

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

Кафедра систем телекоммуникаций

**В. В. Муравьев, Э. Б. Липкович**

***ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ  
ЛИНИЙ СВЯЗИ***

Методическое пособие  
к курсовому проектированию  
по дисциплине *«Спутниковые и радиорелейные системы передачи»*  
для студентов специальности 1-45 01 01  
*«Многоканальные системы телекоммуникаций»*  
всех форм обучения

Минск БГУИР 2011

УДК 621.396.43-047.48(075.8)

ББК 32.884.1я73

М91

**Р е ц е н з е н т:**

доцент кафедры сетей и устройств телекоммуникаций  
учреждения образования «Белорусский государственный  
университет информатики и радиоэлектроники»,  
кандидат технических наук М. Ю. Хоменок

**Муравьев, В. В.**

М91

Проектирование цифровых радиорелейных линий связи : метод. пособие к курсовому проектированию по дисц. «Спутниковые и радиорелейные системы передачи» для студ. спец. 1-45 01 01 «Многоканальные системы телекоммуникаций» всех форм обуч. / В. В. Муравьев, Э. Б. Липкович. – Минск : БГУИР, 2011. – 56 с. : ил.

ISBN 978-985-488-644-2.

Излагаются принципы организации цифровой радиорелейной связи и методы проектирования радиотрасс прямой видимости. Приведена методика расчета основных параметров цифровых систем радиосвязи с учетом обеспечения требуемых качественных показателей. Представлена типовая структурная схема цифровой станции и отмечены особенности ее функционирования.

Пособие может использоваться специалистами для расчета и проектирования цифровых радиорелейных линий.

**УДК 621.396.43-047.48(075.8)**

**ББК 32.884.1я73**

*Авторы выражают благодарность магистрантам М. А. Громыко и В. Ю. Бунасу за оказание помощи в подготовке данного пособия.*

**ISBN 978-985-488-644-2**

© Муравьев В. В., Липкович Э. Б., 2011

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ И СТРУКТУРА КУРСОВОГО ПРОЕКТА .....	8
2 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ.....	8
3 ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ.....	9
4 ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И ТРАССЫ РРЛ.....	11
4.1 Общие замечания.....	11
4.2 Выбор аппаратуры ЦРРСП и определение её параметров.....	11
4.3 Построение трассы РРЛ .....	18
5 ПОСТРОЕНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ИНТЕРВАЛА.....	19
6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТ ПОДВЕСА АНТЕНН НА ИНТЕРВАЛЕ .....	22
7 РАСЧЕТ УРОВНЕЙ СИГНАЛОВ НА ВХОДЕ ПРИЕМНИКА.....	24
8 РАСЧЕТ УРОВНЯ ПОМЕХ НА ВХОДЕ ПРИЕМНИКА .....	28
8.1 Общие положения.....	26
8.2 Расчет уровня помех дальнего распространения.....	26
8.3 Расчет уровня помех от передатчиков встречного направления .....	29
9 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ НЕГОТОВНОСТИ ТРАКТОВ РАДИОЛИНИЙ .....	31
9.1 Общие положения и терминология .....	31
9.2 Расчет процента времени простоя из-за субрефракции.....	34
9.3 Расчет процента времени простоя из-за потерь в осадках .....	36
9.4 Проверка выполнения норм по показателю неготовности из-за субрефракции и осадков .....	38
10 РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПО ОШИБКАМ .....	39
10.1 Общие положения.....	37
10.2 Расчет времени отказов из-за интерференции .....	42
10.3 Расчет процента времени отказов из-за многолучёвого распространения .....	43
10.4 Проверка выполнения норм на качественные показатели по ошибкам .....	44
11 ТИПОВАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ЦИФРОВОЙ РАДИОРЕЛЕЙНОЙ СТАНЦИИ .....	45
11.1 Общая характеристика оконечной станции .....	45
11.2 Структурная схема внутреннего блока цифровой станции.....	46
11.3 Структурная схема и принцип работы внешнего блока станции.....	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	53
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	54

## ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АТС – автоматическая телефонная станция  
АЧХ – амплитудно-частотная характеристика  
ГЭТ – гипотетический эталонный тракт  
ДН – диаграмма направленности  
КАМ – квадратурная амплитудная модуляция  
МСЭ – Международный союз электросвязи  
МСЭ-Р – сектор радиосвязи МСЭ  
ОНШ – отношение несущая – шум  
ОЭМТ – основной элемент международного тракта  
ОЭТМС – основной элемент тракта между странами  
ОРС – оконечная радиорелейная станция  
ПКО – показатель качества по ошибкам  
ПНГ – показатель неготовности  
ПРС – промежуточная радиорелейная станция  
РРЛ – радиорелейная линия  
СО – секунда с ошибками  
СПО – секунда, поражённая ошибками  
УРС – узловая радиорелейная станция  
ЦРПС – цифровая радиорелейная система передачи  
ES – (Errors Second) – секунда с ошибками  
IDU – (Indoor Unit) – внутренний блок  
ODU – (Outdoor Unit) – внешний блок  
QAM – (Quadrature Amplitude Modulation) – квадратурная амплитудная модуляция, КАМ  
QPSK – (Quadrature Phase Shift Keying) – квадратурная фазовая модуляция  
SES – (Severely Errors Second) – секунда, поражённая ошибками

## ВВЕДЕНИЕ

Цифровые радиорелейные системы передачи (ЦРРСП) относятся к классу систем фиксированной наземной службы и широко используются для организации местных, ведомственных, технологических, зонавых и магистральных радиолиний. Их применение особенно эффективно, если прокладка кабеля затруднена или требует больших материальных затрат, времени и технических средств. Для многих стран особенно со сложным рельефом местности, с заболоченными или горными территориями радиорелейные линии (РРЛ) на базе ЦРРСП являются важным звеном в телекоммуникационной инфраструктуре. Посредством ЦРРСП организуют также беспроводные соединения между вычислительными центрами, узловыми АТС и оборудованием удалённых телефонных станций. РРЛ используют в качестве вставок в линии национальных и международных трактов.

Заметный удельный вес цифровых РРЛ среди других наземных телекоммуникационных средств доставки информации объясняется высоким качеством передаваемых сигналов, гибкостью решений при организации радиосвязи и значительной рентабельностью при их развертывании. Строительство и ввод в эксплуатацию одно - и двухпролётных РРЛ осуществляется достаточно быстро, особенно если антенны имеют небольшие размеры, объединены с приёмопередающим блоком и могут располагаться на технических зданиях или существующих антенно-мачтовых опорах.

С развитием сотовых технологий значимость ЦРРСП существенно возросла. Широкое применение для организации связи между базовыми станциями и центром коммутации получили системы в полосах частот: 10,7...11,7; 12,7...13,2; 14,5...15,35; 17,7...19,7; 21,2...23,6; 25,25...27,5; 37...40 ГГц. На коротких пролётах, характерных для радиолиний сотовой связи, преимущественное положение заняли простые ЦРРСП с низким потреблением электроэнергии и отсутствием устройств частотного и пространственного разнесения. Необходимость в устройствах разнесения возникает на протяжённых интервалах с недостаточной устойчивостью связи.

К настоящему времени разработано и сертифицировано значительное число российских и зарубежных ЦРРСП (около 200). Популярными среди операторов сетей являются цифровые станции Pasolink (компания «NEC»), Mini-Link («Ericsson»), Flexi Hopper («Nokia»), Natex-Microlink («Натекс»), Compact-Link («Nera»), Мик-РЛ («Микран»), Флокс («Сеть+Сервис»), Радан («Радан»), Радиус («Олимп») и др. Предлагаемые этими компаниями станции включают целый ряд моделей, предназначенных для работы в разных полосах частот от 4 до 38 ГГц, с разной пропускной способностью от E1 (2,048 Мбит/с) до STM-1 (155,52 Мбит/с), разной помехоустойчивостью и спектральной эффективностью. Все они различаются модульностью построения, компактностью, устойчивостью к помехам, возможностью программно изменять частоту настройки, выходную мощность передачи, параметры модуляции и помехоустойчивого кодирования, осуществлять программный мониторинг параметров станций.

На местных и внутризоновых радиоперелиниях широко используют ЦРРСР с блочным способом построения станций. Внешний радиочастотный блок – приёмопередающий жёстко или с помощью небольшого отрезка гибкого волновода сопряжён с антенной и расположен на верхней части опоры. Внутренний модемный блок находится в помещении и служит для цифровой обработки сигналов, модуляции и демодуляции, формирования сигналов телеобслуживания, служебной связи и дополнительных каналов потребителей. Взаимодействие между блоками организуется с помощью коаксиального кабеля на промежуточной частоте. Двухблочный способ построения позволяет использовать лёгкие конструкции антенных опор и повысить чувствительность приёмных устройств за счёт исключения волноводного тракта, вносящего потери.

Высоты подвеса антенн выбираются в зависимости от длины интервалов, рельефа местности и требований по обеспечению устойчивой связи. С ростом рабочей частоты (начиная с 8 ГГц) протяжённость интервалов приходится сокращать до значений 10...12 км (на частотах около 40 ГГц), что объясняется ростом потерь радиосигналов в атмосфере и осадках.

Многопролётная РРЛ прямой видимости состоит из оконечных (ОРС), промежуточных (ПРС) и узловых (УРС) радиорелейных станций. ОРС являются обслуживаемыми, располагаются в крайних пунктах РРЛ, обеспечивают ввод и вывод сигналов. ПРС в основном необслуживаемые, выполняют приём радиосигналов от передающей станции, их усиление и преобразование на новую частоту для передачи на следующую станцию. УРС – обслуживаемые, осуществляют ретрансляцию, ввод/вывод части сигналов или полную их замену и располагаются через 5-6 ПРС. С ОРС и УРС производится контроль и управление ПРС [1, 2].

В зависимости от назначения РРЛ применяют 2-, 4- или 6-частотную схему организации связи. Двухчастотная схема связи является самой эффективной по использованию плана распределения частот, т. к. для создания одного радиоканала на всем протяжении РРЛ требуется только две частоты. Этот способ принят для построения внутризоновых и магистральных РРЛ. Однако для его реализации необходимы антенны с высоким ослаблением сигналов с противоположных направлений. Для снижения требований к параметрам антенн используют различную поляризацию радиосигналов с одинаковыми частотами. Четырёхчастотная схема является основной при создании местных, малоканальных или временно организуемых РРЛ (например, при военных учениях, стихийных бедствиях и т. д.) с простым типом антенн. На каждой ПРС и УРС предусматривается 4 частоты, что делает связь в обоих направлениях независимой. Шестичастотная схема построения используется на прямолинейных радиотрассах, проходящих вдоль газо- и нефтепроводов. Ее применение позволяет снизить уровень помех из-за дальнего распространения радиосигналов при наличии сверхрефракции.

Для повышения надежности связи в конфигурации систем предусматривается горячее резервирование, частотное или пространственное разнесение по схеме безобрывного переключения на резерв. Переключение на резерв осуще-

ствляется автоматически по определенному порогу срабатывания сигнала аварии, например по величине вероятности ошибки.

Основными преимуществами цифровых РРЛ прямой видимости по сравнению с другими телекоммуникационными средствами доставки информации, например кабельными, являются:

- экономическая эффективность организации связи на участках со сложным рельефом местности;
- быстрая установка и демонтаж оборудования с возможностью его повторного использования;
- простота технического обслуживания с определением мест и причин повреждений благодаря наличию устройств контроля станций.

Недостатки цифровых РРЛ:

- необходимость получения разрешения на использование частотного ресурса;
- обеспечение электромагнитной совместимости с другими близко расположенными радиотехническими комплексами и работающими с ними в общем диапазоне частот.

## **1 ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ И СТРУКТУРА КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

Основной целью курсового проекта является построение РРЛ прямой видимости для заданного направления и исходных данных при условии обеспечения норм на ее качественные показатели. Задачи проекта состоят в разработке общих технических вопросов, касающихся выбора оборудования и построения трассы РРЛ, расчете системных параметров, оценке качественных показателей связи и описании функционирования оконечной цифровой станции заданного назначения и диапазона частот.

В процессе выполнения проекта обосновываются взятые за основу решения, приводятся необходимые построения, осуществляются расчеты и делаются выводы по полученным результатам. Во внимание принимаются оптимальные решения, способные обеспечить лучшее соотношение между требуемыми техническими характеристиками, затратами на построение РРЛ и качеством связи.

Курсовой проект должен содержать следующие разделы.

Введение.

Основной текст:

- выбор типа аппаратуры и расчет ее параметров;
- построение трассы РРЛ;
- построение продольного профиля интервала;
- определение высот подвеса антенн на интервале;
- расчет уровней входных сигналов и построение диаграммы уровней на интервале;
- расчет энергетического запаса на замирания радиосигнала и уровня помех;
- проверка устойчивой работы проектируемой радиолинии по показателям качества;
- структурные схемы и принцип функционирования радиорелейной станции.

Заключение.

Список использованных источников.

Приложения.

Графический материал объемом в один А1 (или два А2, четыре А3) должен содержать:

- копию карты местности с нанесенной трассой РРЛ;
- продольный профиль интервала и диаграмму уровней;
- структурную схему оконечной цифровой станции.

Общий объем расчетно-пояснительной записки к проекту должен составлять 30...35 страниц.

## **2 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ**

Пояснительная записка состоит из титульного листа, задания на курсовое проектирование, содержания, введения, основного текста по техническому



обоснованию, заключения, используемых источников и приложений. Пояснительную записку выполняют на листах формата А4 с применением печатающих устройств ПЭВМ и брошюруют. Пояснительная записка начинается с титульного листа.

Задание по курсовому проекту заполняют согласно стандартной форме и основные разделы согласовывают с руководителем проекта.

Содержание помещают после задания по курсовому проекту. В содержание выносят заголовки всех частей пояснительной записки.

Все расчеты в тексте производят по формулам, которые перед численной подстановкой записываются в общем виде. Формулы снабжают ссылками на источники, нумеруют по порядку данного раздела и поясняют входящие в них величины. При значительном количестве однотипных расчетов результаты сводят в таблицы. Графические материалы выполняют на обычных листах или миллиметровой бумаге вручную или с помощью компьютера, соблюдая правила черчения и ГОСТы. Рисунки и таблицы нумеруют по порядку в рамках раздела. Большой по размеру графический материал выносится в приложение.

Заключение помещают на отдельной странице. В заключении необходимо перечислить основные результаты, характеризующие степень достижения целей проекта и подытоживающие его содержание.

Список использованных источников следует выполнять по ГОСТ 7.1-2003.

Правила оформления приложений изложены в ГОСТ 2.105-95.

Проект подписывается студентом с указанием даты выполнения.

Полный объем требований к оформлению пояснительной записки и чертежей изложен в стандарте предприятия СТП-П-01-2008.

### **3 ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ**

Каждый студент (курсант) получает индивидуальное задание на курсовой проект в соответствии (или по аналогии) с данными таблиц 3.1 и 3.2.

Задание оформляется на стандартном бланке с указанием исходных данных, содержания проекта по разделам и календарного графика его выполнения. Задание подписывается студентом, руководителем и заведующим кафедрой.

В зависимости от назначения РРЛ и подготовленности студентов содержание курсового проекта может корректироваться и усложняться преподавателем. Например, преподаватель предлагает произвести оптимальный выбор пролетов на интервалах трассы РРЛ, обеспечить минимальную сумму высот антенных опор, организовать устойчивую радиосвязь в условиях действия помех или в сложных условиях распространения сигналов. Использовать в ЦРРСИ многочастный метод модуляций с помехоустойчивым кодированием, который принят в цифровом наземном ТВ-вещании для повышения надежности приема. Выполнить компьютерную оптимизацию РРЛ по критерию ее эффективности при обеспечении заданных характеристик за счет снижения затрат на антенные сооружения, фидерные тракты, эксплуатацию и др.

Таблица 3.1 – Направление РРЛ и номер рассчитываемого интервала

Направление РРЛ	Номер рассчитываемого интервала РРЛ	Тип участка РРЛ
1 Минск – Гродно	2	ПУ-1 тип
2 Минск – Барановичи	3	ПУ-2 тип
3 Минск – Брест	4	ПУ-1 тип
4 Минск – Слуцк	2	ПУ-2 тип
5 Минск – Колодищи	1	УД
6 Минск – Молодечно	2	КП
7 Полоцк – Орша	2	КП
8 Гродно – Брест	2	ПУ-2 тип
9 Орша – Колядичи	3	ПУ-2 тип
10 Мозырь – Орша	2	КП
11 Полоцк – Мозырь	3	ПУ-1 тип
12 Пинск – Брест	2	ПУ-2 тип
13 Гродно – Лида	1	КП
14 Витебск – Минск	2	ПУ-1 тип
15 Березино – Минск	1	КП
16 Могилев – Минск	2	ПУ-2 тип
17 Гомель – Пинск	2	КП
18 Гомель – Могилев	3	ПУ-2 тип
19 Гомель – Барановичи	2	ПУ-2 тип
20 Гомель – Брест	3	ПУ-2 тип

Примечание – ПУ – протяженный участок; КП – короткопролетный участок; УД – участок доступа.

Таблица 3.2 – Технические характеристики ЦРРСЦ

Пропускная способность	Вид модуляции	Диапазон частот, ГГц	Уровень мощности передатчика, дБм	Коэф. шума приемника, дБ	Схема резервирования	Тип и скорость кода
1	2	3	4	5	6	7
1 2E1	QPSK	18	20	4	1+0	$R_{СК}=2/3$
2 3E1	QPSK	15	22	4	1+0	$R_{СК}=3/4$
3 4E1	4-ФМ	13	24	3,5	1+0	$R_{СК}=7/8$
4 E2	4-ФМ	15	24	3,5	1+1	$R_{PC}=0,8$
5 2E2	8-ФМ	26	20	3	1+0	$R_{СК}=5/6$
6 3E2	QPSK	22	22	3	1+0	$R_{СК}=3/4$
7 4E2	16-QAM	15	24	3,5	1+0	$R_{СК}=7/8$
8 E3	16-QAM	18	26	3,5	1+1	$R_K=1$
9 2E3	16-QAM	38	20	7	1+0	$R_{PC}=0,82$
10 3E3	32-QAM	26	18	4,5	1+0	$R_{СК}=2/3$
11 4E3	32-QAM	18	24	4,5	1+0	$R_{СК}=3/4$
12 E4	64-QAM	11	26	3	1+1	$R_{СК}=5/6$

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5	6	7
13 E4	128-QAM	8	28	2,5	1+0	$R_{PC}=0,84$
14 STM-0	64-QAM	6	30	2,5	1+1	$R_{CK}=2/3;$ $R_{CK}=0,92$
15 STM-0	32-QAM	4	32	2	1+0	$R_{CK}=3/4$
16 STM-1	32-QAM	6	36	2	1+0	$R_{CK}=5/6;$ $R_{CK}=0,92$
17 STM-1	64-QAM	6	34	2	1+0	$R_{CK}=7/8$
18 STM-1	128-QAM	8	32	3	1+1	$R_{PC}=0,8$
19 8E1	8-ФМ	11	30	3,5	1+0	$R_{CK}=2/3$
20 16E1	8-ФМ	15	28	4	1+0	$R_{CK}=3/4$

Примечания – 1 Скорость информационных данных: E1 – 2,048 Мбит/с; E2 – 8,448 Мбит/с; E3 – 34,368 Мбит/с; E4 – 139,264 Мбит/с; STM-0 – 51,84 Мбит/с; STM-1 – 155,52 Мбит/с.

2  $R_{CK}, R_{PC}$  – относительная скорость сверточного и блочного кодов соответственно.

## 4 ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И ТРАССЫ РРЛ

### 4.1 Общие замечания

Несмотря на то что курсовой проект имеет статус учебного, при его выполнении следует придерживаться принципов инженерного проектирования. В частности, необходимо провести обоснованный выбор оборудования станций, их мест установки и высот антенных опор. Выполнить расчет базовых параметров. Продуманно построить трассу заданного направления с учётом её «зигзагообразности» и альтернативных решений [1 – 4].

### 4.2 Выбор аппаратуры ЦРПС и определение её параметров

На основании исходных данных производится предварительный выбор аппаратуры и дается ее краткое описание (назначение, особенности построения, базовая комплектация и др.). По техническим характеристикам на аппаратуру формируется таблица с указанием следующих параметров: рабочий диапазон частот; средняя длина интервалов  $R_{CP}$ ; частотный разнос  $F_p$  между соседними каналами плана частот; вид модуляции; ширина полосы ВЧ радиотракта  $\Delta F_{ВЧ}$ ; спектральная эффективность  $\gamma_C$ ; мощность передатчика  $P_{ПД}$ ; коэффициент шума приёмника  $n_{Ш}$ ; тип, диаметр и усиление антенн  $g_0$ ; пороговая чувствительность приёмника  $p_{ПОР}$ ; коэффициент системы  $K_{СИС}$ ; способы и параметры помехоустойчивого кодирования; допустимый уровень помехи на совпадающей частоте  $p_{ПОМ}$ .

Если отсутствует необходимая информация о параметрах аппаратуры, то недостающие значения выбирают или рассчитывают на основании следующих рекомендаций.

*Средняя длина интервалов  $R_{\text{СР}}$*  принимается равной: 45...55 км для частот до 6 ГГц; 35...45 км для 8 ГГц; 30...35 км для 11 ГГц; 20...22 км для 18 ГГц; 12...15 км для 30 ГГц и 6...8 км для 40 ГГц.

*Разнос между частотами приема и передачи* устанавливается на основании плана распределения частот, рекомендованного МСЭ-Р (например F.746) в соответствии с диапазоном частот системы. В диапазонах частот около 11, 15, 18, 23, 26, 38 ГГц разнос составляет: 530; 728/420; 1008/1010; 1008/1232; 1008 и 1260 МГц соответственно.

*Ширина полосы радиотракта  $\Delta F_{\text{ВЧ}}$*  при известных значениях общей скорости сигнала  $B = B_0 + B_{\text{В}}$  на выходе мультиплексора, порядка модуляции  $M$  (многопозиционной QAM или ФМ) и относительной скорости кодирования  $R_{\text{К}}$  определяется по формуле [5]

$$\Delta F_{\text{ВЧ}} = B \cdot b_{\text{р}} / (\log_2 M) \cdot R_{\text{К}} = b_{\text{р}} \cdot B_{\text{С}}, \text{ Гц}, \quad (4.1)$$

где  $B_0$  – информационная скорость передаваемых данных, бит/с;

$B_{\text{В}}$  – скорость передачи вспомогательных данных по служебным и дополнительным каналам, примерно равная (3...5)% от  $B_0$ , бит/с;

$b_{\text{р}}$  – коэффициент расширения полосы радиотракта относительно теоретически необходимой и равный 1,15...1,35;

$m = \log_2 M$  – кратность модуляции;

$B_{\text{С}}$  – символьная скорость, характеризующая число переданных радиосимволов в единицу времени, симв/с.

*Частотный разнос  $F_{\text{р}}$  между соседними каналами* плана частот устанавливается в соответствии с полученным значением  $\Delta F_{\text{ВЧ}}$ . Величина  $F_{\text{р}} \geq \Delta F_{\text{ВЧ}}$ , кратна 3,5 МГц и может составлять 7, 14, 28 или 56 МГц. Например, при скорости данных  $B_0 = 155,52$  Мбит/с и модуляции 128-QAM  $F_{\text{р}} = 28$  МГц, при модуляции 32-QAM и наличии помехоустойчивого кодирования  $F_{\text{р}} = 56$  МГц.

*Спектральная эффективность  $\gamma_{\text{С}}$*  характеризует меру использования полосы частот радиотракта ЦРРСП для передачи требуемого объема данных и определяется по формуле

$$\gamma_{\text{С}} = \frac{B}{F_{\text{р}}}, \text{ (бит/с)/Гц}. \quad (4.2)$$

*Максимальное усиление антенн  $g_0$*  в зависимости от протяженности интервалов РРЛ выбирается в диапазоне значений 35...45 дБ и рассчитывается по формуле

$$g_0 = 20 \lg d_{\text{А}} + 20 \lg f_{\text{р}} + 10 \lg k_{\text{И}} + 20,4, \text{ дБ}, \quad (4.3)$$

где  $d_{\text{А}}$  – диаметр параболической антенны, м;

$f_p$  – рабочая частота, ГГц;

$k_{И}$  – коэффициент использования поверхности зеркала антенны, равный 0,55...0,6 для прямофокусных, 0,6...0,7 для офсетных однозеркальных и 0,7...0,75 для двухзеркальных антенн с модифицированным профилем.

При заданном усилении антенны ее диаметр составляет:

$$d_A = \frac{1}{f_p \cdot \sqrt{k_{И}}} \cdot 10^{0,05(g_0 - 20,4)}, \text{ м.} \quad (4.4)$$

Выбирая тип и размеры антенн, следует учитывать, что большегабаритные антенны обладают высокой пространственной избирательностью, существенным ослаблением помех с боковых направлений и позволяют повысить энергетический потенциал радиолинии. Однако они подвержены ветровым нагрузкам и требуют устойчивых антенных опор. Обычно  $d_A$  составляет 0,3...1,8 м.

Мощность передатчика  $P_{ПД}$  в точке соединения с фидером (антенный порт) обычно составляет 0,1...1,0 Вт (20...30 дБм) и в процессе эксплуатации системы может программно изменяться в диапазоне значений 20...30 дБ с шагом 1,0...3,0 дБ. Из-за роста потерь в полосовых фильтрах и устройстве объединения сигналов значение  $P_{ПД}$  с ростом рабочей частоты уменьшается.

Коэффициент шума  $n_{Ш}$  приемника, измеренный в точке соединения с фидером антенны, на частотах до 10 ГГц составляет 3,5...5 дБ. С ростом частоты из-за увеличения потерь в пассивных устройствах, расположенных до малошумящего усилителя (МШУ), его значение возрастает до 6,5...8 дБ (на частоте 38 ГГц). Рассчитывается  $n_{Ш}$  по формуле

$$n_{Ш} = a_{ПАС} + n_{МШУ}, \text{ дБ,} \quad (4.5)$$

где  $a_{ПАС}$  – потери входной мощности в пассивных высокочастотных устройствах приемника, дБ;

$n_{МШУ}$  – коэффициент шума МШУ, дБ.

В зависимости от конструктивной реализации ЦРРСП и ее диапазона частот  $a_{ПАС} \approx 1,5...4,5$  дБ,  $n_{МШУ} = 0,5...4,0$  дБ [17].

Пороговая чувствительность приемника  $p_{ПОР}$  характеризует минимальный уровень входного сигнала, при котором на его выходе обеспечивается допустимая вероятность битовых ошибок  $P_{ОШ} = N_{ОШ} / B \cdot t$ , где  $N_{ОШ}$  – число ошибочных бит за время  $t$ . Величина  $p_{ПОР}$  зависит от вида модуляции, пропускной способности радиоствола, допустимого значения  $P_{ОШ}$ , параметров кодирования и определяется (в точке соединения с фидером антенны) по формуле

$$p_{ПОР} = c_{ТР} + n_{Ш} + 10 \lg(B / m \cdot R_K) - 174, \text{ дБм,} \quad (4.6)$$

где  $\rho_{\text{ТР}}$  – требуемое отношение мощности сигнала на частоте несущей к мощности шума (ОНШ), при котором реализуется заданное значение  $P_{\text{ОШ}}$ , дБ;

$m$  – кратность модуляции или число бит, переносимых радиопосылкой (радиосимволом) модулированного сигнала.

Величина требуемого ОНШ складывается из минимального значения  $\rho_0$ , необходимого для обеспечения  $P_{\text{ОШ}}$  в благоприятных условиях приема, и запаса  $\Delta\rho$  на отклонение реальных параметров радиотракта от теоретических:

$$\rho_{\text{ТР}} = \rho_{0_i} + \Delta\rho = \rho_{0_i} + 2\lg(m + \sqrt{f_p}), \text{ дБ}, \quad (4.7)$$

где  $\rho_{0_i}$  – значение ОНШ, равное  $\rho_0$  при отсутствии кодирования и  $\rho_{0_k}$  при его наличии;

$f_p$  – рабочая частота, ГГц.

Минимально необходимое значение ОНШ на входе приемника при когерентной демодуляции М-QAM сигнала и отсутствии помехоустойчивого кодирования ( $R_K = 1$ ) определяется по формуле [5]

$$\rho_{0(\text{М-QAM})} = 10 \cdot \lg \left[ 1,533(M-1) \cdot (A_1 - 0,5\lg A_1 - 0,18) \right], \text{ дБ}; \quad (4.8)$$

$$A_1 = -\lg P_{\text{ОШ}} - \lg \left( \frac{m \cdot \sqrt{\pi}}{2(1-1/\sqrt{M})} \right), \text{ для } m - \text{четных } (2, 4, 6 \dots);$$

$$A_1 = -\lg P_{\text{ОШ}} - \lg(m \cdot \sqrt{\pi})/2, \text{ для } m - \text{нечетных } (3, 5 \dots).$$

Типовые значения ошибок, для которых оцениваются качественные показатели ЦРРСП, принимаются равными  $10^{-3}$  и  $10^{-6}$ .

Для систем с многопозиционной фазовой модуляцией М-ФМ, когерентной демодуляцией и  $R_K = 1$

$$\rho_{0(\text{М-ФМ})} = 10 \cdot \lg \left[ 2,3(A_2 - 0,5\lg A_2 - 0,18) / \sin^2(\pi/M) \right], \text{ дБ}, \quad (4.9)$$

$$A_2 = -\lg P_{\text{ОШ}} - \lg m \sqrt{\pi} \quad m = 1, 2, 3 \dots$$

При использовании в радиорелейных системах помехоустойчивого кодирования сверточным кодом, квадратурной модуляции М-QAM и декодирования по алгоритму Витерби

$$\rho_{\text{ОК(М-QAM)}} = 10 \cdot \lg \left[ 0,574 \cdot M \cdot R_{\text{СК}} \cdot (0,873 + R_{\text{СК}}^4) \cdot (A_3 - 0,5\lg A_3) / \sqrt{K} \right], \text{ дБ}; \quad (4.10)$$

$$A_3 = -\lg P_{\text{ОШ}} - \lg \left( \frac{m}{(1-1/\sqrt{M}) \cdot \sqrt{R_{\text{СК}}}} \right) + 2,4 + 0,25 \cdot R_{\text{СК}}^4 \cdot m, \text{ для } m -$$

четных (2, 4, 6...),

где  $R_{СК}$  – относительная скорость сверточного кода, равная 1/2, 2/3, 3/4 и др.;  
 $K$  – длина кодового ограничения или характеристика конструктивной сложности кодера. Для большинства ЦРПС  $K$  равняется 7.

При использовании кодирования сверточным кодом и многопозиционной фазовой модуляции М-ФМ

$$\rho_{ОК(М-ФМ)} = 10 \cdot \lg \left[ \frac{1,148 \cdot R_{СК} (A_3 - 0,51 \lg A_3) \cdot (0,873 + R_{СК}^4)}{\sin^2(\pi/M) \cdot \sqrt{K}} \right], \text{ дБ.} \quad (4.11)$$

Если в системах с модуляцией М-КАМ и М-ФМ принято кодирование блочным кодом Рида – Соломона (РС), то величина ОНШ рассчитывается по (4.10) или (4.11) при допущении, что  $R_{СК} = 0,8 \cdot R_{РС}$ , где  $R_{РС}$  – относительная скорость кода РС.

Для протяженных радиотрасс с тяжелыми условиями приема разработаны ЦРПС с повышенной эффективностью за счет применения каскадного помехоустойчивого кодирования. При последовательном включении кодеров внешний из них использует код Рида – Соломона, а внутренний – сверточный код (СК).

Требуемое значение ОНШ при двухступенчатом (РС + СК) последовательном декодировании М-QAM сигналов, длине кодового ограничения  $K=7$  и известной вероятности ошибки на выходе второй ступени декодирования (декодер РС) определяется по формуле

$$\rho_{ОК(М-КАМ)}^{(РС+СК)} = 10 \cdot \lg \left[ 0,235 \cdot M \cdot R_K (0,873 + R_K^4) (A_4 - 0,51 \lg A_4) \right], \text{ дБ;} \quad (4.12)$$

$$A_4 = -\frac{\lg P_{ОШ.РС}}{10,58} - \lg \left[ \frac{m}{(1-1/\sqrt{M})\sqrt{R_{СК}}} \right] + 5,1 + 0,25 R_{СК} \cdot m,$$

где  $R_K = R_{СК} \cdot R_{РС}$  – относительная скорость каскадного кода;

$P_{ОШ.РС}$  – вероятность ошибки на выходе декодера РС.

Часто внешний код РС имеет вид (204, 188,  $t=8$ ) и значение  $R_{РС}=188/204$ . Здесь  $t$  – исправляющая способность кода.

Различие между требуемыми значениями ОНШ при допустимых ошибках  $10^{-6}$  и  $10^{-3}$  в отсутствие помехоустойчивого кодирования составляет 3,7...4,0 дБ, при одной ступени кодирования 2,0...2,3 дБ и при каскадном кодировании (блочный код РС + сверточный) 0,5...0,6 дБ.

При  $M=4$  требуемые значения ОНШ в системах с квадратурной и фазовой модуляцией совпадают (см. выражения (4.8), (4.9) и (4.10), (4.11)), при  $M \geq 8$  предпочтение имеет QAM.

*Коэффициент системы*  $K_{СИС}$  (или коэффициент её усиления) характеризует энергетический потенциал приемопередающего оборудования по компонен-

сации потерь на интервале радиолинии при условии обеспечения заданных значений  $P_{\text{ОШ}}$  ( $10^{-6}$  или  $10^{-3}$ ) и определяется по формуле

$$K_{\text{СИС}} = p_{\text{ПД}} - p_{\text{ПОР}}, \text{ дБ}, \quad (4.13)$$

где  $p_{\text{ПД}}$  – уровень мощности радиосигнала на выходе передатчика, дБм.

В зависимости от параметров аппаратуры  $K_{\text{СИС}}$  находится в пределах от 80 до 120 дБ. При горячем резервировании  $K_{\text{СИС}}$  ниже на сумму потерь в устройствах объединения и разделения сигналов трактов передачи и приема (на 6...7 дБ при использовании 3-дБ разветвителей).

Допустимый уровень одиночной помехи  $p_{\text{ПОМ}}$  на входе приемника при условии обеспечения требуемого значения  $P_{\text{ОШ}}$  (обычно  $10^{-6}$ ) определяется по формуле

$$p_{\text{ПОМ}} = p_{\text{ПОР}} - h_{\text{ЗАЩ}}, \text{ дБ}, \quad (4.14)$$

где  $h_{\text{ЗАЩ}}$  – защитное отношение, дБ.

Для помехи, действующей на частоте полезного сигнала,

$$h_{\text{ЗАЩ}} = \rho_{\text{ТР}} - 10 \cdot \lg(10^{0,1\zeta} - 1), \text{ дБ}, \quad (4.15)$$

где  $\zeta$  – допустимый уровень снижения ОНШ под действием помехи, дБ.

Согласно выражению (4.15), при допущении снижения ОНШ на 1 дБ  $h_{\text{ЗАЩ}} = \rho_{\text{ТР}} + 6$ , дБ, при снижении ОНШ на 3 дБ  $h_{\text{ЗАЩ}} = \rho_{\text{ТР}}$ .

Одна из причин присутствия помех на совпадающей частоте – дальнейшее распространение сигналов вследствие сверхрефракции.

Для помех, попадающих в соседние каналы приема, значение  $h_{\text{ЗАЩ}}$  ниже, чем это требуется при расчете по (4.15), и объясняется частотной избирательностью приемника. Если под действием помехи допускается снижение ОНШ на 1 дБ, то  $h_{\text{ЗАЩ}}$  может составлять от 6 до минус 6 дБ. Если допускается снижение ОНШ на 3 дБ, то  $h_{\text{ЗАЩ}}$  на 6 дБ меньше, т. е. составляет от 0 до минус 12 дБ.

Энергетический выигрыш от кодирования  $G_{\text{КОД}}$  характеризует меру снижения требуемого ОНШ за счет коррекции ошибок при обеспечении заданной достоверности приема:

$$G_{\text{КОД}} = \rho_0 - \rho_{\text{ОК}} + 10 \cdot \lg R_{\text{К}}, \text{ дБ}. \quad (4.16)$$

Для типовых режимов и видов помехоустойчивого кодирования с кодом Рида – Соломона или сверточным кодом выигрыш  $G_{\text{КОД}}$  может составлять около 4...5 дБ. Его величина зависит от алгоритма декодирования и тем выше, чем



выше избыточность кода (меньше  $R_K$ ) и меньше требуемое значение  $P_{ОШ}$ . В системах ЦРРСП, предназначенных для протяженных интервалов с каскадным кодированием (РС + СК),  $G_{код} \approx 6..8$  дБ. Благодаря кодированию представляется возможным уменьшить на величину  $G_{код}$  мощность передатчика, усиление антенн или допустить большие потери на интервале.

Таблица 4.1 – Технические характеристики двух моделей ЦРРСП

1	Значение	
	2	3
1 Диапазон рабочих частот, ГГц	14,5..15,35	17,7..19,7
2 Пропускная способность или скорость передачи данных, Мбит/с	8Е1 (8×2,048 Мбит/с)	STM-0 (51,84 Мбит/с)
3 Частотный разнос между соседними каналами, МГц	14,0	14,0
4 Вид модуляции	4 ФМ (QPSK)	32-QAM
5 Ширина полосы ВЧ-тракта, МГц	10,65	13,97
6 Спектральная эффективность, (бит/с)/Гц	1,23	3,9
7 Уровень выходной мощности передатчика, дБм	23,0	18,0
8 Коэффициент шума приемника, дБ	4,0	5,0
9 Диаметр используемых антенн, м	0,8 /1.2	0,6/0,8
10 Усиление антенн, дБ	38,9/42,5	38,6/41,0
11 Пороговая чувствительность приемника, дБм для $P_{ОШ} = 10^{-6}$ для $P_{ОШ} = 10^{-3}$	– 85,5 – 89,0	– 76,0 – 78,0
12 Коэффициент системы, дБ для $P_{ОШ} = 10^{-6}$ для $P_{ОШ} = 10^{-3}$	108,5 112,0	94,0 96,0
13 Коррекция ошибок	—	Код Рида – Соломона, $R_{РС} = 0,92$
14 Допустимый уровень помехи на совпадающей частоте (дБм) при снижении ОНШ на 1 дБ 3дБ	– 107,0 – 101,0	– 103,0 – 97,0
15 Конфигурация системы	1+0; 1+1	1+0; 1+1

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3
16 Диапазон регулировки выходной мощности передатчика, дБ	30,0	25,0
17 Средняя длина интервалов, км	25,0	20,0
18 Порог срабатывания сигнала аварии по величине вероятности ошибки, $P_{\text{ош}}$	Устанавливается для значений $10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}$	
19 Среднее время наработки на отказ, ч при отсутствии резерва при наличии резерва	$5 \cdot 10^4$ $1,4 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^4$ $1,5 \cdot 10^5$

### 4.3 Построение трассы РРЛ

При построении трассы РРЛ требуемого направления используются карта заданного региона с масштабом  $1:10^6$  или  $1:10^5$  и принятая в соответствии с выбранной аппаратурой средняя длина интервалов  $R_{\text{СР}}$ . Реальная длина интервалов может отличаться от  $R_{\text{СР}}$  на 25...30 %. Прокладка трассы между конечными пунктами ведется по ломаной линии («зигзагообразно») с тщательным выбором мест размещения площадок для станций исходя из следующих требований:

- оптимально используется рельеф местности для достижения минимальных высот антенных опор и низкого уровня отражений (интервалы проходят по пересеченной местности, в стороне от болот и водных зон);
- обеспечиваются удобства для эксплуатации станций благодаря наличию подъездных путей, источников электроэнергии, присутствию жилых зон;
- отсутствует влияние внешних помех, создаваемых радиотехническими средствами, спутниковыми передающими станциями, аэродромами и др.;
- максимально используется имеющаяся инфраструктура для размещения антенн на требуемой высоте в выбранных пунктах (используются антенные опоры других служб, высотные технические здания и др.);
- соблюдается экономическая рентабельность предполагаемого строительства и эксплуатации.

Зигзагообразная разбивка трассы осуществляется так, чтобы углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , показанные на рисунке 4.1, превышали  $5...10^\circ$ . При этих значениях (больших ширины ДН антенны) снижается уровень помех прямого прохождения через несколько интервалов при наличии сверхрефракции на 30...35 дБ. Получаемый эффект объясняется пространственной избирательностью антенн, которые направлены на требуемые станции и обеспечивают для помехи связь через их боковые лепестки с низким уровнем усиления.

При прохождении радиолиний над водными зонами их длины выбирают по возможности более короткими. Это способствует ограничению расходимости луча антенны, снижению радиуса зоны Френеля и уровня помех вследствие отражений от водной поверхности.

Участки (секции), на которых присутствует 4...6 ПРС, заканчиваются узловыми станциями. Место их размещения – крупные населенные пункты. Гипотетическая длина участка 278 км. Реальная длина участка 180...280 км.

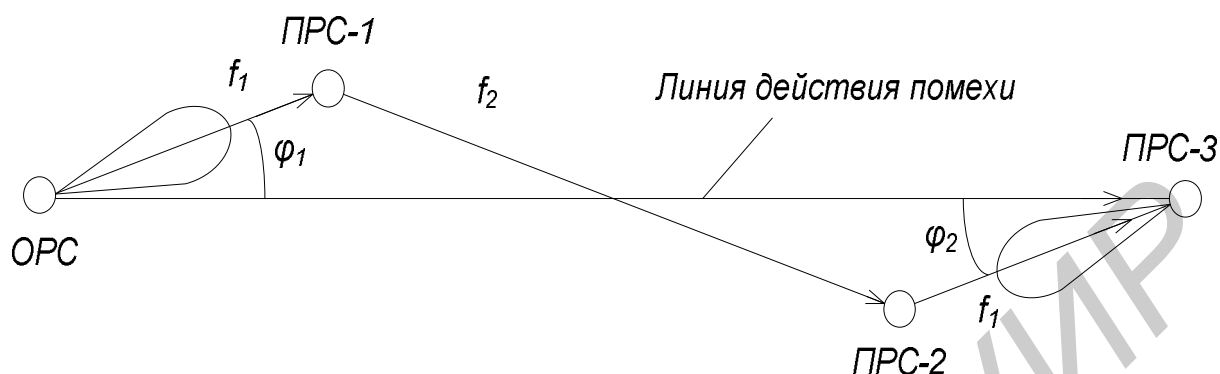


Рисунок 4.1 – Схема «зигзагообразного» построения трассы РРЛ для двухчастотного плана

После всех построений производится нумерация станций и интервалов. В текст записки вносится выкопировка из карты с указанием основных дорог, населенных пунктов, озер и границ лесных массивов, примыкающих к трассе. Указываются длины интервалов между станциями, общая длина РРЛ, количество ПРС, УРС, ОРС и их общее число [1 – 4].

При детальном проектировании трасс следует рассматривать несколько альтернативных вариантов, для каждого из которых строят продольные профили интервалов и выполняют основные расчеты. После их изучения выбирают оптимальный из них, который наилучшим образом отвечает техническим, эксплуатационным и экономическим показателям.

## 5 ПОСТРОЕНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ИНТЕРВАЛА

Профиль интервала отображает вертикальный разрез местности между соседними радиорелейными станциями со всеми высотными отметками, включая строения, лес и т. д. (рисунок 5.1). На профиле интервала указываются водные поверхности: реки, болота, водохранилища. Построение продольных профилей осуществляется с помощью топографических карт с нанесёнными на них линиями равных высот и масштабом 1:100 000 или 1:50 000. В дальнейшем отдельные участки пролета и места установки станций вблизи населенных пунктов уточняются по картам более крупного масштаба (1:25 000, 1:10 000 и т.д.). В настоящее время для построения интервалов РРЛ используют компьютер и цифровые карты местности. На практике для удовлетворительных расчетов трасс точность построения профилей на критических участках должна быть не хуже  $\pm 3$  м [1].

Приведенные на рисунке 5.1 линии равных высот (горизонтالي) представляют собой замкнутые кривые, все точки которых имеют одинаковую вы-

соту над уровнем моря. Горизонтالي бывают нескольких видов – сплошные, утолщенные, пунктирные и пр. На картах указывается разница по высоте между сплошными соседними горизонталями (например, на картах с масштабом 1:100 000 шаг по высоте сплошных горизонталей равен 20 м). Разница высот между сплошными и пунктирными горизонталями обычно в 2 раза меньше. На подобных картах сплошные утолщенные горизонтали имеют высоту, кратную 100 м.

Некоторые горизонтали имеют короткие засечки, показывающие направление уменьшения высоты (на рисунке 5.1 засечки на горизонтали вблизи отметки 107, направленные наружу, показывают, что следующая горизонталь меньше по высоте, а засечки на горизонтали вблизи пункта Б, направленные внутрь, показывают уменьшение высоты к озеру). На линиях равных высот обычно нанесены цифры, соответствующие высотам горизонталей. По оцифрованным горизонталям и геодезическим отметкам определяются высоты рельефа.

Средними высотами местных предметов и инженерных сооружений задаются, ориентируясь на следующие величины: строения в сельской местности – 6...8 м, в поселках городского типа – 10...20 м, в городе – 20...30 м, лесной массив на низких местах – 10...15 м и на возвышенностях 15...30 м. На карте могут располагаться значки, соответствующие характеру леса, и цифры, показывающие среднюю высоту леса и толщину стволов деревьев (такое обозначение указано на рисунке 5.1).

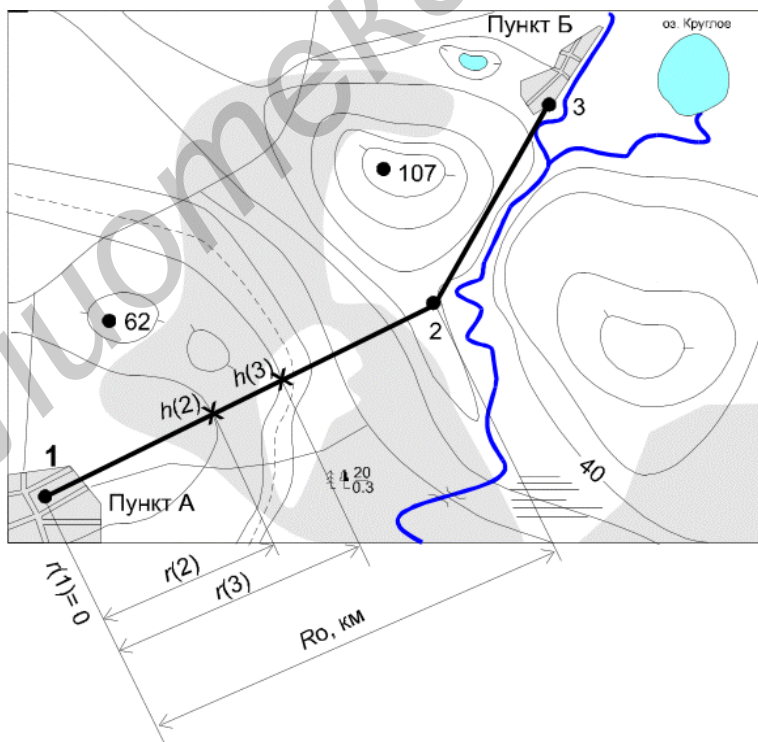


Рисунок 5.1 – План местности с указанием двух интервалов

По принятым направлениям интервалов (например представленных на рисунке 5.1) с карты местности снимают основные высотные отметки местности и результаты заносят в таблицы (таблицы 5.1, 5.2).

Профиль интервала строится в прямоугольных координатах с применением разных масштабов по горизонтали и вертикали. Рекомендованные масштабы приведены в таблице 5.3 .

Таблица 5.1 – Параметры высотных отметок профиля

Параметр	Номер точки отсчета			
	1	2	3	и т. д.
$R(i)$ , км	0			
$h(i)$ , м				

В таблице 5.1  $R(i)$  – расстояние от места расположения станции до  $i$ -й высотной отметки, км;  $h(i)$  – высота  $i$ -й точки рельефа местности, м.

Таблица 5.2 – Параметры местных предметов профиля

Параметр	Номер местного предмета			
	1	2	3	и т. д.
$R_1(i)$ , км				
$R_2(i)$ , км				
$h(i)$ , м				
Вид местного предмета				

В таблице 5.2  $R_1(i)$ ,  $R_2(i)$  – расстояния до начала и конца  $i$ -го местного предмета, км;  $h(i)$  – высота  $i$ -го местного предмета, м.

Таблица 5.3 – Рекомендуемые масштабы для построения продольных профилей

$R_0$ , км	Масштаб расстояний	$\Delta h$ , не более, м	Масштаб высот
3	1:100 000	100	1:500
		250	1:1 000
75	1:200 000	50	1:500
		150	1:1 000
		450	1:2 000
		1100	1:4 000
100	1:250 000	70	1:1 000
		300	1:2 000
		1000	1:4 000
		5500	1:20 000

При построении профилей используют так называемый условный нулевой уровень, имеющий вид параболы, ординаты которой составляют

$$Y = \left( R_0^2 / 2R_3 \right) k(1 - k), \quad (5.1)$$

где  $k_i = R_i / R_0$  – относительная координата заданной точки;

$R_i$  – расстояние до текущей точки;

$R_0$  – длина интервала, км;

$R_3$  – радиус Земли, равный 6370 км.

Для построения параболы используют не менее 3...5 точек, равномерно распределенных по оси  $R_0$ . От линии условного уровня откладывают высотные отметки (см. данные таблицы 5.1), соединяют их между собой и наносят высоты местных предметов (см. данные таблицы 5.2). Примерный вид продольного профиля интервала показан на рисунке 5.2.

Желательно, чтобы построенный профиль интервала был пересеченным, т. е. имел перепады высот в 15...25 м. В этом случае отраженные от земной поверхности сигналы экранируются рельефом местности и не попадают в раскрыв антенн. Интервалы с ровным рельефом, лишённые растительности или с водными зонами крайне нежелательны. Причина состоит в возможном возникновении в фокусе антенны интерференции (взаимодействия) основного и отраженных сигналов. В результате интерференции наблюдается существенное снижение уровня сигнала на входе приемника. Для борьбы с этим явлением местоположение станций обычно уточняют, рассматривают несколько вариантов продольных профилей интервалов и останавливают свой выбор на том, для которого отражениями от поверхности Земли можно пренебречь.

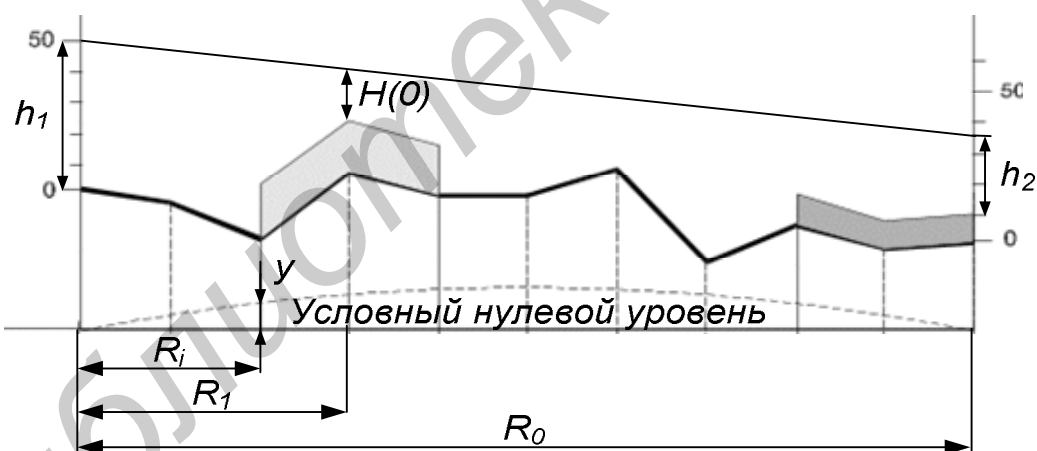


Рисунок 5.2 – Продольный профиль интервала

## 6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТ ПОДВЕСА АНТЕНН НА ИНТЕРВАЛЕ

На построенном продольном профиле интервала от наивысшей точки препятствия откладывается по вертикали вверх значение просвета  $H(0)$  в отсутствии рефракции, которое определяется из условия

$$H(0) \geq H_0 ; \quad (6.1)$$

$$H_0 = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \lambda \cdot R_0 \cdot k(1-k)}, \text{ м}, \quad (6.2)$$

где  $H_0$  – критический просвет, примерно равный 0,6 от радиуса первой зоны Френеля, м;

$\lambda$  – длина волны, м;

$k = R_{II}/R_0$  – относительная координата наивысшей точки препятствия.

Считается, что для рассчитанного по (6.1) просвета основной объем радиоволн распространяется от передатчика к приемнику в условиях свободного пространства, без ограничений со стороны рельефа местности.

На слабопересеченных интервалах для снижения вероятности попадания отраженных сигналов в раскрыв антенны можно принять

$$H(0) \geq H_0 - \Delta H(g); \quad (6.3)$$

$$\Delta H(g) = -\frac{R_0^2}{4} \cdot g \cdot k \cdot (1-k), \text{ м}, \quad (6.4)$$

где  $\Delta H(g)$  – приращение просвета из-за рефракции, которая искривляет траекторию распространения радиоволн, м;

$g = \frac{d\varepsilon}{dh}$  – вертикальный градиент диэлектрической проницаемости атмосферы, 1/м.

В формулах (6.3) и (6.4) значение  $g$  принимается равным средней (нормальной) рефракции  $\bar{g} = -9 \cdot 10^{-8}$ , 1/м. В общем случае  $\Delta H(g)$  изменяется в зависимости от состояния тропосферы и влияет на величину просвета. При положительной рефракции ( $g \leq 0$ ) общий просвет  $H_0 + \Delta H(g)$  увеличивается, при отрицательной или субрефракции ( $g > 0$ ) – уменьшается.

На уровне верхней отметки рассчитанного просвета  $H(0)$  проводится линия прямой видимости, которая соединяет предположительные центры антенн и служит основанием для определения высот подвеса антенн (см. рисунок 5.1). Для выбора высот с учетом смежных интервалов вычерчивают подряд 3-4 интервала, определяют для них просветы, проводят на каждом из них несколько альтернативных линий прямой видимости и останавливаются на варианте, при котором сумма высот антенных опор минимальна.

С помощью (6.1) – (6.4) определяют относительный просвет при средней рефракции:

$$p(\bar{g}) = [H(0) + \Delta H(\bar{g})]/H_0. \quad (6.5)$$

Полученное значение должно удовлетворять условию  $p(\bar{g}) \geq 1$ , которое характеризует принадлежность интервала к открытому типу. В зависимости от атмосферной рефракции интервал из открытого типа может перейти в полуза-

крытый ( $0 < p(g) < 1$ ) или даже закрытый ( $p(g) < 0$ ). Закрытие интервала возникает при субрефракции ( $g > 0$ ), которая наблюдается летом или осенью в присутствии туманов. В этих условиях траектория распространяемых волн обращена поверхностью «вниз» и их основной объем (минимальная зона Френеля) экранируется рельефом местности.

Для установленных значений высот  $h_1$  и  $h_2$  и эффективного градиента  $g_{\text{ЭФ}} = \bar{g} + \sigma$  проверяется выполнение условия прямой видимости:

$$R_0 \leq \sqrt{2 \cdot R_{\text{Э}}} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \text{ м}; \quad (6.6)$$

$$R_{\text{Э}} = R_3 / \left(1 + \frac{R_3 \cdot g_{\text{ЭФ}}}{2}\right), \text{ м}, \quad (6.7)$$

где  $R_{\text{Э}}$  – эквивалентный радиус Земли;

$\sigma$  – стандартное отклонение градиента  $\bar{g}$ , равное  $7 \cdot 10^{-8}$  для Республики Беларусь, 1/м.

Затем выбирается тип антенных опор, которые различаются конструкцией, методом установки, несущей способностью, доступом к антенне и оборудованию. Учитывается, что в зависимости от типа станции РРЛ часть оборудования может располагаться рядом с антенной и для его технического обслуживания необходимо предусмотреть лестницы, ограждения, площадки и др. При проектировании РРЛ местного и внутризонального назначения могут использоваться металлические решетчатые антенны, устанавливаемые на поверхности земли (высотой до 120 м) или на зданиях (высотой до 35 м); бетонные опоры (высотой от 19 до 28 м); трубчатые конструкции (высотой до 30 м), удерживаемые с помощью растяжек и др.

Строительство антенных опор и оформление на них разрешительных документов является затратной процедурой, поскольку их возведение требует согласования с надзорными организациями и соответствующими службами (радионавигации, воздушных перевозок и др.). Поэтому антенные опоры должны быть типовыми и содержать все основные средства технической эксплуатации.

## 7 РАСЧЁТ УРОВНЕЙ СИГНАЛОВ НА ВХОДЕ ПРИЁМНИКА

В курсовом проекте определяются два крайних уровня сигналов, которые могут присутствовать на входе приёмника. Это средний уровень  $p_{\text{ВХ}}$ , наблюдаемый в 50 % времени в условиях средней атмосферной рефракции, и пороговый  $p_{\text{ПОР}}$ , при котором на выходе демодулятора приёмника или декодера при наличии помехоустойчивого кодирования вероятность ошибок составляет  $10^{-6}$  или  $10^{-3}$ .



Определение уровней сигналов ведётся для указанного заданием интервала в одном направлении от передатчика к приёмнику с учётом характеристик станций и среды распространения (рисунок 7.1).



Рисунок 7.1 – Структурная схема радиотракта интервала

Средний уровень сигнала на входе приёмника открытого интервала определяется на основании уравнения передачи:

$$P_{\text{ВХ}} = P_{\text{ПД}} + g_{\text{ПД}} - a_{\text{Ф.ПД}} - a_0 - a_{\text{АТМ}} + g_{\text{ПР}} - a_{\text{Ф.ПР}}, \text{ дБм}, \quad (7.1)$$

где  $P_{\text{ПД}}$  – уровень мощности передатчика на входе фидерного тракта, дБм;

$g_{\text{ПД}}, g_{\text{ПР}}$  – усиление передающей и приёмной антенн, дБ;

$a_{\text{Ф.ПД}}, a_{\text{Ф.ПР}}$  – потери в фидерных устройствах на стороне передачи и приёма, дБ;

$a_0, a_{\text{АТМ}}$  – потери мощности сигнала в свободном пространстве и атмосфере соответственно, дБ.

Потери в фидерном тракте зависят от способа размещения оборудования станций. При их размещении у основания опоры (вариант характерен для станций большой емкости диапазона до 8 ГГц) потери составляют

$$a_{\text{Ф}} = l_{\text{Ф1}} \cdot \alpha_{\text{ПОГ1}} + l_{\text{Ф2}} \cdot \alpha_{\text{ПОГ2}} + a_{\text{Б.Т}}, \text{ дБ}, \quad (7.2)$$

где  $l_{\text{Ф1}}, l_{\text{Ф2}}$  – длина фидера вертикального и горизонтального участков, м;

$\alpha_{\text{ПОГ1}}, \alpha_{\text{ПОГ2}}$  – погонное затухание сигнала в фидере соответствующего участка, дБ/м;

$a_{\text{Б.Т}}$  – потери в элементах базового тракта, дБ.

Базовый тракт состоит из поляризационного селектора, поглотителя высших типов волн, герметизирующих вставок со штуцером (для подключения системы осушки), волноводных соединений и др. [1–3]. Потери  $a_{\text{Б.Т}}$  можно принять 0,5..1,2 дБ.

Фидер вертикального участка обычно имеет волноводную конструкцию с длиной, примерно равной высоте антенной опоры, и с погонным затуханием 0,018...0,022 дБ/м. Для возможности передачи сигналов с горизонтальной и вертикальной поляризацией по одному фидеру используют волноводы круглого сечения. Горизонтальные участки фидеров чаще всего строятся на эллиптических волноводах длиной 15...20 м и с погонным затуханием 0,08...0,1 дБ/м.

При размещении высокочастотного блока ЦРРСП на верхней части опоры потери в фидере зависят от способа его соединения с антенной. Если соединение осуществляется отрезком гибкого волновода длиной 0,5...1,0 м, то потери  $a_\Phi$  составляют около 0,5...0,8 дБ. При жёсткой конструкции соединения блока с антенной потери 0,1...0,3 дБ.

Потери радиосигнала в поле свободного пространства, связанные с расходимостью фронта излучения на интервале, определяются из выражения

$$a_0 = 92,44 + 20 \lg f_p + 20 \lg R_0, \text{ дБ}, \quad (7.3)$$

где  $f_p$  – рабочая частота, ГГц;

$R_0$  – длина интервала, км.

Атмосферные потери в основном обусловлены поглощением части передаваемой мощности в парах воды и кислороде:

$$a_{\text{АТМ}} = R_0(\gamma_{\text{В}} + \gamma_{\text{К}}), \text{ дБ}, \quad (7.4)$$

где  $\gamma_{\text{В}}, \gamma_{\text{К}}$  – коэффициенты поглощения мощности сигнала в парах воды и кислороде, дБ/км.

Значения  $\gamma_{\text{В}}$  и  $\gamma_{\text{К}}$  определяются по приближенным выражениям [6]:

$$\gamma_{\text{В}} = \left( 0,067 + \frac{3,6}{(f_p - 22,3)^2 + 8,5} + \frac{10,6}{(f_p - 183,3)^2 + 9} + \frac{8,9}{(f_p - 325,4)^2 + 26,3} \right) f_p^2 \cdot p \cdot 10^{-4}, \text{ дБ/км} \quad (7.5)$$

$$\gamma_{\text{К}} = \left( 7,19 \cdot 10^{-3} + \frac{6,09}{f_p^2 - 0,227} + \frac{4,81}{(f_p - 57)^2 + 1,5} \right) f_p^2 \cdot 10^{-3}, \text{ дБ/км}, \quad (7.6)$$

где  $p$  – влажность воздуха при температуре 20°C, равная 7,5 г/м<sup>3</sup>.

Потери  $a_{\text{АТМ}}$  заметны на частотах свыше 15 ГГц и имеют резонансный характер с «пиками» и окнами «прозрачности» в зависимости от частоты [1].

Укажем, что в области максимума поглощения мощности в парах воды (около 20,4 ГГц)  $\gamma_{\text{В}} = 0,18$  дБ/км, а  $\gamma_{\text{К}} = 0,013$  дБ/км. В окне прозрачности на частоте 30 ГГц  $\gamma_{\text{В}} = 0,02$  дБ/км,  $\gamma_{\text{К}} = 0,08$  дБ/км.

Отношение средней мощности сигнала к мощности шума  $P_{\text{ш}}$  на входе приемного устройства (точка Б) составляет

$$\rho_{\text{СР}} = p_{\text{ВХ}} - 10 \cdot \lg P_{\text{ш}} = p_{\text{ВХ}} - p_{\text{ПОР}} + \rho_{\text{ТР}}, \text{ дБ}. \quad (7.7)$$

В выражении (7.7) величина  $p_{\text{ПОР}}$  – пороговая чувствительность приемника, определяемая для двух значений  $P_{\text{Ош}} = 10^{-6}$  и  $P_{\text{Ош}} = 10^{-3}$  на основании формул (4.6) – (4.12).

По полученным значениям  $p_{ВХ}$  и  $p_{ПОР}$  вычисляется энергетический запас на плоские замирания  $K_{ЗАП}$  (для двух уровней ошибок,  $P_{ОШ} = 10^{-6}$  и  $P_{ОШ} = 10^{-3}$ ), который характеризует диапазон возможных изменений уровней входных сигналов на приеме в условиях эксплуатации системы:

$$K_{ЗАП} = p_{ВХ} - p_{ПОР}, \text{ дБ.} \quad (7.8)$$

С учетом (7.7) величина  $K_{ЗАП}$  может определяться как

$$K_{ЗАП} = \rho_{СР} - \rho_{ТР}, \text{ дБ,} \quad (7.9)$$

где  $\rho_{СР}$ ,  $\rho_{ТР}$  – значения ОНШ при среднем и пороговом уровнях входных сигналов, дБ.

Типовые значения энергетического запаса  $K_{ЗАП}$  на замирания находятся в пределах 38...45 дБ. Для увеличения  $K_{ЗАП}$  следует повысить уровень входного сигнала  $p_{ВХ}$  (за счет уменьшения длины интервала, повышения усиления антенны и др.) или уменьшить требуемое значение ОНШ за счет помехоустойчивого кодирования. Снижать ОНШ путем повышения величины  $P_{ОШ}$  в цифровых системах недопустимо. Это связано с пороговым режимом работы ЦРРСП. При  $P_{ОШ} > 10^{-3}$  в приемных устройствах наблюдается срыв синхронизации и потеря сигнала.

На основании полученных данных строится диаграмма уровней, которая отображает характерные изменения уровней передаваемого сигнала на интервале от передатчика к приемнику (рисунок 7.2).

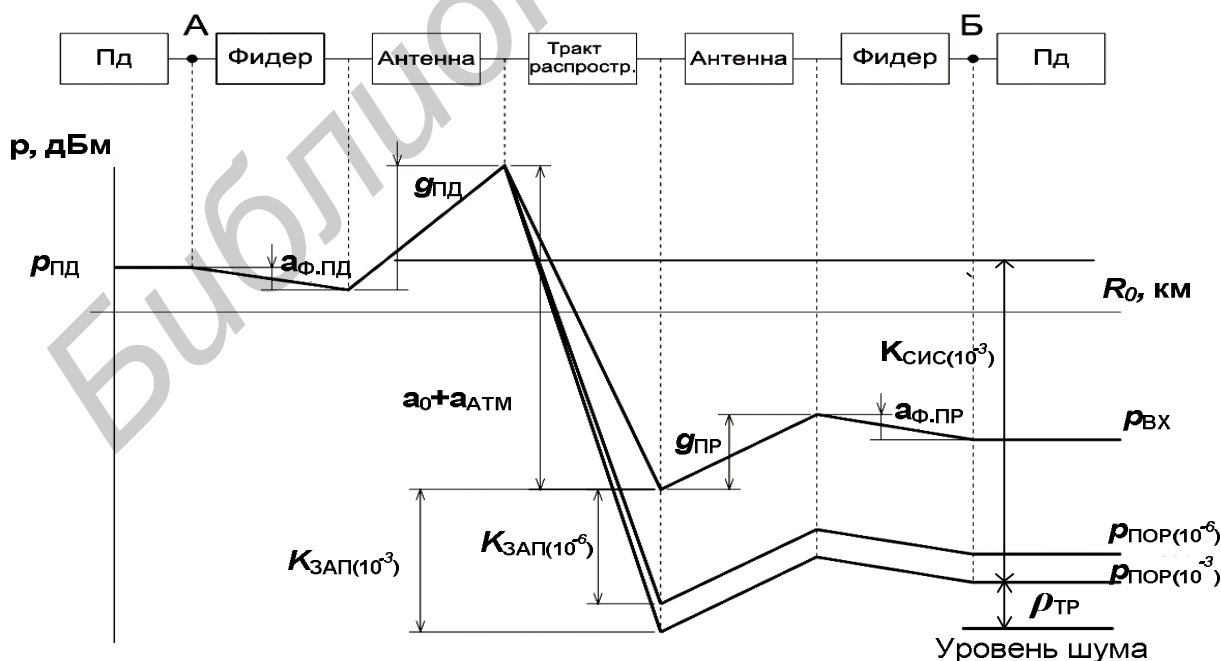


Рисунок 7.2 – Диаграмма уровней на интервале

## 8 РАСЧЕТ УРОВНЯ ПОМЕХ НА ВХОДЕ ПРИЕМНИКА

### 8.1 Общие положения

В реальных условиях работы РРЛ на входах приемников отдельных интервалов присутствуют внутрисистемные помехи и помехи от внешних источников. На правильно спроектированной РРЛ уровень помех не превышает норм. Допустимый уровень помех рассчитывается по (4.14) через пороговый уровень входного сигнала и величину защитного отношения для соответствующего вида помехи. Значения защитных отношений устанавливаются по величине ухудшения ОНШ приемника (обычно в пределах 1...3 дБ) под действием помех.

В курсовом проекте определяются уровни внутрисистемных помех, которые имеют частоту, равную частоте приема, и поступают на антенну разными путями.

### 8.2 Расчет уровня помех дальнего распространения

Помехи этого вида возникают на многопролетных РРЛ и проявляются вследствие загоризонтного распространения сигналов в условиях сверхрефракции ( $g \leq -31,4 \cdot 10^{-8}$ , 1/м). Длина пути помехи  $R_{\text{ПОМ}}$  зависит от выбранной схемы построения РРЛ. При двухчастотной схеме (см. рисунок 4.1) помеха сказывается через 3 интервала, при четырехчастотной – через 5. Для минимизации уровня помех трассу РРЛ строят «зигзагообразно».

Уровень одиночной помехи  $p_{\text{ПОМ}}$  на совпадающей частоте с основным каналом приема определяется по следующим выражениям:

$$p_{\text{ПОМ}} = p_{\text{ПД}} + g_{\text{ПД}}(\varphi_1) - a_{\text{Ф.ПД}} - a_0^{(\text{П})} - a_{\text{АТМ.П}} - a_{\text{Ф.ПР}} + g_{\text{ПР}}(\varphi_2), \text{ дБм}; \quad (8.1)$$

$$g(\varphi) = 49 - 10 \lg(d_A / \lambda) - 25 \lg \varphi, \text{ дБ для } 1 < \varphi < 48^\circ; \quad (8.2)$$

$$a_0^{(\text{П})} = 92,4 + 20 \lg f_{\text{Р}} + 20 \lg R_{\text{ПОМ}}, \text{ дБ}, \quad (8.3)$$

где  $g(\varphi)$ ,  $d_A$  – усиление антенны по боковому лепестку (дБ) и ее диаметр, м;

$\varphi$  – угол, отсчитываемый от линии максимального усиления антенны, град;

$a_0^{(\text{П})}$ ,  $a_{\text{АТМ.П}}$  – потери в свободном пространстве и в атмосфере на пути помехи, дБ;

$R_{\text{ПОМ}}$  – длина пути помехи, км;

$p_{\text{ПД}}$ ,  $a_{\text{Ф.ПД}}$ ,  $a_{\text{Ф.ПР}}$  – значения, принятые при расчете  $p_{\text{СР}}$ .

Углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  выбираются в 2...4 раза большими, чем ширина главного лепестка ДН антенны и  $\theta_{0,5}$  по уровню половинной мощности для горизонтальной поляризации

$$\theta_{0,5} = 21 / f_p \cdot d_A, \text{ град}, \quad (8.4)$$

где  $f_p$  – рабочая частота, ГГц,

$d_A$  – диаметр антенны, м.

Допустимый уровень помехи на входе приемника, при котором его пороговая чувствительность (определенная для  $P_{\text{ОШ}} = 10^{-6}$ ) снижается на 1 дБ, вычисляется согласно (4.14) по выражению

$$P_{\text{ПОМ. ДОП (1 дБ)}} = n_{\text{Ш}} + 10 \lg \left( \frac{B}{m \cdot R_K} \right) - 180, \text{ дБм}. \quad (8.5)$$

При снижении  $P_{\text{ПОР}}$  на 3 дБ допустимый уровень помехи относительно  $P_{\text{ПОМ. ДОП (1 дБ)}}$  увеличивается на 6 дБ.

Проверяется выполнение условия

$$P_{\text{ПОМ}} \leq P_{\text{ПОМ. ДОП (1 дБ)}}. \quad (8.6)$$

Если условие (8.6) не выполняется, то необходимо увеличить углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  или диаметр антенны.

### 8.3 Расчет уровня помех от передатчиков встречного направления

Помехи этого вида возникают на РРЛ при двухчастотном плане организации связи из-за низкого коэффициента защитного действия приемной антенны основного направления (рисунок 8.1). Помехами в данном случае являются мешающие сигналы следующего интервала, которые направлены навстречу сигналам основного направления и имеют одинаковые с ними частоты. Их нежелательное действие на входе приемника проявляется через боковые или задние лепестки приемной антенны прямого направления. Для снижения требований к параметрам антенн используют ортогональные виды поляризации сигналов на встречных направлениях.

Уровень мешающего сигнала на входе приемника  $P_{\text{ПОМ.В}}$  основного направления от передатчика интервала встречного направления определяется из соотношений:

$$P_{\text{ПОМ. В}} = P_{\text{ВХ.А}} + g_{\text{ПР.ОБ}}(\varphi) - L_{\text{ПОЛ}}, \text{ дБм}; \quad (8.7)$$

$$P_{\text{ВХ.А}} = P_{\text{ПД}}^{(\Pi)} + g_{\text{ПД}}^{(\Pi)} - a_{\text{Ф.ПД}}^{(\Pi)} - a_0^{(\Pi)} - a_{\text{АТМ}}^{(\Pi)} - a_{\text{Ф.ПР}}^{(\Pi)}, \text{ дБм}, \quad (8.8)$$

где  $p_{\text{ВХ.А}}$  – уровень помехи в зоне размещения приемной антенны от передатчика встречного направления, дБм;

$g_{\text{ПР.ОБ}}(\text{ц})$  – усиление приемной антенны для сигнала обратного направления, дБ;

$L_{\text{ПОЛ}}$  – ослабление уровня помехи за счет использования на РРЛ ортогональной поляризации сигналов, дБ.

Знак (П) указывает на параметры интервала помехи.

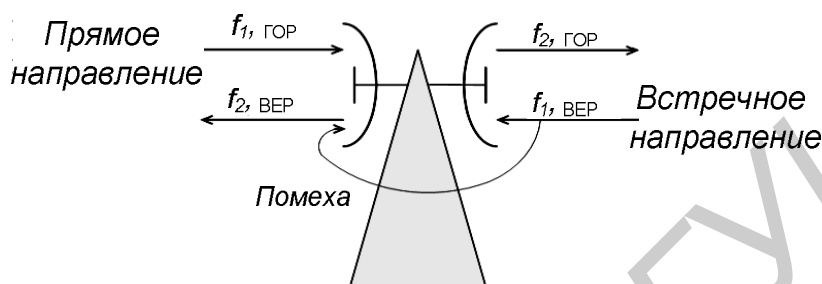


Рисунок 8.1 – Схема действия помехи от встречного направления

В соответствии с эталонной огибающей ДН антенны [7] для  $d_{\text{А}}/\lambda < 100$ , ее усиление с боковых направлений при углах от  $48^\circ$  до  $180^\circ$  составляет минус 10 дБ. Ослабление помехи за счет поляризационной развязки можно принять  $L_{\text{ПОЛ}} \approx 15 \dots 20$  дБ.

Для рассчитанного значения  $p_{\text{ПОМ.В}}$  проверяется выполнение условия (8.6) или равноценного ему условия:

$$p_{\text{ПОМ.В}} \leq (p_{\text{ВХ}} - K_{\text{ЗАП}(10^{-6})} - \rho_{\text{ТР}} - 6). \quad (8.9)$$

При примерно равных параметрах основного интервала и интервала помехи из (8.7) для  $g_{\text{ПР.ОБ}}(\varphi) = 10$  дБ получим

$$p_{\text{ПОМ.В}} = p_{\text{ВХ}} - g_{\text{ПР}} - L_{\text{ПОЛ}} - 10, \text{ дБм}, \quad (8.10)$$

где  $p_{\text{ВХ}}$  – уровень сигнала на входе приемника основного интервала.

Тогда условие (8.9) примет вид

$$g_{\text{ПР}} + L_{\text{ПОЛ}} + 10 \geq K_{\text{ЗАП}(10^{-6})} + \rho_{\text{ТР}} + 6, \quad (8.11)$$

из которого следуют варианты защиты от этого вида помех.

Наибольшая проблема по ограничению помех встречного направления возникает в системах с высоким порядком модуляции (64-QAM, 128-QAM), для которых  $\rho_{\text{ТР}} = 25 \dots 30$  дБ. Мерой снижения  $\rho_{\text{ТР}}$  для выполнения условия (8.11) является помехоустойчивое кодирование.

## 9 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ НЕГОТОВНОСТИ ТРАКТОВ РАДИОЛИНИЙ

### 9.1 Общие положения и терминология

Согласно Рекомендации МСЭ-Т G.827 (утверждена 2003 г.), радиотракт РРЛ находится в состоянии неготовности, если в течение периода измерений в 10-секундных интервалах наблюдается пропадание сигнала либо вероятность ошибок на протяжении интервала превышает величину  $P_{\text{ОШ}} = 10^{-3}$ . Интервалы с ошибками меньше 10 с относятся к периоду готовности, причем в этом состоянии должны находиться оба направления РРЛ. Причины неготовности аппаратуры: экранирование сигналов препятствиями на интервалах при субрефракции; ослабление мощности принимаемых сигналов из-за наличия осадков (дождь, снег, град, туман); ненадежность аппаратуры станций; ошибки обслуживающего персонала.

Обычно нормируется показатель неготовности (ПНГ) тракта, который характеризует долю времени в течение периода наблюдения когда тракт находится в состоянии неготовности. ПНГ выражается в процентах. Период неготовности называют также «отказом» или «простоем». Дополнительно используют следующие показатели: коэффициент неготовности  $K_{\text{НЕГ}}$  и коэффициент готовности  $K_{\text{Г}}$ . Первый из них определяет отношение общего времени неготовности  $T_{\text{НЕГ}}$  к продолжительности периода наблюдения  $T_{\text{НАБ}}$ . Второй – отношение общего времени готовности  $T_{\text{Г}}$  к  $T_{\text{НАБ}}$ . При этом  $K_{\text{Г}} + K_{\text{НЕГ}} = 1$ , причем  $K_{\text{НЕГ}} \ll K_{\text{Г}}$ . Рекомендуемый период наблюдения – год (примерно 525 960 мин). Значение ПНГ и коэффициент  $K_{\text{Г}}$  связаны соотношением

$$\text{ПНГ} = (1 - K_{\text{Г}}) \cdot 100, \% \quad (9.1)$$

Среднее время между отказами  $T_{\text{СР}}$  определяется интенсивностью отказов  $N_{\text{ОТ}}$  за период готовности тракта:

$$\begin{aligned} T_{\text{СР}} &= (1 - K_{\text{НЕГ}}) \cdot T_{\text{НАБ}} / N_{\text{ОТ}}; \\ K_{\text{НЕГ}} &= 0,01 \cdot \text{ПНГ}. \end{aligned} \quad (9.2)$$

Суммарный коэффициент неготовности  $K_{\text{НЕГ}}$  из-за влияния наиболее существенных статистически независимых причин составляет

$$K_{\text{НЕГ}} = K_{\text{НЕГ.СР}} + K_{\text{НЕГ.АП}} + K_{\text{НЕГ.ПИТ}} + K_{\text{НЕГ.ЭКС}}, \quad (9.3)$$

где  $K_{\text{НЕГ.СР}}$  – коэффициент неготовности, вызванный влиянием среды распространения на интервалах;

$K_{\text{НЕГ.АП}}$  – коэффициент неготовности, вызванный ненадежностью аппаратуры;

$K_{\text{НЕГ.ПИТ}}$  – коэффициент неготовности, вызванный ненадежностью систем электропитания;

$K_{\text{НЕГ.ЭКС}}$  – коэффициент неготовности, вызванный недостатками в эксплуатации и восстановлении отказов.

Величина первого слагаемого в (9.3) обычно принимается равной 0,33 от установленной нормы на неготовность. Величина второго – зависит от качественных показателей ЦРРСП, наличия резервирования и рассчитывается по формуле [8]

$$K_{\text{НЕГ.АПП}} = T_{\text{В}} / (T_{\text{В}} + T), \quad (9.4)$$

где  $T_{\text{В}}$  – среднее время восстановления отказа, ч;

$T$  – среднее время наработки аппаратуры на отказ, ч.

Для магистральных и внутризоновых РРЛ  $T \geq 7 \cdot 10^4$  и  $T \geq 6 \cdot 10^4$  соответственно. Для блоков ЦРРСП  $T \geq 10^5$ , что составляет более 10 лет, поскольку в году насчитывается  $8,766 \cdot 10^3$  часа. Время восстановления отказа  $T_{\text{В}}$  составляет: 2...4 ч в городе; 3...5 ч вне города и 6...12 ч вне города с размещением оборудования на антенной опоре.

На станциях РРЛ с бесперебойным питанием  $K_{\text{НЕГ.ПИТ}} \leq 10^{-5}$ , а при высокотехнологичной эксплуатации оборудования РРЛ  $K_{\text{НЕГ.ЭКС}} \leq 10^{-6}$ .

В таблице 9.1 приведены нормы на ПНГ, %, и интенсивность отказов  $N_{\text{ОТ}}$  за год для РРЛ, входящих в структуру национального участка гипотетического эталонного цифрового тракта (ГЭЦТ) протяженностью 27 500 км [9]. Национальный участок сети может состоять из трёх основных секций: участка доступа; короткопролетного и протяженного участков. В зависимости от архитектуры сети участок доступа может содержать один или два интервала, а короткопролетный длиной до 250 км – несколько интервалов. Протяженные участки приняты двух типов. Радиотракты участков могут быть частью другой сети, например сотовой. Приведенные значения ПНГ должны разделяться с учётом событий неготовности согласно формуле (9.3).

Таблица 9.1 – Нормы на показатели неготовности РРЛ и интенсивность отказов для национального участка ГЭЦТ

Тип участка (секции)	ПНГ, %	Длина секции, км	Интенсивность отказов за год
Протяженный 1-го типа	0,3 ( $L/2500$ )	$250 < L < 2500$	$55 + 100(L/2500)$
Протяженный 2-го типа	$0,011 + 0,19 (L/2500)$	$50 < L < 250$	$50 + 150(L/2500)$
Короткопролетный	0,04	$50 < L < 250$	120
Участок доступа	0,05	50	100

Примечание – Для участка доступа и короткопролетного участка показатели ПНГ не зависят от их длины.



В таблице 9.2 приведены нормы на ПНГ, %, и интенсивность отказов  $N_{OT}$  для РРЛ, входящей в структуру международного участка связи цифрового тракта [9]. Международный участок включает, как минимум, один основной элемент тракта между странами (ОЭТМС) и/или один основной элемент международного тракта (ОЭМТ). Начинается и заканчивается международный участок национальными участками. Как правило, ОЭТМС пересекает две государственные границы и поддерживается спутниковой или подводной кабельной системой передачи. ОЭМТ может содержать РРЛ разной протяжённостью от 50 км и более 7500 км. Эталонная длина РРЛ принята 2500 км.

Таблица 9.2 – Нормы на показатель неготовности РРЛ (ПНГ, %) и интенсивность отказов для основного элемента международного тракта

Тип РРЛ участка ОЭМТ	ПНГ, %	Длина, км	Интенсивность отказов
Первый	0,3 ( $L/2500$ )	$L > 7500$	55+100 ( $L/2500$ )
Второй	0,3 ( $L/2500$ )	$2500 < L \leq 7500$	55+100 ( $L/2500$ )
Третий	0,3 ( $L/2500$ )	$250 < L \leq 2500$	55+100 ( $L/2500$ )
Четвёртый	0,011+0,19 ( $L/2500$ )	$50 < L \leq 250$	50+150 ( $L/2500$ )

Представим несколько примеров расчёта ПНГ,  $N_{OT}$  и  $T_{CP}$  цифровых РРЛ по данным таблицы 9.1 и формуле (9.2).

1 Участок доступа  $L=30$  км.

Для расчёта используется  $L_{мин} = 50$  км. Значение ПНГ =  $5 \cdot 10^{-2}$  %, готовность 99,95 %, коэффициент неготовности  $K_{нег} = 5 \cdot 10^{-4}$  (неготовность составляет 263 мин/год), интенсивность отказов  $N_{OT} = 100$ , среднее время между отказами  $T_{CP} = 5257$  мин (3,65 дня).

2 Короткопролётный участок  $L=105$  км.

Значение ПНГ =  $4 \cdot 10^{-2}$  %, готовность 99,96 %,  $K_{нег} = 4 \cdot 10^{-4}$  (неготовность 210 мин/год),  $N_{OT} = 120$ ,  $T_{CP} = 4381$  мин (3,04 дня).

3 Протяженный участок 1 типа  $L=960$  км.

Значение ПНГ =  $11,5 \cdot 10^{-2}$  %, готовность 99,88 %,  $K_{нег} = 11,5 \cdot 10^{-4}$  (неготовность 606 мин/год),  $N_{OT} = 93$ ,  $T_{CP} = 5649$  мин (3,92 дня).

Примеры расчёта ПНГ,  $N_{OT}$  и  $T_{CP}$  цифровых РРЛ, входящих в структуру международного тракта.

1 Протяженность интервала 30 км.

В расчёте используется  $L_{мин} = 50$  км и данные таблицы 9.2 для РРЛ 4-го типа.

Значение ПНГ =  $1,48 \cdot 10^{-2}$  %, готовность 99,985 %, коэффициент неготовности  $K_{нег} = 1,48 \cdot 10^{-4}$  (неготовность 78 мин/год), интенсивность отказов  $N_{OT} = 53$ , среднее время между отказами  $T_{CP} = 9922$  мин (6,89 дня).

2 Протяженность РРЛ  $L=280$  км. Используются данные таблицы 9.2 для радиолинии 3-го типа.

Значение ПНГ  $= 3,36 \cdot 10^{-2}$ , %, готовность 99,966 %,  $K_{\text{НЕГ}} = 3,36 \cdot 10^{-4}$  (неготовность 176,7 мин/год),  $N_{\text{ОТ}} = 66,2$ ,  $T_{\text{СР}} = 7942$  мин (5,51 дня).

3 Протяженность РРЛ  $L=1056$  км. Используются данные таблицы 9.2 для РРЛ 3-го типа.

Значение ПНГ  $= 0,127 \cdot 10^{-2}$ , %, готовность 99,873 %,  $K_{\text{НЕГ}} = 1,27 \cdot 10^{-3}$  (неготовность 668 мин/год),  $N_{\text{ОТ}} = 97,2$ ,  $T_{\text{СР}} = 5404$  мин (3,75 дня).

## 9.2 Расчет процента времени простоя из-за субрефракции

Субрефракция возникает при  $g > 0$  и приводит к уменьшению просвета на интервале, блокировке сигналов препятствием и к снижению их уровня на входе приемника. Замирания сигнала при субрефракции, или дифракционные замирания сравнительно медленные, имеют слабую частотную зависимость и продолжаются от нескольких минут до нескольких часов. Проявляется этот вид рефракции весной или осенью, когда у поверхности Земли присутствуют туманы. Величина дифракционных потерь для заданного просвета  $H(0)$  зависит от профиля интервала и изменяется от минимального значения потерь в случае клиновидного препятствия до максимального при гладкой выпуклой поверхности.

Для наиболее распространенного рельефа местности, когда препятствие или группа препятствий удовлетворительно аппроксимируется сферическим сегментом, расчет проводится в следующей последовательности.

1 На продольном профиле интервала (рисунок 9.1) на расстоянии  $\Delta y = H_0$  от вершины препятствия вниз проводится прямая, которая параллельна линии, соединяющей центры антенн станций. Определяются длина хорды  $r$ , отсекающая часть препятствия, коэффициент  $z = r / R_0$  и параметр препятствия  $\mu$ , который характеризует радиус кривизны сферического сегмента:

$$\mu = 2,015 \sqrt[3]{k^2(1-k)^2/z^2}, \quad (9.5)$$

где  $k = R_{\text{П}} / R_0$  – относительная координата наивысшей точки препятствия.

Для плоских интервалов  $\mu \rightarrow 0$ , а для клиновидных  $\mu \rightarrow \infty$ .

2 По значению  $\mu$  и величине запаса на замирания  $K_{\text{ЗАП}}$  для  $P_{\text{ОШ}} = 10^{-3}$  с помощью интерференционных кривых (рисунок 9.2) определяется относительный просвет  $p(g)$ , при котором глубина замираний  $|v|$  равна  $K_{\text{ЗАП}(10^{-3})}$ . Полученное значение  $p(g)$  является отрицательным, поскольку при субрефракции наблюдается закрытие интервала.

3 Принимается во внимание относительный просвет на интервале при средней рефракции  $\bar{g} = -9 \cdot 10^{-8}$ , 1/м, который рассчитывается по формуле (6.5).

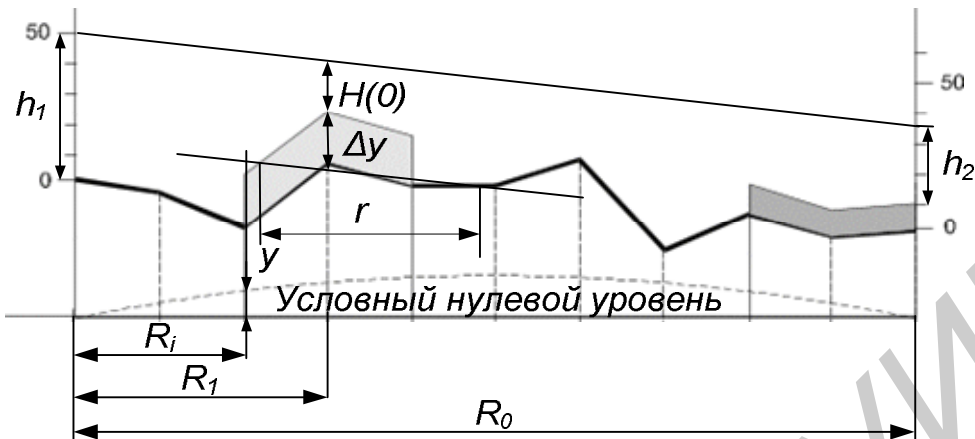


Рисунок 9.1 – К аппроксимации препятствия сферическим сегментом

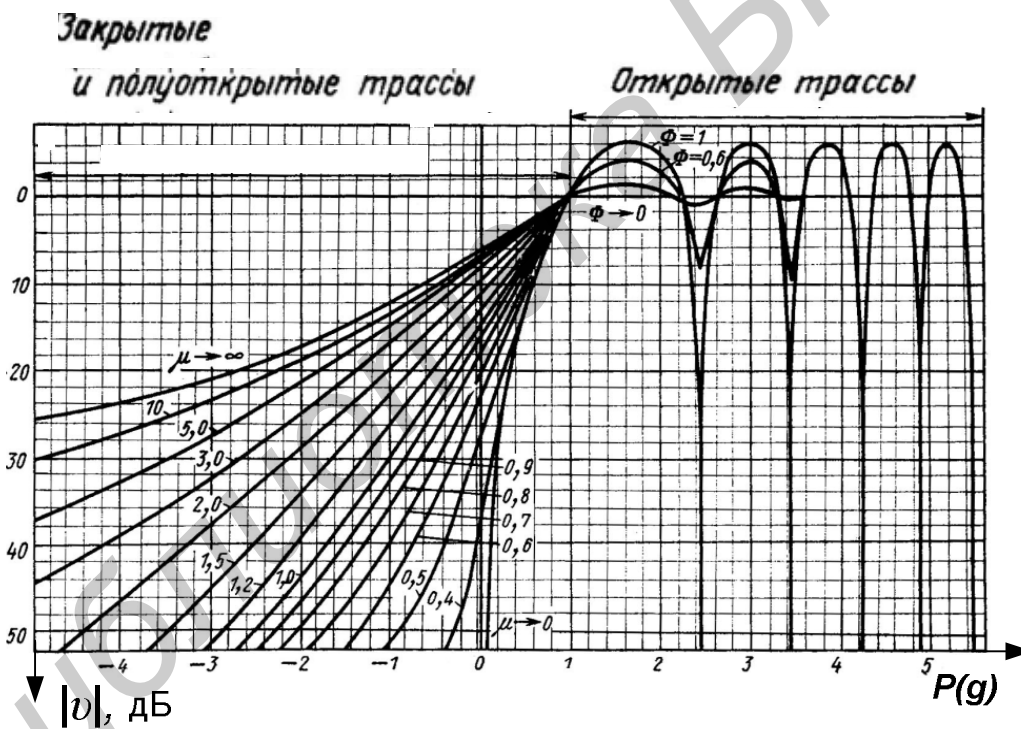


Рисунок 9.2 – Интерференционные кривые для различных типов интервалов

4 Вычисляется параметр

$$\psi = \frac{2,31}{\sigma} \cdot [p(\bar{g}) - p(g)] \cdot \sqrt{\lambda / R_0^3 k(1-k)}, \quad (9.6)$$

где  $\sigma$  – стандартное отклонение градиента  $g$ , равное  $7 \cdot 10^{-8}$ , 1/м.

5 По графику (рисунок 9.3) определяется процент времени неготовности радиотракта интервала  $T_{\text{НЕГ.СУБ}}$ , %, когда глубина замираний превышает значение запаса на замирания  $K_{\text{ЗАП}(10^{-3})}$ .

6 Рассчитывается вероятность (коэффициент) простоя при субрефракции для данного интервала, которая является частью  $K_{\text{НЕГ}}$ :

$$P_{\text{СУБ}}(t) = 0,01 \cdot T_{\text{НЕГ.СУБ}} \quad (9.7)$$

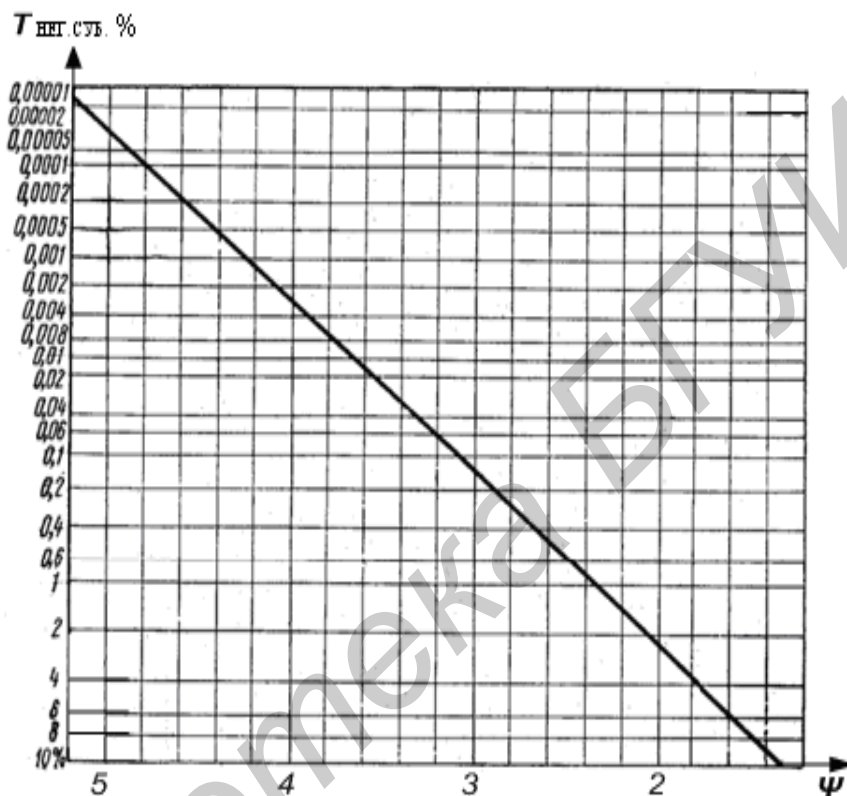


Рисунок 9.3 – Процент времени простоя из-за субрефракции

### 9.3 Расчёт процента времени простоя из-за потерь в осадках

Простои на интервалах РРЛ из-за осадков наблюдаются на частотах выше 7...8 ГГц и являются следствием поглощения и рассеяния ими части мощности передаваемого радиосигнала. Потери сигнала в осадках относятся к неизбежному по частоте и медленно изменяющемуся во времени процессу. Расчёт процента времени неготовности радиотракта из-за этой причины ведётся в следующей последовательности [10].

1 По известному значению среднeminутной интенсивности дождей, которая может увеличиваться в данной местности в течение 0,01 % времени (для Республики Беларусь  $J_{0,01} = 55$  мм/ч), рассчитывается удельное затухание мощности сигнала в осадках:

$$\gamma_{\text{д}} = \beta \cdot J_{0,01}^{\alpha}, \text{ дБ/км}, \quad (9.8)$$

где  $\beta$  и  $\alpha$  – коэффициенты, именуемые коэффициентами регрессии (таблица 9.3), зависящие от вида поляризации сигналов и частоты.

Таблица 9.3 – Коэффициенты для определения удельных потерь в осадках при горизонтальной поляризации

Параметр	Рабочая частота, ГГц									
	10	12	15	18	23	25	27	30	35	40
$\alpha$	1,276	1,217	1,154	1,121	1,076	1,061	1,041	1,021	0,979	0,939
$\beta$	0,010	0,019	0,037	0,058	0,104	0,124	0,151	0,187	0,283	0,35

Приближенно  $\gamma_D$  для  $J_{0,01} = 55$  мм/ч, рабочих частот от 7,5 до 38 ГГц и разной поляризации сигналов определяется из соотношения

$$\gamma_D = x f_p - 2,13, \text{ дБ/км}, \quad (9.9)$$

где  $x$  – коэффициент, равный 0,417; 0,389 или 0,363 при горизонтальной, круговой или вертикальной поляризации сигналов соответственно.

Для известной протяженности интервала  $R_0$  определяется эффективная длина дождевой зоны с интенсивностью  $J_{0,01}$ :

$$R_{\text{эф}} = R_0 / \left(1 + \frac{R_0}{d_0}\right), \text{ км}; \quad (9.10)$$

$$d_0 = 35 \exp(-0,015 J_{0,01}), \text{ если } J_{0,01} \leq 100 \text{ мм/ч};$$

$$d_0 = 15,35 \text{ км для } J_{0,01} = 55 \text{ мм/ч};$$

$$d_0 = 7,81 \text{ км, для } J_{0,01} > 100 \text{ мм/ч}.$$

3 Вычисляется затухание сигнала с горизонтальной поляризацией, которое повышается в течение 0,01 % времени (52,59 мин за год):

$$a_{\text{дГ}} = \gamma_{\text{дГ}} \cdot R_{\text{эф}}, \text{ дБ}, \quad (9.11)$$

4 Для промежуточных значений коэффициентов  $\beta$  и  $\alpha$  (см. таблицу 9.3) затухание в осадках на требуемой частоте  $f_2$  от 7 до 50 ГГц рассчитывается по известному затуханию  $a_{\text{дГ1}}$  на частоте  $f_1$  при  $f_1 < f_2$  с помощью соотношений:

$$a_{\text{дГ}} = a_{\text{дГ1}} \cdot C^{(1-H)}; \quad (9.12)$$

$$C = \Phi(f_2) / \Phi(f_1); \quad \Phi(f) = f^2 / (1 + 10^{-4} \cdot f^2);$$

$$H = 1,12 \times 10^{-3} \cdot C^{0,5} \left[ \Phi(f_1) \cdot a_{\text{дГ1}} \right]^{0,55},$$

где  $a_{д.Г1}$  – затухание в осадках, вычисленное по формуле (9.11) на основании данных таблицы 9.3 для частоты  $f_1$ , дБ;  
 $f_2$  – рабочая частота, ГГц.

5 Определяется затухание сигнала в осадках с вертикальной поляризацией

$$a_{д.в} = (300 \cdot a_{д.Г}) / (335 + a_{д.Г}), \text{ дБ.} \quad (9.13)$$

6 Для значений  $a_{д.Г}$  и  $a_{д.в}$  вычисляется доля времени неготовности или простоя, в течение которого потери на интервале вследствие осадков превышают величину запаса на замирание  $K_{ЗАП(10^{-3})}$ :

$$T_{НЕГ.Д.} = 10^b, \text{ \%}; \quad (9.14)$$

$$b = -6,349 + \sqrt{40,292 - 23,256 \cdot \lg(K_{ЗАП(10^{-3})} / 0,12a_{д.в})},$$

где в формуле (9.14)  $a_{д.}$  принимает значения  $a_{д.Г}$  или  $a_{д.в}$ .

7 Для полученных значений показателей простоя определяется время неготовности радиотракта интервала вследствие осадков:

$$T_{НЕГ.ИНТ} = 10^{-2} \cdot T_{НЕГ.Д.} \cdot T_{НАБ}, \text{ мин/год.} \quad (9.15)$$

#### 9.4 Проверка выполнения норм по показателю неготовности из-за субрефракции и осадков

1 Для участка РРЛ, входящего в состав национальной или международной линии связи и состоящего из  $n$  интервалов, определяются процент времени простоя ПНГ и  $K_{НЕГ}$  из-за субрефракции и осадков

$$\text{ПНГ}_{\text{уч}} = \sum_{i=1}^n \left[ (T_{НЕГ.СУБ.})_i + (T_{НЕГ.Д.})_i \right], \text{ \%}; \quad (9.16)$$

$$K_{НЕГ.УЧ} = 0,01 \cdot \text{ПНГ}_{\text{уч}}.$$

Если по заданию рассчитывается только один интервал участка, то в курсовом проекте можно считать, что характеристики всех интервалов примерно равные.

2 Рассчитывается суммарное время неготовности участка РРЛ в течение года наблюдений:

$$T_{НЕГ.УЧ} = 10^{-2} \cdot \text{ПНГ}_{\text{уч}} \cdot T_{НАБ}, \text{ мин/год.} \quad (9.17)$$

3 Рассчитывается среднее время между отказами:

$$T_{СР} = [T_{НАБ} - T_{НЕГ.УЧ}] / N_{ОТ}, \text{ мин,} \quad (9.18)$$

где  $N_{от}$  – интенсивность отказов, взятая из таблицы 9.1 или таблицы 9.2 для длины  $L$ , равной длине участка РРЛ.

4 Проверяется выполнение норм по показателю неготовности участка РРЛ из-за влияния осадков и субрефракции:

$$\text{ПНГ}_{\text{уч}} \leq 0,33 \text{ ПНГ}, \quad (9.19)$$

где ПНГ – норма на показатель неготовности (таблица 9.1 или таблица 9.2) для участка РРЛ длиной  $L$ .

5 Сравнивается суммарное время неготовности участка РРЛ, полученное по формуле (9.17), с нормой:

$$T_{\text{нег.уч}} \leq 3,3 \cdot 10^{-3} (\text{ПНГ}) \cdot T_{\text{наб.}} \quad (9.20)$$

Если условие (9,19) не выполняется, то следует увеличить усиление антенн, выбрать ЦРРСП с лучшими характеристиками (например с помехоустойчивым кодированием), уменьшить длину интервалов, увеличить высоты подвеса антенн (для борьбы с субрефракцией).

## 10 РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПО ОШИБКАМ

### 10.1 Общие положения

Показатели качества по ошибкам (ПКО) относятся к периоду времени готовности радиотрактов РРЛ. Параметр ПКО складывается из событий, которые вызваны быстрыми замираниями на интервалах [10 – 15]. К числу основных факторов, определяющих ПКО, относятся:

- блок с ошибками, в котором один или несколько бит являются ошибочными;
- секунда с ошибками (СО) или ES (Errors Second) – период в 1 секунду с одним или несколькими ошибочными блоками или, как минимум, с одним дефектом;
- секунда, пораженная ошибками (СПО), или SES (Severely Errors Second) – период в 1 секунду, содержащий не менее 30 % блоков с ошибками или, как минимум, один дефект. СПО являются частным случаем СО. Длина блока в зависимости от скорости передаваемых данных может составлять от 1 тыс. до 30 тыс. бит.

Базовыми долговременными характеристиками ПКО являются:

- коэффициент секунд с ошибками  $K_{СО}$ , или ESR (Ratio ES) – отношение числа секунд с ошибками к общему числу секунд в период готовности для фиксированного интервала времени измерений;
- коэффициент секунд, пораженных ошибками  $K_{СПО}$ , или SESR (Ratio SES) – отношение числа секунд, пораженных ошибками, к общему числу секунд в период готовности для фиксированного интервала времени измерений.

Нормы на ПКО определены в [11], которые согласованы с требованиями [21] для гипотетического эталонного цифрового тракта протяженностью 27 500 км. В соответствии с [11] проектируемая РРЛ может быть частью национального или международного участка ГЭЦТ. Национальный участок связи, как отмечалось, может состоять из секций или отдельных участков радиосвязи: протяженного, короткого и участка доступа. Международный тракт связи проходит через конечные и транзитные страны. В зависимости от принадлежности проектируемой РРЛ к соответствующим трактам связи или секциям нормы на ПКО отличаются. Для РРЛ протяженного участка, входящего в состав национальной линии связи, ПКО определяются по следующим формулам:

$$\text{ПКО} = A(F_1 + 2 \cdot 10^{-5} L), \quad \text{для } L > 100 \text{ км}; \quad (10.1)$$

$$\text{ПКО} = A(F_1 + 2 \cdot 10^{-3})L / 100, \quad \text{для } 50 \text{ км} < L \leq 100 \text{ км}, \quad (10.2)$$

где  $A$  – параметр, характеризующий ПКО (таблица 10.1);

$F_1$  – коэффициент допустимого отклонения, принятый 0,01...0,02;

$L$  – длина РРЛ, км.

Для РРЛ, принадлежащей к короткому участку или участку доступа,

$$\text{ПКО} = A \cdot F_i, \quad (10.3)$$

где  $F_i$  – коэффициент допустимого отклонения ПКО короткого участка ( $F_2$ ) и участка доступа ( $F_3$ ).

Считается, что коэффициенты  $F_2, F_3$  для этих участков равны и составляют 0,075...0,085. Сумма допустимых отклонений должна удовлетворять условию  $F_1 + F_2 + F_3 \leq 0,175$  (или 17,5%).

Таблица 10.1 – Значения параметра  $A$ , принадлежащие  $K_{\text{CO}}$  или  $K_{\text{СПО}}$  цифровой РРЛ национального участка связи

Скорость, Мбит/с	До 1,5	От 1,5 до 5	От 5 до 15	От 15 до 55	От 55 до 160
$K_{\text{CO}}, (ESR)$	0,04	0,04	0,05	0,075	0,16
$K_{\text{СПО}}, (SESR)$	0,002				

Для РРЛ, входящих в состав международного участка связи, показатель качества по ошибкам для транзитных и конечных стран определяется по формуле

$$\text{ПКО} = A \cdot (1 + D) \cdot (L / 2500) + C_i D, \quad (10.4)$$

где  $A$  – параметр, характеризующий ПКО (таблица 10.2);

$D$  – коэффициент допустимого отклонения для блоков ( $0 < D < 1$ );

$C_i$  – коэффициент, зависящий от протяженности радиолиний.



Для транзитных стран с протяженностью радиолиний  $L > 1000$  км учитывают значения  $A, C_1, D$ . Коэффициент  $C_1 = 0,4 \cdot A$ ;  $D = 1$ . При длине РРЛ  $50 \text{ км} < L < 1000 \text{ км}$  полагают  $C_1 = 0$ .

Для конечных стран с протяженностью радиолиний  $L > 500$  км учитывают  $A, C_2, D$ . Коэффициент  $C_2 = 0,2 \cdot A$ ;  $D = 1$ . При длине РРЛ  $50 \text{ км} < L < 500 \text{ км}$  полагают  $C_2 = 0$ .

Таблица 10.2 – Значения параметра  $A$ , принадлежащие  $K_{\text{CO}}$  и  $K_{\text{СПО}}$  цифровой РРЛ международного участка связи

Скорость, Мбит/с	До 1,5	От 1,5 до 5	От 5 до 15	От 15 до 55	От 55 до 160
$K_{\text{CO}}, (ESR)$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$3,75 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$
$K_{\text{СПО}}, (SESR)$	$1 \cdot 10^{-4}$				

*Примеры расчета ПКО цифровых РРЛ, входящих в национальный участок связи.*

1 Протяженность участка доступа  $L = 20$  км, скорость передачи данных  $B = 2,048$  Мбит/с.

Расчет ведется по формуле (10.3) для  $F_3 = 0,075$  и данных таблицы 10.1.

$$K_{\text{CO}} = 0,04 \cdot 0,075 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ (или 7776 секунд с ошибками в месяц).}$$

$$K_{\text{СПО}} = 0,002 \cdot 0,075 = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ (или 389 с, пораженных ошибками в месяц).}$$

2 Протяженность радиолинии короткопролетного участка  $L = 80$  км, скорость данных  $B = 34,0$  Мбит/с.

Расчет ведется по формуле (10.3) при  $F_2 = 0,075$ .

$$K_{\text{CO}} = 0,075 \cdot 0,075 = 5,625 \cdot 10^{-3} \text{ (или 14580 с/мес.).}$$

$$K_{\text{СПО}} = 0,002 \cdot 0,075 = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ (или 389 с/мес.).}$$

3 Длина радиолинии протяженного участка  $L = 75$  км, скорость данных  $B = 155,52$  Мбит/с (STM-1).

Расчет ведется по формуле (10.2) при  $F_1 = 0,01$ .

$$K_{\text{CO}} = 0,16(0,01 + 2 \cdot 10^{-3}) \cdot 75 / 100 = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ (или 3732,5 с/мес.).}$$

$$K_{\text{ПСО}} = 0,002(0,01 + 2 \cdot 10^{-3}) \cdot 75 / 100 = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ (или 46,6 с/мес.).}$$

*Пример расчета ПКО для цифровой РРЛ международного участка связи:*

Длина РРЛ составляет  $L = 105$  км,  $B = 140$  Мбит/с.

Расчет ведется по формуле (10.4) при  $C_2 = 0, D = 1$  и данным таблицы 10.2.

$$K_{\text{CO}} = 8 \cdot 10^{-3}(1 + 1) \cdot (105 / 2500) + 0 = 6,72 \cdot 10^{-4} \text{ (или 1741 с/мес.).}$$

$$K_{\text{ПСО}} = 1 \cdot 10^{-4}(1 + 1) \cdot (105 / 2500) + 0 = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ (или 22 с/мес.).}$$

Причинами возникновения отказов на интервалах являются интерференционные замирания, вызванные отражениями от слоистых неоднородностей тро-

посферы и земной поверхности, а также селективные замирания и искажения сигналов вследствие многолучёвого распространения радиоволн. В ряде случаев возникают ошибки, связанные с наличием случайных событий: помехи от внешних источников, изменение метеорологических условий, внутрисистемные помехи и др.

Интерференционные замирания кратковременные, случайные со средней продолжительностью доли секунд или секунды при глубине снижения уровня до 25...35 дБ. Прогнозирование процента времени отказов при их наличии строится на концепции плоских замираний большой глубины, наблюдаемых одновременно во всей полосе радиоствола, для наихудшего месяца года. Вероятность отказов на участке РРЛ определяется путём суммирования вероятностей отказов на отдельных интервалах.

Явление многолучёвости на интервале связано с наличием многократных переотражений сигналов в многослойной среде распространения от передатчика к приемнику.

## 10.2 Расчёт времени отказов из-за интерференции

На пересечённых интервалах РРЛ глубокие интерференционные замирания обусловлены взаимодействием прямой радиоволны с отраженными от слоистых неоднородностей тропосферы [1–4] и [12, 13]. Вероятность возникновения в тропосфере неоднородностей со значениями перепада диэлектрической проницаемости воздуха  $\Delta\varepsilon = -\lambda/R_0$ , при которых наблюдается существенное уменьшение уровня сигнала на приёме, составляет

$$P(\Delta\varepsilon) = 0,01 \cdot T(\Delta\varepsilon); \quad (10.5)$$

$$T(\Delta\varepsilon) = 4,1 \cdot 10^{-4} \cdot \zeta \cdot R_0 \cdot f_p^{1,5}, \%, \quad (10.6)$$

где  $\zeta$  – коэффициент, характеризующий тип интервала.

Для сухопутных интервалов  $\zeta = 1$ , для прибрежных –  $\zeta = 5$ .

Процент времени месяца, в течение которого глубина интерференционных замираний превышает запас на замирания  $K_{ЗАП}$ , составляет

$$T_{ИНТ}(K_{ЗАП}) = T(\Delta\varepsilon) \cdot 10^{-0,1 \cdot K_{ЗАП}}, \%. \quad (10.7)$$

Величина  $T_{ИНТ}(K_{ЗАП})$  рассчитывается для двух значений  $K_{ЗАП}$ : при  $P_{ОШ} = 10^{-3}$  и  $P_{ОШ} = 10^{-6}$ .

На слабопересечённых интервалах с гладким рельефом местности или водными участками возможны также интерференционные замирания, снижающие уровень сигнала на входе приемника, из-за отражений радиоволны от земной поверхности. На таких интервалах

$$T_{ИНТ}(K_{ЗАП}) = Q \cdot T(\Delta\varepsilon) \cdot 10^{-0,1 \cdot K_{ЗАП}}, \%. \quad (10.8)$$

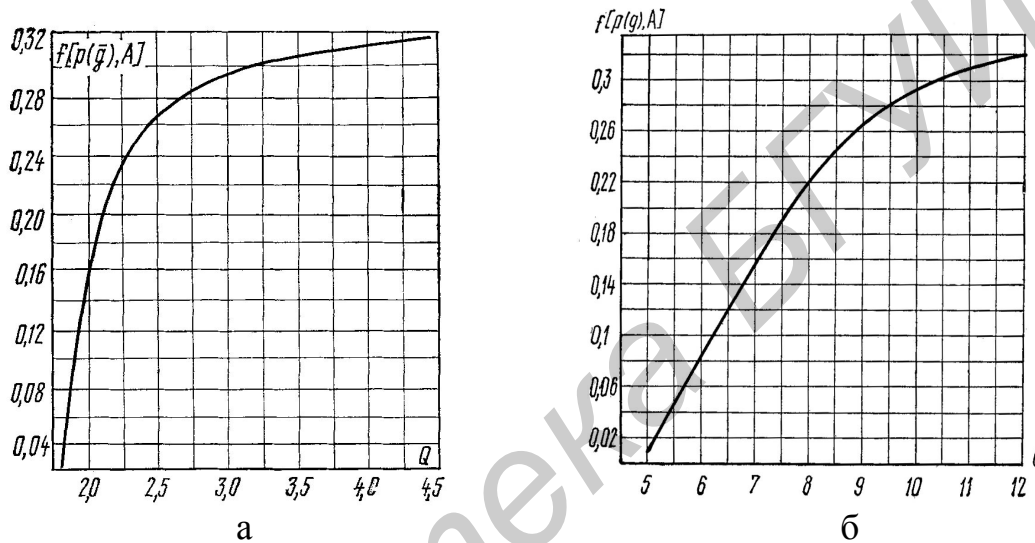
где  $Q$  – коэффициент, учитывающий наличие интерференционных минимумов вследствие отражений от земной поверхности.

Коэффициент  $Q$  определяется по графикам (рисунок 10.1 а, б) как аргумент функции вида

$$f[p(\bar{g}), A] \approx 0,36 \cdot \sqrt{n} \cdot A \cdot \exp\{-2,67 \cdot A^2 \cdot [p(\bar{g}) - \sqrt{6 \cdot n}]^2\}; \quad (10.9)$$

$$A = \frac{1}{\sigma} \times \sqrt{\lambda / R_0^3 \times k(1-k)}; \quad (10.10)$$

где  $n$  – номер интерференционного минимума, который для большинства радиотрасс на территории Республики Беларусь принимается равным единице.



а – для сухопутных; б – для прибрежных интервалов

Рисунок 10.1 – Зависимости коэффициента  $Q$  от функции  $f[p(\bar{g}), A]$

### 10.3 Расчёт процента времени отказов из-за многолучёвого распространения

Многолучёвости на интервалах проявляется в виде копий сигналов на приеме, что ведет к частотно-селективным замираниям и межсимвольным искажениям [12]. Эти искажения характерны для цифровых систем. Они зависят от величины группового времени задержки радиосигнала при распространении, скорости передачи данных, вида модуляции и проявляются в росте ошибок при демодуляции. Распространённым подходом к оценке продолжительности отказов из-за многолучёвости является метод, основанный на данных о сигнатуре системы или её индивидуальных метках [10, 16]. Этот метод учитывает особенности ЦРРСП и предполагает проведение измерений глубины замираний в пределах ширины полосы ВЧ-тракта аппаратуры при воздействии двух сигналов с определёнными амплитудами и задержкой между ними (обычно  $\tau_3 = 6,3$  нс). В таблице 10.3 приведены параметры нормализованной сигнатуры  $K_{\Pi}$  для раз-

личных форматов модуляции [13], в соответствии с которыми чувствительность ЦРПС к многолучёвости растёт с увеличением порядка модуляции.

Таблица 10.3 – Параметры нормализованной сигнатуры, дБ

Вид модуляции			
QPSK	8-ФМ	16-QAM	64-QAM
1,0	7,0	5,5	15,4

Порядок расчета состоит в следующем.

1 Определяется временная задержка многолучёвого сигнала в среде распространения:

$$\tau_M = \tau_{CP} \cdot (R_0 / 50)^{1,3}, \text{ нс}, \quad (10.11)$$

где  $\tau_{CP}$  – среднее время задержки многолучёвого сигнала в среде распространения, равное 7 нс для  $R_0 = 50$  км.

2 Определяется коэффициент многолучёвой активности, который характеризует интенсивность замираний:

$$\eta = 1 - \exp[-0,2 \cdot P(\Delta\varepsilon)^{0,75}]. \quad (10.12)$$

3 Определяется вероятность появления глубоких замираний из-за многолучёвости:

$$P_M(t) = P(\Delta\varepsilon) \cdot \eta. \quad (10.13)$$

4 Определяется показатель чувствительности ЦРПС к задержке сигналов и скорости передачи данных:

$$b_1 = \tau_M / T_C = (\tau_M \cdot B) / (\log_2 M) \cdot R_K, \quad (10.14)$$

где  $T_C$  – длительность радиопосылок модулированного сигнала, равная обратной величине символьной скорости;

$B$  – общая скорость цифрового потока, бит/с.

5 Рассчитывается процент времени отказов вследствие многолучёвости

$$T_M = [2 \cdot P_M(t) \cdot K_{\Pi} \cdot b_1^2] \cdot 100, \% , \quad (10.15)$$

где  $K_{\Pi}$  – параметр нормализованной сигнатуры ( см. таблицу 10.3).

Из формул (10.14) и (10.15) следует, что процент времени отказов растёт с ростом скорости цифрового потока.

#### 10.4 Проверка выполнения норм на качественные показатели по ошибкам

1 По вычисленным значениям процентов времени отказов из-за интерференции  $T_{\text{инт}}(K_{\text{зап}}(10^{-3}))$  и многолучёвости  $T_M$  определяется суммарный процент времени отказов на интервале:

$$T_{\text{от}} = T_{\text{инт}} (K_{\text{зап}}(10^{-3})) + T_{\text{м}}, \% . \quad (10.16)$$

2 Определяется процент времени отказов для рассматриваемого в проекте участка РРЛ:

$$T_{\text{от.уч}} = \sum_{i=1}^n T_{\text{от}i}, \quad (10.17)$$

где  $T_{\text{от}i}$  – процент времени отказов на  $i$ -м интервале;  
 $n$  – число интервалов на участке РРЛ.

3 Определяется вероятность отказов на участке РРЛ:

$$P_{\text{от.уч}} = 0,01 \cdot T_{\text{от.уч}}. \quad (10.18)$$

4 В зависимости от принадлежности рассматриваемого участка РРЛ к типу секции национальной или международной линии связи по (10.1) – (10.4) определяются допустимые значения ПКО для  $K_{\text{со}}$  и  $K_{\text{спо}}$ .

5 Производится проверка выполнения условий:

$$P_{\text{от.уч}} \leq \text{ПКО}_1; P_{\text{от.уч}} \leq \text{ПКО}_2. \quad (10.19)$$

где  $\text{ПКО}_1$ ,  $\text{ПКО}_2$  – показатели качества по ошибкам для  $K_{\text{со}}$  и  $K_{\text{спо}}$  соответственно.

Если одно из условий (10.19) не выполняется, то в зависимости от причин осуществляется оптимальный выбор интервала с минимумом отражений от его поверхности, предусматривается в системе адаптивная коррекция для компенсации искажений АЧХ тракта распространения радиоволн или используется разнесенный прием по частоте или в пространстве. Значение выигрыша в ПКО от применения дополнительных мер, а также методика его расчета приведена в [10, 16]. Для борьбы с межсимвольными искажениями эффективен метод многочастотной передачи, который принят в цифровом наземном ТВ-вещании.

## 11 ТИПОВАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ЦИФРОВОЙ РАДИОРЕЛЕЙНОЙ СТАНЦИИ

### 11.1 Общая характеристика оконечной станции

Оконечные цифровые станции радиорелейной связи постоянно совершенствуются, и большинство из них располагает следующими функциональными возможностями:

- программным изменением пропускной способности, режима передачи, частоты настройки и выходной мощности передатчика;
- комплексным контролем рабочих характеристик станций с выводом на экран ПК конфигурации РРЛ, параметров состояния ее устройств, уровней сигналов и показателей качества связи;
- телеметрией и управлением работой ближайшими ПРС.

Современные ЦРПСИ малой и средней ёмкости состоят из двух блоков: внешнего Outdoor Unit (ODU) и внутреннего Indoor Unit (IDU). Внешний блок представляет собой малогабаритный контейнер, который совместно с антенной устанавливается на верхней части антенной опоры. Высокочастотная часть блока ODU выполняется по микрополосковой технологии СВЧ [17] и служит для приема и передачи модулированных радиосигналов соответствующего диапазона частот. ODU обеспечивает разделение принимаемых сигналов по частоте, поляризации и направлению; установку по командам с блока IDU требуемых значений частот настройки и уровней выходной мощности; проверку устройств блока в режиме работы «на себя» по СВЧ-сигналу и др. В разных диапазонах частот (от 4 до 40 ГГц) блоки ODU одного производителя близки по исполнению и отличаются только частотно-селективными устройствами и частотой их настройки. Конструктивно ODU приспособлены для работы в широком диапазоне температур (от минус 45 до плюс 50°C), имеют малые размеры и вес (4...8 кг) и обычно крепятся на тыльной стороне антенны или соединяются с ней гибким волноводом.

Внутренний блок IDU содержит входные и выходные интерфейсы для передачи цифровых потоков и выполняет следующие функции:

- сопряжение с линиями связи и цифровой аппаратурой уплотнения;
- программное объединение вспомогательной информации и потоков типа E1, E2 и др.;
- формирование, ввод и вывод сигналов телеуправления, служебной связи, резервирования и др.;
- цифровую обработку передаваемой информации, включая помехоустойчивое кодирование/декодирование и модуляцию/демодуляцию сигналов;
- вспомогательную модуляцию для сигналов управления параметрами ODU и демодуляция сигналов с датчиков контроля устройств ODU;
- подачу напряжения питания на внешний блок;
- контроль состояния станции и управление ее параметрами.

## 11.2 Структурная схема внутреннего блока цифровой станции

Несмотря на широкую номенклатуру цифровых радиорелейных станций, концепция их построения применительно к внешнему и внутреннему блокам, во многом схожа.

На рисунке 11.1 приведена типовая структурная схема внутреннего (модемного) блока оконечной цифровой радиорелейной станции.

Внутренний блок IDU состоит из передающего и приемного трактов. Установленные на входе и выходе этих трактов интерфейсы служат для согласования параметров IDU с транспортными линиями. В зависимости от пропускной способности и варианта применения ЦРПСИ интерфейсы блока IDU могут быть электрическими [18] или оптическими [19]. Примеры характеристик интерфейсов приведены в [20, 21]. Принятые цифровые потоки данных преобразуются из квазитрочного кода HDB-3 в двоичный код NRZ и проходят устройства регенерации цифровых сигналов. Регенераторы исключают линейные искажения,

внесенные кабелем, выделяют тактовую частоту цифровых потоков и восстанавливают амплитуду, длительность и фронт импульсной последовательности с помощью решающего и формирующего устройств.

После регенерации цифровые потоки объединяются в программируемом мультиплексоре 3 (MUX). В нем объединяются также сигналы служебной связи, телеуправления и синхронизации, которые поступают от блока вспомогательных сигналов 13. В состав MUX может входить преобразователь кода, предназначенный для преобразования одного вида цифровой последовательности в другой, например, в относительный код. Объединенные данные считываются с буферной памяти мультиплексора в последовательном коде и поступают на устройства цифровой обработки и модуляции.

Скремблер (рандомизатор или перемешиватель) формирует из принятого цифрового сигнала псевдослучайную последовательность, у которой количество нулей и единиц в потоке примерно равно. Благодаря скремблированию, упрощается процедура выделения тактовой частоты на приемной стороне и обеспечивается на выходе передатчика равномерный спектр радиосигнала. Последний показатель позволяет улучшить электромагнитную совместимость радиосредств.

Канальный кодер 5 служит для повышения помехоустойчивости системы и предполагает внесение по определённому алгоритму проверочной информации. Кодирование может быть одноступенчатым или двухступенчатым (с использованием сверточного и блочного кодов) [22]. За счет внесения избыточности при кодировании на приёмной стороне осуществляется обнаружение и прямое исправление ошибок, благодаря чему улучшается достоверность приема. В результате кодирования снижается требуемое значение ОНШ, при котором достигается заданная вероятность ошибки на бит. Выигрыш в ОНШ от кодирования может составлять 6...8 дБ. Для улучшения работы декодеров в кодере 5 производится временное перемежение бит или символов цифрового потока. На приёмной стороне деперемежитель переводит групповые ошибки, возникшие на радиолинии, в одиночные.

После помехоустойчивого кодирования цифровой поток поступает на модулятор 6, который формирует радиосимволы на промежуточной частоте (например на  $f_H = 310$  МГц) с длительностью  $T_C$ . Каждый радиосимвол (радиопосылка) содержит сведения о составе группы переносимых им бит информации. Число бит в группе зависит от порядка модуляции  $M$ . Если используется квадратурная QPSK (4-QAM), фазовая 4-ФМ или относительная DQPSK модуляция, то амплитуда радиосимволов постоянна и два переносимых ими бита информации отображаются одним из четырех значений фаз. При  $M$ -QAM ( $M < 4$ ) для отображения состава бит в радиосимволах задействованы разные начальные фазы и амплитуды радиосигнала. В модуляторах форматов 16-QAM и 64-QAM для передачи 4 и соответственно 6 бит информации используется 16 и 64 различных признака. На выходе модулятора присутствуют две боковые полосы частот, спектр которых ограничен полосовым фильтром 7. Причем несущая для снижения мощности передаваемого радиосигнала подавлена на 30...40 дБ.

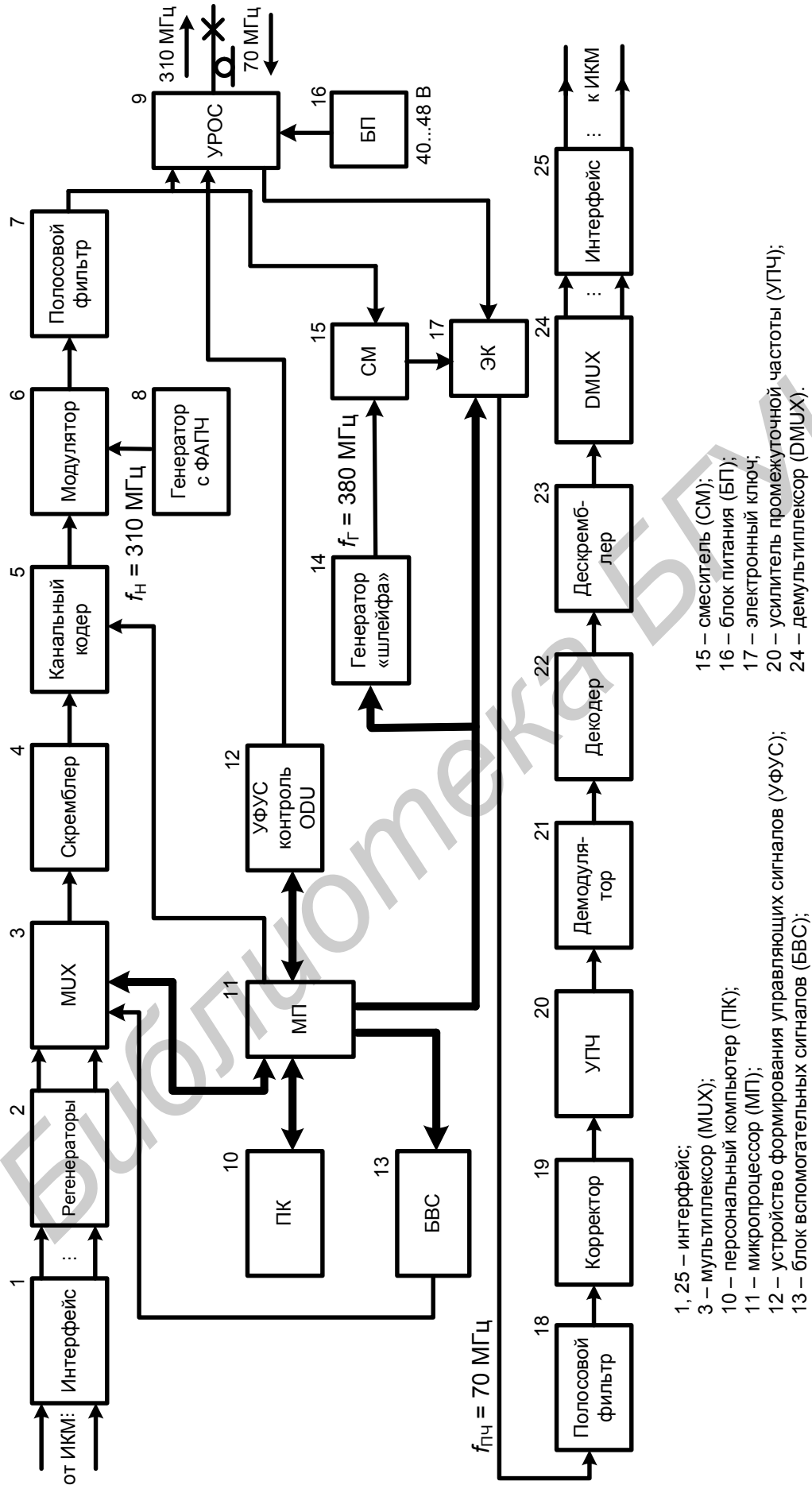


Рисунок 11.1 – Структурная схема модемного блока цифровой системы



Далее радиосигнал на промежуточной частоте поступает через устройство разделения и объединения сигналов 9 по соединительному кабелю на внешний блок. Кроме того, на устройство объединения 9 с устройства формирования управляющих сигналов (УФУС) поступают сигналы для управления режимами блока ODU и напряжение 48 В для питания внешнего блока. Сигналы управления передаются на блок ODU путем модуляции низкочастотной несущей в диапазоне частот 6...8 МГц.

В приемном тракте IDU происходит выделение радиосигнала с промежуточной частотой 70 МГц. Этот сигнал доставляется по соединительному кабелю от внешнего блока и проходит через электронный ключ (ЭК), полосовой фильтр 18, корректор 19, усилитель 20 (УПЧ) и поступает на демодулятор 21. ЭК позволяет перевести IDU в режим контроля его устройств передачи и приема, если блок ODU отключен или уровень принимаемых сигналов на его входе недостаточен.

В режиме контроля включается смеситель 15 и генератор «шлейфа» 14 с частотой 380 МГц, которые формируют из поступившего сигнала 310 МГц сигнал с частотой 70 МГц. Если в режиме контроля выходной уровень на стороне приёма соответствует норме, то все устройства блока IDU исправны.

В демодуляторе 21 выделяется цифровая последовательность и восстанавливается форма двоичных импульсов. В декодере 22 осуществляется обнаружение и исправление ошибок. При одноступенчатом декодировании, например, с помощью декодера сверточного кода (декодер максимального правдоподобия Витерби с мягким принятием решения о символе) осуществляется исправление ошибок, начиная с  $P_{\text{ОШ}} = 7 \cdot 10^{-2}$ , и получение на его выходе значений  $P_{\text{ОШ}} = 2 \cdot 10^{-4}$ . Для меньших значений  $P_{\text{ОШ}}$  на входе декодера его исправляющая способность еще выше. Если используется декодирование по алгоритму Рида – Соломона, то эффективное исправление блочных ошибок начинается со значений  $P_{\text{ОШ}} \leq 10^{-3}$ . В случае каскадного двухступенчатого декодирования с последовательным включением декодеров Витерби и Рида – Соломона их исправляющая способность такова, что на выходе второй ступени  $P_{\text{ОШ}} \leq 10^{-11}$ . Это значение соответствует квазибезошибочному приему, поскольку при потоке в 30 Мбит/с совершается только одна ошибка за час.

Последующие устройства тракта приема IDU выполняют задачи обратные задачам тракта передачи.

Центральное место в блоке IDU занимает микропроцессор (МП). Он управляет работой всех основных устройств блока, позволяет вести контроль параметров и отображать на ПК конфигурацию РРЛ. Контроль всех параметров аварийных сигналов, показателей качества ЦРПСИ ведётся без перерыва связи. При управлении конфигурацией оборудования РРЛ возможна программная установка параметров блоков и станций, замена рабочего ствола на резервный, организация контроля в режимах шлейфов по ПЧ и СВЧ. Контролируемые параметры и события запоминаются и выводятся через процедуру фильтрации на

монитор. В частности, регистрируются такие события, как изменение состояния, появление аварии, восстановление после аварии, изменение параметров. Технические показатели могут выводиться как в табличном, так и в графическом виде.

### 11.3 Структурная схема и принцип работы внешнего блока станции

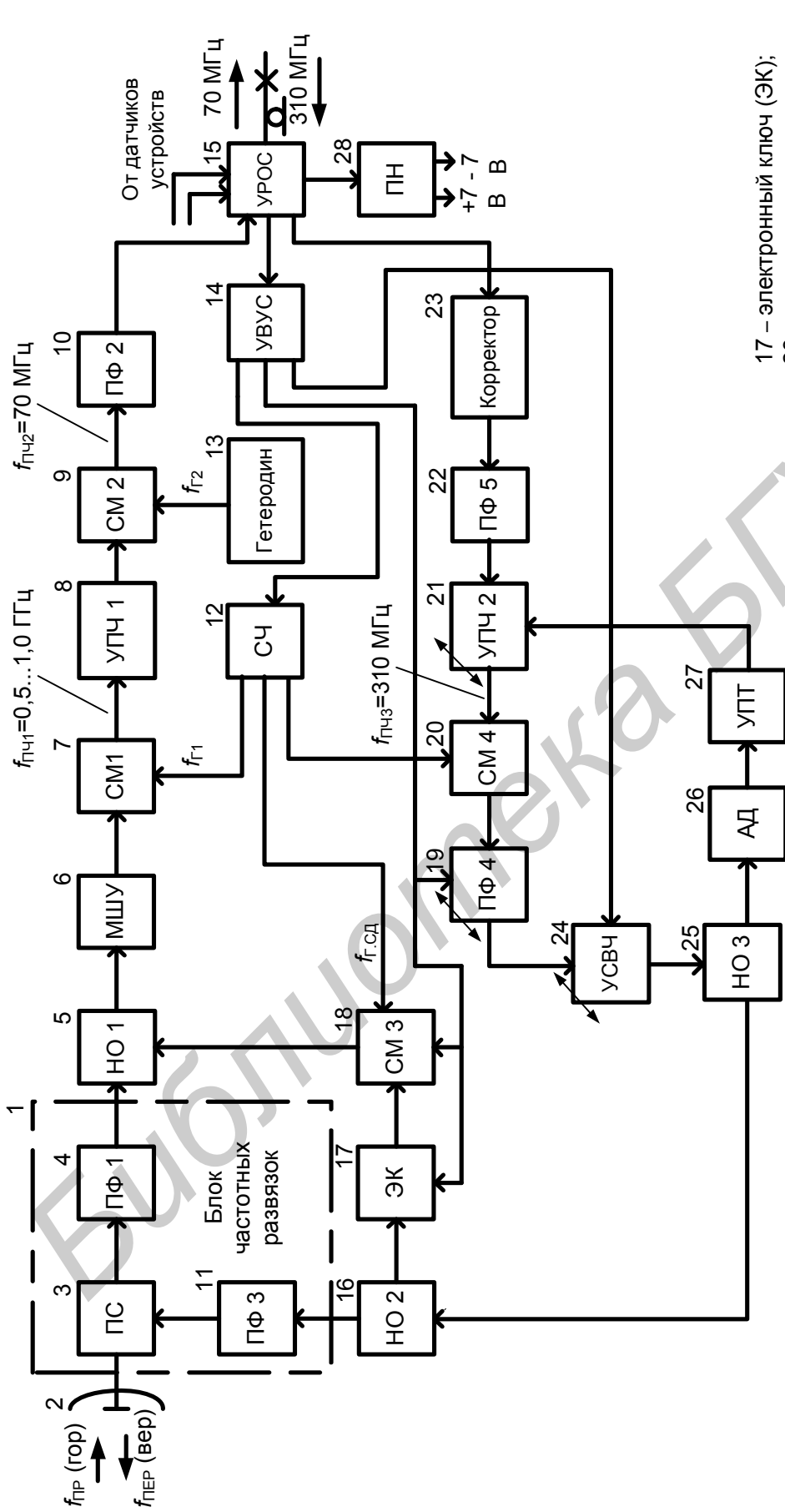
ODU представляет собой приемопередающий модуль (трансивер) с процессорным изменением его частоты настройки и выходной мощности передатчика (рисунок 11.2). Диапазон изменения выходной мощности равен 20...30 дБ, шаг изменения 1...3 дБ. Максимальные значения выходной мощности различных моделей ЦРПСИ находится в пределах 0,1...1,0 Вт. В качестве разделительных устройств сигналов приема и передачи используют поляризационный селектор 3 (в ряде моделей циркулятор) и блок частотных развязок 1.

Приемный тракт ODU строится по супергетеродинной схеме с двойным преобразованием частоты и малошумящим усилителем 6 на его входе. Полосовой фильтр 4 снижает уровень мощности передатчика (из-за неидеальности ПС) и помех, попадающих на вход приемника, а также ограничивает просачивание мощности гетеродина с частотой  $f_{Г1}$  на его вход до значений  $-120... -130$  дБм.

Частотный разнос между несущими передачи и приема соответствует плану распределения частот. Смеситель частоты 7 является балансным или двойным балансным с компенсацией шумов гетеродина и некоторых нежелательных составляющих преобразования. Первая промежуточная частота выбирается высокой  $f_{ПЧ1} = 0,5...1,0$  ГГц, что позволяет простыми средствами обеспечить должный уровень подавления помех по зеркальному каналу до значений  $a_{ЗК} \geq 60$  дБ. Требуемые частоты гетеродинов  $f_{Г1}$  и  $f_{Г2}$  формируются в синтезаторе частоты 12 под действием команд с устройства выделения управляющих сигналов 14. Долговременная нестабильность частоты гетеродина обычно  $10^{-5}...5 \cdot 10^{-6}$ .

Основное усиление ВЧ-тракта реализуется в усилителе промежуточной частоты 8. Необходимая ширина полосы пропускания ВЧ-тракта обеспечивается за счёт частотной избирательности УПЧ и полосового фильтра 10. Этот фильтр обычно выполнен на поверхностных акустических волнах и настроен на стандартную частоту  $f_{ПЧ2} = 70$  МГц.

В тракте передачи блока ODU радиосигнал на промежуточной частоте 310 МГц проходит устройства линейной коррекции 23, фильтрации 22 и усиления 21. В смесителе частоты 20 производится конвертация сигнала ПЧ на выходную частоту передачи. Процесс преобразования частоты в смесителе (обычно балансном) осуществляется благодаря воздействию сигнала гетеродина, поступающего от синтезатора частоты. При настройке блока на новый канал эта частота гетеродина изменяется одновременно с частотой  $f_{Г1}$ , подаваемой на См 1. В результате преобразования на выходе См 4 образуются две боковые по-



- 1 – блок частотных развязок (БЧР);  
 2 – антенна;  
 3 – поляризационный селектор (ПС);  
 4, 10, 11, 19, 22 – полосовой фильтр (ПФ);  
 5, 16, 25 – направленный ответвитель (НО);  
 6 – маломощный усилитель (МШУ);  
 7, 9, 18, 20 – смеситель частоты (СМ);  
 8, 21 – усилитель промежуточной частоты (УПЧ);  
 12 – синтезатор частот (СЧ);  
 13 – гетеродин;  
 14 – устройство выделения управляющих сигналов (УВУС);  
 15 – устройство разделения и объединения сигналов (УРОС);  
 17 – электронный ключ (ЭК);  
 23 – корректор;  
 24 – усилитель СВЧ (УСВЧ);  
 26 – амплитудный детектор (АД);  
 27 – усилитель постоянного тока (УПТ);  
 28 – преобразователь напряжения (ПН).

Рисунок 11.2 – Структурная схема внешнего блока цифровой станции

лосы (если не используется смеситель с компенсацией боковой полосы), одна из которых пропускается перестраиваемым полосовым фильтром ПФ 4. После фильтрации выходной сигнал усиливается в СВЧ-усилителе 24 с низким уровнем нелинейных искажений. Его коэффициент передачи изменяется по командам с устройства управления 14, что необходимо для адаптивной регулировки уровня выходной мощности при наличии потерь на радиолинии. Чтобы исключить возможный выход из строя усилителя СВЧ при повышенных на его выходе уровнях мощности, предусматривается устройство защиты выходных СВЧ-каскадов от перегрузки. В состав устройства защиты входят направленный ответвитель 25, амплитудный детектор 26 и усилитель постоянного тока 27. Работа устройства основывается на том, что в случае превышения допустимых значений выходной мощности по цепи обратной связи осуществляется автоматическое уменьшение коэффициента передачи усилителя 21 и снижение выходной мощности передатчика.

Контроль работоспособности устройств внешнего блока при отсутствии сигнала на входе приемника производится путем включения СВЧ-шлейфа по команде с УРУС. В шлейф входят два направленных ответвителя 5 и 16 с ослаблением в 40 дБ, смеситель частоты 18 и электронный ключ 17. Смеситель 18 посредством сигнала с частотой сдвига конвертирует, снятую с помощью ответвителя 16, малую часть выходной мощности с частотой передачи в сигнал с частотой приема. Образованный уровень сигнала на входе МШУ примерно равен  $-60$  дБм.

Для снижения уровня внеполосных помех, образованных в тракте передачи, на выходе УСВЧ устанавливается многосвязный полосовой фильтр 11 с требуемой АЧХ. Обычно необходимо, чтобы спектральные компоненты, отстоящие от центральной частоты канала (радиоствола) на величину, равную символьной скорости  $V_c$ , были ослаблены не менее чем на 37 дБ. Уровень побочных излучений на частотах, отстоящих от центральной частоты канала на ПЧ (310 МГц) и 2 ПЧ (620 МГц) должны быть менее  $-60$  и  $-90$  дБм соответственно.

Контроль работоспособности отдельных устройств ODU осуществляется с помощью подключенных к ним датчиков. Снятая с датчиков информация, поступает на вспомогательный низкочастотный модулятор (с частотой несущей 4...8 МГц) устройства разделения и объединения сигналов 15 и после него по коаксиальному кабелю на блок IDU. Напряжение питания (40...48 В), поданные с IDU, трансформируются в преобразователе напряжения (ПН) до номинального значения (обычно равного +7 и  $-7$  В).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время операторы сетей все чаще обращаются к беспроводным технологиям, позволяющим оперативно развернуть системы двухстороннего обмена информацией в сжатые сроки. Цифровые радиорелейные системы являются эффективным решением и хорошим дополнением к проводным средствам связи на местных, внутризоновых и магистральных участках. Новые ЦРРСП обладают высокой спектральной эффективностью и гибкостью в выборе технических характеристик, обеспечивают устойчивую связь на протяженных интервалах, поддерживают процессорные способы управления режимами и конфигурацией сети. Они могут использоваться для построения транспортных телеинформационных линий, радиотрасс военного назначения, обеспечивать обслуживание технологических магистралей, сотовых и корпоративных систем связи и передачи данных.

По материалам данного методического пособия представляется возможным:

- определить недостающие базовые параметры цифровой радиорелейной аппаратуры, выбранной для проектирования;
- построить интервалы РРЛ заданного направления;
- рассчитать уровни сигналов и помех на интервалах;
- определить показатели неготовности и качества по ошибкам на участках РРЛ, сравнить результаты с нормами МСЭ и принять решения по обеспечению их выполнения;
- понять структуру построения и принцип работы типовой двухблочной цифровой станции радиорелейной связи для правильного описания работы аппаратуры, выбранной студентом (курсантом) при курсовом проектировании.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Справочник по радиорелейной связи / Н. Н. Каменский [ и др.] ; под ред. С. В. Бродича. – М. : Радио и связь, 1981. – 416 с.
- 2 Мордухович, Л. Г. Системы радиосвязи. Курсовое проектирование : учеб. пособие для вузов / Л. Г. Мордухович, А. П. Степанов. – М. : Радио и связь, 1987. – 192 с.
- 3 Радиорелейные и спутниковые системы передачи : учебник для вузов / А. С. Немировский, О. С. Данилович [и др.] ; под ред. А. С. Немировского . – М. : Радио и связь, 1986. – 392 с.
- 4 Лобач, В. С. Цифровые микроволновые системы связи : учеб. пособие по курсовому проектированию для вузов / В. С. Лобач. – СПб. : СПбГУТ, 1998. – 23 с.
- 5 Липкович, Э. Б. Проектирование и расчет систем цифрового спутникового вещания : учеб.-метод. пособие / Э. Б. Липкович, Д. В. Кисель. – Минск : БГУИР, 2006. – 135 с.
- 6 Рекомендация МСЭ-R P.676-7 . Ослабление в атмосферных газах.
- 7 Рекомендация МСЭ-R P.580-5 . Показатели направленности антенн.
- 8 Антипенко, В. А. Расчет показателей готовности трактов цифровых радиорелейных линий связи // Электросвязь. – 2004. – №12. – С. 19–23.
- 9 Рекомендация МСЭ-R F.1703. Показатели готовности для реальных радиорелейных линий, используемых на гипотетических эталонных трактах и соединениях длиной 27 500 км.
- 10 Рекомендация МСЭ-R P.530-11. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, требующиеся для проектирования наземных систем прямой видимости.
- 11 Рекомендация МСЭ-R F.1668. Нормы на показатели качества по ошибкам для реальных цифровых линий фиксированной беспроводной связи, используемых на гипотетических эталонных трактах протяженностью 27 500 км и соединениях.
- 12 Калинин, А. М. Влияние частотной селективности интерференционных замираний на трассах с гладкими профилями на устойчивость работы цифровых РРЛ // Электросвязь. – 1998. – №3. – С. 25–29.
- 13 Рекомендация МСЭ-R F.1093-2. Влияние многолучевости распространения радиоволн на проектирование и работу цифровых систем фиксированной беспроводной связи прямой видимости.
- 14 Рекомендация МСЭ-R F.1705. Анализ и оптимизация показателей качества по ошибкам цифровых фиксированных беспроводных систем для целей ввода в эксплуатацию и технического обслуживания.
- 15 Рекомендация МСЭ-T G. 826 . Параметры и нормы показателей качества по ошибкам для международных цифровых трактов с постоянной скоростью передачи, равной или выше первичной скорости.
- 16 Справочник по цифровым радиорелейным системам. Бюро радиосвязи МСЭ. – Женева, 1996. – 391 с.

17 Муравьев, В. В. Сверхвысокочастотные технологии в системах телекоммуникаций : учеб.-метод. пособие. В 3 ч. Ч. 1: Приемопередающие устройства, направляющие системы передачи и пассивные компоненты диапазона СВЧ / В. В. Муравьев, С. А. Корневский, В. Н. Мищенко. – Минск : БГУИР, 2007 – 80 с.

18 Рекомендация МСЭ-Т G. 703 . Физические и электрические характеристики иерархических цифровых стыков.

19 Рекомендация МСЭ-Т G. 957 . Оптические стыки оборудования и систем, относящихся к синхронной цифровой иерархии.

20 Битнер, В. И. Нормирование качества телекоммуникационных услуг : учеб. пособие / В. И. Битнер, Г. Н. Попов; под ред. В. П. Шувалова. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 312 с.

21 Никульский, И. Е. Оптические интерфейсы цифровых коммутационных станций и сети доступа. – М. : Техносфера, 2006. – 256 с.

22 Морелос-Сарагоса, Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. / Р. Морелос-Сарагоса. – М. : Техносфера, 2005. – 320 с.

23 Рекомендация МСЭ-R F.1101. Характеристики цифровых фиксированных беспроводных систем, работающих в полосах частот ниже примерно 17 ГГц.

*Учебное издание*

**Муравьев** Валентин Владимирович  
**Липкович** Эдуард Борисович

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ  
ЛИНИЙ СВЯЗИ**

Методическое пособие  
к курсовому проектированию  
по дисциплине *«Спутниковые и радиорелейные системы передачи»*  
для студентов специальности 1-45 01 01  
«Многоканальные системы телекоммуникаций»  
всех форм обучения

Редактор Н. В. Гриневич  
Корректор Е. Н. Батурчик  
Компьютерная верстка Ю. Ч. Ключкевич

---

Подписано в печать 23.02.2011.  
Гарнитура «Таймс».  
Уч.-изд. л. 3,0.

Формат 60x84 1/16.  
Отпечатано на ризографе.  
Тираж 100 экз.

Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 3,37.  
Заказ 500.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6