г/м³.

Приняв для г. Минска высоту $h_{\text{ЗС}} = 0,2$ км, получим: $l_1 = 13$ км, $h_2 = 2,6$ км, $l_2 = 5,38$ км, $\gamma_K = 0,01$ дБ/км, $\gamma_B = 0,106$ дБ/км, $a_{\text{АТМ}} = 0,7$ дБ.

4. Определить потери мощности радиосигнала в осадках, обусловленные рассеянием и поглощением части электромагнитной энергии в среде распространения.

а) По известным коэффициентам регрессии (табл. 3.2) для заданной рабочей частоты и вида поляризации [15], а также по среднеминутному значению

интенсивности дождей в зоне приема для 0,01 % времени среднего года $J_{0,01}$ (мм/ч) [16] рассчитать погонные потери в осадках:

$$\gamma_D = \beta \cdot J_{0,01}^\alpha, \text{ дБ/км.}$$

Для стран Европы и СНГ с умеренным климатом интенсивность дождя $J_{0,01}$ составляет 25...45 мм/ч (рис. 3.2 и 3.3).

При приеме радиосигналов в г. Минске ($J_{0,01} = 30$ мм/ч, $\beta_{\text{ГОР}} = 0,092$, $\beta_{\text{ВЕР}} = 0,096$, $\alpha_{\text{ГОР}} = 1,057$, $\alpha_{\text{ВЕР}} = 0,984$) погонные потери в дождях для горизонтальной поляризации сигналов $\gamma_{\text{Д.ГОР}} = 3,32$ дБ/км, для вертикальной – $\gamma_{\text{Д.ВЕР}} = 2,7$ дБ/км.

Таблица 3.2
Коэффициенты регрессии по Рекомендации МСЭ-R P.838-3

Параметр, вид поляризации	Рабочая частота, ГГц										
	8	11	12	13	14	18	20	27	30	40	
β	горизонтальная	0,004	0,018	0,024	0,030	0,037	0,071	0,092	0,188	0,240	0,443
	вертикальная	0,003	0,017	0,025	0,033	0,041	0,077	0,096	0,181	0,229	0,427
α	горизонтальная	1,390	1,214	1,183	1,159	1,119	1,082	1,057	0,978	0,949	0,867
	вертикальная	1,379	1,162	1,122	1,090	1,065	1,002	0,984	0,928	0,913	0,842

б) Определить высоту зоны дождя h_D [17] и геометрическую длину наклонной трассы L_H с осадками:

$$h_D = 5,1 - 2,15 \cdot \lg[1 + 10^{(\psi - 27)/25}], \text{ км, для } \psi \geq 36^\circ \text{ с. ш.};$$

$$L_H = (h_D - h_{3C}) / \sin \varepsilon, \text{ км.}$$

Для данных примера $h_D = 2,72$ км, $L_H = 5,92$ км.

в) Определить коэффициенты коррекции длины дождевой трассы ($r_{0,01}$ и $v_{0,01}$) с учетом неравномерной плотности выпадения осадков в горизонтальном и вертикальном направлениях:

$$r_{0,01} = 1 / \left[1 + 0,78 \cdot \left((L_\Gamma \cdot \gamma_D) / f_P \right)^{0,5} - 0,38 (1 - 10^{-0,87 \cdot L_\Gamma}) \right];$$

$$L_\Gamma = L_H \cdot \cos \varepsilon;$$

$$v_{0,01} = 1 / \left[1 + \sqrt{\sin \varepsilon} \cdot \left(\frac{31 (L_\Gamma \cdot \gamma_D)^{0,5}}{f_P^2} - 0,45 \right) \right];$$

$$L_D = (L_\Gamma \cdot r_{0,01}) / \cos \varepsilon \text{ при } \xi \geq \varepsilon;$$

$$L_D = L_H \text{ при } \xi < \varepsilon;$$

$$\xi = \arctg(\text{tg} \varepsilon / r_{0,01}).$$

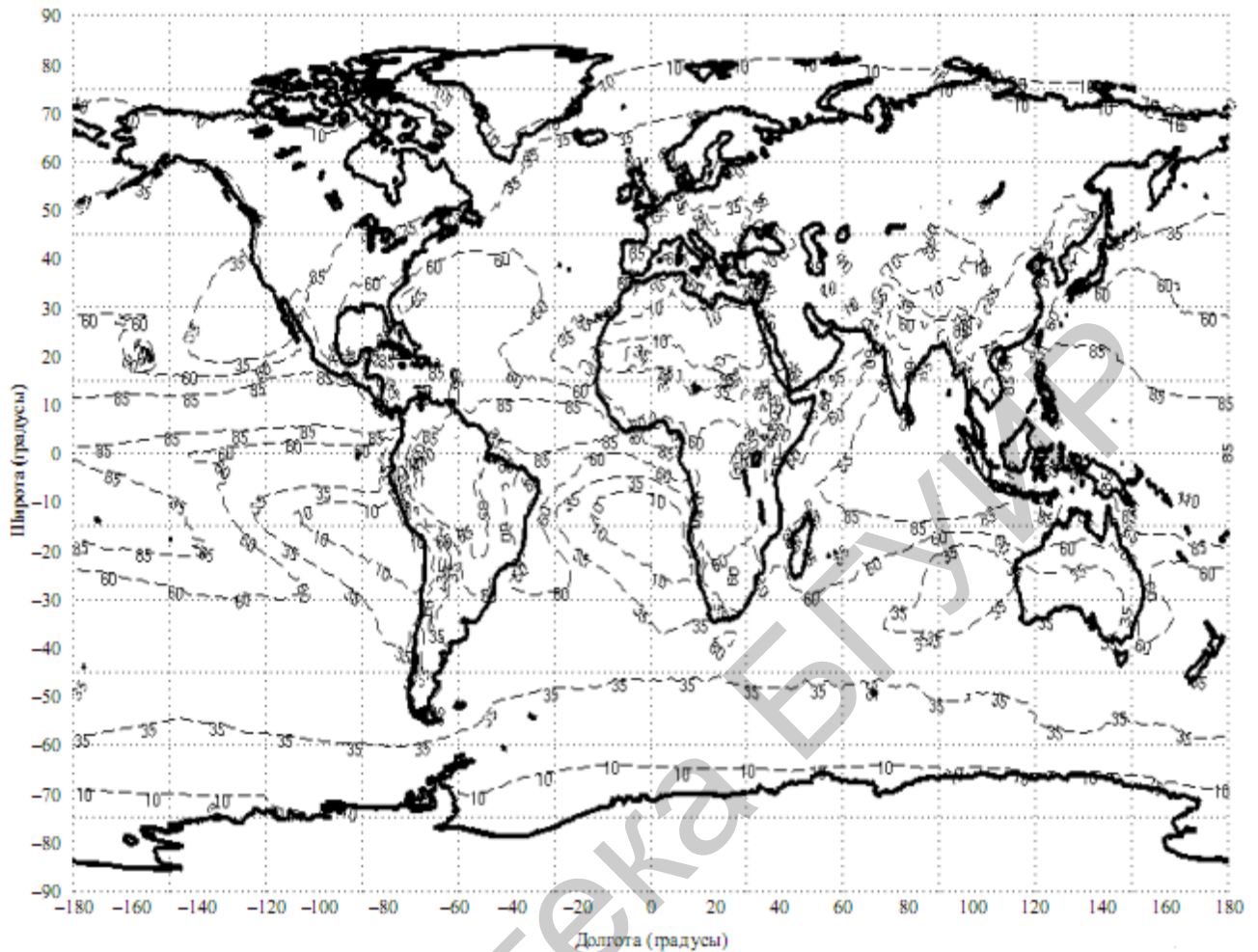


Рис. 3.2. Интенсивность дождя (в миллиметрах в час), превышаемая в течение не более 0,01 % времени среднего года, для континентов мира

Приняв во внимание значение $\gamma_{\text{Д.ГОР}} = 3,32$ дБ/км, получим: $L_{\Gamma} = 5,3$ км, $r_{0,01} = 0,746$; $\xi = 33,66^\circ$, $\gamma_{\text{Д}} = 4,42$ км, $\nu_{0,01} = 1,12$.

г) Определить эквивалентную длину пути спутникового сигнала в дождях на радиолинии ИСЗ – ЗС:

$$L_{\text{Э}} = L_{\text{Д}} \cdot \nu_{0,01}, \text{ км.}$$

В примере $L_{\text{Э}} = 4,95$ км.

д) Определить потери в дождях, превышаемые в течение не более 0,01 % времени среднего года:

$$a_{\text{Д}(0,01)} = \gamma_{\text{Д}} \cdot L_{\text{Э}}, \text{ дБ.}$$

В примере $a_{\text{Д}(0,01)} = 16,4$ дБ.

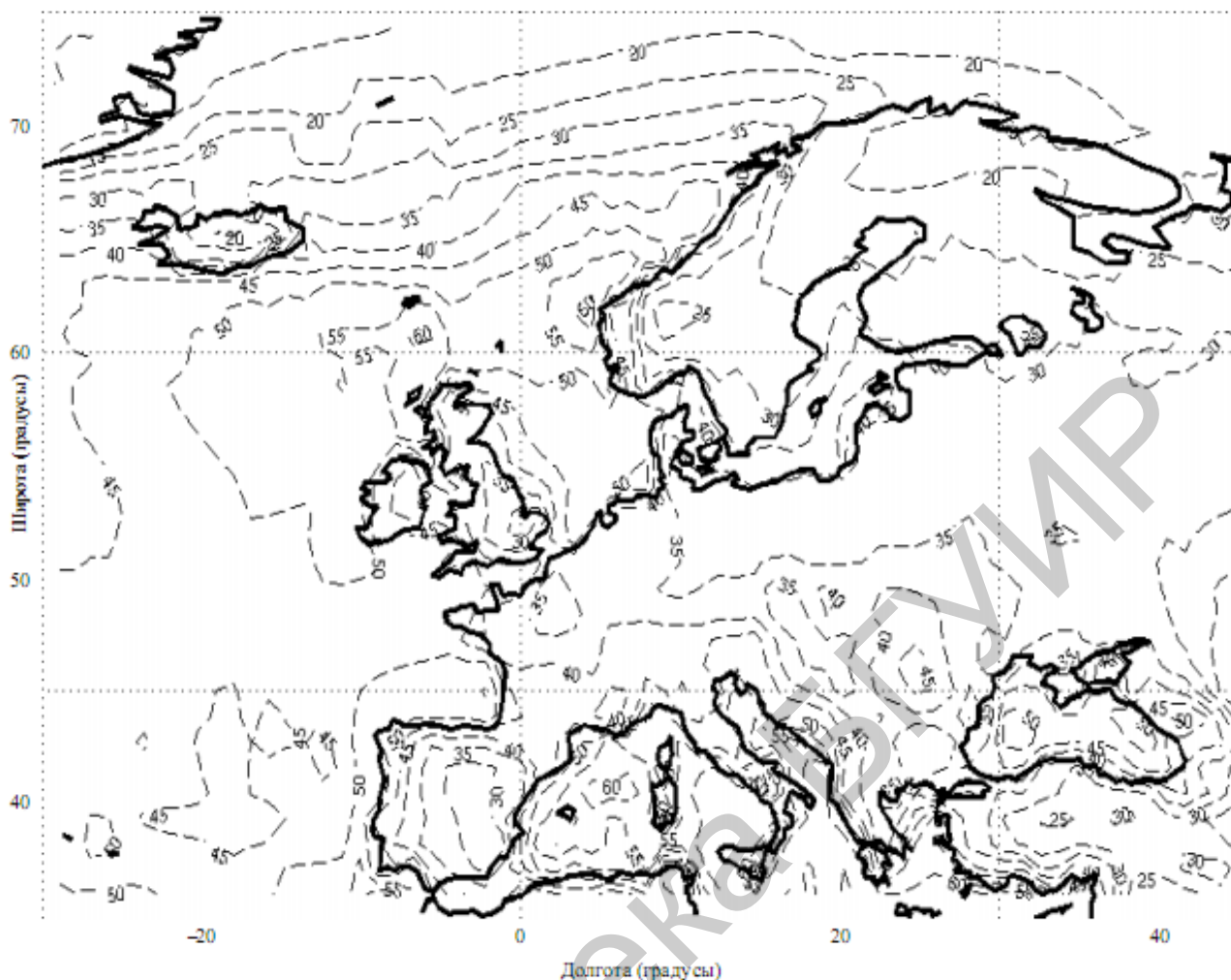


Рис. 3.3. Интенсивность дождя (в миллиметрах в час), превышаемая в течение не более 0,01 % времени среднего года, для Европы

е) В соответствии с допустимым значением T_r (%) (см. табл. 3.1) выполнить пересчет рассчитанных потерь $a_{D(0,01\%)}$ в потери $a_{D(\%)}$ для требуемого процента времени:

$$a_{D(\%)} = a_{D(0,01\%)} \cdot [T_r(\%)/0,01]^{-x}, \text{ дБ};$$

$$x = 0,65 + 0,076 \cdot \lg T_r(\%) - 0,103 \cdot \lg a_{D(0,01\%)}.$$

Для индивидуального приема сигналов с ИСЗ «Ka-Sat» (9° в. д.) в полосе фиксированной спутниковой связи (ФСС) Ka-диапазона значение T_r (%) = 0,1 %, $x = 0,454$ и $a_{D(0,1\%)} = 5,78$ дБ.

ж) Если по условию проводимых расчетов следует определить потери в осадках для заданного процента времени наихудшего месяца года T_m (%), что необходимо при проектировании систем в диапазоне радиовещательной спутниковой службы (РСС), то требуемая величина T_m (%) пересчитывается в эквивалентное значение T_r (%) по одной из следующих формул [18]:

– при планировании сети с глобальным охватом:

$$T_r(\%) = 0,3 T_m(\%)^{1,15} \text{ для } 1,9 \cdot 10^{-4} \leq T_m(\%) \leq 7,8;$$

– при организации приема на территории Европы:

$$T_r(\%) = 0,26 T_m(\%)^{1,19}.$$

По вычисленному значению $T_r(\%)$ потери $a_d(\%)$ определяются на основании пункта е.

Потери в дождях, превышаемые в течение не более 1 и 0,1 % времени наихудшего месяца года, можно рассчитать по приближенным формулам, справедливым для частот f_p от 3,5 до 30 ГГц и углов мест ε от 3 до 70°:

$$a_{d(1\%)} = 0,1 + [(f_p^2 - 18)/5,5 (\varepsilon + 3)], \text{ дБ};$$

$$a_{d(0,1\%)} = 0,1 + [(f_p^2 - 18)/1,9 (\varepsilon + 3)], \text{ дБ}.$$

5. Определить потери мощности несущей, вызванные угловым отклонением φ_Σ оси ДН антенны ЗС от истинного направления на спутник, из-за нестабильного положения ИСЗ на ГО и ошибок в точности наведения приемной антенны:

$$a_H = 10 \cdot \lg[1 + (2 \varphi_\Sigma / \theta_{0,5})^2], \text{ дБ}.$$

Для данных примера $a_H = 0,174$ дБ.

6. Определить потери мощности радиосигнала на радиолинии с линейной поляризацией волн вследствие углового расхождения векторов поляризации антенны спутника и антенны приемной станции:

$$a_P = 10 \cdot \lg[2/(1 + \cos 2 \theta_P)], \text{ дБ}.$$

Потери для $\theta_P = 10^\circ$ составляют 0,133 дБ.

7. Определить суммарные потери мощности на спутниковой радиолинии ИСЗ – ЗС:

$$a_\Sigma = a_0 + a_{\text{доп}} = a_0 + a_{\text{АТМ}} + a_d + a_H + a_P, \text{ дБ}.$$

На частоте 20,2 ГГц значение $a_{\text{доп}} = 6,79$ дБ, $a_\Sigma = 217,09$ дБ.

8. По картам зон обслуживания спутника определить значения ЭИИМ ретрансляторов в рабочем режиме по основным лучам ретрансляторов ИСЗ (широкий, узкий, зональный и др.), с которых целесообразен прием цифровых программ и данных, в направлении точки приема.

Для спутника «Ka-Sat» (9° в. д.) ЭИИМ бортового ретранслятора в направлении г. Минска $\mathcal{E}_{\text{БР}} = 52$ дБВт.

9. Определить (с учетом скремблирования передаваемых данных) плотность потока мощности P_M , создаваемую спутником у земной поверхности в контрольной полосе $\Delta f_{\text{кон}}$:

$$P_M = \mathcal{E}_{\text{БР}} - 10 \cdot \lg(4\pi r^2) - a_{\text{доп}} - 10 \cdot \lg(\Delta f_{\text{к}} / \Delta f_{\text{кон}}), \text{ дБВт/м}^2.$$

Проверить выполнение условия

$$P_M \leq P_{\text{доп}},$$

где $P_{\text{доп}}$ – допустимая (предельная) плотность потока мощности у земной поверхности (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Предельные значения ППМ у поверхности Земли для геостационарных систем, дБВт/м²

Диапазон частот, ГГц	Углы прихода сигнала с ИСЗ			Контрольная ширина полосы $\Delta f_{\text{кон}}$
	0...5°	5...25°	25...90°	
3,4...4,2 4,5...4,8	-152	-152+0,5(δ_1-5)	-142	4 кГц
5,15...5,216	-164			4 кГц
6,7...6,825	-137	-137+0,5(δ_1-5)	-127	1 МГц
6,825...7,075	-134	-134+0,5(δ_1-5)	-124	1 МГц
10,7...11,7	-150	-150+0,5(δ_1-5)	-140	4 кГц
11,7...12,5	-108			27 МГц
12,5...12,75	-148	-148+0,5(δ_1-5)	-138	4 кГц
17,7...21,2	-115	-115+0,5(δ_1-5)	-105	1 МГц
21,4...22,0	-105			1 МГц

Для данных примера ($\mathcal{E}_{\text{БР}} = 52$ дБВт, $r = 38\,392 \cdot 10^3$ м, $a_{\text{доп}} = 6,79$ дБ, $\Delta f_{\text{к}} = 250$ МГц, $\Delta f_{\text{кон}} = 1$ МГц), $P_M = -137,09$ дБВт/м². Согласно данным табл. 3.3 для угла места $\varepsilon = 26,56^\circ$, $P_{\text{доп}} = -105$ дБВт/м² и условие по электромагнитной совместимости наземных и спутниковых систем на линии ИСЗ – ЗС выполняется ($-137,09 < -105$).

10. Определить ЭШТ антенны приемной системы, обусловленную приемом тепловых шумов от внешних и собственных источников:

$$T_A = T_{\text{пог}} + T_3 + T_{\text{кос}} + T_{\text{соб}}, \text{ К.}$$

В формуле для T_A величина $T_{\text{пог}}$ обусловлена приемом теплового излучения среды распространения, которое возникает вследствие поглощения атмосферой и дождями части передаваемой с ИСЗ мощности:

$$T_{\text{ПОГ}} = T_{\text{СР}} \left[1 - 10^{-0,1(a_{\text{АТМ}} + a_{\text{Д}})} \right], \text{ К.}$$

При $T_{\text{СР}} = 260 \text{ К}$, $a_{\text{АТМ}} = 0,7 \text{ дБ}$, $a_{\text{Д}} = 5,78 \text{ дБ}$ величина $T_{\text{ПОГ}} = 201,6 \text{ К}$.

Составляющая T_3 обусловлена приемом фонового излучения земной поверхности через боковые лепестки антенны и зависит от типа, размеров и угла места антенны:

$$T_3 = 29 \left[(F_{\Phi}/d_A) + (1,2/(2 d_A + 1)) + (5/\epsilon) \right], \text{ К.}$$

При отсутствии сведений о возможных параметрах приемной антенны можно принять

$$T_3 = 23(1 + 6/\epsilon), \text{ К.}$$

Тогда $T_3 = 28,19 \text{ К}$.

Составляющая ЭШТ антенны $T_{\text{КОС}}$ обусловлена приемом радиоизлучения Галактики:

$$T_{\text{КОС}} = 13,5/f_p^{2,4}, \text{ К.}$$

Для $f_p = 20,2 \text{ ГГц}$ величина $T_{\text{КОС}} = 0,03 \text{ К}$.

Составляющая $T_{\text{СОБ}}$ обусловлена собственными тепловыми шумами, образованными из-за потерь энергии сигнала на поверхности зеркала антенны, в облучателе и волноводных соединителях:

$$T_{\text{СОБ}} = 62 \left[685,8 (\bar{\delta}_0/\lambda)^2 + a_{\text{ОБ}} \right], \text{ К.}$$

Относительная величина неровностей поверхности зеркала антенны составляет $\bar{\delta}_0/\lambda = 0,01 \dots 0,02$, $a_{\text{ОБ}} = 0,05 \dots 0,15 \text{ дБ}$.

Для $\bar{\delta}_0/\lambda = 0,01$ и $a_{\text{ОБ}} = 0,15 \text{ дБ}$ величина $T_{\text{СОБ}} = 13,55 \text{ К}$.

Результирующее значение ЭШТ приемной антенны $T_A = 243,37 \text{ К}$.

11. Определить минимальную эквивалентную шумовую температуру приемной антенны для сухой и ясной погоды, значение которой экспериментально проверяется и вносится в технический паспорт:

$$T_{\text{Аmin}} = T_3 + T_{\text{КОС}} + T_{\text{СОБ}}, \text{ К.}$$

Для рассчитанных значений величина $T_{\text{Аmin}} = 41,72 \text{ К}$.

12. Представить схему спутникового канала связи и указать на ней рассчитанные параметры.

Схема однонаправленной передачи информации через ИСЗ «Ka-Sat» (9° в. д.) для линии ИСЗ – ЗС приведена на рис. 3.4.

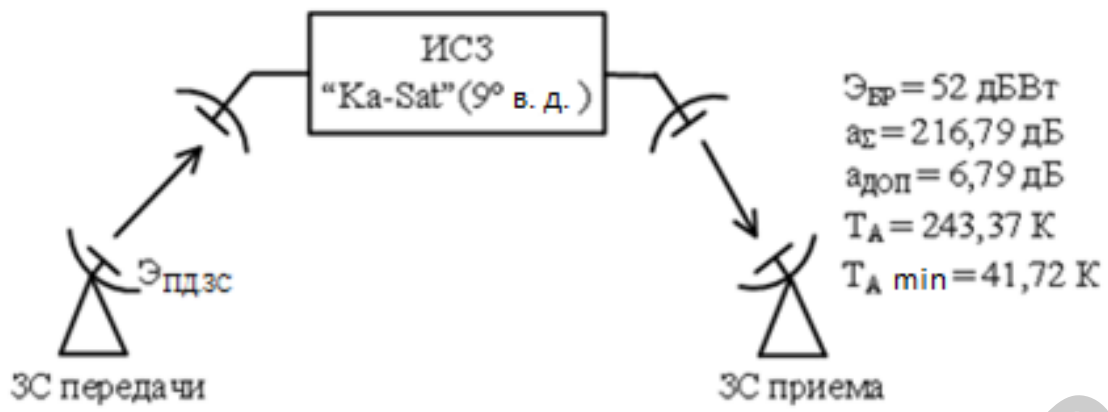


Рис. 3.4. Схема спутникового канала связи

Библиотека БГУИР

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТ УСТАНОВКИ ПРИЕМНЫХ АНТЕНН

4.1. Исходные положения

В условиях города с разновысокой и плотной застройкой жилого массива, а также при сложном рельефе местности не всегда однозначно можно выбрать местоположение антенн для организации приема сигналов с требуемых спутников. Основная причина этой неоднозначности состоит в отсутствии прямой радиовидимости спутников с предполагаемой точки приема вследствие экранирования принимаемых сигналов различными препятствиями (здания, технические сооружения, деревья и др.). Выбор осложняется, если препятствия находятся вблизи мест приема, являются высокими, протяженными и прием сигналов необходимо вести с различных ИСЗ на перестраиваемую антенную систему.

Представляется целесообразным до начала установки антенн выполнить предварительные расчеты по определению возможных точек их размещения на здании с учетом особенностей зоны застройки в месте приема.

Расчет основывается на фрагменте плана застройки микрорайона, высотных отметок рельефа местности и высот объектов в секторе обзора дуги ГО с точки приема.

В результате расчета определяются:

- минимальные значения высот размещения антенн для обеспечения свободного приема сигналов с требуемых ИСЗ;
- максимально допустимая длина выбранного типа соединительного кабеля;
- реально требуемая длина кабеля между конвертором и приемным оборудованием, находящимся в помещении.

В качестве контрольного примера взят вариант приема спутниковых сигналов в г. Минске ($\varphi_3 = 27,58^\circ$ в. д.; $\psi = 53,88^\circ$ с. ш.) на фиксированные антенны головной станции, которые наведены на спутники: HotBird (13° в. д.), Astra 1M ($19,2^\circ$ в. д.), Astra 2A/2B ($28,2^\circ$ в. д.) и Eutelsat 36A (36° в. д.). Фрагмент застройки жилого массива показан на рис. 4.1. Высота технического здания для размещения оборудования и антенн 15 м. Продольный профиль сооружений в секторе приема приведен на рис. 4.2.

Параметры приемных устройств станции для упрощения расчетов системы выбраны однотипными. Коэффициент шума конвертора $n_{ш.к.} = 0,5$ дБ, усиление конвертора $K_{РК} = 55$ дБ, коэффициент шума цифрового приемника (тюнера) $n_{ш.т.} = 8$ дБ, погонное затухание в кабеле типа SAT-602 $\alpha_{КАБ} = 0,311$ дБ/м, потери в делителе мощности $a_{доп} = 3$ дБ, относительное изменение величины ЭШТ на входе конвертора при его установке в тракт приемного оборудования станции $\mu = \Delta T_K / T_K = 0,05$ (5 %), угол обзора дуги ГО с точки приема $\theta_{ОБ} = 141,39^\circ$; $T_K = T_0(10^{0,1n_{ш.к.}} - 1)$ – шумовая температура конвертора, равная 34,8 К.

4.2. Порядок расчета

1. На фрагменте плана застройки жилого массива отметить точкой А предполагаемое место установки приемных антенн (см. рис. 4.1). Из этой точки отложить угол обзора $\theta_{об}$ видимой дуги ГО, ось симметрии которого совпадает с направлением на юг, т. е. указать границы сектора обзора ГО с точки приема при отсутствии препятствий.

2. Рассчитать углы азимутальных смещений $\Delta\beta_i$, заключенные между проекциями направлений на юг и на требуемые спутники, с которых предполагается вести прием:

$$\Delta\beta_i = \pm \arctg[(\operatorname{tg}|\varphi_{Ci} - \varphi_3|) / \sin \psi], \text{ град,}$$

где φ_{Ci} – позиция i -го спутника на ГО; знак «плюс» в формуле берется, если ЗС восточнее ИСЗ, и «минус», если западнее.

Отложить на плане рассчитанные углы из точки А.

Для данных примера значения углов $\Delta\beta_i$ в направлении на требуемые спутники с позициями $\varphi_{C1} = 13^\circ$ в. д., $\varphi_{C2} = 19,2^\circ$ в. д., $\varphi_{C3} = 28,2^\circ$ в. д. и $\varphi_{C4} = 36^\circ$ в. д. равны: 17,75; 10,35; -1,25 и -10,36° соответственно.

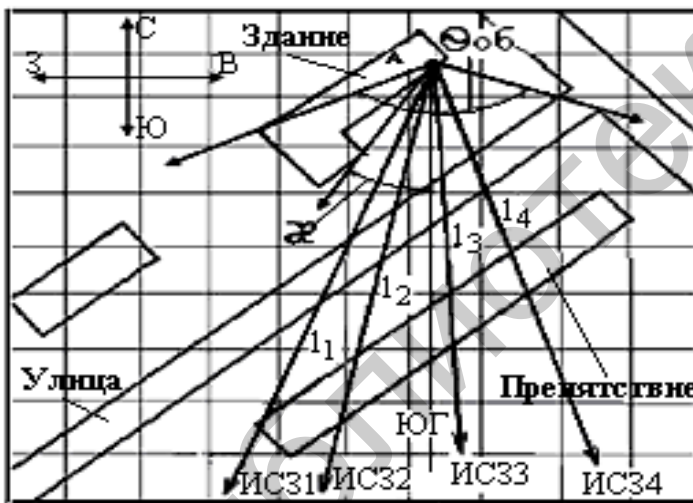


Рис. 4.1. Фрагмент плана застройки

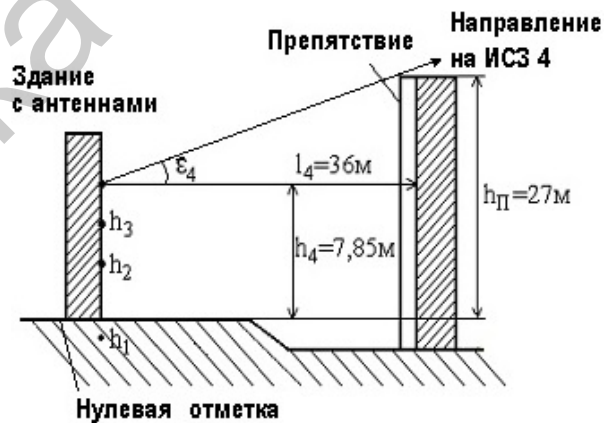


Рис. 4.2. Продольный профиль сооружений в зоне приема

3. Используя план застройки жилого массива, определить по каждому направлению на спутник значения расстояний l_i от точки А до ближайшего препятствия.

В соответствии с планом (см. рис. 4.1) имеем: $l_1 = 57$ м, $l_2 = 47$ м, $l_3 = 40$ м и $l_4 = 36$ м.

4. На основании полученных расстояний l_i и отметок высот препятствий определить минимальные значения высотных точек для размещения антенн, направленных на требуемые спутники:

$$h_i = h_{\Pi i} - l_i[(\cos \alpha_i - A) / \sin \alpha_i], \text{ м};$$

$$\alpha_i = \arctg(\operatorname{tg} \psi / \cos \Delta \beta_i), \text{ град},$$

где $h_{\Pi i}$ – высота препятствия на i -м направлении относительно нулевой отметки здания, на котором планируется установка антенн.

Для препятствий с высотой $h_{\Pi} = 27$ м в результате расчета $h_1 = -2,17$ м, $h_2 = 2,1$ м, $h_3 = 5,25$ м и $h_4 = 7,85$ м.

5. С учетом плана здания, предназначенного для размещения антенн, и с учетом его конструктивных особенностей уточнить крайние позиции спутников на ГО, с которых в случае перестройки антенн возможен прием сигналов в точке А:

$$\varphi_{\text{с.к}} = \varphi_3 \pm \arctg(\operatorname{tg} \chi \cdot \sin \psi), \text{ град},$$

где χ – угол, заключенный между направлением на юг и стеной здания или препятствием, которые ограничивают перестройку антенн.

В формуле используется знак «плюс», если препятствие находится восточнее юга, и знак «минус», если западнее.

В соответствии с рис. 4.1 имеющееся препятствие (уступ здания) находится западнее точки приема и угол $\chi \approx 40^\circ$. Крайняя западная позиция спутника на ГО, с которого еще возможен прием сигналов в точке А, составляет $\varphi_{\text{с.к}} = 6,57^\circ$ з. д.

6. Для известных параметров приемной установки и допустимого относительного изменения номинальной величины ЭШТ конвертора μ при его включении в общий состав установки определить максимально возможное ослабление сигнала между конвертором и спутниковым приемником:

$$a_{\text{к-т}} = 10 \lg \mu + 10 \lg(10^{0,1 \cdot n_{\text{ш.к}}} - 1) + K_{\text{рк}} - n_{\text{ш.т}}, \text{ дБ}.$$

Для данных примера $a_{\text{к-т}} = 26$ дБ.

7. Выбрать тип кабеля, определить в нем погонные потери $a_{\text{КАБ}}$ на частоте 2,15 ГГц, учесть дополнительные потери $a_{\text{доп}}$ в пассивных устройствах (мультипликатор, СВЧ-коммутатор и др.) между конвертором и приемником и определить максимальную длину соединительного кабеля:

$$l_{\text{КАБ}} = (a_{\text{к-т}} + a_{\text{доп}}) / \alpha_{\text{КАБ}}, \text{ м}.$$

Для данных примера $l_{\text{КАБ}} = 70,1$ м.

8. На основании полученных высотных точек для размещения антенн и с учетом максимальной длины кабеля определить место установки антенн и выбрать реально требуемые длины соединительных линий.

В примере все четыре антенны располагаются на крыше технического здания высотой $h = 15$ м. Эта высота здания превышает все отметки для свободного приема сигналов. Учитывая необходимое разнесение мест установки антенн между собой (например, 3 м) и принимая длины кабелей для разводки внутри помещения до точек размещения приемных устройств 15 м, требуемые значения длин отрезков кабелей составят: $l_1 = 30$ м, $l_2 = 33$ м, $l_3 = 36$ м и $l_4 = 39$ м.

9. Результаты расчетов свести в таблицу (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Основные результаты расчета мест установки антенн (для данных примера), м

Тип спутника	Высота препятствия	Расстояние до препятствия	Минимальная высота подъема антенн	Длина кабеля
HotBird	27,0	57,0	-2,17	30,0
Astra 1M	27,0	47,0	2,1	33,0
Astra 2A/2B	27,0	40,0	5,25	36,0
Eutelsat 36A	27,0	36,0	7,85	39,0

5. РАСЧЕТ СИСТЕМНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ РАДИОКАНАЛОВ И ПРИЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

5.1. Общие положения, задачи расчета, исходные данные

Технология доставки различных видов информации по спутниковым каналам связи в адрес пользователей основывается на положениях стандартов DVB-S [3], DVB-S2 [5, 19], DVB-RCS [8] и DVB-DSNG [4], в рамках которых рекомендовано помехоустойчивое кодирование, полосноберегающие методы модуляции и прямая коррекция ошибок (FEC) на приемной стороне.

Цифровое спутниковое телевизионное вещание (ЦСТВ) является многопрограммным, строится на базе алгоритмов компрессии MPEG-2 и MPEG-4 AVC/H.264, ведется в форматах стандартной (SD) и высокой (HD) четкости и передача сформированного мультиплекса осуществляется в одночастотном режиме. Энергетический потенциал спутниковых каналов считается дефицитным и требуются сбалансированные решения по рациональному использованию мощности и полосы частот радиосредств для обеспечения необходимой достоверности приема.

Стандарт DVB-S предусматривает квадратурную QPSK-модуляцию, помехоустойчивое кодирование с внешним укороченным блочным кодом Рида – Соломона (РС) ($R_{PC} = 188/204$) и внутренним сверточным кодом ($R_{СК} = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$), когерентный прием ФМ-сигналов и их двухступенчатое декодирование (по алгоритмам Витерби с мягким решением и Рида – Соломона) с депережежением байт. По сравнению с жестким двухуровневым декодированием при мягком решении по алгоритму максимального правдоподобия, производится дополнительное многоуровневое квантование демодулированных сигналов (обычно восьмиуровневое), что обеспечивает выигрыш в отношении несущая/шум (ОНШ) на приеме более 2 дБ.

Для каналов с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) вероятность ошибки на выходе первой ступени декодирования по алгоритму Витерби $P_{ош.в}$ может составлять около 10^{-4} . При этом значение на выходе декодера Рида – Соломона $P_{ош.РС} \leq 10^{-10} \dots 10^{-11}$, что соответствует квазибезошибочному приему (QEF).

Стандарт DVB-DSNG в дополнение к стандарту DVB-S регламентирует использование модуляций PSK-8 и QAM-16 для спутниковой видеожурналистики и доставки ТВ-программ на профессиональное оборудование телецентров с большеразмерными антеннами. Применение высокоформатных видов модуляции позволяет сократить ширину полосы, занимаемой информацией, и снизить затраты на аренду частотного ресурса ИСЗ.

Стандарт DVB-S2 располагает гораздо более полным набором функциональных и системных возможностей. В нем предусматривается несколько видов модуляции (QPSK, PSK-8, APSK-16 и APSK-32), улучшенное каскадное кодирование с внешним блочным кодом BCH (код Боуза – Чоудхури – Хоквингема) и внутренним LDPC-кодом с низкой плотностью проверок на четность,

когерентный прием и итеративное декодирование по алгоритму Галлагера. При QPSK-модуляции относительная кодовая скорость LDPC-кода принята $R_L = 1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9$ и $9/10$, при PSK-8 – $3/5, 2/3, 3/4, 5/6, 8/9, 9/10$, при APSK-16 – $2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9$ и $9/10$, при APSK-32 – $3/4, 4/5, 5/6, 8/9$ и $9/10$. Критерием достоверного приема информации для каналов с АБГШ служит уровень пакетных ошибок на входе демультимплексора, равный $P_{\text{ош.п}} \leq 10^{-7}$. Это значение соответствует одной неисправленной ошибке в течении часа передачи данных со скоростью 5 Мбит/с и сопоставимо со значением $P_{\text{ош.РС}} = 5,5 \cdot 10^{-11}$ для одиночных ошибок. Исправляющая способность кода BCH зависит от величины R_L кодера LDPC и составляет 12, 10 или 8 скорректированных байт в блоке. Коэффициент расширения полосы спутникового радиоканала b_p относительно теоретически необходимой ширины полосы по уровню -3 дБ может принимать значения 1,35, 1,25 и 1,20. Длина блока цифровой последовательности для обычного кадра при ТВ-вещании 64 800 бит, для короткого кадра при необходимости минимизации задержек передаваемых данных – 16 200 бит.

Технология стандарта DVB-S2 охватывает различные сферы услуг: широкополосный доступ к информационным ресурсам, многопрограммное вещание, репортажи с портативных или передвижных станций, интерактивную связь с помощью спутниковых терминалов или VSAT-станций на стороне абонентов. Поддержание интерактивности в спутниковых сетях базируется на положениях стандарта DVB-RCS.

Целью раздела являются определение базовых показателей приемных систем при организации многопрограммного спутникового вещания, высокоскоростной доставки мультимедийных данных в адрес пользователей, передачи данных телеметрии и контроля. Среди определяемых параметров: ЭШТ приемного оборудования, уровни входных сигналов, энергетический выигрыш от кодирования (ЭВК), спектральная и информационная эффективности, число программ в радиоканале, диаметр и конструктивные параметры приемной антенны.

В приводимом ниже примере с исходными данными (табл. 5.1) расчету подлежат характеристики спутниковой системы коллективного приема.

Таблица 5.1

Исходные данные к расчету

Точка приема и ее координаты	Минск $\varphi_3 = 27,5^\circ$ в. д.; $\psi = 53,84^\circ$ с. ш.
1	2
Спутниковая система	Ямал-402 (54,9° в. д.)
Тип используемой модуляции	QPSK для каналов DBV-S PSK-8 для каналов DVB-S2
Символьная скорость радиопосылок, Мсимв/с	$B_C = 27,5$ для каналов DVB-S $B'_C = 29$ для каналов DVB-S2
Относительная кодовая скорость	$R_{СК} = 3/4$ для сверточного кода $R_L = 3/4$ для кода LDPC

1	2
Вероятность ошибок	$P_{\text{ош.в}} = 10^{-5}$ в канале DVB-S $P_{\text{ош.п}} = 10^{-7}$ в канале DVB-S2
Угол места антенны в направлении на ИСЗ, град	$\varepsilon = 23,66$
ЭИИМ в направлении точки приема, дБВт	$\mathcal{E}_{\text{БР}} = 52$
Суммарное затухание на линии ИСЗ – ЗС, дБ	$a_{\Sigma} = 211,125$
ЭШТ приемной антенны, К	$T_{\text{А}} = 110$
Ширина полосы радиоканала, МГц	$\Delta f_{\text{к}} = 36$
Средняя рабочая частота, ГГц	$f_{\text{СР}} = 11,67$
Потери в корректоре поляризации, дБ	$a_{\text{ВТ}} = 0,15$
Коэффициент шума конвертора, дБ	$n_{\text{ш.к}} = 0,5$
Коэффициент усиления конвертора, дБ	$K_{\text{П.к}} = 55,0$
Коэффициент шума приемника, дБ	$n_{\text{ш.т}} = 10,0$
Потери в делителе мощности, дБ	$a_{\text{д.м}} = 6,0$
Затухание в соединительном кабеле, дБ	$a_{\text{КАБ}} = 15,5$
Эксплуатационный запас в усилении антенны, дБ	$\Delta g_{\text{э}} = 1,0$
Относительная высота неровностей поверхности зеркала антенны	$\delta/\lambda = 0,025$
Конструктивная длина сверточного кодера	$K = 7$

5.2. Порядок расчета характеристик приемной системы

5.2.1. Расчет шумовых показателей приемной системы

1. Определить эквивалентную шумовую температуру приемного устройства, состоящего из малошумящего конвертора с коэффициентом шума $n_{\text{ш.к}}$ и усилением $K_{\text{П.к}}$, соединительного кабеля с потерями $a_{\text{КАБ}}$, делителя мощности с потерями $a_{\text{д.м}}$ и цифрового приемника DVB-S/S2 с коэффициентом шума $n_{\text{ш.т}}$:

$$T_{\text{ПР}} = T_0 [10^{0,1 \cdot n_{\text{ш.к}}} - 1 + 10^{0,1 \cdot (a_{\text{КАБ}} + a_{\text{д.м}} + n_{\text{ш.т}} - K_{\text{П.к}})}], \text{ К.}$$

Для данных примера значение $T_{\text{ПР}} = 35,44$ К.

Упрощенная структурная схема приемной системы (ПС), в соответствии с условием примера, приведена на рис. 5.1.

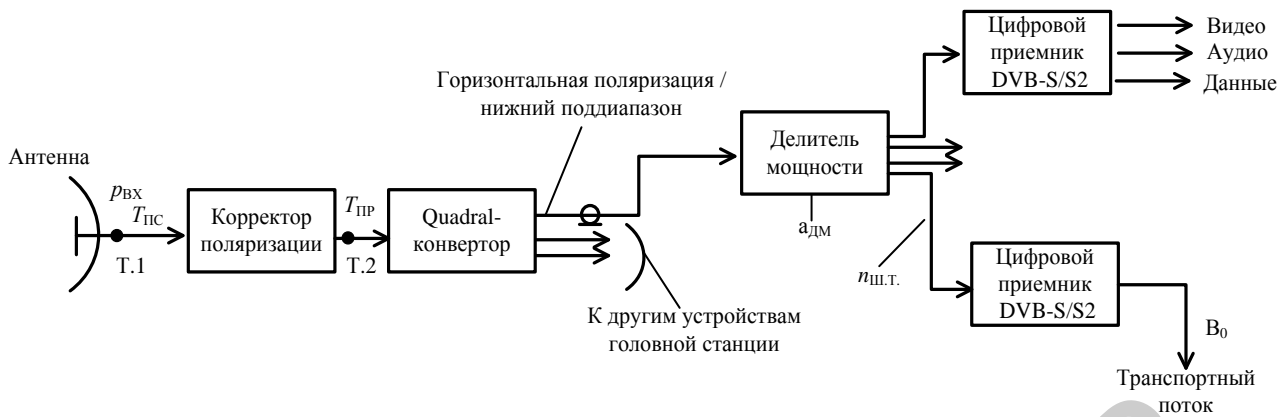


Рис. 5.1. Упрощенная схема станции коллективного приема и распределения спутниковых сигналов

2. Определить полную ЭШТ приемной системы (на выходе антенны), обусловленную шумами антенны, потерями в корректоре поляризации $a_{кп}$ и собственными шумами приемного устройства:

$$T_{пс} = T_A + T_0(10^{0,1 \cdot a_{кп}} - 1) + 10^{0,1 \cdot a_{кп}} \cdot T_{пр}, \text{ К.}$$

Для исходных данных ($T_A = 110 \text{ К}$, $a_{кп} = 0,15 \text{ дБ}$) значение $T_{пс} = 156,6 \text{ К}$.

5.2.2. Расчет энергетических показателей спутникового приема с декодированием по алгоритму Витерби

1. Определить для сигналов с требуемым видом модуляции минимально необходимое значение ОНШ на входе ПС, при котором на выходе декодера Витерби с мягким решением обеспечивается заданная вероятность ошибки $P_{ош.в}$ в информационном бите (рис. 5.2).

Для спутниковых каналов телевидения, высокоскоростного обмена данными, телеметрии и контроля при использовании многопозиционных видов модуляции (QAM-M, PSK-M), когерентной демодуляции и сверточного декодирования минимальное значение ОНШ на входе ПС рассчитывается на основании следующих соотношений:

$$\rho_{ок} = h_{ок} + 10 \cdot \lg \gamma_0;$$

$$h_{ок} = 10 \cdot \lg[2,3 (D_i - 0,5 \cdot \lg(2,3 D_i / \mu_i)) / \mu_i];$$

$$D_i = -\lg P_{ош.в} - \lg(\sqrt{\pi \cdot q_i / C_i}) + \lg(1 / \beta_i);$$

$$\mu_i = R_K d_C \beta_i q_i;$$

$$\beta_i = 1 - [\lg(R_K d_C \cdot \sqrt{K \cdot q_i}) / (-\lg P_{ош.в})],$$

где $h_{0K} = 10 \lg(E_6/N_0)_K$ – отношение сигнал/шум (ОШ) на выходе декодера при наличии кодирования, дБ; $\gamma_0 = B_0/B_C$ – удельная скорость передачи данных, бит/симв; q_i – квадрат коэффициентов помехоустойчивости; C_i – коэффициенты, зависящие от вида модуляции; d_C – свободное расстояние кода; K – конструктивная длина сверточного кодера; i – индекс, указывающий на используемый вид модуляции.

Для систем с кратностью модуляции $m = \log_2(M)$ значения коэффициентов C_i и q_i рассчитываются по формулам:

$$C_1 = 2(1 - 1/\sqrt{M})/m; \quad q_1 = 3m/2(M - 1) \text{ – для QAM-M с } m\text{-четным;}$$

$$C_2 = 2/m; \quad q_2 = 3m/2(M - 0,5) \text{ – для QAM-M с } m\text{-нечетным;}$$

$$C_3 = 1/m; \quad q_1 = m \cdot \sin^2(\pi/M) \text{ – для ФМ-M с } m = 1, 2, 3 \dots;$$

В табл. 5.2 приведены значения свободного расстояния кода d_C для оптимальной структуры двухканального сверточного кодера при $K = 7$ (порождающие полиномы 171 и 133) и $K = 9$ (порождающие полиномы 753 и 561).

Таблица 5.2

Свободное расстояние кода при сверточном кодировании

$R_{СК}$	1/2	2/3	3/4	5/6	7/8
$K = 7$	10	7	5	4	3
$K = 9$	12	8	6	5	4

Для каналов спутникового вещания стандарта DVB-S с квадратурной фазовой модуляцией QPSK (QAM-4) и двухкаскадным кодированием кодом Рида – Соломона и сверточным кодом, приведенные выше соотношения при $C_1 = 0,5$; $q_1 = 1$ преобразуются к виду:

$$\rho_{OK}^{(QPSK)} = h_{OK} + 10 \lg(m \cdot R_K);$$

$$h_{OK} = 10 \cdot \lg[2,3 (D_1 - 0,5 \cdot \lg(2,3 D_1/\mu_1))/\mu_1], \text{ дБ;}$$

$$D_1 = -\lg P_{\text{ош.в}} - 0,55 + \lg(1/\beta_1);$$

$$\mu_1 = R_K d_C \beta_1;$$

$$\beta_1 = 1 - [\lg(R_K d_C \sqrt{K})/(-\lg P_{\text{ош.в}})]; \quad R_K = R_{PC} R_{СК}.$$

Для данных примера (используется QPSK, $R_{СК} = 3/4$, $R_{РС} = 188/204$, $K = 7$, $d_C = 5$, $P_{ош.в} = 10^{-5}$) $\beta = 0,808$, $D_1 = 5,362$, $h_{ок} = 5,59$ дБ, $\rho_{ок}^{(QPSK)} = 6,99$ дБ.

2. Определить требуемое значение ОНШ на входе приемника (точка 1, рис. 5.2) с учетом вносимых в спутниковый канал дополнительных потерь, снижающих помехоустойчивость приема в реальных условиях работы системы:

$$\rho_{ТР.ЗС} = \rho_{ок} + \Delta\rho_{\Sigma.2}, \text{ дБ};$$

$$\Delta\rho_{\Sigma.2} \cong 1 + \nu R_{СК} \cdot \lg m, \text{ дБ}, \nu = 5 \dots 6,$$

где $\Delta\rho_{\Sigma.2}$ – системный запас в помехоустойчивости приема на радиолинии «вниз» при односигнальном режиме ретрансляции сообщений через ИСЗ.

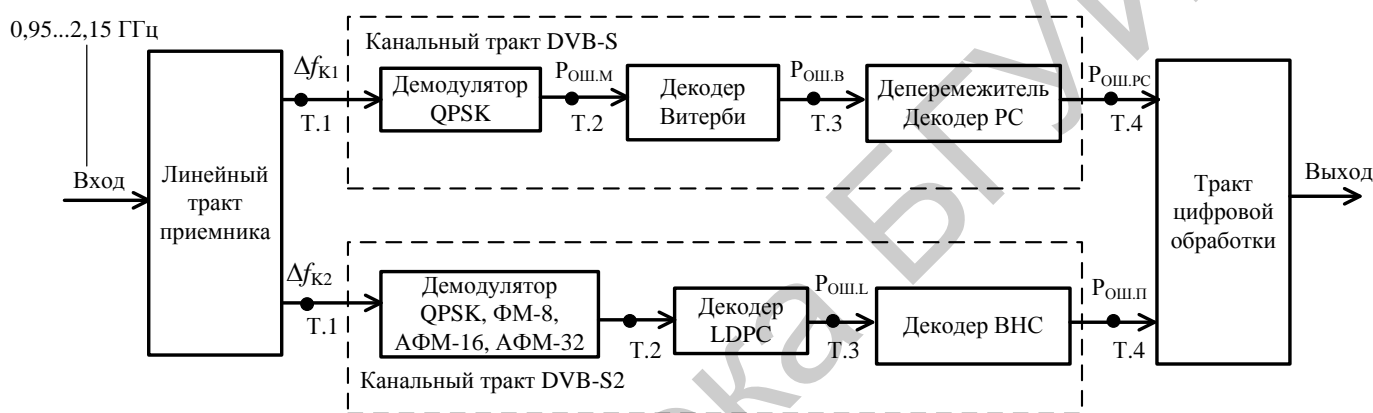


Рис. 5.2. Структурная схема цифрового приемника DVB-S/S2

Причины потерь в спутниковых радиоканалах обусловлены неточной реализацией их устройств, неидеальностью характеристик группового времени запаздывания (ГВЗ) и амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), частотным ограничением передаваемого спектра, наличием переходных шумов в ретрансляторе, действием внесистемных помех, включая помехи мешающих спутников.

Для $\nu = 5,5$ значения $\Delta\rho_{\Sigma.2} = 2,25$ дБ и $\rho_{ТР.ЗС} = 9,24$ дБ.

3. Определить пороговый уровень мощности радиосигнала на входе ПС, при котором обеспечивается требуемая достоверность приема:

$$p_{пор.ЗС} = \rho_{ТР.ЗС} + 10 \cdot \lg T_{ПС} + 10 \cdot \lg B_C - 228,6, \text{ дБВт.}$$

Для $B_C = 27 \cdot 10^6$ симв/с значение $p_{пор.ЗС} = -123,02$ дБВт.

4. Определить энергетический выигрыш в помехоустойчивости приема за счет исправления ошибок в декодере Витерби по сравнению с режимом без кодирования при условии равенства вероятностей ошибок на выходах сравниваемых устройств:

$$\Delta G = h_0 - h_{0K} = \rho_0 - \rho_{0K} + 10 \cdot \lg R_K;$$

$$\rho_0 = h_0 + 10 \cdot \lg(m), \text{ дБ};$$

$$h_0 = 10 \cdot \lg[2,3(A_i - 0,5 \cdot \lg(2,3 A_i/q_i))]/q_i, \text{ дБ};$$

$$A_i = -\lg P_{\text{ош}} - \lg(\sqrt{\pi \cdot q_i}/C_i),$$

где ρ_0 и h_0 – значения отношений несущая/шум и сигнал/шум в отсутствии кодирования.

При использовании QPSK-модуляции ($q_1 = 1, C_1 = 0,5, m = 2$):

$$h_0^{(\text{QPSK})} = 10 \cdot \lg[2,3(A_1 - 0,5 \cdot \lg(2,3 \cdot A_1))], \text{ дБ};$$

$$A_1 = -\lg P_{\text{ош}} - 0,55.$$

Для данных примера в отсутствие кодирования требуемая величина $P_{\text{ош}} = 10^{-5}$ достигается при $A_1 = 4,45, h_0 = 9,57$ дБ, $\rho_0 = 12,58$ дБ.

Энергетический выигрыш в помехоустойчивости от использования в каналах DVB-S сверточного кодирования и декодирования по алгоритму Витерби $\Delta G = 3,98$ дБ.

5. Определить для заданной вероятности ошибки $P_{\text{ош.вх}}$ на выходе декодера Витерби и соответствующего значения h_{0K} величину действующей вероятности ошибки на его входе:

$$P_{\text{ош.вх}} = \frac{C_i}{Z_i \sqrt{\pi}} \cdot 10^{-Z_i^2/2,3};$$

$$Z_i = \sqrt{q_i E_6/N_0}; E_6/N_0 = 10^{0,1 h_{0K}}.$$

Для $C_1 = 0,5, q_1 = 1, h_{0K} = 5,59$ дБ значение $P_{\text{ош.вх}} = 3,93 \cdot 10^{-3}$.

6. Определить исправляющую способность декодера Витерби:

$$И_D = P_{\text{ош.вх}}/P_{\text{ош.в}}.$$

Для $P_{\text{ош.вх}} = 3,93 \cdot 10^{-3}$ и $P_{\text{ош.в}} = 10^{-5}$ значение $И_D = 3,93 \cdot 10^2$, т. е. декодер Витерби в данном режиме снижает уровень ошибок примерно на 2,5 порядка.

7. Определить максимальное значение вероятности ошибки на входе декодера Витерби $P_{\text{ош.м}}$ и величину h_0 , с которых при условии $\Delta G = 10 \cdot \lg[d_c \cdot R_K \cdot \beta_i \cdot \xi_i] = 0$ декодер способен исправлять ошибки после демодулятора и обеспечивать выигрыш от кодирования:

$$P_{\text{ош.м}} = 10^{-\chi};$$

$$\chi = \lg(R_K d_C \sqrt{K q_i}) / [1 - (1/R_K d_C \xi_i)];$$

$$\xi_i = (A_i - 0,5 \lg(2,3 A_i / q_i)) / (D_i - 0,5 \lg(2,3 D_i / \mu_i)).$$

Ввиду зависимости ξ_i от $P_{\text{ош}}$ значение $P_{\text{ош.м}}$ ищется методом последовательных приближений и состоит в поэтапной подстановке рассчитанных величин $P_{\text{ош.м}}$ в выражение для ξ . С целью упрощения расчета можно считать $\xi = 0,7 \dots 0,75$.

Для данных примера ($R_K d_C = 3,45$, $q_i = 1$, $\xi = 0,75$) параметр $\chi = 1,4$ и $P_{\text{ош.м}} = 3,8 \cdot 10^{-2}$.

Значение $h_0 = h_{0К}$, при котором $\Delta G = 0$, рассчитывается по формуле позиции 4 данного пункта для $P_{\text{ош.м}}$.

В результате расчета $A_1 = 0,838$ и $h_0 = h_{0К} = 2,82$ дБ. Таким образом, начиная со значений $h_0 = 2,82$ дБ и $P_{\text{ош.м}} = 3,8 \cdot 10^{-2}$ осуществляется исправление ошибок при декодировании.

8. Представить в координатах $P_{\text{ош}} = \psi(h_0)$ полученные результаты расчета по аналогии с приведенными на рис. 5.3 для рассматриваемого примера.

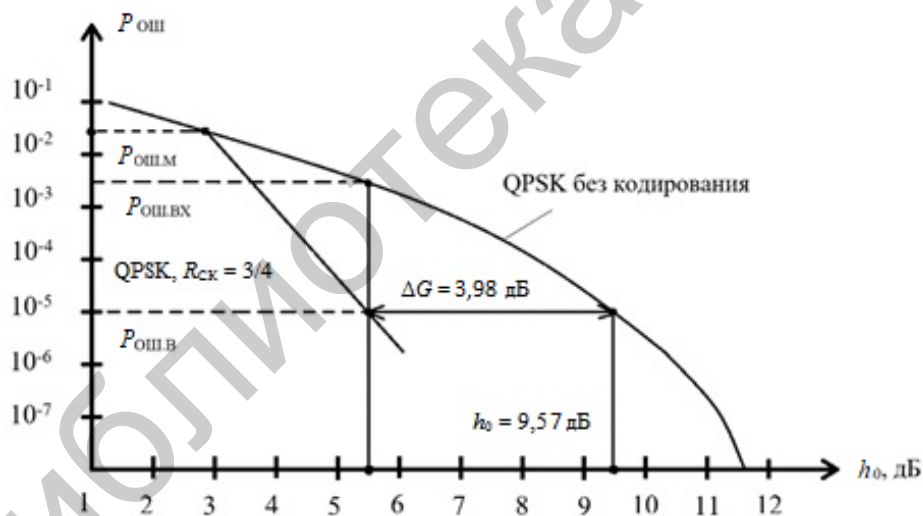


Рис. 5.3. Результаты расчета показателей помехоустойчивости

При верно выполненных расчетах значения h_0 должны находиться на кривой помехоустойчивости без кодирования. Поведение этой кривой определяется по расчетным соотношениям позиции 4 данного пункта или на основании данных табл. 5.3.

9. Определить усиление приемной антенны с учетом запаса на эксплуатационные потери $\Delta g_Э$ для обеспечения требуемого уровня мощности радиосигнала на входе ПС:

$$g_{\text{пр.зс}} = p_{\text{пор.зс}} + a_{\Sigma,2} - \mathcal{E}_{\text{БР}} + \Delta g_Э + 685,8 (\delta/\lambda)^2, \text{ дБ.}$$

Для заданных и рассчитанных данных $g_{\text{ПР.ЗС}} = 37,53$ дБ.

Таблица 5.3

Значения отношений h_0 при отсутствии кодирования, дБ

Вид модуляции	Вероятность ошибки						
	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
QPSK	4,37	6,19	8,39	9,58	10,52	11,3	11,96
QAM-8	6,91	9,22	10,76	11,92	12,84	13,6	14,26
PSK-8	7,24	9,98	11,7	12,95	13,93	14,74	15,42
QAM-16	7,82	10,48	12,18	13,41	14,38	15,18	15,86
QAM-32	10,11	12,77	14,46	15,69	16,66	17,45	18,13
QAM-64	11,74	14,68	16,47	17,75	18,75	19,57	20,26

10. Определить добротность приемной системы ЗС:

$$D_{\text{ПР.ЗС}} = g_{\text{ПР.ЗС}} - 10 \cdot \lg T_{\text{ПС}}, \text{ дБ/К.}$$

Расчетная величина $D_{\text{ПР.ЗС}} = 15,59$ дБ/К.

11. Определить диаметр приемной антенны для организации приема спутниковых сигналов с требуемым качеством:

$$d_A = \frac{1}{f_{\text{СР}} \sqrt{k_{\text{И}}}} \cdot 10^{0,05 (g_{\text{ПР.ЗС}} - 20,4)}, \text{ м.}$$

Значение $k_{\text{И}}$ устанавливается в соответствии с типом предполагаемой антенны: 0,5...0,6 – для прямофокусных; 0,6...0,7 – для однозеркальных офсетных; 0,7...0,75 – для офсетных двухзеркальных антенн.

Для каналов стандарта DVB-S при средней частоте приема $f_{\text{СР}} = 11,41$ ГГц, $k_{\text{И}} = 0,7$ диаметр $d_A = 0,75$ м.

12. Определить энергетический потенциал (ЭП) радиолинии «вниз», характеризуемый отношением мощности несущей $P_{\text{ВХ.ЗС}}$ (в децибелах) на входе ПС земной станции к спектральной плотности мощности шума $N_0 = k \cdot T_{\text{ПС}}$:

$$W_2 = 10 \cdot \lg(P_{\text{ВХ.ЗС}}/N_0) = \mathcal{E}_{\text{БР}} - a_{\Sigma,2} + D_{\text{ПР.ЗС}} + 228,6, \text{ дБГц.}$$

Для данных примера величина $W_2 = 85,07$ дБГц.

13. Определить минимальное значение энергетического потенциала радиолинии «вниз», необходимое для обеспечения достоверного приема:

$$W_{\text{min}2} = p_{\text{пор.ЗС}} - 10 \cdot \lg k T_{\text{ПС}} = \rho_{\text{ТР.ЗС}} + 10 \cdot \lg B_{\text{С}}, \text{ дБГц.}$$

Для $\rho_{\text{ТР.ЗС}} = 9,24$ дБ и $B_{\text{С}} = 27 \cdot 10^6$ симв/с значение $W_{\text{min}2} = 83,64$ дБГц.

14. Определить энергетический запас на радиолинии «вниз» для компенсации возможных потерь в процессе эксплуатации системы:

$$K_{\text{зап}} = W_2 - W_{\text{min}2}, \text{ дБ.}$$

Значение $K_{\text{зап}} = 1,43$ дБ и соответствует принятому запасу на эксплуатационные потери в усилении антенны.

5.2.3. Расчет информационных показателей спутникового приема с декодированием по алгоритму Витерби

1. Определить на стороне приема после демодуляции и декодирования скорость передачи данных:

$$B_0 = 10^{0,1 \cdot (W_{\text{min}2} - h_{\text{OK}} - \Delta\rho_{\Sigma,2})} = B_C \cdot m \cdot R_K, \text{ бит/с.}$$

С учетом $W_{\text{min}2} = 83,64$ дБГц, $h_{\text{OK}} = 5,59$ дБ, $\Delta\rho_{\Sigma,2} = 2,25$ дБ, $B_C = 27,5$ Мсимв/с, $m = 2$, $R_{\text{СК}} = 3/4$, $R_{\text{РС}} = 188/204$ скорость передачи данных составляет 38,01 Мбит/с.

2. Определить среднее число ТВ-программ, транслируемых по спутниковому каналу с SD- или HD-качеством, при сжатии видеоданных по стандартам MPEG-2 и MPEG-4/H.264:

$$N_{\text{П}} = \text{int} (B_0 / B_{\text{П}}).$$

Принять скорость данных на программу $B_{\text{П}}$ для MPEG-2 с SD- и HD-качеством 4,5 и 17 Мбит/с, для MPEG-4/H.264 соответственно 2,5 и 8 Мбит/с.

При $B_0 = 38,01$ Мбит/с по одному каналу с компрессией MPEG-2 можно передать 8 SD- или 2 HD-программы, с компрессией MPEG-4/H.264 – 15 SD- или 4 HD-программы соответственно.

3. Определить спектральную эффективность спутникового канала γ_C и удельную скорость передачи данных γ_0 :

$$\gamma_C = B_0 / \Delta f_K = B_C \cdot m \cdot R_K / \Delta f_K, \text{ бит/(с} \cdot \text{Гц)};$$

$$\gamma_0 = B_0 / B_C, \text{ бит/симв.}$$

Для $\Delta f_K = 36$ МГц значения $\gamma_C = 1,06$ бит/(с · Гц) и $\gamma_0 = 1,38$ бит/симв.

4. Определить информационную эффективность спутникового канала с рассчитанными характеристиками, которая устанавливает соотношение между реальной скоростью передачи данных в полосе канала и пропускной способностью C по Шеннону:

$$\eta_{\text{инф}} = (B_0 / C) = \gamma_C / \gamma_{\text{ш}} = 0,3\gamma_C / \lg(1 + 10^{0,1\rho_{\text{ТР.ЗС}}}),$$

где $\gamma_{\text{ш}} = C/\Delta f_K$ – спектральная эффективность по Шеннону.

Для $\rho_{\text{ТР.ЗС}} = 9,24$ дБ значение $\eta_{\text{инф}} = 0,327$, т. е. реальная скорость передачи информации в 3,06 раза ниже пропускной способности по Шеннону. Этот результат обусловлен наличием потерь в радиотракте и ограниченными возможностями в исправлении ошибок кодом РС+СК.

5. Определить информационную эффективность спутникового канала при отсутствии потерь в радиотракте.

Принять, что $\rho_{\text{ТР}} = \rho_{\text{ОК}}$ (т. е. исключаются дополнительные потери в канале связи и системный запас $\Delta\rho_{\Sigma,2} = 0$) и $\Delta f_K = B_C$ (т. е. ширина спектра сигнала совпадает с шириной полосы канала по уровню -3 дБ и $\gamma_C = \gamma_0$).

В этом случае $\eta_{\text{инф}} = 0,532$, т. е. пропускная способность спутникового канала стандарта DVB-S с QPSK-модуляцией, декодированием по алгоритму Витерби и принятыми параметрами ($P_{\text{ОШ.В}} = 10^{-5}$, $R_{\text{СК}} = 3/4$) ниже предельной в 1,88 раза.

Дальнейшее сокращение различия в пропускной способности предполагает использование более совершенных методов помехоустойчивого кодирования и декодирования.

5.2.4. Расчет параметров приема по стандарту DVB-S2

1. Определить минимальный уровень мощности сигнала на входе приемной системы стандарта DVB-S2 (Т.1 на рис. 5.2) для обеспечения заданной вероятности пакетной ошибки $P_{\text{ОШ.п}}$ на выходе второй ступени декодирования:

$$p_{\text{пор.ЗС}} = \rho_{\text{ОК}} + \Delta\rho_{\Sigma,2} + 10 \cdot \lg T_{\text{ПС}} + 10 \cdot \lg B'_C - 228,6, \text{ дБВт};$$

$$\Delta\rho_{\Sigma,2} \cong 1 + \vartheta R_L \cdot \lg m, \text{ дБ, где } \vartheta = 4 \dots 5.$$

Значения $\rho_{\text{ОК}}$ для различных кодовых скоростей R_L кода LDPC и видов модуляции (QPSK, PSK-8, APSK-16 и APSK-32) при обеспечении на выходе ПС $P_{\text{ОШ.п}} = 10^{-7}$ определены стандартом DVB-S2 [5] и приведены в табл. 5.4. Для других значений $P_{\text{ОШ.п}}$ величина $\rho_{\text{ОК}}$ рассчитывается по следующим формулам:

– при модуляции PSK-8 (ФМ-8):

$$\rho_{\text{ОК}}^{(\text{PSK-8})} = 10 \cdot \lg[2,97 \cdot R_L \cdot (0,873 + R_L^4) \cdot (B_1 - 0,5\lg B_1)], \text{ дБ};$$

$$B_1 = (-\lg P_{\text{ОШ.п}}/30,5) + 2,2 \cdot R_L^4 + 1,65;$$

– при модуляции QPSK, APSK-16 и APSK-32:

$$\rho_{\text{OK}}^{(\text{APSK-M})} = 10 \cdot \lg[0,217 \cdot M \cdot R_L \cdot (0,873 + R_L^4) \cdot (B_2 - 0,5 \lg B_2)], \text{ дБ};$$

$$B_2 = (-\lg P_{\text{ош.п}}/30,5) - \lg \left[m / \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \cdot \sqrt{R_L} \right] + 0,5 \cdot R_L^4 \cdot m + 3,85.$$

Для данных примера (модуляция PSK-8, $B'_C = 29$ Мсимв/с, $R_L = 3/4$, $m = 3$, $P_{\text{ош.п}} = 10^{-7}$) и значения $\rho_{\text{OK}} = 7,91$ дБ, взятого из табл. 5.4, системный запас в ОНШ $\Delta\rho_{\Sigma.2} = 2,79$ дБ и минимальный уровень радиосигнала на входе ПС $p_{\text{пор.ЗС}} = -121,33$ дБВт.

Таблица 5.4

Значения ОНШ на входе приемной системы при обеспечении $P_{\text{ош.п}} = 10^{-7}$, дБ

Вид модуляции	R_L	1/2	3/5	2/3	3/4	4/5	5/6	8/9	9/10
	t	12	12	10	12	12	10	8	8
QPSK	ρ_{OK}	1,0	2,23	3,1	4,03	4,68	5,8	6,2	6,42
PSK-8	ρ_{OK}	–	5,5	6,62	7,91	–	9,35	10,69	10,89
APSK-16	ρ_{OK}	–	–	8,97	10,21	11,03	11,61	12,89	13,13
APSK-32	ρ_{OK}	–	–	–	12,73	13,64	14,28	15,69	16,05

В табл. 5.4 величина t – исправляющая способность кода BCH, выраженная в байтах.

2. Определить энергетический выигрыш от кодирования в канале системы DVB-S2 с каскадным кодом BCH и LDPC по сравнению с режимом без кодирования при равенстве вероятностей ошибок на выходах устройств:

$$\Delta G = h_0 - \rho_{\text{OK}} + 10 \cdot \lg[m(R_L - t/4050)], \text{ дБ}.$$

При определении h_0 (см. позицию 4 п. 5.2.2) принять, что в отсутствие кодирования величина $P_{\text{ош}} = 5,5 \cdot 10^{-4} P_{\text{ош.п}}$.

На основании позиции 1 и позиции 4 п. 5.2.2 для модуляции PSK-8 в отсутствие кодирования ($C_3 = 0,333$, $q_3 = 0,439$, $A_3 = 9,714$, $P_{\text{ош}} = 5,5 \cdot 10^{-11}$) значение $h_0 = 16,68$ дБ. Энергетический выигрыш в канале DVB-S2 при использовании двух ступеней декодирования $\Delta G = 12,27$ дБ.

3. Определить по позиции 9 п. 5.2.2 усиление приемной антенны.

Для данных примера $g_{\text{пр.ЗС}} = 39,22$ дБ.

4. Определить по позиции 10 п. 5.2.2 добротность ПС.

Для данных примера $D_{\text{пр.ЗС}} = 17,28$ дБ/К.

5. Определить по позиции 11 п. 5.2.2 диаметр приемной антенны для приема сигналов с модуляцией PSK-8 по стандарту DVB-S2.

Для данных примера $d_A = 0,92$ м.

6. Определить по позиции 12 п. 5.2.2 ЭП радиолинии «вниз».

Значение $W_2 = 86,67$ дБГц.

7. Определить по позиции 13 п. 5.2.2 минимальное значение ЭП радиолинии «вниз».

Значение $W_{\min 2} = 85,33$ дБГц, что на 1,69 дБ больше, чем в случае использования DVB-S с QPSK-модуляцией. Повышение ЭП связано с переходом на PSK-8, что потребовало увеличение диаметра приемной антенны (с 0,75 до 0,92 м) и ее усиления.

8. Определить информационную скорость данных транспортного потока на выходе декодера BCH (Т.4 на рис. 5.2):

$$B_0 = B_c m R_{\text{BCH}} R_L / (1 + 80/K_{\text{BCH}})(1 + 90m/n_L), \text{ бит/с};$$

$$R_{\text{BCH}} = K_{\text{BCH}}/N_{\text{BCH}} = 1 - (16t/n_L R_L); \quad K_{\text{BCH}} = n_L R_L - 16t.$$

Для данных примера ($B'_c = 29$ Мсимв/с, $R_L = 3/4$, $n_L = 64\,800$ бит, $t = 12$) скорость кода BCH $R_{\text{BCH}} = 0,996$, длина некодированной части кода BCH $K_{\text{BCH}} = 48\,408$ бит и $B_0 = 64,616$ Мбит/с.

9. Определить по позиции 2 п. 5.2.3 среднее число ТВ-программ в спутниковых каналах с SD- и HD-качеством при сжатии видеоданных по стандартам MPEG-2 и MPEG-4/H.264.

При $B_0 = 64,616$ Мбит/с в одном канале с компрессией MPEG-2 можно разместить 14 SD- или 4 HD-программы, с компрессией MPEG-4/H.264 соответственно 25 SD- или 8 HD-программ.

10. Определить по позиции 3 п. 5.2.3 спектральную эффективность спутникового канала γ_c и удельную скорость передачи данных γ_0 .

Для $\Delta f_K = 36$ МГц величина $\gamma_c = 1,795$ бит/(с · Гц) и $\gamma_0 = 2,228$ бит/симв.

11. Определить по позиции 4 п. 5.2.3 информационную эффективность спутникового канала стандарта DVB-S2 с заданными характеристиками и качеством приема.

В результате расчета $\eta_{\text{инф}} = 0,487$, т. е. в спутниковом канале DVB-S2 скорость передачи данных в 2,05 раза меньше предельной по Шеннону.

12. Определить информационную эффективность спутникового канала DVB-S2 с принятыми параметрами модуляции и кодирования при минимизации возможных потерь в тракте.

Приняв $\Delta p_{\Sigma,2} = 0$ и $\gamma_c = \gamma_0$, получим $\eta_{\text{инф}} = 0,77$. Этот результат означает, что при идеализации характеристик канала с PSK-8, $R_L = 3/4$ и $P_{\text{ош.п}} = 10^{-7}$ скорость передачи данных в 1,3 раза меньше предельной.

13. Определить проигрыш в полученных энергетических и спектральных показателях по сравнению с потенциально возможными значениями $\rho_{\text{ш}}$ и $\gamma_{\text{ш}}$ по Шеннону:

$$\delta\rho = \rho_{\text{ЗС}} - \rho_{\text{Ш}} = \rho_{\text{ЗС}} - 10\lg(10^{0,3\gamma} - 1), \text{ дБ};$$

$$\delta\gamma = \gamma_{\text{Ш}} - \gamma = \gamma \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\text{инф}}} - 1 \right), \text{ бит}/(\text{с} \cdot \text{Гц}).$$

Для рабочего режима ($\rho_{\text{ЗС}} = \rho_{\text{ТР.ЗС}} = 10,7$ дБ, $\gamma = \gamma_{\text{С}} = 1,795$ бит/(с · Гц), $\eta_{\text{инф}} = 0,487$) проигрыш в энергетической эффективности $\delta\rho_1 = 6,8$ дБ, в спектральной — $\delta\gamma_1 = 1,89$ бит/(с · Гц). При отсутствии потерь в радиоканале ($\rho_{\text{ЗС}} = \rho_{\text{ОК}} = 7,91$ дБ, $\gamma = \gamma_0 = 2,228$ бит/(с · Гц), $\eta_{\text{инф}} = 0,77$) значения $\delta\rho_2 = 2,31$ дБ и $\delta\gamma_2 = 0,665$ бит/(с · Гц).

14. Построить зависимость $\gamma_{\text{Ш}} = C/\Delta f_{\text{К}} = \lg\left(1 + 10^{0,1\rho_{\text{ТР.ЗС}}}\right)/0,3$, характеризующую границу Шеннона в координатах $\gamma = \Psi(\rho)$, и представить результаты различия в энергетических и спектральных показателях для каналов DVB-S и DVB-S2 по сравнению с предельными (рис. 5.4). Расчет $\delta\rho$ и $\delta\gamma$ для параметров канала DVB-S выполнить по позиции 13 данного пункта.

Для параметров DVB-S в рабочем режиме значения $\delta\rho_3 = 8,92$ дБ, $\delta\gamma_3 = 2,18$ бит/(с · Гц), в идеализированном — $\delta\rho_4 = 4,95$ дБ, $\delta\gamma_4 = 1,21$ бит/(с · Гц).

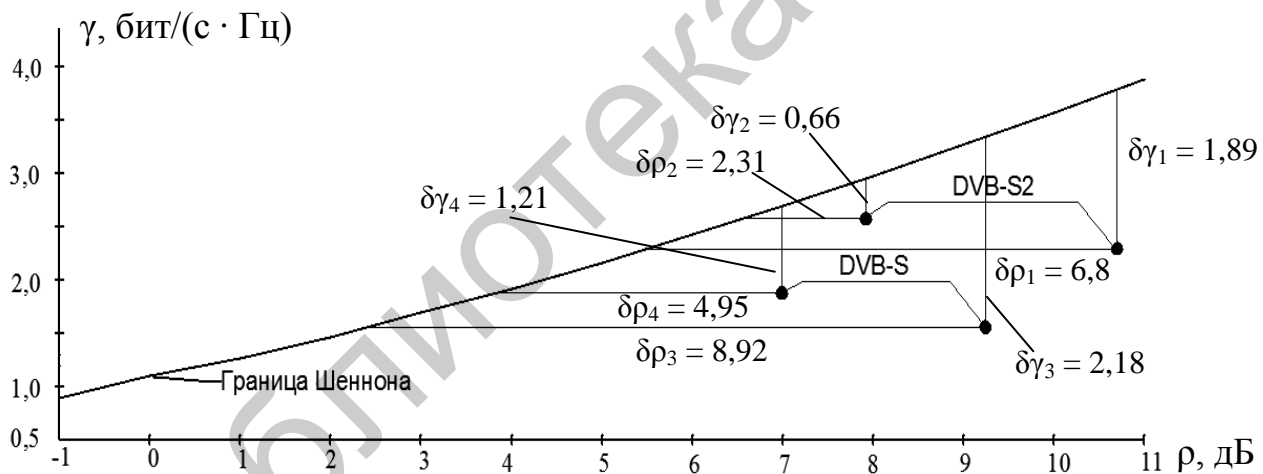


Рис. 5.4. Показатели энергетической и спектральной эффективностей для каналов DVB-S и DVB-S2

Из приведенных построений видно, что для каналов стандарта DVB-S2 с модуляцией PSK-8 и кодированием BCH+LDPC отклонение от границы Шеннона значений энергетической и спектральной эффективностей выше, чем в случае DVB-S с модуляцией QPSK и кодированием PC+СК. При минимизации потерь в радиотрактах ($\Delta\rho_{\Sigma 2} = 0$, $\gamma_{\text{С}} = \gamma_0$) проигрыш в значениях $\delta\rho$ и $\delta\gamma$ сокращается.

5.2.5. Расчет параметров приемной антенны и уровня сигнала на входе цифрового приемника

1. По каталогам или сайтам Интернета выбрать тип промышленной антенны, размеры которой соответствуют большему из рассчитанных диаметров для систем стандартов DVB-S и DVB-S2.

Согласно данным примера, выбираем офсетную антенну фирмы TRIAX (Дания) типа TRIAX TD110 размером 1,0 × 1,1 м, со стальным рефлектором, двойным антикоррозийным покрытием и коэффициентом усиления $g_{\text{пр}} = 40,2$ дБ на частоте 11,7 ГГц. Размер 1,0 м соответствует малой оси зеркала $d_{0\Phi}$, размер 1,1 м – большой $D_{0\Phi}$.

2. Определить по приведенным ниже формулам конструктивные параметры офсетной антенны для правильной установки облучателя и конвертора в ее фокусе (рис. 5.5):

– фокусное расстояние $F_{0\Phi}$, отношение $F_{0\Phi}/d_{0\Phi}$ и глубину зеркала $h_{0\Phi}$:

$$F_{0\Phi} = d_{0\Phi}^3 / 16D_{0\Phi}h_{0\Phi};$$

$$F_{0\Phi}/d_{0\Phi} = d_{0\Phi}/1,6 D_{0\Phi};$$

$$h_{0\Phi} \approx 0,1 d_{0\Phi}, \text{ м};$$

– конструктивное смещение нижнего края зеркала относительно оси симметрии гипотетического зеркала:

$$\Delta_{0\Phi} = 0,5 d_{0\Phi} \left[2,5 \sqrt{1 - (d_{0\Phi}/D_{0\Phi})^2} - 1 \right], \text{ м};$$

– расстояние от фокуса до верхней кромки зеркала:

$$l_{0\Phi} = F_{0\Phi} + [(d_{0\Phi} + \Delta_{0\Phi})^2 / 4F_{0\Phi}], \text{ м};$$

– погрешность установки облучателя:

$$\Delta z = \lambda/8 [1 - \cos(2\arctg(d_{0\Phi}/4F_{0\Phi}))], \text{ м}.$$

В результате расчетов для $d_{0\Phi} = 1,0$ м и $D_{0\Phi} = 1,1$ м получим:

$$h_{0\Phi} = 0,1 \text{ м}; F_{0\Phi} = 0,568 \text{ м}; F_{0\Phi}/d_{0\Phi} = 0,568 \text{ м}; \Delta_{0\Phi} = 0,02 \text{ м};$$

$$l_{0\Phi} = 1,026 \text{ м}; \Delta z = 0,97 \text{ см}.$$

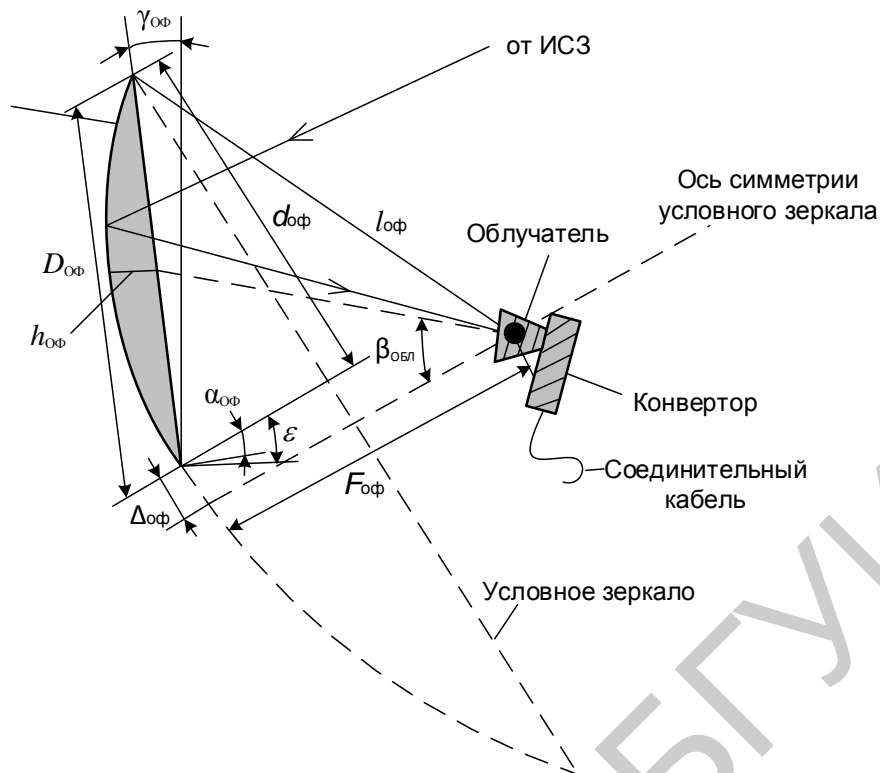


Рис. 5.5. Конструкция офсетной антенны и ее параметры

3. Определить офсетный угол $\alpha_{\text{оф}}$ между направлением на спутник и нормалью к раскрыву зеркала антенны и рассчитать угловое отклонение плоскости ее раскрыва $\gamma_{\text{оф}}$ от вертикали:

$$\alpha_{\text{оф}} = \text{arctg} \left[(D_{\text{оф}}/d_{\text{оф}}) \sqrt{1 - (d_{\text{оф}}/D_{\text{оф}})^2} \right], \text{ град};$$

$$\gamma_{\text{оф}} = \varepsilon - \alpha_{\text{оф}}, \text{ град.}$$

В результате расчета $\alpha_{\text{оф}} = 24,6^\circ$, значение $\gamma_{\text{оф}} = -0,94^\circ$ и раскрыв офсетной антенны наклонен относительно вертикали в сторону земной поверхности.

4. Представить упрощенную конструкцию офсетной антенны (в соответствии с рис. 5.5) и указать на ней рассчитанные параметры.

5. Определить по уровню -3 дБ ширину главного лепестка ДН антенны в двух плоскостях:

$$\theta_{\text{о.ГОР}} = 21/f_{\text{СР}}d_{\text{оф}}, \text{ град};$$

$$\theta_{\text{о.ВЕР}} = 19/f_{\text{СР}}d_{\text{оф}}, \text{ град.}$$

Для $f_{\text{СР}} = 11,67$ ГГц и $d_{\text{оф}} = 1,0$ м, $\theta_{\text{о.ГОР}} = 1,8^\circ$ и $\theta_{\text{о.ВЕР}} = 1,63^\circ$.

6. Определить с учетом усиления выбранного типа антенны уровни мощности сигналов на входах приемной станции $p_{\text{ВХ.ЗС}}$ и цифрового приемника $p_{\text{ВХ.Т}}$ (в полосе 0,95...2,15 ГГц), а также уровень напряжения на входе приемника $U_{\text{ВХ.Т}}$:

$$p_{\text{ВХ.ЗС}} = \mathcal{E}_{\text{БР}} - a_{\Sigma.2} + g_{\text{ПР.ЗС}}, \text{ дБВт};$$

$$p_{\text{ВХ.Т}} = p_{\text{ВХ.ЗС}} + K_{\text{Р.К}} - a_{\text{ВТ}} - a_{\text{К-Т}}, \text{ дБВт};$$

$$U_{\text{ВХ.Т}} = p_{\text{ВХ.Т}} + 10 \lg R_{\text{ВХ}} + 120, \text{ дБмкВ}.$$

Для исходных и дополнительных данных ($g_{\text{ПР.ЗС}} = 40,2$ дБ, $a_{\text{К-Т}} = a_{\text{Д.М}} + a_{\text{КАБ}} = 21,5$ дБ, $R_{\text{ВХ}} = 75$ Ом) получаем следующие значения: $p_{\text{ВХ.ЗС}} = -118,92$ дБВт, $p_{\text{ВХ.Т}} = -85,57$ дБВт и $U_{\text{ВХ.Т}} = 53,18$ дБмкВ (465 мкВ).

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ ПЕРЕДАТЧИКА ЗЕМНОЙ СТАНЦИИ И ПАРАМЕТРОВ БОРТОВОГО РЕТРАНСЛЯТОРА

6.1. Общие положения, исходные данные

Расчет выходной мощности передатчика ЗС1, входящего в состав спутниковой системы с прямой ретрансляцией сигналов, основывается на предварительном определении требуемого значения ОНШ на входе бортового ретранслятора (БР), при котором на приемной стороне ЗС2 обеспечивается заданная вероятность ошибки (рис. 6.1). При этом, в зависимости от назначения сети, учитывается влияние на помехоустойчивость приемных систем не только наличие гауссовского шума, но и ряда шумовых составляющих, вызванных искажениями сигналов при их прохождении по реальному радиотракту, включая воздействие помех мешающих ИСЗ [11, 12, 20].

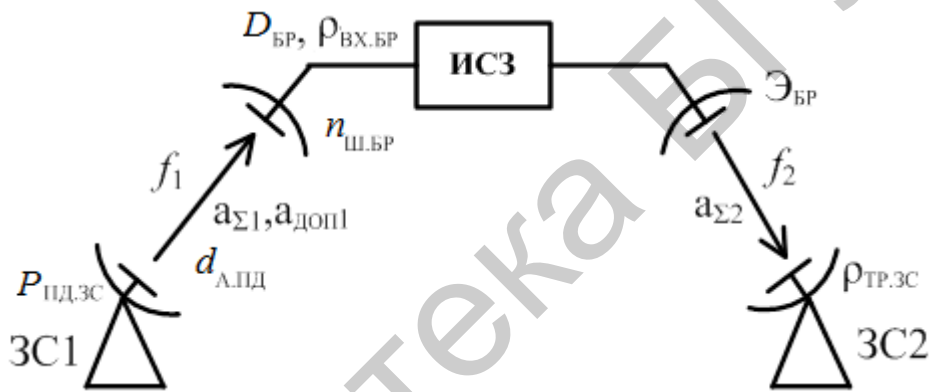


Рис. 6.1. Структурная схема спутникового канала связи

В частности, заметное влияние на помехоустойчивость ЗС2 могут оказывать переходные шумы бортового ретранслятора, если в нем присутствует многосигнальный режим передачи и выходной усилитель мощности работает в нелинейном режиме с высоким уровнем интермодуляционных продуктов. Многосигнальный режим характерен для многостанционного доступа к ИСЗ с частотным разделением каналов. Для снижения в этом режиме нелинейных искажений и повышения многосигнального коэффициента интермодуляции до значений $IM_M \geq 18$ дБ используют линейризацию амплитудной характеристики усилителя и ограничивают уровень мощности входных сигналов на 8...12 дБ относительно точки его насыщения (показатель отступления по входу – ИВО). При этом выходная мощность передатчика из-за нелинейности АХ снижается на 3...5 дБ по отношению к максимальному значению (показатель отступления по выходу – ОВО). В односигнальном режиме передачи радиосигналов, характерном для ТВ-вещания, влияние на прием переходных шумов не столь заметно и усилитель может работать в режиме, близком к максимальной выходной мощности [22, 23].

При проектировании интерактивных спутниковых систем для компенсации потерь, снижающих помехоустойчивость приема из-за ряда факторов (переходные шумы ретранслятора, помехи мешающих ИСЗ, фазовые шумы, неравномерность ГВЗ, ограничение спектра, отклонение характеристик модема от требуемых и др.), предусматривают системный запас $\Delta\rho_{\Sigma}$. Величина запаса складывается в основном из трех составляющих, учитывающих наличие переходных шумов БР – $\Delta\rho_{БР}$, внесистемных помех мешающих ИСЗ – $\Delta\rho_{М}$ и канальных искажений – $\Delta\rho_{К}$:

$$\Delta\rho_{\Sigma,2} = \Delta\rho_{БР} + \Delta\rho_{М} + \Delta\rho_{К}, \text{ дБ.}$$

Величина $\Delta\rho_{БР}$ зависит от назначения сети (телевизионное вещание, высокоскоростная передача данных, интерактивная связь с использованием VSAT-станций и др.), методов многостанционного доступа к ИСЗ (FDMA, TDMA, CDMA) и может находиться в широком диапазоне значений 0,4...3 дБ и более. Минимальное значение $\Delta\rho_{БР}$ устанавливается прежде всего при дефиците энергетического потенциала W_2 на радиолинии «вниз», например, при индивидуальном приеме спутниковых телевизионных сигналов. Верхнее значение $\Delta\rho_{БР}$ выбирается при дефиците энергопотенциала на радиолинии «вверх», например, в интерактивной сети на базе VSAT-станций. Величина $\Delta\rho_{М}$ ограничена требованиями международного союза электросвязи (МСЭ) по обеспечению электромагнитной совместимости радиосредств в спутниковых системах фиксированной и радиовещательной служб значениями 1,0 и 0,5 дБ соответственно.

Величина $\Delta\rho_{К}$, компенсирующая потери в ОНШ из-за искажений в канале, рассчитывается по формуле

$$\Delta\rho_{К} = 1 + \xi R_{К} \cdot \lg m, \text{ дБ,}$$

где ξ – коэффициент, равный 2...3.

В контрольном примере определяются параметры БР и выходная мощность станции VSAT, работающей в сети интерактивной связи на частоте передачи $f_1 = 14$ ГГц с модуляцией PSK-8 и кодовой скоростью кода LDPC $R_L = 5/6$. Диаметр передающей антенны станции $d_{ПД,ЗС1} = 1,2$ м, потери в волноводном тракте $a_{Ф,ПД,ЗС1} = 0,1$ дБ, $k_{И} = 0,7$, скорость передаваемых данных $V_{01} = 2,0$ Мбит/с. Размер луча приемной антенны БР $\theta_1 \cdot \theta_2 = 2 \cdot 1,6^\circ$. Потери в фидере $a_{Ф,БР} = 0,3$ дБ, коэффициент использования поверхности (КИП) антенны БР $k_{И} = 0,6$, коэффициент шума приемника БР $n_{Ш,БР} = 2$ дБ. Общая ширина полосы спутникового канала $\Delta f_{К} = 72$ МГц. Дополнительные потери на радиолинии «вверх» $a_{доп1} = 2,4$ дБ, наклонная дальность ЗС1 – ИСЗ $r_1 = 38\,000$ км. Снижение усиления приемной антенны бортового ретранслятора из-за того, что ЗС1 находится вне точки прицеливания $\Delta g_{БР} = 1$ дБ. Позиция ИСЗ на орбите $\psi_c = 51,5^\circ$ в. д. Координаты приемной станции ЗС2:

$\psi = 54^\circ$ с. ш., $\varphi_3 = 33^\circ$ в. д. Диаметр приемной антенны $d_{\text{ПР.ЗС2}} = 6$ м, $f_{\text{P2}} = 11,5$ ГГц, $T_{\text{ЗС2}} = 250$ К, $a_{\text{доп2}} = 2,2$ дБ, $k_{\text{и.ЗС2}} = 0,6$ дБ, $P_{\text{ОШ.П}} = 10^{-7}$.

6.2. Порядок расчета выходной мощности передающей станции

1. Определить минимально требуемое (теоретическое) значение ОНШ на входе приемного устройства ЗС2, при котором для исходных параметров модуляции и кодирования обеспечивается заданная вероятность ошибки.

Значения ОНШ в каналах стандарта DVB-S рассчитываются по формулам, приведенным в п. 5.2.2. В каналах DVB-S2 при $P_{\text{ОШ.П}} = 10^{-7}$ значения $\rho_{\text{ОК}}$ берутся из табл. 5.4, для других $P_{\text{ОШ.П}}$ расчет ведется по формулам, приведенным в п. 5.2.4.

Для $R_L = 5/6$, $m = 3$, $P_{\text{ОШ.П}} = 10^{-7}$ значение $\rho_{\text{ОК}} = 9,35$ дБ (см. табл. 5.4).

2. Определить реально требуемое значение ОНШ на входе ПС ЗС2 с учетом системных запасов $\Delta\rho_{\text{М}}$, $\Delta\rho_{\text{БР}}$, $\Delta\rho_{\text{К}}$, компенсирующих влияние на помехоустойчивость спутникового приема нежелательных составляющих помех и переходных шумов, поступающих на вход станции:

$$\rho_{\text{ТР.ЗС}} = \rho_{\text{ОК}} + \Delta\rho_{\text{М}} + \Delta\rho_{\text{БР}} + \Delta\rho_{\text{К}}, \text{ дБ.}$$

Для $R_L = 5/6$, $m = 3$, $\Delta\rho_{\text{К}} = 1,8$ дБ, $\Delta\rho_{\text{М}} = 0,4$ дБ, $\Delta\rho_{\text{БР}} = 1,5$ дБ значение $\rho_{\text{ТР.ЗС}} = 13,05$ дБ.

3. Определить минимально требуемое значение ОНШ на входе приемного устройства бортового ретранслятора с учетом существующих в нем искажений и шумов:

$$\rho_{\text{БР}} = \rho_{\text{ТР.ЗС}} - 10 \cdot \lg(10^{0,1\Delta\rho_{\text{БР}}} - 1), \text{ дБ.}$$

Для системного запаса от переходных шумов БР $\Delta\rho_{\text{БР}} = 1,5$ дБ значение $\rho_{\text{БР}} = 16,91$ дБ, т. е. значение $\rho_{\text{БР}}$ на 3,86 дБ требуется выше, чем на входе ЗС2.

4. Определить ЭШТ бортового ретранслятора:

$$T_{\text{БР}} = T_0 [10^{0,1(a_{\text{Ф.БР}} + n_{\text{Ш.БР}})}], \text{ К.}$$

Для данных $a_{\text{Ф.БР}} = 0,3$ дБ, $n_{\text{Ш.БР}} = 2$ дБ значение $T_{\text{БР}} = 493$ К.

5. Определить усиление приемной антенны ретранслятора ИСЗ:

$$g_{\text{ПР.БР}}(\theta) = 47 - 10 \cdot \lg(\theta_1 \cdot \theta_2) + 10 \lg k_{\text{И}} - \Delta g_{\text{БР}}, \text{ дБ.}$$

Для исходных данных $g_{\text{БР}}(\theta) = 38$ дБ.

6. Определить добротность приемной системы бортового ретранслятора:

$$D_{\text{БР}} = g_{\text{ПР.БР}} - 10 \cdot \lg T_{\text{БР}}, \text{ дБ/К.}$$

Значение $D_{БР} = 11,07$ дБ/К.

7. Определить суммарные потери на радиолинии «вверх»:

$$a_{\Sigma 1} = 92,4 + 20 \cdot \lg f_{p1} + 20 \cdot \lg r_1 + a_{доп1}, \text{ дБ.}$$

Для исходных данных $a_{\Sigma 1} = 209,4$ дБ.

8. Определить эквивалентную изотропно-излучаемую мощность передающей станции ЗС1 для обозначения на входе БР требуемого значения ОНШ:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{пд.зс1}} &= \rho_{БР} + a_{\Sigma 1} + 10 \cdot \lg \left(\frac{B_{01}}{m R_K} \right) - D_{БР} - 228,6, \text{ дБВт;} \\ R_K &= R_{ВСН} \cdot R_L = R_L - (t/4050). \end{aligned}$$

Для $R_L = 5/6$, $t = 10$, $m = 3$, $B_{01} = 2,0$ Мбит/с значение ЭИИМ передатчика $\mathcal{E}_{\text{пд.зс1}} = 45,68$ дБВт.

9. Определить усиление передающей антенны станции ЗС1 на частоте излучения:

$$g_{\text{пд.зс1}} = 20 \cdot \lg(f_{p1} d_{\text{пд.зс1}}) + 10 \cdot \lg k_{и1} + 20,4, \text{ дБ.}$$

Для антенны с $d_{\text{пд.зс1}} = 1,2$ м, $k_{и1} = 0,7$ значение $g_{\text{пд.зс1}} = 43,36$ дБ.

10. Определить выходную мощность передатчика станции ЗС1:

$$P_{\text{пд.зс1}} = 10^{0,1(\mathcal{E}_{\text{пд.зс1}} - g_{\text{пд.зс1}} + a_{\text{ф.пд.зс1}})}, \text{ Вт.}$$

Принимая во внимание потери в фидерном тракте передатчика VSAT-станции $a_{\text{ф.пд.зс1}} = 0,1$ дБ, а также рассчитанные ранее значения $\mathcal{E}_{\text{пд.зс1}}$ и $g_{\text{пд.зс1}}$, выходная мощность станции ЗС1 $P_{\text{пд.зс1}} = 1,76$ Вт.

11. Определить требуемый энергетический потенциал радиолинии «вверх» для доставки потока данных от VSAT-станции на спутник:

$$W_1 = \mathcal{E}_{\text{пд.зс1}} - a_{\Sigma 1} + D_{БР} + 228,6, \text{ дБГц.}$$

Значение $W_1 = 75,95$ дБГц.

Для надежной работы системы предусмотрим энергетический запас $K_{ЗАП}$ на радиолинии «вверх», который, согласно формуле для W_1 , можно реализовать увеличением $\mathcal{E}_{\text{пд.зс1}}$ или $D_{БР}$. Поскольку характеристики антенны БР и ЗС1 определены заданием, то для поставленной цели увеличим мощность передатчика ЗС1. Полагая $K_{ЗАП} = 1$ дБ, значение $P_{\text{пд.зс1}} = 2,22$ Вт.

6.3. Порядок расчета параметров бортового ретранслятора

Расчет проводится для многосигнального режима передачи информации через БР с прямой ретрансляцией сигналов на центральную станцию и частично базируется на полученных в подразд. 6.2 данных.

1. Определить суммарные потери энергии сигнала на радиолинии «вниз» от ИСЗ в направлении центральной станции ЗС2:

$$a_{\Sigma 2} = 185,04 + 20 \lg f_{p2} + 10 \lg(1 - 0,2954 \cos \psi \cos |\varphi_c - \varphi_3|) + a_{\text{доп}2}, \text{ дБ.}$$

Для рабочей частоты $f_{p2} = 11,5$ ГГц, $\psi = 54^\circ$ с. ш., $\varphi_3 = 33^\circ$ в. д., $\varphi_c = 51,5^\circ$ в. д., $a_{\text{доп}2} = 2,2$ дБ значение $a_{\Sigma 2} = 208,74$ дБ.

2. Определить усиление приемной антенны станции ЗС2:

$$g_{\text{ПР.ЗС2}} = 20 \lg(f_{p2} d_{\text{ПР.ЗС2}}) + 10 \lg k_{\text{И2}} + 20,4, \text{ дБ.}$$

Для $d_{\text{ПР.ЗС2}} = 6$ м, $k_{\text{И2}} = 0,6$ величина $g_{\text{ПР.ЗС2}} = 55$ дБ.

3. Определить добротность приемного оборудования центральной станции ЗС2:

$$D_{\text{ПР.ЗС2}} = g_{\text{ПР.ЗС2}} - 10 \lg T_{\text{ЗС2}}, \text{ дБ/К.}$$

Для $T_{\text{ЗС2}} = 250$ К и $g_{\text{ПР.ЗС2}} = 55$ дБ значение $D_{\text{ПР.ЗС2}} = 31$ дБ/К.

4. Определить минимальное значение ЭИИМ бортового ретранслятора, использующего квазилинейный режим передачи многосигнальных сообщений, при котором обеспечивается требуемая достоверность приема на центральной станции:

$$\mathcal{E}_{\text{БРmin}} = \rho_{\text{ТР.ЗС2}} + a_{\Sigma 2} + 10 \cdot \lg(\Delta f_k / b_p) - D_{\text{ПР.ЗС2}} - 228,6, \text{ дБВт.}$$

Для параметров $\rho_{\text{ТР.ЗС2}} = 13,05$ дБ, $a_{\Sigma 2} = 208,74$ дБ, $\Delta f_k = 72$ МГц, $b_p = 1,2$, $D_{\text{ПР.ЗС2}} = 31$ дБ/К значение $\mathcal{E}_{\text{БРmin}} = 39,99$ дБВт.

5. Определить значение ЭИИМ ретранслятора в режиме максимальной выходной мощности (режиме насыщения):

$$\mathcal{E}_{\text{БР}} = \mathcal{E}_{\text{БРmin}} + \text{ОВО}_M, \text{ дБВт.}$$

При отступлении в рабочем режиме передачи от точки насыщения усилителя мощности по выходу (ОВО_M) на 5 дБ значение $\mathcal{E}_{\text{БР}} = 44,99$ дБВт.

6. По графикам для амплитудной характеристики (АХ) бортового ретранслятора (рис. 6.2) и коэффициента интермодуляционных искажений ИМ_M в многосигнальном режиме передачи (рис. 6.3) определить отступление от точки насыщения по входу (ИВО_M) и значение коэффициента ИМ_M .

Для $OBO_M = 5$ дБ величина $IВO_M = 10$ дБ и $ИМ_M = 19,6$ дБ.

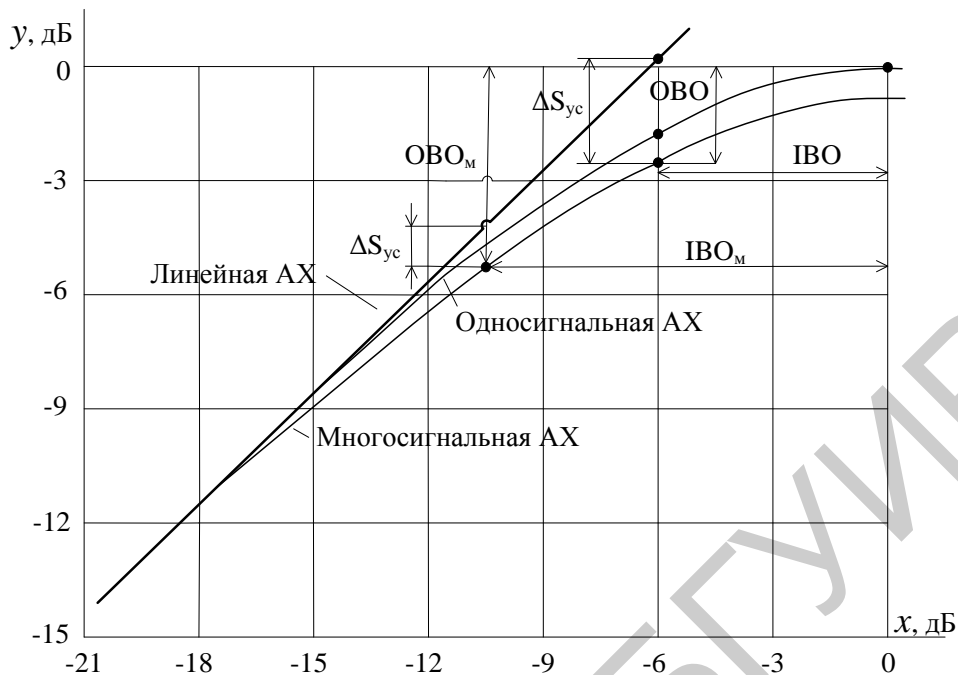


Рис. 6.2. Амплитудные характеристики усилителя мощности бортового ретранслятора

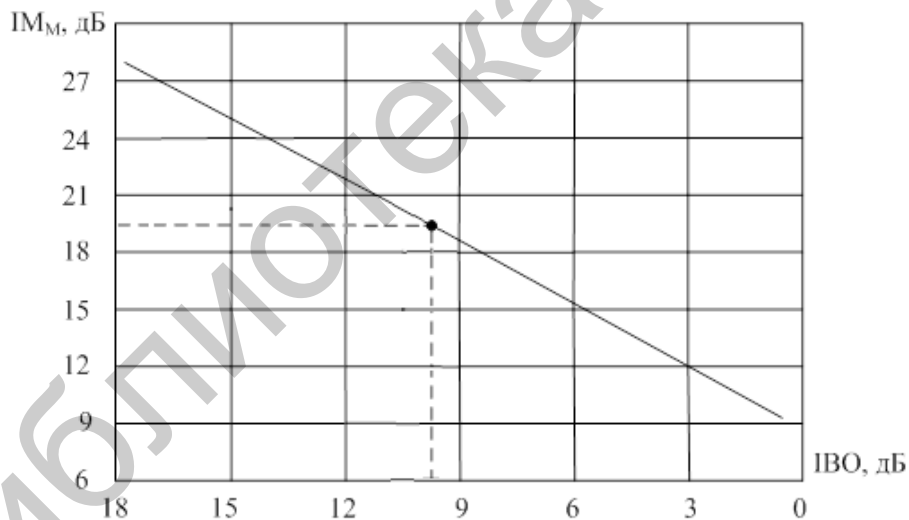


Рис. 6.3. Характеристика коэффициента интермодуляции в многосигнальном режиме передачи

7. Определить общий уровень мощности радиосигналов на входе бортового ретранслятора, при котором на стороне центральной станции ЗС2 обеспечивается заданная достоверность приема:

$$p_{ВХ.БР} = \rho_{ТР.БР} + 10 \lg(kT_{БР} \Delta f_K / b_p), \text{ дБВт.}$$

Для $\rho_{ТР.БР} = 16,91$ дБ, $T_{БР} = 493$ К, $\Delta f_K = 72$ МГц, $b_p = 1,2$ общий уровень входной мощности $p_{ВХ.БР} = -107,7$ дБВт.

8. Определить рабочее усиление бортового ретранслятора в квазилинейном режиме передачи с ограниченной выходной мощностью:

$$K_{БР} = \mathcal{E}_{БР\min} - g_{ПД,БР} + a_{Ф,БР} - p_{ВХ,БР}, \text{ дБ.}$$

Для $\mathcal{E}_{БР\min} = 39,99$ дБВт, $g_{ПД,БР} = 38$ дБ, $a_{Ф,БР} = 0,3$ дБ, $p_{ВХ,БР} = -107,7$ дБВт значение $K_{БР} = 109,99$ дБ.

9. Определить усиление бортового ретранслятора, получаемое в режиме максимальной выходной мощности:

$$K_{БР\max} = \mathcal{E}_{БР} - g_{ПД,БР} + a_{Ф,БР} - p_{ВХ,БР} + \text{ИВО}, \text{ дБ.}$$

Для $\mathcal{E}_{БР} = 44,99$ дБВт, ИВО = 10 дБ значение $K_{БР\max} = 124,99$ дБ.

10. Определить диапазон изменения усиления в бортовом ретрансляторе:

$$\Delta K = K_{БР\max} - K_{БР.КВ}, \text{ дБ.}$$

Значение $\Delta K = 15$ дБ.

6.4. Порядок расчета общего числа VSAT-станций в зоне обслуживания

1. С учетом коэффициента эффективного использования полосы частот прямого канала ИСЗ – ЗС2 ($K_{ЭФ.П} = 0,85 \dots 0,95$) определить общую скорость данных $V_{П}$, передаваемых по радиостволу в адрес работающей VSAT-станции:

$$V_{П} = [\Delta f_{К} m K_{ЭФ.П} (R_L - t/4050)] / (L_{ОБ} b_{Р}), \text{ бит/с;}$$

$$L_{ОБ} = [(1 + 80/R_L n_L - 16t)] (1 + 90m/n_L) \cdot 1,025.$$

Для $\Delta f_{К} = 72$ МГц, $m = 3$, $K_{ЭФ.П} = 0,9$, $b_{Р} = 1,2$, $t = 10$, $R_L = 5/6$, $n_L = 64\ 800$, скорость данных $V_{П} = 130$ Мбит/с.

2. Определить для часа наибольшей нагрузки максимальное число VSAT-станций, работающих в сети и имеющих одновременный доступ к спутниковому ретранслятору:

$$N_{СТ} = V_{П} / B_{01}.$$

Для $B_{01} = 2$ Мбит/с число обслуживаемых станций $N_{СТ} = 65$.

3. С учетом коэффициента активной работы VSAT-станций в сети связи k_A определить их общее число в зоне обслуживания спутниковым ретранслятором:

$$N_{\Sigma} = N_{СТ} / k_A.$$

Для $k_A = 0,01$ общее число VSAT-станций в зоне обслуживания $N_{\Sigma} = 6\ 500$.

7. РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ МЕШАЮЩИХ СПУТНИКОВ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИЕМНЫХ СИСТЕМ

7.1. Общие положения, задачи, исходные данные

Действие помех мешающих ИСЗ на работающие земные станции проявляется в изменении условий электромагнитной совместимости взаимодействующих радиосредств и снижении помехоустойчивости приемных систем. Уровень снижения ОНШ на входе ПС зависит от мощности помех, углового разнесения рабочего и мешающих спутников на орбите, величины частотного перекрытия спутниковых каналов между собой, используемых видов поляризации сигналов и пространственной избирательности приемных антенн. Основным условием совместимости систем является превышение уровня защищенности приемной станции, находящейся под воздействием помех мешающих ИСЗ, над допустимым уровнем защитного отношения $h_{\text{защ,ЗС}}$, т. е. в обеспечении $A_{3,\Sigma} \geq h_{\text{защ,ЗС}}$. Допустимые уровни снижения ОНШ приемных систем ФСС и РСС от действия помех составляют 1,0 и 0,5 дБ соответственно [11]. К числу мешающих ИСЗ относятся те из них, которые отстоят на дуге ГО от информационного спутника на $\pm 10^\circ$, $\pm 9^\circ$, $\pm 8^\circ$ для систем С-, Ku- и Ka-диапазонов частот, работают в частично или полностью совпадающих полосах частот, имеют заметные значения ЭИИМ и их зоны обслуживания перекрываются с рабочей (рис. 7.1) [11, 24].

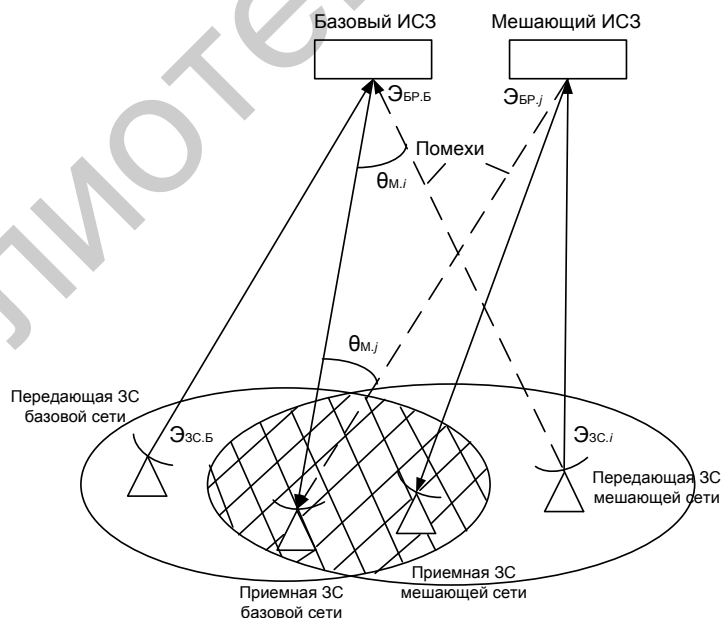


Рис. 7.1. Схема взаимодействия спутниковых систем

К числу задач, решаемых в данном разделе, следует отнести:

– определение уровня защищенности ПС земной станции $A_{3,\Sigma}$ от совокупного действия помех мешающих ИСЗ;

– проверку выполнения условия совместимости взаимодействующих систем для принятия решения о необходимой коррекции размеров приемной антенны рабочей ЗС;

– определение уровня снижения ОНШ на входе ПС $\Delta \rho_M$ из-за помех со стороны мешающих ИСЗ.

В контрольном примере полагаем, что прием сигналов спутникового вещания осуществляется в г. Пинске ($\psi = 52,15^\circ$ с. ш.; $\varphi_3 = 25,82^\circ$ в. д.) с ИСЗ HotBird 13 E ($\varphi_C = 13^\circ$ в. д.) и $\mathcal{E}_{БР} = 50$ дБВт. Мешающими спутниками являются: ИСЗ1 Eutelsat10A ($\varphi_{M1} = 10^\circ$ в. д.) с $\mathcal{E}_{БР1} = 46$ дБВт и ИСЗ2 Eutelsat 16A ($\varphi_{M2} = 16^\circ$ в. д.) с $\mathcal{E}_{БР2} = 50$ дБВт. На стороне приема используется офсетная антенна с усилением $g_{ПР} = 40,1$ дБ и отношением $d_A/\lambda = 40$. Требуемое ОНШ на входе ПС составляет $\rho_{ТР.ЗС} = 11,6$ дБ. Ширина полосы радиоканала рабочего ИСЗ $\Delta f_K = 36$ МГц. Системный запас для компенсации влияния помех со стороны мешающих ИСЗ на помехоустойчивость ПС принят $0,4$ дБ. Потери в джодях на линии «вниз» $a_{Д(0,1\%)} = 2,5$ дБ. Поляризация полезных и мешающих сигналов и помех совпадает по отдельным каналам. Азимутальное смещение информационного спутника относительно южного направления $\Delta\beta = 16,09^\circ$.

7.2. Порядок расчета

1. Определить значения азимутальных смещений $\Delta\beta_{MJ}$ мешающих спутников с заданными позициями φ_{MJ} :

$$\Delta\beta_{MJ} = \pm \arctg[(\operatorname{tg}|\varphi_{MJ} - \varphi_3|)/\sin\psi].$$

В расчетной формуле знак «плюс» берется, если приемная ЗС находится восточнее мешающего ИСЗ, и знак «минус», если западнее.

Для ИСЗ1 $\Delta\beta_{M1} = 19,82^\circ$, для ИСЗ2 $\Delta\beta_{M2} = 12,36^\circ$ (рис. 7.2).

2. Определить топоцентрические углы между проекциями направлений на информационный ИСЗ и на каждый мешающий спутник:

$$\theta_{MJ} = |\Delta\beta_{MJ} - \Delta\beta|, \text{ град.}$$

Для азимутального смещения рабочего ИСЗ $\Delta\beta = 16,09^\circ$ значения топоцентрических углов $\theta_{M1} = \theta_{M2} = 3,73^\circ$.

3. Определить разницу между максимальным усилением приемной антенны $g_{ПР}$ и ее усилением для сигналов мешающих ИСЗ:

– при $d_A/\lambda \geq 50$ для прямофокусных антенн и $d_A/\lambda \geq 22$ – для офсетных:

$$\Delta g(\theta_{MJ}) = g_{ПР} - 29 + 25 \cdot \lg \theta_{MJ} \text{ при } 1^\circ < \theta_{MJ} < 48^\circ,$$

– при $d_A/\lambda < 50$ для прямофокусных антенн:

$$\Delta g(\theta_{MJ}) = g_{\text{пр}} - 52 + 10 \cdot \lg(d_A/\lambda) + 25 \cdot \lg \theta_{MJ} \text{ при } 1^\circ < \theta_{MJ} < 48^\circ.$$

Величины $\Delta g(\theta_{M1}) = \Delta g(\theta_{M2}) = 25,35$ дБ.

4. Представить схему размещения на ГО принятых к рассмотрению спутников и указать рассчитанные для них угловые параметры.

Для данных примера необходимые построения приведены на рис. 7.2.

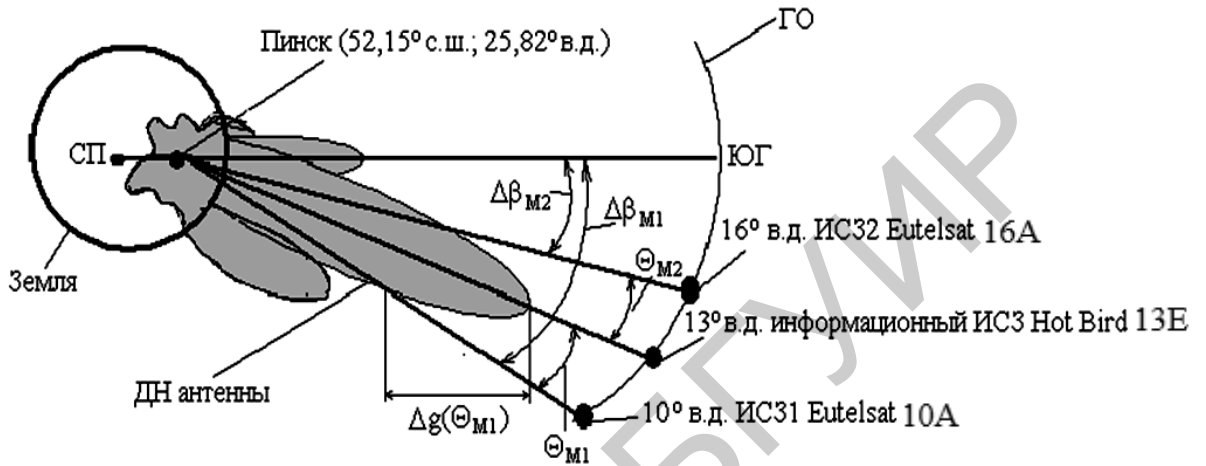


Рис. 7.2. Схема размещения спутников на ГО

5. Определить разницу в уровнях ЭИИМ информационного и мешающих ИСЗ:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{БР}J} = \mathcal{E}_{\text{БР}} - \mathcal{E}_{\text{БР}J}, \text{ дБВт.}$$

Для данных примера $\Delta \mathcal{E}_{\text{БР}1} = 4$ дБ, $\Delta \mathcal{E}_{\text{БР}2} = 0$ дБ.

6. Определить разницу между уровнями ослабления полезного и мешающих сигналов на спутниковых радиолиниях от ИСЗ к ЗС:

$$\Delta a_{\Sigma J} = 10 \cdot \lg[(1 - 0,295 \cos \psi \cdot \cos |\varphi_C - \varphi_3|) / (1 - 0,295 \cos \psi \cdot \cos |\varphi_{MJ} - \varphi_3|)], \text{ дБ.}$$

Для ИС31 и ИС32, удаленных от основного ИСЗ на $3,73^\circ$, значения $\Delta a_{\Sigma 1} \cong \Delta a_{\Sigma 2} \cong 0$ дБ.

7. Определить величину поляризационной развязки L_{PJ} между сигналами информационного и мешающих ИСЗ в совпадающих по частоте каналах приема.

При равенстве поляризаций полезного и мешающих сигналов следует принять $L_{PJ} = 0$. Для сигналов с ортогональной поляризацией гарантированное значение L_{PJ} с учетом возможной деполяризации сигналов в осадках составляет 6...8 дБ. При приеме помеховых сигналов с круговой поляризацией на ПС с линейной поляризацией $L_{PJ} = 1,5$ дБ [11].

В соответствии с условием примера $L_{P1} = L_{P2} = 0$.

8. На основании частотных планов информационного и мешающих спутников для линий «вниз» определить ширину полосы частот $\Delta f_{\text{пом}J}$ (рис. 7.3),

которая перекрывается помехой, и определить уровень снижения влияния помехи на ПС из-за частичного совпадения этих полос:

$$L_{ПJ} = 10 \cdot \lg(\Delta f_K / \Delta f_{ПOMJ}), \text{ дБ.}$$

Для $\Delta f_K = 36 \text{ МГц}$, $\Delta f_{ПOM1} = 20 \text{ МГц}$ и $\Delta f_{ПOM2} = 18 \text{ МГц}$ значения $L_{P1} = 2,54 \text{ дБ}$, $L_{P2} = 3,0 \text{ дБ}$.

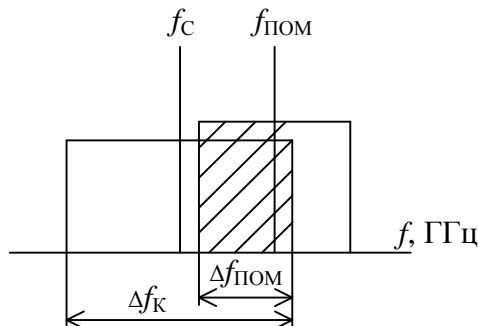


Рис. 7.3. Зона перекрытия полос рабочего и мешающего спутников

9. Определить уровни защищенности приемной системы ЗС (с учетом развязок по поляризации и полосам) от воздействия на ее вход одиночных помех с уровнями $p_{ПJ}$:

$$A_{зJ} = p_c - p_{ПJ} = \Delta g(\theta_{MJ}) + \Delta a_{\Sigma J} + \Delta \mathcal{E}_{БРJ} + L_{PJ} + L_{ПJ}, \text{ дБ.}$$

Значения $A_{зJ}$ по отдельным направлениям $A_{з1} = 31,8 \text{ дБ}$, $A_{з2} = 28,35 \text{ дБ}$.

10. Определить уровень защищенности ПС земной станции от суммарного воздействия на нее помех мешающих ИСЗ, т. е. определить отношение мощности полезного сигнала на входе ПС к совокупной мощности помех:

$$A_{з\Sigma} = -10 \cdot \lg \left(\sum_{J=1}^N 10^{-0,1 \cdot A_{зJ}} \right), \text{ дБ.}$$

При наличии двух мешающих ИСЗ

$$A_{з\Sigma} = A_{з1} - 10 \cdot \lg[1 + 10^{-0,1 \cdot (A_{з2} - A_{з1})}], \text{ дБ.}$$

С учетом помех от двух ИСЗ уровень защищенности $A_{з\Sigma} = 26,65 \text{ дБ}$.

11. Определить допустимый уровень защитного отношения $h_{защ.ЗС}$ на входе ПС земной станции при воздействии на нее n единичных помех от мешающих ИСЗ:

$$h_{\text{защ.ЗС}} = \rho_{\text{ТР.ЗС}} + a_{\text{д}}(\text{T}\%) + \chi_2 - 10 \cdot \lg n, \text{ дБ.}$$

В расчетной формуле $a_{\text{д}}(\text{T}\%)$ – потери в осадках; χ_2 – допустимая разница между уровнями мощности единичной помехи и мощности шума на входе ПС (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Значение χ для единичной помехи, дБ

Направление действия помехи	Защищаемая спутниковая служба		
	ФСС	План ФСС	План РСС
Линия «вниз»	12,2	11,65	17,0

Для исходных данных спутниковой системы, работающей в частотной полосе плана ФСС, значение $h_{\text{защ.ЗС}} = 25,75$ дБ.

12. Проверить выполнение условия совместимости систем при воздействии на ПС помех от мешающих ИСЗ:

$$A_{\text{з}\Sigma} \geq h_{\text{защ.ЗС}}.$$

Поскольку защитный запас между уровнем защищенности ПС $A_{\text{з}\Sigma}$ и допустимым уровнем защитного отношения $h_{\text{защ.ЗС}}$ составляет 0,9 дБ, то условие совместимости систем выполняется. Если в результате расчета $A_{\text{з}\Sigma} \leq h_{\text{защ.ЗС}}$, то необходимо увеличить диаметр приемной антенны рабочей ЗС, что позволит улучшить ее пространственную избирательность, и затем пересмотреть расчет. Усиление антенны определяется согласно позиции 2 подразд. 6.3.

13. Определить уровень снижения ОНШ на входе приемной системы от действия помех мешающих ИСЗ:

$$\Delta\rho_{\text{М}} = 10 \cdot \lg[1 + 10^{-0,1 \cdot (A_{\text{з}\Sigma} - \rho_{\text{ТР.ЗС}})}], \text{ дБ.}$$

В данном примере снижение ОНШ составляет 0,15 дБ, что меньше допустимого (0,4 дБ) по заданию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебно-методическом пособии представлен перечень тем курсовых работ и указаны исходные данные для проектирования. Определены задачи самостоятельных исследований и порядок расчета базовых показателей систем цифрового спутникового мультимедийного вещания и интерактивной связи с использованием VSAT-станций. Изложены процедуры расчета энергетических, системных и информационных показателей радиоканалов и трактов. Разработаны математические модели для проведения детальных исследований характеристик помехоустойчивости приемных систем и пропускной способности спутниковых каналов с учетом принятых методов кодирования и многопозиционных видов модуляции. Приведены методики расчета выходной мощности передатчика земной станции, сетевых показателей при использовании VSAT-станций и влияния мешающих ИСЗ на характеристики приемных устройств. Материалы данного учебно-методического пособия охватывают основные позиции, входящие в задачи проектирования, и соответствуют требованиям стандартов DVB-S/S2, DVB-DSNG, DVB-RCS и международных рекомендаций.

Базируясь на представленных в издании методических указаниях и технических сведениях, представляется возможным закрепить теоретические положения, излагаемые в учебных дисциплинах, расширить область понимания происходящих процессов в трактах спутникового вещания и высокоскоростного обмена информацией и приобрести навыки в расчетах и проектировании.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПРИМЕР ФОРМИРОВАНИЯ СВЕДЕНИЙ О РАБОЧЕМ СПУТНИКЕ

В табл. П.1 и П.2 приведены технические характеристики геостационарного спутника «Экспресс – АМУ1» и его системные показатели, используемые при проведении расчетов.

Таблица П.1

Технические характеристики ИСЗ «Экспресс – АМУ1»

Параметр	Значение
Дата вывода на орбиту	26.12.2015 г.
Орбитальная позиция на ГО	36° в. д.
Тип спутниковой платформы	Экспресс-1000 НТВ
Масса ИСЗ при запуске, кг	5900
Точность удержания на орбите, град	0,05
Мощность системы электропитания, Вт	13 500
Диапазон рабочих частот, ГГц	
Радиостволы Ku-диапазона:	
прием на ИСЗ	17,3...18,1
передача с ИСЗ	11,7...12,5
Радиостволы Ka-диапазона:	
прием на ИСЗ	27,5...29,5
передача с ИСЗ	18,3...18,8 и 19,7...20,2
Число радиостволов (транспондеров)	52 – Ku-диапазон 18 – Ka-диапазон
Максимальное значение ЭИИМ, дБВт	
Ku-диапазон	54,0
Ka-диапазон	61,0

Таблица П.2

Системные показатели ИСЗ «Экспресс – АМУ1», используемые при проектировании

Параметр	Значение
Ширина полосы радиоканала, МГц	33,0
ЭИИМ в направлении точки приема, дБВт	52,0
Стандарт вещания	DVB-S, DVB-S2
Вид модуляции	QPSK, PSK-8
Вид поляризации	Круговая (RHCP, LHCP)
Символьная скорость, Мсимв/с	27,5 для QPSK (DVB-S) 29,0 для PSK-8 (DVB-S2)
Относительная скорость сверточного кода (FEC)	3/4 для QPSK, 3/4 для PSK-8

Зоны покрытия спутником в Ku- и Ka-диапазонах приведены на рис. П.1 и П.2.



Рис. П.1. Зона покрытия спутника «Экспресс-АМУ1» в Ku-диапазоне



Рис. П.2. Зона покрытия спутника «Экспресс-АМУ1» в Ka-диапазоне

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- АЧХ – амплитудно-частотная характеристика
БР – бортовой ретранслятор
ГВЗ – групповое время запаздывания
ГО – геостационарная орбита
ДН – диаграмма направленности (антенны)
ИСЗ – искусственный спутник Земли
ЗС – земная станция
КАМ – квадратурная амплитудная модуляция
МДВР – многостанционный доступ с временным разделением сигналов
МСЭ – международный союз электросвязи
ППМ – плотность потока мощности
ОНШ – отношение несущая/шум
ОПУ – опорно-поворотное устройство
ОСШ – отношение сигнал/шум
ПС – приемная система
РСС – радиовещательная спутниковая служба
СИТ – спутниковый интерактивный терминал
СК – сверточный код
ФМ – фазовая модуляция
ФСС – фиксированная спутниковая связь
ЦСС – центральная станция сопряжения
ЭП – энергетический потенциал
ВСН (Bose Chaudhuri Hocquenghim) – Боуз – Чоудхури – Хоквингем
DSNG (Digital Satellite News Gathering) – цифровая спутниковая видеожурналистика
DVB-S (Digital Video Broadcasting) – цифровое телевизионное вещание
FEC (Forward Error Correction) – прямая коррекция ошибок
MPEG (Moving Pictures Experts Group) – группа экспертов по подвижным изображениям
LDPC (Low Density Parity Cheking) – код с низкой плотностью проверок на четность
QAM (Quadrature Amplitude Modulation) – квадратурная амплитудная модуляция
PSK (Phase Shift Keying) – фазовая манипуляция
SI (Service Information) – служебная информация

ЛИТЕРАТУРА

1. Липкович, Э. Б. Проектирование и расчет систем цифрового спутникового вещания : учеб.-метод. пособие / Э. Б. Липкович, Д. В. Кисель. – Минск : БГУИР, 2006. – 135 с.
2. Системы спутниковой связи с эллиптическими орбитами / Е. Ф. Камнев [и др.]. – М. : Глобсатком, 2009. – 724 с.
3. ETSI EN 300 421. Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300400_300499/300421/01.01.02_60/en_300421v010102p.pdf.
4. ETSI EN 301210. Цифровое телевидение. Структура формирования кадров, кодирование каналов и модуляция для цифровой спутниковой видеожурналистики (DSNG) и других приложений доставки ТВ-программ спутниками [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301200_301299/301210/01.01.01_60/en_301210v010101p.pdf.
5. ETSI EN 302 307. Стандарт DVB-S2. Система цифрового ТВ-вещания [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/302307/01.03.01_60/en_302307v010301p.pdf.
6. Анпилогов, В. Р. О спутниках HTS / В. Р. Анпилогов // Технологии и средства связи. Спец. вып. «Спутниковая связь и вещание – 2014». – С. 50–51.
7. Анпилогов, В. Р. Многолучевые антенные системы HTS / В. Р. Анпилогов, А. Н. Шишлов, А. Г. Эйбус // Технологии и средства связи. Спец. вып. «Спутниковая связь и вещание – 2014». – С. 54–67.
8. ETSI EN 301790. Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems (DVB-RCS) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301700_301799/301790/01.05.01_60/en_301790v010501p.pdf.
9. Анпилогов, В. Р. Спутниковые системы массового обслуживания в Ка-диапазоне / В. Р. Анпилогов // Технологии и средства связи. Спец. вып. «Спутниковая связь и вещание – 2010». – С. 16–21.
10. Анпилогов, В. Р. Системы на основе геостационарных спутников связи и вещания Ка-диапазона / В. Р. Анпилогов // Технологии и средства связи. Спец. вып. «Спутниковая связь и вещание – 2013». – С. 16–26.
11. Электромагнитная совместимость систем спутниковой связи / под ред. Л. Я. Кантора, В. В. Ноздрин. – М. : НИИР, 2009. – 280 с.
12. Спутниковая связь и вещание : справочник / В. А. Бартенев [и др.] ; под ред. Л. Я. Кантора. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1997. – 528 с.

13. Рекомендация МСЭ-R P.618-10. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для систем связи Земля – Космос.
14. Рекомендация МСЭ-R P.676-7. Затухание в атмосферных газах.
15. Рекомендация МСЭ-R P.838-3. Модель удельного затухания радиоволн в дожде, используемая в методах прогнозирования.
16. Рекомендация МСЭ-R P.837. Характеристики атмосферных осадков для моделирования распространения радиоволн.
17. Рекомендация МСЭ-R P.839. Модель высоты слоя осадков, используемая в методах предсказания.
18. Рекомендация МСЭ-R P.841-5. Преобразование годовой статистики в статистику наилучшего месяца года.
19. Бителева, А. Стандарт DVB-S2. Новые задачи – новые решения / А. Бителева // Телеспутник. – 2005. – №6. – С. 62–65.
20. Банкет, В. Л. Цифровые методы в спутниковой связи / В. Л. Банкет, В. М. Дорофеев. – М. : Радио и связь, 1998. – 239 с.
21. Каменев, В. Е. Спутниковые сети связи : учеб. пособие / В. Е. Каменев, В. В. Черкасов, Г. В. Чечин. – М. : Альпина Паблишер, 2004. – 536 с.
22. Сомов, А. М. Спутниковые системы связи: учеб. пособие / А. М. Сомов, С. В. Корнев ; под ред. А. М. Сомова. – М. : Горячая линия – Телеком, 2012. – 244 с.
23. Бородич, С. В. ЭМС наземных и космических служб. Критерии, условия и расчет / С. В. Бородич. – М. : Радио и связь, 1990. – 272 с.
24. Рекомендация МСЭ-R P.619. Помехи от космических станций.
25. Рекомендация МСЭ-R P.840. Затухание из-за облачности и тумана.
26. Зубарев, Ю. Б. Цифровое телевизионное вещание. Основы, методы, системы / Ю. Б. Зубарев, М. И. Кривошеев, И. Н. Красносельский. – М. : НИИР, 2001. – 568 с.
27. Мамаев, Н. С. Системы цифрового телевидения и радиовещания / Н. С. Мамаев. – М. : Горячая линия, 2006. – 253 с.
28. Тестоедов, Н. П. Планы развития российской спутниковой группировки в Ka-диапазоне частот / Н. П. Тестоедов // Технологии и средства связи. Спец. вып. «Спутниковая связь и вещание – 2011». – С. 12–13.
29. ETSI EN 300 429. Стандарт DVB-C. Система цифрового ТВ-вещания [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300400_300499/300429/01.02.01_60/en_300429v010201p.pdf.
30. Дворкович, В. П. Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика) / В. П. Дворкович, А. В. Дворкович. – М. : Техносфера, 2012. – 1008 с.

31. Эйбус, А. Г. О технологиях VSAT и их функциональных особенностях / А. Г. Эйбус, П. М. Тырин // Технологии и средства связи. Спец. вып. «Спутниковая связь и вещание – 2010». – С. 40–41.
32. Высоцкий, Г. Услуги сетей VSAT и их потребители / Г. Высоцкий // Телеспутник. – 2011. – №3. – С. 20–28.
33. Труфанов, С. Выбор цифровой головной станции / С. Труфанов // Телеспутник. – 2011. – №3. – С. 80–84.
34. DSGN. Мобильно. Компактно. Эффективно // ТВ-технологии. – 2010. – №2. – С. 62–64.
35. Бителева, А. Услуга «видео по требованию» (VoD) в IP-сетях / А. Бителева // Телеспутник. – 2009. – №9. – С. 72–80 ; 2009. – №10. – С. 74 – 80.
36. Новейшее поколение высокопроизводительных VSAT-платформ ИстарUHP [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.eastar.ru.
37. Передвижные репортажные станции Altegrosky [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.altegrosky.ru.
38. VSAT-станции [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.amtelcom.ru ; www.idirect.net ; www.seatel.ru ; www.gilat.com/skyendge-ii-c .
39. Сеть IPTV [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.konturm.ru/tech.php?id=iptvsh>.
40. Системы связи DVB-RCS [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://dvb-rcs.ru/solution/index.shtml>.
41. Фролов, О. П. Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи / О. П. Фролов, В. П. Вальт. – М. : Горячая линия – Телеком, 2008. – 496 с.
42. Кислицин, А. С. Корпоративные спутниковые информационные сети на основе VSAT-технологии. Методология построения / А. С. Кислицин. – М. : Радиотехника, 2007. – 345 с.
43. Крылов, А. М. Основные спутниковые сервисы и тенденции их развития в XXI веке / А. М. Крылов // Технологии и средства связи. Спец. вып. «Спутниковая связь и вещание – 2015». – С. 68–74.

Учебное издание

Липкович Эдуард Борисович

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ
СПУТНИКОВОГО МУЛЬТИМЕДИЙНОГО ВЕЩАНИЯ
И ИНТЕРАКТИВНОЙ СВЯЗИ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *М. А. Зайцева*

Корректор *Е. И. Герман*

Компьютерная правка, оригинал-макет *М. В. Касабуцкий*

Подписано в печать 01.09.2017. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,07. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 100 экз. Заказ 122.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,

№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

ЛП №02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6