

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем
управления и радиотехники

А.М. Голиков

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ РАДИОРЕЛЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ERICSSON MINI-LINK

Методические указания для выполнения лабораторных работ
для студентов направлений "Инфокоммуникационные
технологии и системы связи", «Радиотехника» и "Радиоэлектронные
системы и комплексы"



Томск
2022

УДК 621.37
ББК 32.884.1
Г 604

Рецензент

Мещеряков А.А. зав. кафедрой радиотехнических систем ТУСУР,
канд. техн. наук, доцент

Голиков А.М.

Г606 Исследование цифровой радиорелейной системы Ericsson MINI-LINK: методические указания для выполнения лабораторных работ для студентов направлений "Инфокоммуникационные технологии и системы связи", «Радиотехника» и "Радиоэлектронные системы и комплексы" / А.М. Голиков -Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. - 35 с.

В лабораторной работе проводится знакомство с аппаратурой цифровой радиорелейной системы Ericsson MINI-LINK, получение практических навыков по настройке, конфигурированию оборудования Ericsson MINI-LINK, изучению режимов работы системы и исследованию основных технических характеристик. В описании лабораторной работы приведен пример исследования помехоустойчивости системы и скорости передачи информации для различных видов цифровой модуляции от 4-QAM до 512-QAM. Лабораторная работа предназначена для подготовки студентов по направлениям "Инфокоммуникационные технологии и системы связи", «Радиотехника» и "Радиоэлектронные системы и комплексы".

Автор выражает благодарность заведующему лабораторией Блинковскому Н.К и студентам кафедры РТС Горбунову А.Д. и Комогоровой О.А. за проведение исследований характеристик ЦРПЛ Ericsson MINI-LINK

Одобрено на заседании каф. РТС протокол № 6 от 16.05.2022 г.

УДК 621.37
ББК 32.884.1

© А.М. Голиков, 2022
© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2022

Оглавление

	Введение	4
1	Цифровая радиорелейная система Ericsson MINI-LINK	5
1.1	Назначение и особенности микроволновых систем MINI-LINK	5
1.2	Характеристика оборудования MINI-LINK E	7
1.3	Особенности структурной и аппаратной реализации радиоблоков MINI-LINK	10
1.4	Особенности структурной и аппаратной реализации блоков модема MINI-LINK	14
2	Порядок выполнения лабораторной работа	16
3	Задание на выполнение лабораторной работы	23
4	Содержание отчета по лабораторной работе.....	23
5	Контрольные вопросы	24
	Заключение	24
	Литература	24
	Приложение А	25
	Приложение Б	27

Введение

Под радиорелейной связью понимают радиосвязь, основанную на ретрансляции радиосигналов метровых, дециметровых и более коротких волн станциями, расположенными на поверхности Земли. Совокупность технических средств и среды распространения радиоволн для обеспечения радиорелейной связи образует радиорелейную линию (РРЛ) связи. В РРЛ используется земная радиоволна, распространяющаяся вблизи земной поверхности. Земные радиоволны длиной менее 1 м хорошо распространяются только в пределах прямой видимости. Поэтому РРЛ на большие расстояния строят в виде цепочки приёмно-передающих радиорелейных станций, в которой соседние станции или радиовышки размещают на расстоянии, обеспечивающем радиосвязь прямой видимости и называемом радиорелейной линией прямой видимости РРЛ. Подобные системы связи широко распространены и используются для передачи сигналов многоканальных телефонных сообщений, радиовещания, телевидения, передачи данных для технологических нужд газодобывающей промышленности, железнодорожного транспорта и между базовыми станциями сотовой связи. Радиорелейные линии связи относятся к широкополосным системам телекоммуникаций.

Простейшая топология РРЛ представляет собой две станции, обеспечивающие передачу информации между двумя базовыми станциями сотовой связи. В более сложных случаях строятся ответвления от основной линии или создаются сети распределения информации между регионами, населёнными пунктами и непосредственно между потребителями, в качестве которых чаще выступают подразделения крупных компаний.

В настоящее время широкое развитие получили цифровые системы РРЛ (ЦРРЛ), обеспечивающие передачу цифровой формы информации. ЦРРЛ решают одну из главных задач создания помехоустойчивых каналов связи, позволяющих передавать информацию с высокой скоростью и требуемой достоверностью [1].

Архитектура цифровой радиорелейной станции (РРС) делится на две функциональных части: выносное оборудование, к которому относятся антенное устройство с элементами крепления, кабели, приемопередающие устройства) и внутреннее оборудование (модули доступа, мультиплексоры, источники питания). Приемопередающее устройство (ППУ) соединяется с внутренним оборудованием гибким волноводом — симметричным или коаксиальным кабелем, по которому подаются информационные потоки и электропитание. Конструктивное исполнение приемопередатчиков с синтезаторами частот обеспечивает возможность перестройки частоты в пределах поддиапазона. Зарубежные изготовители применяют функцию автоматической регулировки мощности выходного сигнала в зависимости от уровня приема на удаленном конце, что обеспечивает экономию энергоресурсов и отвечает требованиям электромагнитной совместимости. «Горячий резерв» обеспечивается с помощью применения двух приемопередатчиков в работе на одну антенну с переключением ствола в случае аварийной ситуации. Внутреннее оборудование, применительно к схеме организации связи, может комплектоваться либо собственно модулем

доступа для передачи группового сигнала в ППУ, с функциями резервирования, служебной связи, дополнительных сервисных каналов управления внешними устройствами и служебной связью, либо может интегрироваться с блоками дополнительных каналов, мультиплексорами для увеличения информационной емкости радиоканала до 34 Мбит/с (поток *E3*). В этом случае мультиплексоры обычно образуют дополнительный канал со скоростью 2,048 Мбит/с.

Для контроля за функционированием станций и линий, сбора и передачи сигналов аварии, организации шлейфов, управления станцией, отображения состояния применяется система телеуправления и телесигнализации. Управление параметрами РРС и конфигурирование сети обычно производится программными средствами, локально по *RS-232* или с помощью удаленного доступа, например, по протоколу *Simple Network Management Protocol (SNMP)* с любого терминала сети [2].

1. Цифровая радиорелейная система Ericsson MINI-LINK

1.1 Назначение и особенности микроволновых систем MINI-LINK

Радиорелейные системы *Ericsson* средней пропускной способности для связи «точка-точка» *MINI-LINK E* пригодны для организации работы сетей любого типа. *MINI-LINK E* может иметь конфигурацию, удовлетворяющую требованиям по дальности и скорости передачи данных. Эта аппаратура работает в частотных диапазонах от 7 до 38 ГГц и обеспечивает скорость передачи данных от 2 до (2¹⁷+2) Мбит/с. Терминалы *MINI-LINK E* могут использоваться в сетях любой конфигурации — в виде звезды, дерева, или кольца как показано на рис. 1.1.

На рис. 1.2 изображен пример структуры мобильной сети, в которой аппаратура *MINI-LINK* осуществляет связь базовых станций с центром коммутации мобильной связи — *Mobile services Switching Center (MSC)*, которые работают под управлением контроллера базовой станции — *Base Station Controller (BSC)*.

Для повышения надежности могут быть использованы системы с резервированием типа 1+1 или сети с кольцевой структурой. Продукция *MINI-LINK E* подразделяется на две ветви: автономная, полностью наружная аппаратура *MINI-LINK E Micro* для обеспечения минимальной стоимости и гибкая сплит-система *MINI-LINK E* для оптимальной компоновки многотерминальных сайтов.

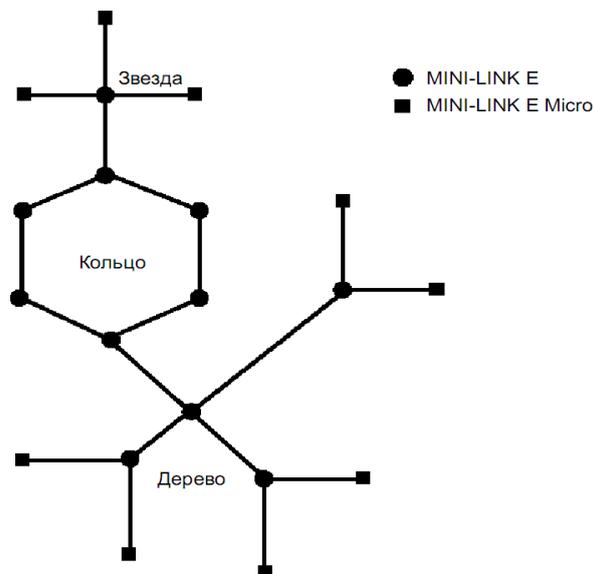


Рисунок 1.1 — Пример топологии сети

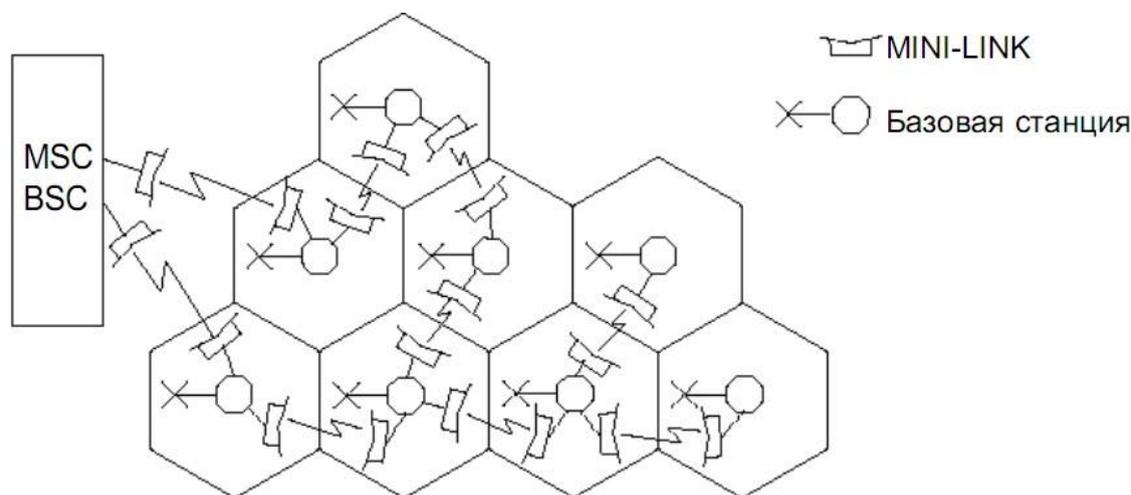


Рисунок 1.2 — Пример мобильной сети, в которой аппаратура *MINI-LINK* осуществляет связь базовых станций с центром коммутации

Полностью наружная аппаратура *MINI-LINK E Micro* содержит все необходимые компоненты передачи, что устраняет необходимость использования оборудования внутри помещения. Это особенно важно, когда необходимо обеспечить быстрый ввод в строй и минимальную стоимость сайта.

Сайтом называется пункт РРС оборудованный одним или несколькими терминалами [2].

Радиорелейное оборудование *Ericsson MINI-LINK* является широко распространённым среди операторов связи. В настоящее время используется трилинейки оборудования:

- *MINI-LINK E*;
- *MINI-LINK Traffic Node* (скорость до 32×2 Мбит/с, модуляция *C-QPSK*, *16 QAM*) [2];

— *MINI-LINK High Capacity* (скорость до 155 Мбит/с, модуляция 16 QAM, 128 QAM).

Для настройки и управления оборудованием используется система управления сетью *MINI-LINK Service Manager (MSM)*, которая состоит из комплекса специализированных программ. Для централизованного управления и эксплуатации всего оборудования используется система *MINI-LINK Netman*. Она может использоваться, как изолированная система или быть интегрирована в Систему Управления Сетью (*Network Management System, NMS*) более высокого порядка с помощью стандартного *SNMP* интерфейса [2].

Программное управление конфигурацией сайта и взаимными связями позволяет минимизировать количество кабельных соединений, обеспечить высокую надежность и сократить время установки. Кроме того, программное управление скоростью трафика облегчает возможность расширения сети без замены аппаратуры.

1.2 Характеристика оборудования *MINI-LINK E*

Несколько терминалов *MINI-LINK E* могут быть интегрированы в один общий модуль доступа. Это позволяет сделать компактные сайты сети, а также эффективно распределить между разными терминалами такие ресурсы, как мультиплексоры, интерфейсы служебных каналов и системы поддержки. Возможно создание конфигураций сайта, поддерживающих до четырех радиомодулей, как показано на рис. 1.3.

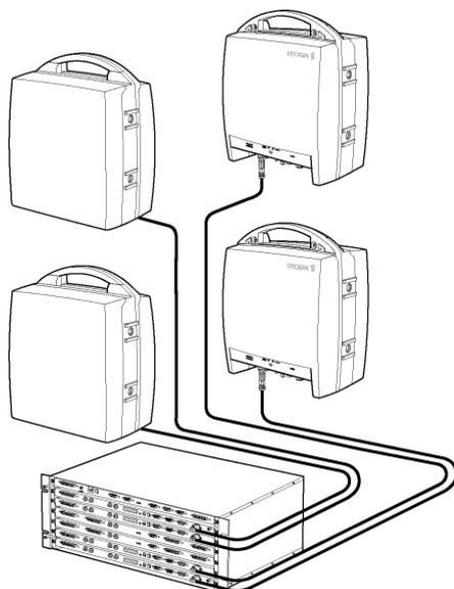


Рисунок 1.3 — Много терминальный сайт *MINI-LINK E*

Маршрутизация трафика и его переадресация в пределах сайта могут выполняться при минимальном количестве внешних кабелей. Маршрут трафика задается с помощью ПО и конфигурируется во время установки станции. Терминал может быть сконфигурирован как нерезервируемый (1+0) или резервируемый (1+1); резервирование может быть также обеспечено

сетью кольцевого типа. Каждый терминал обеспечивает скорость трафика до $(17 \cdot 2 + 2)$ Мбит/с.

Терминал *MINI-LINK E* состоит из наружной и внутренней частей. Кроме того, имеется целый ряд адаптированных к ним принадлежностей, оборудования и программного обеспечения.

Наружная часть полностью независима от скорости трафика и поставляется для различных частотных диапазонов. Наружная часть состоит из антенного модуля, радиоблока (*RAU*) и соответствующего установочного оборудования. Антенна и радиоблок могут устанавливаться совместно или раздельно. Для резервируемых систем (1+1) используются два радиоблока и одна или две антенны.

Внутренняя часть, это часть, устанавливаемая внутри помещения — модуль доступа, полностью независима от частотного диапазона и поставляется в различных версиях для разных скоростей трафика и конфигураций систем. Модуль доступа может обслужить до четырех радиомодулей, как показано на рис. 1.4. Внутренняя часть оборудования содержит блок модема *Modem Unit (MMU)* и устанавливаемых при необходимости блока ключей-мультиплексоров *SMU* и блока служебных каналов *SAU*, все эти блоки размещаются в одном общем магазине модуля доступа. Для систем с резервированием используются два *MMU* и один *SMU*.

Наружная и внутренняя части терминала соединяются одним коаксиальным кабелем.

Для систем с кольцевым резервированием может быть использован дополнительный блок кросс-коннекта *MINI-LINK (MXU)*. Блоки *MXU* поддерживает резервирующие переключения в сетях кольцевой конфигурации, уплотнение данных на уровне 64 кбит/с.

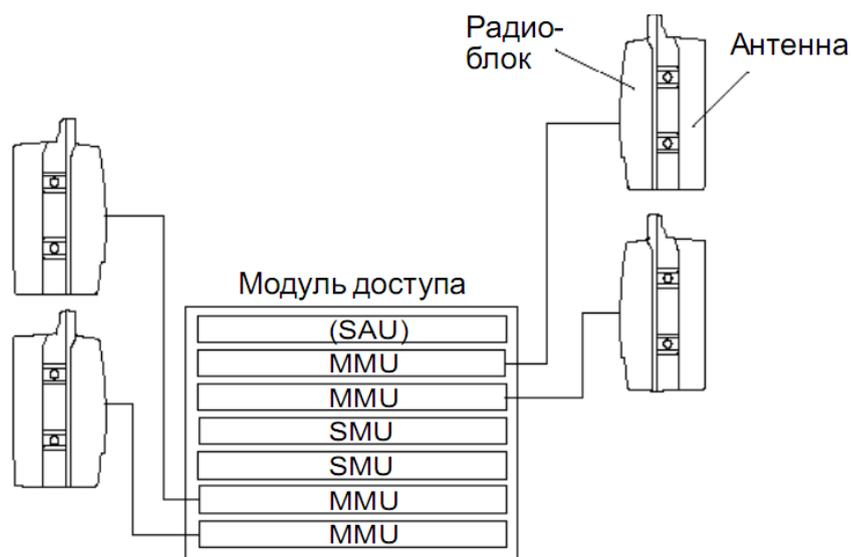


Рисунок 1.4 — Конфигурация многотерминального сайта

Внутренние части оборудования монтируются в 19" стойках, объединенных в «кабинеты», или устанавливаются непосредственно на стене или столе. Модуль доступа состоит из магазина модуля доступа (*Access Module Magazine, АММ*) и набора съемных блоков.

Для различных применений выпускаются следующие стандартные типы АММ:

- *АММ 1U* для конечных терминалов;
- *АММ 2U* для сайтов с одним или двумя терминалами; он может вместить до четырех съемных блоков;
- *АММ 4U* для более сложных многотерминальных сайтов, вмещающий до семи съемных блоков.

Находящаяся внутри помещения часть может быть модернизирована или реорганизована с помощью съемных блоков, что обеспечивает гибкость конфигурирования сайта. Связь наружной части (радиоблока и антенны) с находящейся внутри помещения частью терминала, осуществляется единственным коаксиальным кабелем, по которому передаются полный дуплексный трафик, трафик поддержки, оперативные и эксплуатационные данные, а также подводится постоянное напряжение питания.

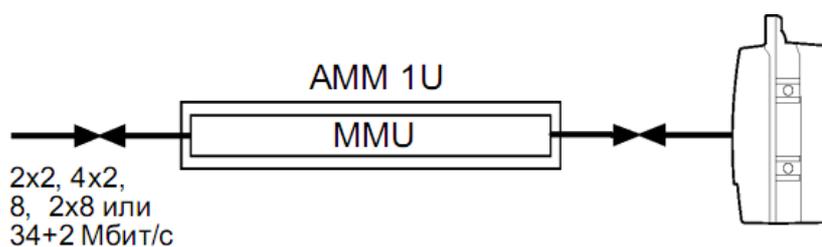
Пример конфигурации терминала без резервирования типа (1+0) изображен на рис. 1.5, а и содержит как минимум:

- один радиоблок (*RAU*);
- одну антенну;
- один магазин модуля доступа (*АММ 1U*);
- один блок модема (*MMU*);
- один соединяющий коаксиальный кабель.

Для трафика со скоростью 8×2 , 17×2 и $4 \times 8 + 2$ Мбит/с требуется также блок ключей-мультиплексоров (*SMU*). Пример конфигурации сайта показан на рис. 1.5, б.

В магазин модуля доступа может быть также добавлен блок служебных каналов (*SAU*), что обеспечивает дополнительные интерфейсы для управления и аварийной сигнализации, передачу служебных каналов и других специфических потребностей клиента. Более подробно особенности использования *SAU* охарактеризовано в [2].

а)



б)

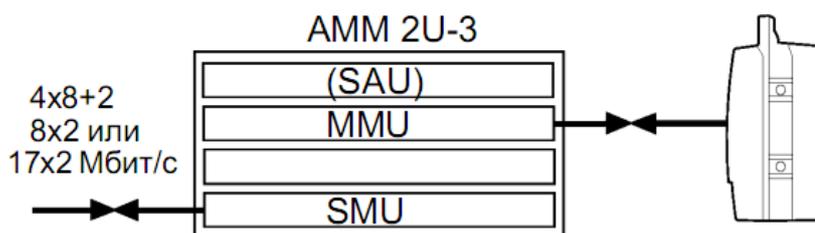


Рисунок 1.5 — Конфигурация сайта типа (1+0):

а) вариант для трафика со скоростью менее 8x2 Мбит/с;

б) вариант для трафика со скоростью 8x2, 4x8=2 Мбит/с

Чтобы сделать возможной передачу трафика *Ethernet*, в *АММ* добавляется блок интерфейса *Ethernet* (*Ethernet Interface Unit, ETU*). Основной функцией *ETU* является преобразование трафика *Ethernet* в поток данных *Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH)* с выбранной пропускной способностью трафика и наоборот.

Блок интерфейса *ETU* — внутренний сменный блок, который устанавливается в слот *АММ*. Для подключения к локальной сети он имеет один *Ethernet* интерфейс *10BASE-T* или *100BASE-TX*.

Три варианта интерфейса *G.703* — 2, 8 и 34 Мбит/с (*E1, E2* и *E3*) возможно использовать для связи с *MMU* или *SMU*. Важно, что *Ethernet* трафик от *ETU* может сочетаться с другими типами трафика, например, с трафиком телефонной сети, канал которого подключается непосредственно к *MMU*. При пропускной способности трафика 34+2 Мбит/с, трафик 34 Мбит/с может использоваться, например, для передачи данных *Ethernet*, а 2 Мбит/с — для речевой связи.

1.3 Особенности структурной и аппаратной реализации радиоблоков *MINI-LINK*

В составе линий *MINI-LINK* используются два типа радиоблоков — *RAU1* и *RAU2*. Они имеют одинаковое функциональное назначение, но различаются по конструкции и микроволновой технологии. *RAU2* имеет более высокую степень интеграции микроволновых цепей.

Радиоблоки обеспечивают работу сайта с любой пропускной

способностью трафика в пределах ограничений оборудования *MINI-LINK*. Рабочая частота определяется радиоблоком и устанавливается с помощью управляющего ПО. Радиоблок имеет защищенный от атмосферных воздействий корпус серого цвета с ручкой для переноски и подъема. Он подключается к волноводному порту антенного блока. Радиоблок имеет два крюка и захваты, что облегчает процедуры монтажа или съема блока при его совместном монтаже с антенной.

Существуют радиоблоки для работы в различных частотных диапазонах рекомендуемых *ITU-R* и *ETSI*. Более подробная информация о частотных вариантах радиоблоков приведена в [2].

Далее рассмотрим особенности реализации радиоблока *RAU1* (15-*E*, 18-*E*, 23-*E*, 26-*E* и 38-*E*). Внешний вид блока *RAU1* показан на рис. 1.6.

Радиоблок этого типа состоит из корпуса, рамы, субблока радиointерфейса и микроволнового субблока. Радиointерфейс субблока представляет собой схемную сборку, содержащую интерфейсы внешних сигналов к блокам, которые размещаются внутри помещения. Конструктивно интерфейс представляет собой 50-омный разъем *N*-типа. Разъем для измерения уровня входного ВЧ сигнала и светодиоды индикации также размещены на наружной поверхности радиоблока.

Микроволновой субблок состоит из микрополосковой платы, защищенной алюминиевой крышкой, которая обеспечивает экранировку отсека с высокочастотными цепями. Плата управления устанавливается на обратной стороне микрополосковой платы. Микроволновой субблок снабжен волноводным выходом для подключения к антенне. Преобразователь напряжения питания *DC/DC* установлен непосредственно на вертикальной раме и подсоединен к микроволновому субблоку с помощью плоского кабеля.

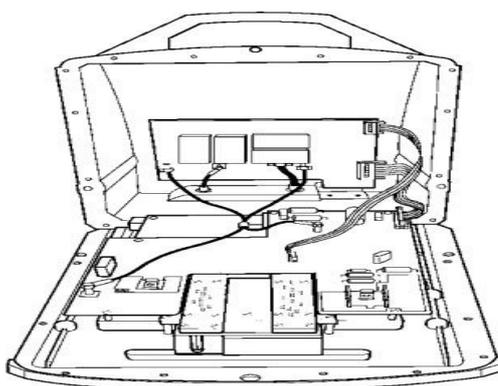


Рисунок 1.6 — Внешний вид радиоблока *RAU1* с открытым корпусом

Вертикальная рама имеет также волноводный фланец для подсоединения к антенне. В нижней части корпуса расположен разъем радиокабеля, который служит интерфейсом для установленного внутри

помещения блока модема *MMU* и разъем для измерения напряжения, пропорционального уровню входного ВЧ сигнала (предназначено для юстировки антенны). Разъем для радиокабеля оснащен газоразрядными элементами для защиты от молнии. Структурная схема радиоблока *RAU1* (вариант 15-*E*, 18-*E*, 23-*E*, 26-*E* и 38-*E*) изображена на рис. П.1. В ее состав входят субблок радиointерфейса и микроволновый субблок.

а) **Субблок радиointерфейса** выполняет следующие функции:

- интерфейс кабеля;
- управление и контроль;
- обработка передаваемого сигнала промежуточной частоты (ПЧ);
- обработка принимаемого сигнала ПЧ.

Интерфейс кабеля. Набор сигналов, поступающих от расположенного внутри помещения оборудования, а именно, передаваемый сигнал ПЧ, сигналы команд и управления, а также постоянное напряжение разделяются интерфейсом кабеля и передаются далее для последующей обработки. Передаваемый сигнал ПЧ является модулированным сигналом с центральной частотой 350 МГц.

Передаваемый вверх сигнал команд и управления модулирован по амплитуде с несущей частотой 6,5 МГц. По высокочастотному кабелю на радиоблок подается напряжение источника питания (в диапазоне 45...60 В). К *MMU* подводится постоянное напряжение номиналом 24...60 В.

Аналогично, интерфейсом кабеля объединяются передаваемые вниз: сигналы: принятый сигнал ПЧ и сигналы команд и управления. Центральная частота принимаемого сигнала ПЧ равна 140 МГц.

Передаваемый вниз сигнал команд и управления модулирован по амплитуде с несущей частотой 4,5 МГц.

В дополнение к перечисленному выше, интерфейс кабеля содержит цепи защиты от перенапряжений.

Процессор системы управления и контроля входит в состав субблока радиointерфейса радиоблока. Основные функции процессора описаны ниже.

- Сбор сигналов о неисправностях (сигналы о неисправностях и сигналы статуса радиоблока пересылаются во внутренний процессор *MMU*). Сводные сигналы статуса визуализируются светодиодами, расположенными на радиоблоке.

- Выполнение команд управления (команд, поступающих от внутреннего оборудования). Это команды включения и выключения передатчика, установки частоты канала и уровня выходной мощности, а также команды на включения и выключения петли ВЧ сигнала.

- Управление радиоблоком (внутренними процессами в радиоблоке и петлями в режиме тестирования оборудования).

Обработка передаваемого сигнала ПЧ. Передаваемый сигнал ПЧ усиливается, ограничивается и демодулируется. Демодулированный сигнал усиливается и, пройдя через буферный усилитель, подается на микроволновой субблок модуляции несущей ВЧ сигнала.

Входной усилитель имеет систему автоматической регулировки усиления, благодаря чему не требуется каким-либо образом компенсировать различия в длине кабеля между внутренним и наружным оборудованием.

При определенном уровне выходного сигнала генерируется сигнал неисправности, указывающий, что уровень передаваемого сигнала ПЧ слишком низок из-за чрезмерных потерь в кабеле.

Обработка принимаемого сигнала ПЧ. Поступающий от микроволнового блока сигнал ПЧ с частотой 140 МГц усиливается и подается на интерфейс кабеля. Этот сигнал частично отводится к калиброванному детектору, который обеспечивает измерение уровня входного сигнала приемника. Измеренная величина доступна для измерения в виде аналогового напряжения на выходе порта юстировки антенны (AGC) и цифровом виде в программе обслуживания системы, где производится ее вывод в единицах дБм.

б) Микроволновой субблок

Преобразователь DC/DC обеспечивает стабильные напряжения для микроволнового субблока, а также для блока радиоинтерфейса.

Генератор передатчика входит в состав блока передатчика. Частота передатчика поддерживается цепью формирования частоты. При этом сигнал генератора управляемого напряжением (Voltage-controlled oscillator, VCO) частично отводится к делителю и далее поступает на программируемый фазовый детектор). Встроенная система контроля и управления регулирует подачу сигнала о неисправности по последовательной шине. При нарушении петли обратной связи VCO генерируется сигнал с учетом отклонения частоты передатчика.

Умножение частоты и фильтрация. Сигнал VCO усиливается, его частота умножается, после чего сигнал фильтруется.

Оконечный усилитель. Выходная мощность передатчика задается установкой коэффициента усиления окончного усилителя. Выходная мощность устанавливается с шагом 1 дБ с помощью программы системы управления. Передатчик может быть включен или выключен соответствующим переключением режима работы окончного усилителя.

Примечание: Вышеизложенное относится к RAU1 15-E, 18-E, 23-E и 26-E повышенной мощности. RAU1 26-E и 38-E имеют механически регулируемый аттенюатор, расположенный вблизи согласующего фильтра.

Разветвляющий фильтр. В направлении передачи сигнал подается в антенну через разветвляющий фильтр и циркулятор. В направлении приема сигнал через циркулятор поступает на вход разветвляющего фильтра.

Измеритель мощности. Часть передаваемого сигнала используется для контроля уровня передаваемой мощности (и для выработки сигнала о несоответствии уровня выходной мощности).

Петля ВЧ сигнала (Только для RAU1 15-Е, 18-Е и 23-Е). Передаваемый сигнал частично отводится и смешивается с сигналом генератора смещения частоты, после чего сигнал подается на приемник для целей контроля.

Ослабление ВЧ сигнала. Наряду с описанным выше способом регулировки выходной мощности передатчика, уровень выходного ВЧ сигнала может быть уменьшен подключением к микроволновому блоку ВЧ аттенюатора с фиксированным ослаблением. Передаваемый ВЧ сигнал может иметь суммарное ослабление до 50 дБ для RAU1 23-Е, 26-Е и 38-Е.

Блок приемника. Используемая в RAU1 схема супергетеродинного приема с двойным преобразованием частоты и высокой первой ПЧ обеспечивает высокую избирательность в широком диапазоне частот и необходимое подавление по прямому и зеркальному каналам.

Принятый сигнал через входной согласующий фильтр поступает на малошумящий усилитель (за исключением модели RAU1 38-Е) и преобразуется с понижением частоты в первую ПЧ, равную приблизительно 1 ГГц. После фильтрации полосовым фильтром и усиления частота сигнала еще раз понижается до второй ПЧ, равной 140 МГц.

Генератор приемника, умножитель и фильтр. Сигналы гетеродинов (Local oscillator, LO) для двух понижающих частоту преобразований генерируются так же, как и в случае передаваемого сигнала. Поступающий от MMU сигнал управления частотой (AFC) передается генератору приемника через процессор системы управления и контроля.

1.4 Особенности структурной и аппаратной реализации блоков модема *MINI-LINK*

Блок модема *MMU* является размещаемым в помещении интерфейсом к радиоблоку. Этот блок существует в следующих вариантах: с фиксированными значениями пропускной способности (2 2, 4 2, 8, 2 8, 34+2 Мбит/с); с регулируемой пропускной способностью от 2 до 34+2 Мбит/с. Внешний вид блока модема *MMU* показан на рис. 1.7.

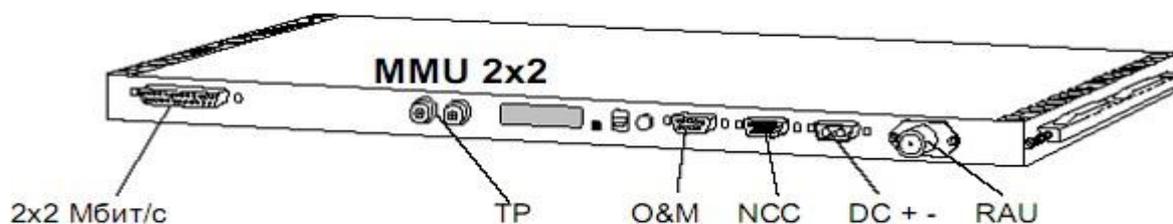


Рисунок 1.7 — Внешний вид блока модема *MMU*

На рис. 1.7 - *TP* — разъем подключения тест-порт, *O&M* — разъем интерфейса RS232, *NCC* — канал связи узла, *DC* — разъем подключения источника питания, *RAU* — высокочастотный разъем подключения кабеля к радиоблоку

Все виды *MMU* полностью независимы от используемого частотного диапазона, т. е. могут работать совместно с радиоблоком любого частотного диапазона. Структурная схема блока модема *MMU* изображена на рис. 1.8. Мультиплексор радиорейма обеспечивает объединение трех различных типов данных передаваемых по каналу радиосвязи: трафик данных, данные служебного канала и данные служебного канала пролета — *Hot Communication Channel (HCC)*. Передающиеся данные трафика обеспечивают необходимый темп передачи данных. Если на входе нет корректных данных, то включается подача сигнала AIS, передаваемого с номинальной скоростью и трафик данных через пролет заполняется единицами.

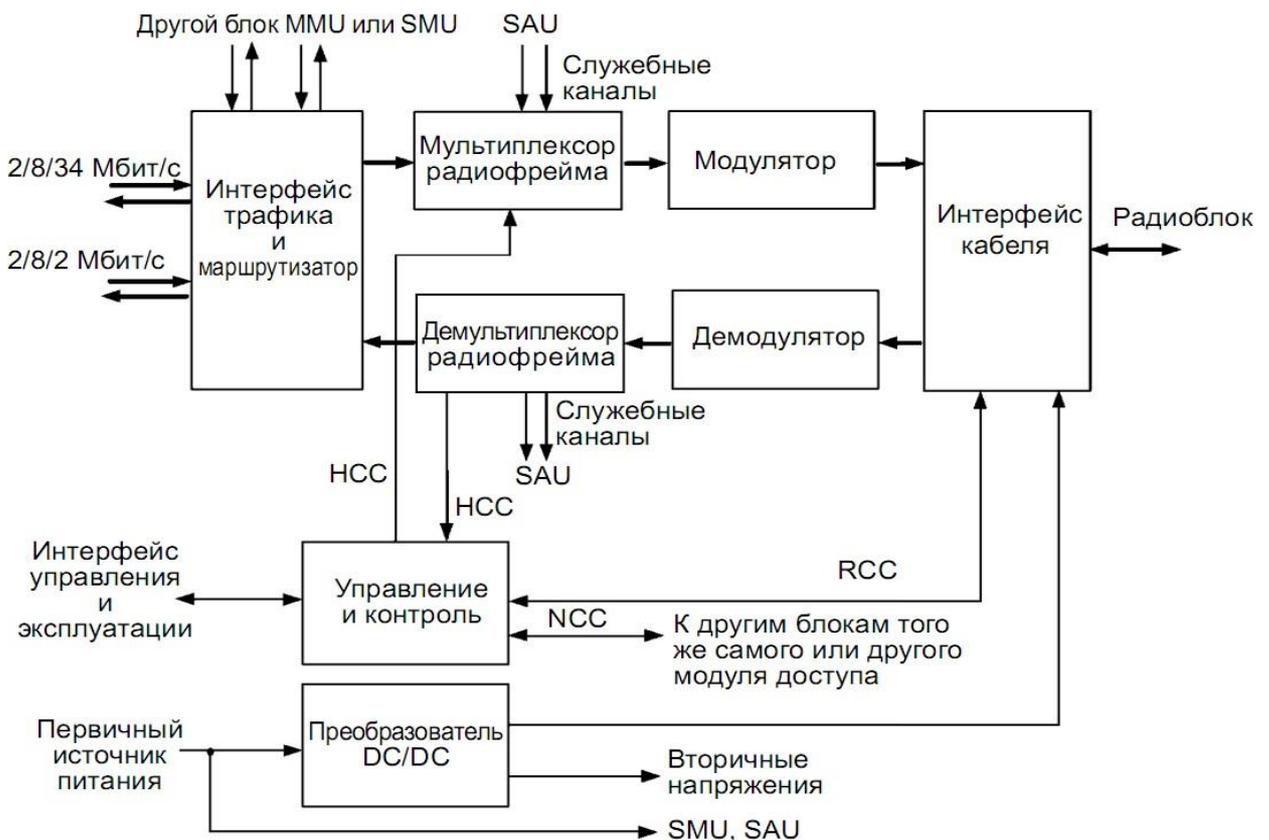


Рисунок 2.8 — Структурная схема блока модема *MMU* для конфигураций 2 2, 2 и 34+2 Мбит/с

В системе предусмотрены два типа служебных каналов — аналоговые и цифровые, которые обрабатываются по-разному. *SAU* получает тактовые и синхронизирующие импульсы, и данные из *SAU* подаются в мультиплексор. Цифровые данные и синхроимпульсы вначале поступают в несинхронный буфер, а затем считываются в синхронном режиме, определяемом тактовой

частотой.

Модулятор содержит генератор, управляемый напряжением — *voltage controlled oscillator (VCO)*, генерирующий сигнал с частотой 350 МГц. Он смешивается с сигналом частотой 490 МГц, выделенный сигнал с разностной частотой 140 МГц используется для контроля.

Питание постоянным напряжением осуществляется подачей напряжения на все *MMU*. В состав *MMU* входит изолированный преобразователь *DC/DC*, который обеспечивает стабильное напряжение для наружного радиоблока и вторичное питание для электроники *MMU*. После фильтрации напряжение питания также распределяется по находящимся в модуле доступа блокам *SMU* и *SAU*.

2 Порядок выполнения лабораторной работа

Лабораторная работа выполняется на оборудовании *MINI-LINK E*. PPC содержит один пролет типа «точка-точка». В состав стенда входят радиоблоки типа *RAU 1 18-E* для работы в частотном диапазоне (18,6...19,4) ГГц.

Для конфигурации и мониторинга оборудования *MINI-LINK* используется программное обеспечение *MINI-LINK Craft 15B*. Для подключения к модулю требуется ввести IP-адрес модуля, логин и пароль пользователя. Подключение можно осуществить как к локальному модулю, так и к удалённому. Окно входа представлено на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Интерфейс окна входа

После подключения к модулю, можно просмотреть, из каких блоков он состоит, а также статус работы этих блоков (рис. 2.2 и 2.3).

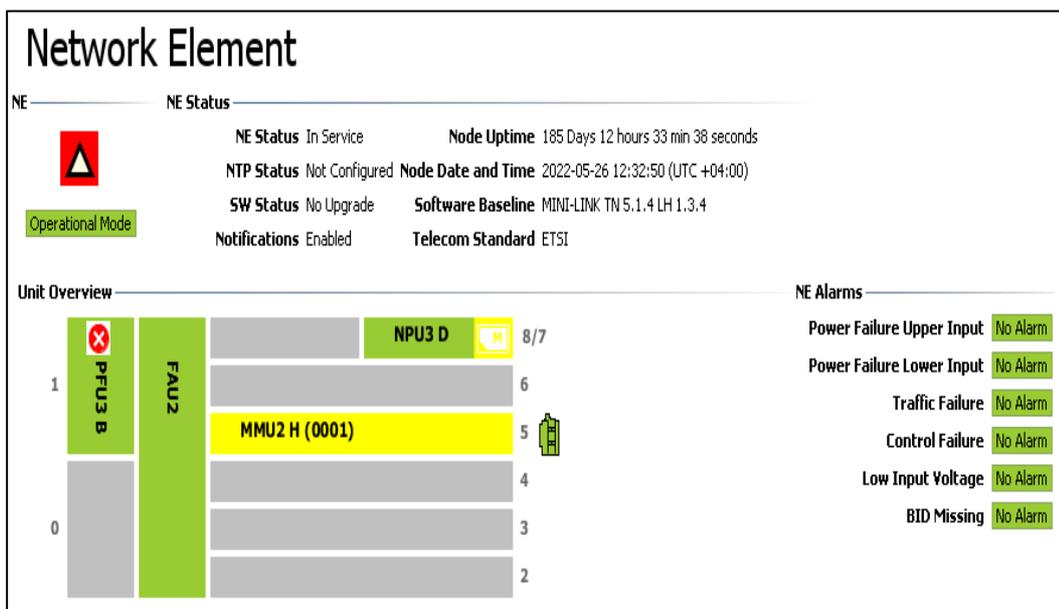


Рисунок 2.2 – Окно обзора состава локального модуля и состояния его блоков

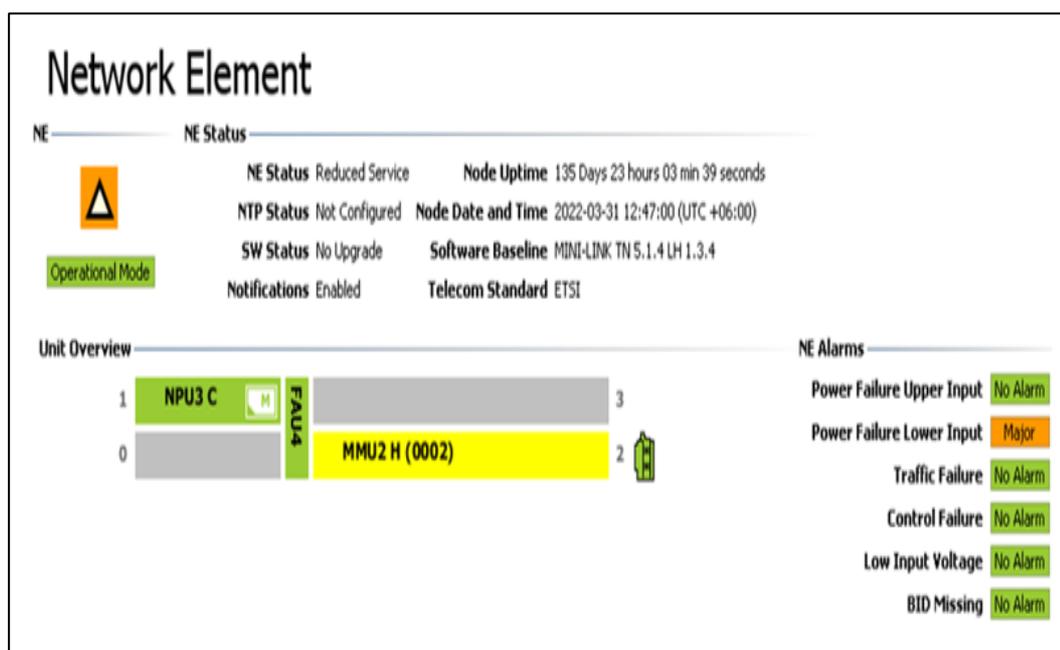


Рисунок 2.3 – Окно обзора состава удалённого модуля и состояния его блоков

Для изменения конфигурации связи между приёмно-передающими модулями, в ПО присутствует соответствующее окно, вид которого представлен на рисунке 2.4.

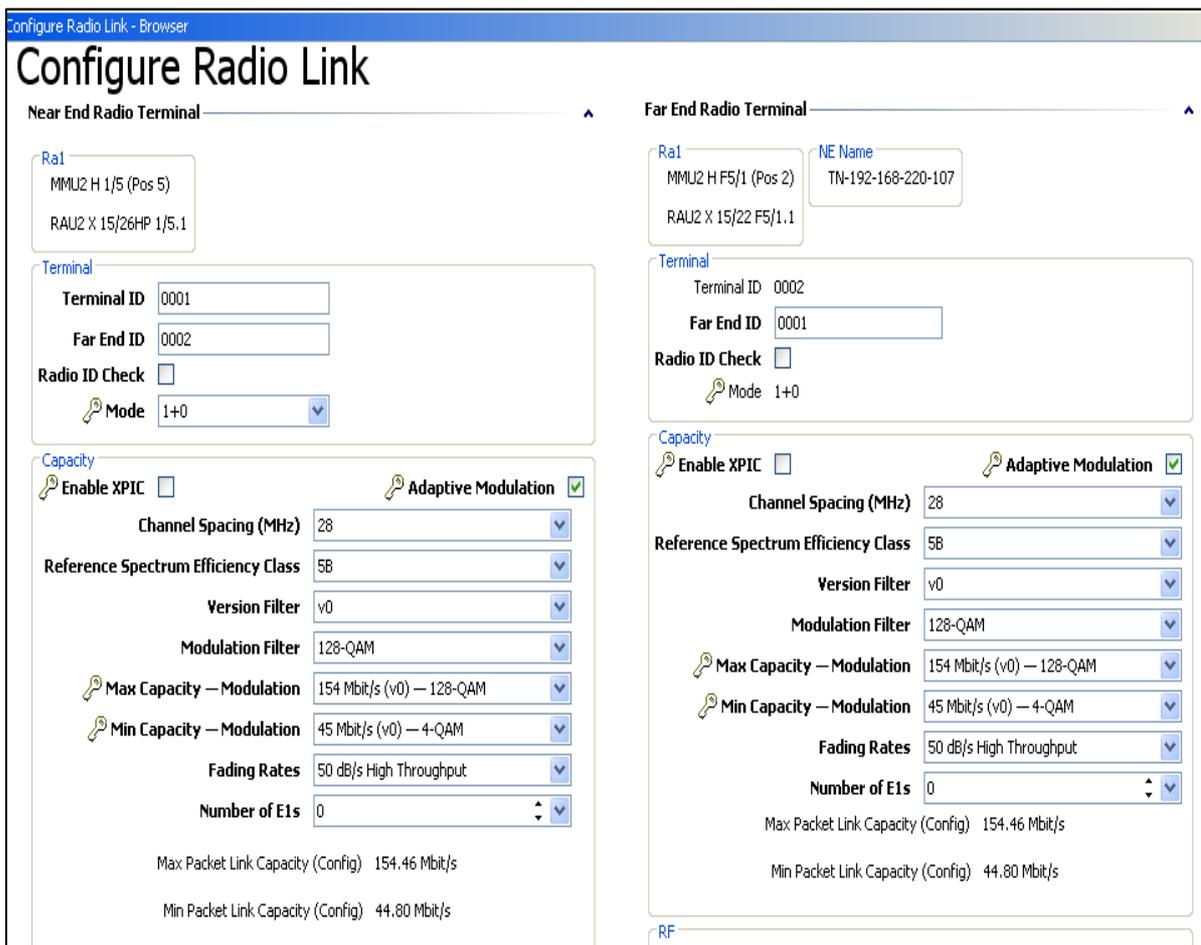


Рисунок 2.4 – Окно конфигурации связи

На рисунке 2.4 представлены следующие настраиваемые параметры:

- Terminal ID – идентификатор «главного» терминала;
- Far End ID – идентификатор терминала на дальнем конце пролета;
- Radio ID Check – проверка идентификатора терминала
- Mode – конфигурация работы защиты на пролете;
- Enable XPIC – работа в режиме кросс-поляризации;
- Adaptive Modulation – режим адаптивной модуляции;
- Channel Spacing – ширина частотного канала;
- Reference Spectrum Efficiency Class – тип спектральной маски;
- Max Capacity - Modulation – максимальный порядок модуляции;
- Min Capacity - Modulation – минимальный порядок модуляции;

После изменения конфигурации связи, следует включить передатчик на локальном модуле, так как модуль выключает передатчик автоматически при разрыве связи, который происходит при изменении конфигурации связи. Сделать это можно в окне “Alarms and Status”, которое представлено на рисунке 2.5.

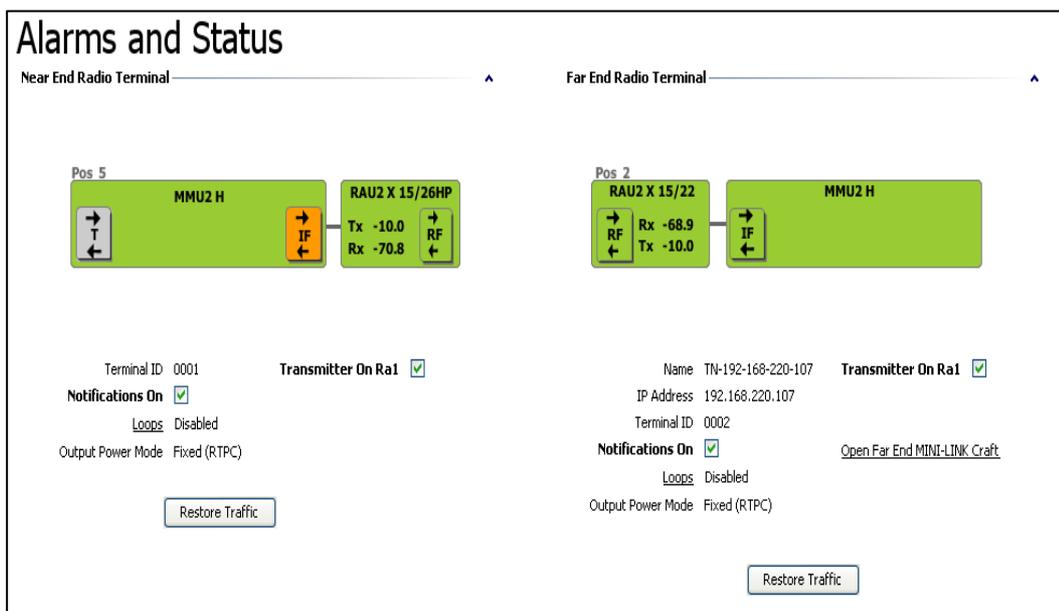


Рисунок 2.5 – Вид окна состояния модулей

Также, можно посмотреть состояние мультиплексора RL-IME, что показано на рисунке 2.6 ниже. Можно заметить, что модуль может рассчитать минимальную (для режима адаптивной модуляции – скорость минимально выбранного порядка модуляции) и максимальную скорости передачи и измерить текущую скорость. В таблице 2.1 приведены максимальные скорости передачи данных для различных видов модуляции.

RL-IME 1/7/100 - Alarms and Status

RL-IME Status

	Radio Link Bonding	Radio Link Bonding Status	Notifications	Speed (Mbit/s)	Min Speed (Mbit/s)	Max Speed (Mbit/s)	Max Supported Links
RL-IME 1/7/100	Disabled	Inactive	Enabled	91.40	44.80	154.46	4

RL-IME Alarms

	Reassembly Failure	No Traffic	Degraded Service	Oversubscription Resource	Oversubscription
RL-IME 1/7/100	No Alarm	No Alarm	No Alarm	No Alarm	No Alarm

Packet Link Status

	Link Status	Speed (Mbit/s)	Min Speed (Mbit/s)	Max Speed (Mbit/s)
Packet Link 1/5/1	OK	91.40	44.80	154.46

Рисунок 2.6 – Вид окна состояния RL-IME

На рисунке 2.6 представлены параметры такие как:

Terminal ID – четырехзначный идентификатор (заглавные/строчные буквы и цифры) терминала на ближнем конце пролета. Вводим четырехзначный номер БС.

Far End ID – четырехзначный идентификатор терминала на дальнем конце пролета. Также вводим БС на дальнем конце пролета.

Radio ID Check – проверять или нет идентификатор терминала на дальнем конце пролета. Если опция включена и прописанный идентификатор не совпадает с принимаемым, будет генерироваться авария.

Mode – конфигурация работы защиты на пролете: 1+0 (без защиты), 1+1 Hot Standby (горячий резерв, оба пролета работают на одинаковой частоте, резервный передатчик выключен), 1+1 Working Standby (оба пролета работают на разных частотах одновременно, включены оба передатчика). Выбираем 1+0.

Enable XPIC – включить или нет работу в режиме кросс-поляризации (модемы должны находиться в соответствующих позициях).

Adaptive Modulation – включение режима адаптивной модуляции. Некоторые скорости в радиоканале и модуляции не будут доступны, если эта опция выключена, например, 200 Мбит/с при ширине канала 28 МГц.

Channel Spacing – ширина частотного канала. Выбираем 28 MHz.

Reference Spectrum Efficiency Class – тип спектральной маски, зависит от модуляции и выставляется согласно выданной лицензии. Стандартные значения для модуляций: 4 QAM – 2, 16 QAM – 4L, 32 QAM – 4H, 64 QAM и 128 QAM – 5B, 256 QAM и 512 QAM – 6B. Выбираем 5B.

Max Capacity – Modulation – выбор максимальной емкости радиоканала. Есть два типа модуляции – v0 и v1, v1 более предпочтителен т.к. более эффективен и позволяет выделить большую емкость.

Min Capacity – Modulation – аналогично указанному выше, только для минимально допустимой емкости (модуляции) в радиоканале. Если выставить оба значения одинаковыми, РРЛ будет удерживать емкость радиоканала постоянной.

Так же в данных разделах можно выбирать максимальные и минимальные скорости при различных модуляциях, таблица соответствующих скоростей приведена ниже.

Таблица 2.1 – Скорости для M-QAM

Вид модуляции	Максимальная скорость	Минимальная скорость
4-QAM	45 Мбит/с	45 Мбит/с
16-QAM	91 Мбит/с	45 Мбит/с
32-QAM	112 Мбит/с	45 Мбит/с
64-QAM	134 Мбит/с	45 Мбит/с
128-QAM	154 Мбит/с	45 Мбит/с
256-QAM	171 Мбит/с	45 Мбит/с

Number of E1s – количество E1, выделяемых в радиоканале. Минимальное количество 0, максимальное зависит от максимальной емкости радиоканала, но не более 80-ти.

После установки всех параметров, настройки радиосвязи необходимо сохранить, нажав кнопку Save в верхней левой части окна MINI-LINK Craft.

Таблица 2.1 – Максимальные скорости передачи для соответствующих видов модуляции

Вид модуляции	Максимальная скорость
4-QAM	45 Мбит/с
16-QAM	91 Мбит/с
32-QAM	112 Мбит/с
64-QAM	134 Мбит/с
128-QAM	154 Мбит/с
256-QAM	171 Мбит/с
512-QAM	200 Мбит/с

В лабораторной работе рассчитывается зависимость полосы частот, которую занимает сигнал, от выбранного вида модуляции. Для сигнала с квадратурной амплитудной модуляцией полоса этого сигнала по уровню -3 дБ будет равняться символьной скорости [2]. Полученные значения представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Зависимость полосы частот от вида модуляции

Вид модуляции	Максимальная битовая скорость	Символьная скорость (полоса частот)
4-QAM	45 Мбит/с	22.5 МГц
16-QAM	91 Мбит/с	22.75 МГц
32-QAM	112 Мбит/с	22.4 МГц
64-QAM	134 Мбит/с	22.3 МГц
128-QAM	154 Мбит/с	22 МГц
256-QAM	171 Мбит/с	21.38 МГц
512-QAM	200 Мбит/с	22.2 МГц

По полученным данным можно сделать следующий вывод – чем выше порядок модуляции, тем эффективнее используется полоса частот, так как в одном символе содержится большее число бит.

Также, проводится исследование зависимости скорости передачи данных от выбранного порядка модуляции. Результаты представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Зависимость скорости передачи данных от вида модуляции

Максимальный порядок модуляции	Минимальный порядок модуляции	Скорость передачи данных
4-QAM	4-QAM	45 Мбит/с
16-QAM		90.4 Мбит/с
32-QAM	4-QAM	90.4 Мбит/с
64-QAM		
128-QAM		
256-QAM		
512-QAM		

По полученным данным можно сделать вывод, что при включенном режиме адаптивной модуляции, когда модуль автоматически выбирает оптимальный вид модуляции, чтобы сохранить требуемое качество связи, жертвуя при этом пропускной способностью.

В лабораторной работе оценка вероятности битовой ошибки (BER) от SNR для различных уровней модуляции от 4-QAM до 512-QAM (рис. 2.7)

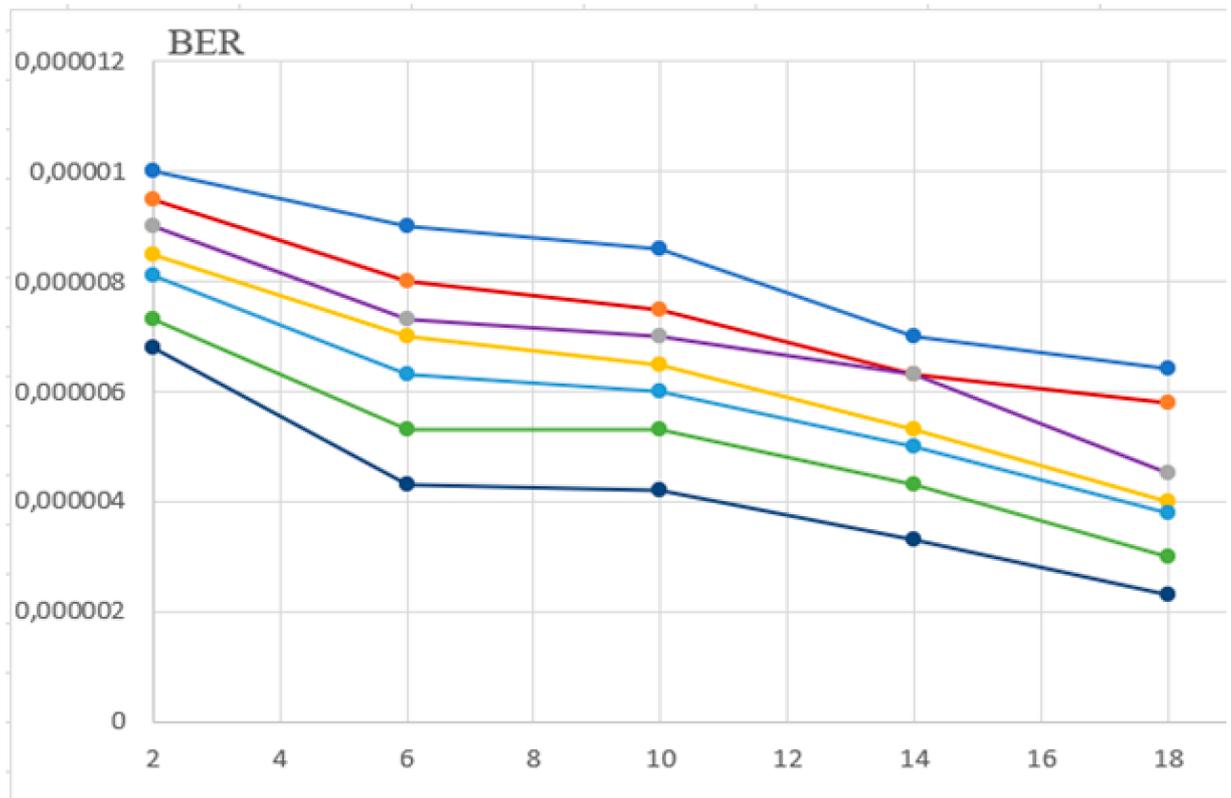


Рисунок 2.7 – Зависимость BER от SNR (дБ) снизу-вверх 4-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM, 256-QAM, 512-QAM)

Из рисунка 2.7 видно, что при увеличении SNR - BER уменьшается для всех уровней модуляций, при увеличении уровня от 4-QAM до 512-QAM величина ошибки - BER увеличивается, но скорость передачи при 512-QAM наибольшая. Из этого следует вывод, что при больших SNR можно использовать высокие уровни модуляции, а при малых SNR надо переходить на низкие уровни модуляции в ущерб потери скорости.

3. Задание на выполнение лабораторной работы

- 1) Произвести конфигурирование и мониторинга оборудования MINI-LINK, используется программное обеспечение MINI-LINK Craft 15B
- 2) Произвести обзор состава локального модуля и состояния его блоков (рис. 2.2)
- 3) Произвести обзор состава удалённого модуля и состояния его блоков, выполнить конфигурирование связей, сделать настройку параметров (рис. 2.4)
- 4) После изменения конфигурации связи, следует включить передатчик на локальном модуле. Посмотреть состояние мультиплексора RL-IME (рис. 2.6).
- 5) Рассчитать минимальную (для режима адаптивной модуляции – скорость минимально выбранного порядка модуляции) и максимальную скорости передачи и измерить текущую скорость. В таблице 2.1 приведены максимальные скорости передачи данных для различных видов модуляции.
- 6) После установки всех параметров, настройки радиосвязи. необходимо сохранить, нажав кнопку Save в верхней левой части окна MINI-LINK Craft.
- 7) Произвести исследование зависимости скорости передачи данных от выбранного порядка модуляции (таб. 2.3).
- 8) Произвести оценку вероятности битовой ошибки (BER) от SNR для различных уровней модуляции от 4-QAM до 512-QAM (рис. 2.7)

4 Содержание отчета по лабораторной работе

1. Сформулируйте цель лабораторной работы, в которой укажите какие зависимости и параметры исследуются в лабораторной работе.
2. Представьте упрощенную структурную схему лабораторной установки с указанием назначенных отдельным элементам системы идентификаторов.
3. Выполните протокол исследований в виде копий экрана для режима тестирования в соответствии с заданием. Приведите текстовые пояснения полученных результатов.
4. Приведите исследования в соответствии с п.2. Приведите таблицы и графики зависимостей BER от SNR для различных уровней модуляции от 4-

QAM до 512-QAM.

5. Сформулируйте выводы по работе, в которых приведите подробный анализ и сопоставление расчетных и экспериментальных данных, и выполните подробное обсуждение результатов.

5 Контрольные вопросы

- 1) Охарактеризуйте отличие трех вариантов оборудования MINI-LINK по их характеристикам и области использования.
- 2) Охарактеризуйте состав и назначение элементов субблока радиointерфейса радиоблока *MINI-LINK*.
- 3) Охарактеризуйте состав и назначение элементов микроволнового субблока радиоблока *MINI-LINK*.
- 4) Охарактеризуйте, какие элементы структурной схемы радиоблока *RAU* обеспечивают работу оборудования в режиме тестирования.
- 5) Для чего предназначена кнопка *Loop* в терминальном окне *MSM*? Опишите пример использования.
- 6) Перечислите последовательность действий оператора *MSM* для выключения передающей части на локальном и удаленном сайтах.
- 7) Дайте анализ результатам исследований.
- 8) Объясните зависимость BER от SNR для различных уровней модуляции.

Заключение

В лабораторной работе производится знакомство с современной цифровой радиорелейной системой Ericsson MINI-LINK. Изучается порядок конфигурирования аппаратной-программной структуры системы. Рассматривается практика работы с интерфейсом системы, задания параметров для работы системы. Проводятся исследования основных характеристик системы, включая основные характеристики качества системы такие как зависимость помехоустойчивость системы для разных уровней используемой модуляции.

Литература

1. Голиков, А. М. Системы радиосвязи и сети телерадиовещания: Курс лекций, компьютерные лабораторные работы, компьютерный практикум, задание на самостоятельную работу [Электронный ресурс] / А. М. Голиков. — Изд. перераб. и доп. — Томск: ТУСУР, 2018. — 354 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/8848>
2. MINI-LINK E и E Micro. Техническое описание / Эрикссон Корпорация АО. — Режим доступа: http://files.radioscanner.ru/files/download/file10353/mini_link_e_i_emicro_tehniceskoe_opisanie.pdf

ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное)
Параметры приемной части радиоблоков и
структурная схема радиоблока

Таблица П1 — Пороговая чувствительность приемников *RAU1* и *RAU2*

Радиоблок	Скорость трафика, Мбит/с	Пороговый уровень при $BER=10^{-3}$, дБм		Пороговый уровень при $BER=10^{-6}$, дБм	
		Типовой	Гарантированный	Типовой	Гарантированный
18-Е	2 2	-90	-89	-86	-85
	4 2	-87	-86	-83	-82
	8 2	-84	-83	-80	-79
	17 2+2	-81	-80	-77	-76

Таблица П2 — Пороговая чувствительность приемника *RTU*

Радиоблок	Скорость трафика, Мбит/с	Пороговый уровень при $BER=10^{-3}$, дБм		Пороговый уровень при $BER=10^{-6}$, дБм	
		Типовой	Гарантированный	Типовой	Гарантированный
23-Е	1 2	-92	-91	-88	-87
	2 2	-90	-89	-86	-85

Таблица П3 — Коэффициент усиления антенн (дБм) на средней частоте

Диаметр антенны, м	Средняя частота диапазона							
	7/8 ГГц	13 ГГц	15 ГГц	18 ГГц	23 ГГц	26 ГГц	28 ГГц	38 ГГц
0,2	—	—	—	—	31,8	—	34,6	36,6
0,3	—	—	32,1	34,4	36,2	37,3	38,1	40
0,6	31	36	36,6	39,2	40	41,5	42,4	44,3
1,2	37	41,8	42,7	44,6	46	47,1	48	—
1,8	41	45,3	46,4	48,5	49,5	—	—	—
2,4	42,9	—	—	—	—	—	—	—
3,0	44,8	—	—	—	—	—	—	—

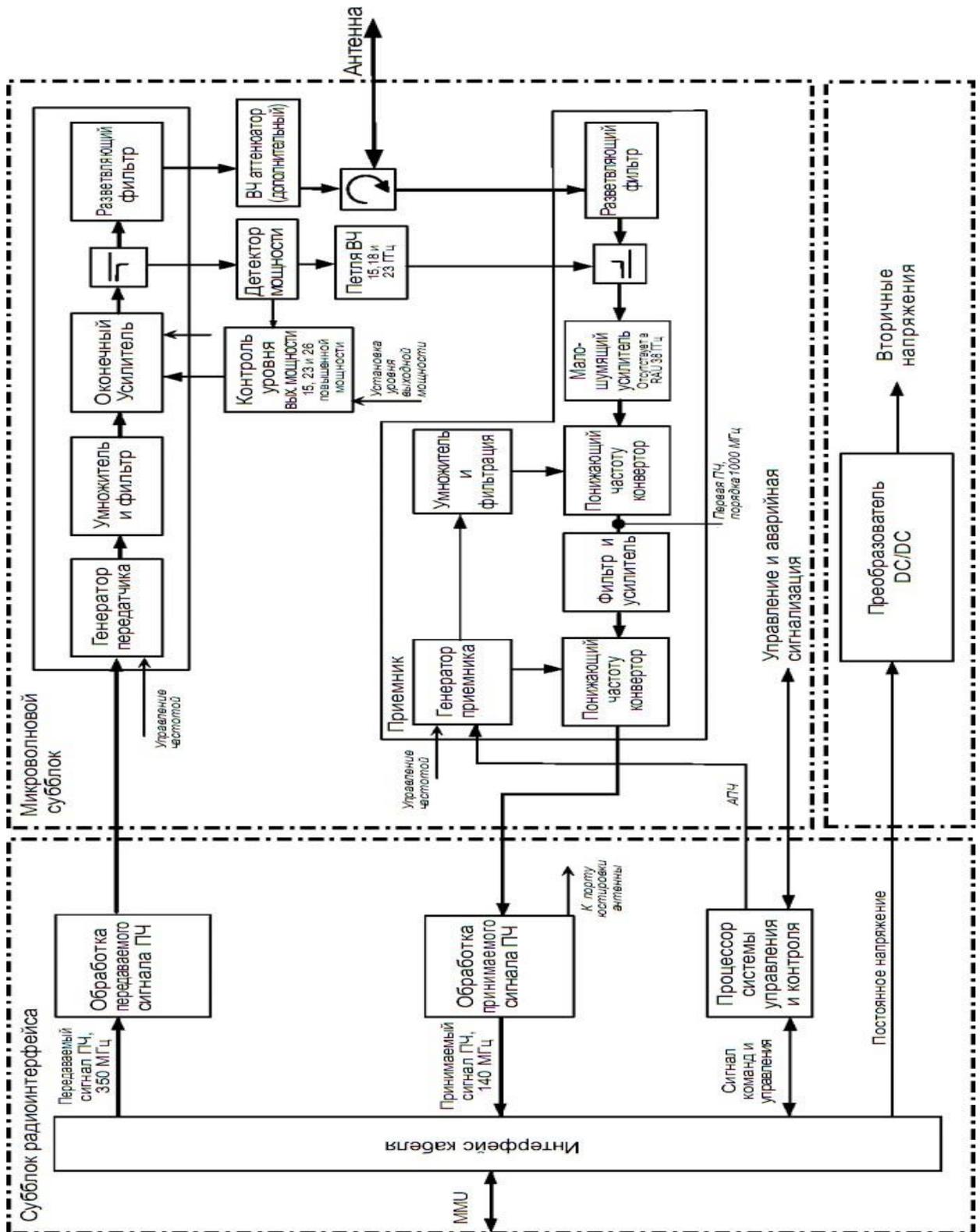


Рисунок П.1 — Структурная схема радиоблока RAU1 (вариант 15-Е, 18-Е, 23-Е, 26-Е и 38-Е)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное)

Показатели качества работы радиорелейных линий

Различают два состояния, в которых может находиться цифровой тракт – готовности и неготовности. Период времени неготовности начинается с интервала времени, содержащего 10 последовательных секунд со значительным количеством ошибок (SES). Указанные 10 секунд рассматриваются как часть времени неготовности. Период времени готовности начинается с интервала времени, содержащего 10 последовательных секунд без значительного количества ошибок (SES). При анализе характеристик качества системы период времени неготовности исключается, т.е. показатели качества по ошибкам оцениваются только в период состояния готовности цифрового тракта.

При проектировании ЦРРЛ рассчитывается значение SESR, а также значение коэффициента неготовности $K_{нг}$, обусловленного процессом распространения радиоволн.

Нормы на показатели качества рекомендуются Международным Союзом Электросвязи (МСЭ). Основной является рекомендация МСЭ-Т G.826. При проектировании ЦРРЛ должны выполняться обе нормы (SESR и $K_{нг}$).

Следует учесть, что в общем случае неготовность радиолинии складывается из неготовности, обусловленной процессом распространения радиоволн и неготовности, вызванной отказами оборудования. В Методике НИИР принято допущение, что неготовность по причине распространения радиоволн составляет одну треть от общего коэффициента неготовности, указанного в таблице.

Расчет качественных показателей пролетов ЦРРЛ

Основные положения

В качестве качественных показателей пролета любой радиорелейной линии используют два параметра, которые мы и будем рассчитывать:

1. Коэффициент неготовности;
2. Коэффициент секунд со значительным количеством ошибок.

Коэффициент неготовности линии $K_{нг}$ складывается из следующих величин.

$$K_{нг} = P_{сум} + P_{дож} + P_{обор}, \quad (П.1)$$

где $P_{сум}$ - общая вероятность нарушения радиосвязи, вызванная многолучевым замиранием;

$P_{дож}$ - вероятность нарушения радиосвязи, вызванная дождем;

$P_{обор}$ - вероятность нарушения радиосвязи, вызванная отказом оборудования.

Прежде, чем приступать к расчету вероятностей нарушения связи, разберемся с таким понятием, как запас на замирание.

Расчет необходимого запаса на замирание

Атмосферные возмущения оказывают влияние на условия передачи на радиорелейных линиях прямой видимости. Уровень принимаемого сигнала изменяется во времени и характеристики системы определяются вероятностью того, что уровень сигнала упадет ниже порогового значения, или спектр принимаемого сигнала будет сильно искажен.

Рассмотрим упрощенную структурную схему интервала радиолинии и соответствующую диаграмму уровней сигнала (рисунок 2.1). Очевидно, что качество работы линии связи, определяется уровнем сигнала на входе приемника $P_{пр}$ и возможными отклонениями этого уровня при замираниях.

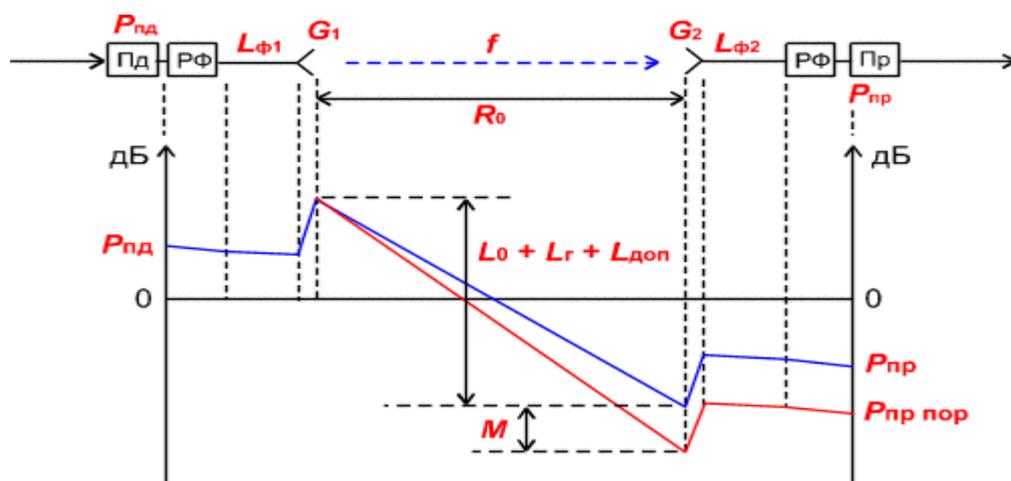


Рисунок П.2 – Диаграмма уровней сигнала на пролете РРЛ

На диаграмме уровней видно, что сигнал излучается передатчиком с уровнем $P_{нд}$, проходит через разделительный фильтр (РФ), в котором уровень упадет за счет внутренних потерь и поступает через фидерную линию в передающую антенну с коэффициентом усиления G_1 . За счет потерь в фидерной линии $L_{ф1}$ уровень сигнала еще уменьшится, а в передающей антенне увеличится на величину G_1 .

При распространении сигнала по интервалу РРЛ (протяженностью R_0 , на рабочей частоте f) уровень сигнала упадет за счет ослабления свободного пространства, потерь в газах атмосферы и некоторых дополнительных потерь. Общее ослабление сигнала за счет этих причин может достигнуть 130-140 дБ и больше.

В приемной антенне уровень сигнала увеличится на величину G_2 , затем уменьшится в приемной фидерной линии, в разделительном фильтре и

поступит на вход приемника с уровнем $P_{\text{ПР}}$. Это значение получается в отсутствии замираний сигнала на пролете РРЛ.

Запас на замирания M является разницей между уровнем сигнала на входе приемника $P_{\text{ПР}}$ и его пороговым значением $P_{\text{ПР пор}}$, которое определяется из параметров конкретной аппаратуры цифровых РРЛ для заданной величины $k_{\text{ош}}$ (10^{-3} или 10^{-6}).

Уровень сигнала на входе приемника можно определить по следующей формуле:

$$P_{\text{ПР}} = P_{\text{ПД}} + G_1 + G_2 - L_0 - L_{\phi 1} - L_{\phi 2} - L_{\Gamma} - L_{\text{РФ}} - L_{\text{ДОП}}, \quad (\text{П.2})$$

где $P_{\text{ПД}}$ – уровень мощности передатчика, дБм;

G_1, G_2 – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн;

$L_{\phi 1}, L_{\phi 2}$ – ослабление сигнала в фидерных линиях ($\Phi 1, \Phi 2$), дБ;

При отсутствии фидера (когда приемопередатчики объединены с антенной в виде моноблока) необходимо учитывать конструктивные особенности устройства объединения, как правило, в этих случаях потери в фидерах можно принять равными 0 дБ. При больших диаметрах антенн соединение проводится коротким отрезком гибкого волновода, потери в котором $L_{\phi 1} = L_{\phi 2} = 0.5 \text{ дБ}$;

$L_{\text{РФ}}$ – определяется из параметров аппаратуры. Обычно значение ослабления в разделительных фильтрах соответствует сумме потерь в передающем и приемном устройствах. При моноблочной конструкции, данные на уровень мощности передатчика и пороговые значения уровня сигнала на входе приемника, часто относятся к точкам, соответствующим уровням на антенном волноводном соединителе (другими словами, значения уровней уже заложены потери в разделительных фильтрах). В этих случаях величина потерь $L_{\text{РФ}} = 0$. При разнесенной конструкции приемопередатчиков и антенн, потери в РФ составляют 4 - 5 дБ в зависимости от типа и длины фидера.

$L_{\text{ДОП}}$ – дополнительные потери, складывающиеся из потерь в антенных обтекателях $L_{\text{АО}}$ и потерь от перепада высот приемной и передающей антенн $L_{\text{ПВ}}$ ($L_{\text{ДОП}} = 1 - 2 \text{ дБ}$);

L_0 – ослабление радиоволн при распространении в свободном пространстве рассчитывается по следующей формуле:

$$L_0 = 20 \cdot \lg(4.189 \cdot 10^4 R_0 \cdot f), \text{ дБ}, \quad (\text{П.3})$$

где R_0 – протяженность интервала РРЛ, км;

f – рабочая частота, ГГц.

L_{Γ} – атмосферные потери (потери в газах) рассчитываются по формуле:

$$L_{\Gamma} = (\gamma_0 + \gamma_H) \cdot R_0 = \gamma_{\text{СУМ}} \cdot R_0, \quad (\text{П.4})$$

где γ_0 и γ_H – погонные затухания в водяных парах и атомах кислорода атмосферы, рассчитываемые следующим образом.

Расчет атмосферных потерь

Атмосферные потери, в основном, складываются из потерь в атомах кислорода и в молекулах воды. Практически полная непрозрачность атмосферы для радиоволн наблюдается на частоте 118.74 ГГц (резонансное поглощение в атомах кислорода), а на частотах больше 60 ГГц погонное затухание превышает 15 дБ/км. Ослабление в водяных парах атмосферы зависит от их концентрации и весьма велико во влажном теплом климате и доминирует на частотах ниже 45 ГГц.

Погонные потери в атомах кислорода (дБ/км):

$$\gamma_0 = \left[7.19 \cdot 10^{-3} + \frac{6.09}{f^2 + 0.227} + \frac{4.81}{(f - 57)^2 + 1.5} \right] \cdot f^2 \cdot 10^{-3}, \quad (\text{П.5})$$

где f – рабочая частота, ГГц.

Эта формула справедлива для рабочих частот ниже 57 ГГц, при нормальном атмосферном давлении и при температуре воздуха +15 градусов С.

Погонные потери в водяных парах (дБ/км):

$$\gamma_H = \left[0.05 + 0.0021 \cdot \rho + \frac{3.6}{(f - 22.2)^2 + 8.5} + \frac{10.6}{(f - 183.3)^2 + 9} + \frac{8.9}{(f - 325.4)^2 + 26.3} \right] \cdot f^2 \cdot \rho \cdot 10^{-4} \quad (\text{П.6})$$

где ρ – концентрация водяных паров в атмосфере, г/м³ (обычно $\rho = 7.5 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$).

Суммарные погонные потери (дБ/км) при температуре, отличной от 15 градусов С:

$$\gamma_{\text{сум}} = [1 - (t - 15) \cdot 0.01] \cdot \gamma_0 + [1 - (t - 15) \cdot 0.06] \cdot \gamma_H, \quad (\text{П.7})$$

где t – температура воздуха в градусах С.

Таким образом, расчет запаса на замирания можно провести по следующей формуле:

$$M = P_{\text{ПР}} - P_{\text{ПР ПОР}}, \quad (\text{П.8})$$

где $P_{\text{ПР ПОР}}$ – минимально-допустимый уровень мощности сигнала на входе приемника (чувствительность приемника).

Расчет вероятности нарушения связи из-за многолучевого распространения

Метеорологические условия в пространстве, разделяющем передатчик и приёмник, могут иногда оказывать вредное воздействие на принимаемый сигнал. Лучи, которые обычно затухают в тропосфере, могут преломляться и попадать в приёмную антенну и в приёмник, где они суммируются с полезным сигналом. Амплитудно-фазовые соотношения между этими сигналами определяют результирующий сигнал на выходе приёмника.

При этом возникают два эффекта, влияющих на качество передачи сигналов. В одних случаях все компоненты полезного сигнала уменьшаются в равной степени. Это так называемые «плоские» замирания.

В других случаях подавляются только некоторые компоненты спектра, вызывая его искажения. Это так называемые «селективные» замирания. Эти два эффекта проявляются раздельно.

Плоские замирания

В отчёте 338-6 МСЭ-Р и в рекомендации 530 даются два различных метода для расчёта вероятности появления замираний для худшего месяца. Эти методы называются метод 1 и метод 2. Метод 1 используется для проектирования на начальном этапе, метод 2 - для более детального проектирования. Несмотря на то, что профиль нам известен, для пролёта проведём расчёт первым методом.

Измерения проведённые в различных частях мира (отчёт 336-8 МСЭ-Р и рекомендация 530), показали, что вероятность снижения уровня принимаемого сигнала на M дБ по сравнению с уровнем сигнала в свободном пространстве (вероятность нарушения связи), равна:

$$P_{\text{плоск}} = P_0 \cdot 10^{-M/10} \quad \%, \quad (\text{П.9})$$

где M – запас на замирание, дБм;

P_0 – вероятность появления замирания, %, которая находится по следующей формуле:

$$P_0 = K \cdot R_0^{3.6} \cdot f_B^{0.89} \cdot (1 + |E_h|)^{-1.4}, \quad \% \quad (\text{П.10})$$

где E_h – наклон пролёта (миллирадиан):

$$E_h = \frac{|h_1 - h_2|}{R_0} \quad \text{мрад}, \quad (\text{П.11})$$

где h_1, h_2 – абсолютные высоты подвеса антенн, м;

K – геоклиматический коэффициент, его можно оценить по данным замираний для среднего худшего месяца.

При отсутствии таких данных можно использовать следующие эмпирические соотношения для сухопутных трасс:

$$K = 10^{-5.1} \cdot P_L^{1.5} \cdot M \quad (\text{П.12})$$

где P_L – это процент времени, в течении которого средний коэффициент преломления в самых нижних 100 м атмосферы меньше, чем – 100 N/км. В методике Nera приведены значения P_L для четырёх различных месяцев. Выбирается месяц, имеющий наибольшее значение P_L . По рисункам в находим значение $P_L = 5$. $M=10^{-0.2}$ этот коэффициент используется при сильно изрезанных профилях пролётов, когда не имеет смысла определять среднее значение угла касания. В нашем случае $M=1$.

Селективные замирания

Характеристики радиорелейных линий прямой видимости могут быть серьёзно ухудшены селективными замираниями из-за амплитудных и фазовых искажений в полосе сигнала. Эти многолучевые (или селективные) замирания могут появиться в результате отражений от поверхности или аномалий в атмосфере, например, большого градиента в атмосферном волноводе.

При неизменной во времени горизонтально расслоенной атмосфере вертикальный градиент преломления в атмосфере вызывает появление нескольких лучей распространения между передатчиком и приёмником на линии прямой видимости.

Если через τ обозначить относительное время задержки между двумя путями распространения радиоволн, то относительная фаза между двумя сигналами будет равна $2\pi f\tau$, являясь функцией частоты f . Т.е. амплитуда и фаза принятого сигнала изменяется с частотой. Такое изменение сигнала на радиолинии в зависимости от частоты называется селективным замиранием.

Влияние селективного замирания на цифровую радиорелейную линию можно кратко описать следующим образом:

- уменьшается отношение сигнал/шум и, следовательно, увеличивается вероятность ошибки (BER);
- искажается форма импульса, увеличивая межсимвольную интерференцию и вероятность ошибки;
- увеличиваются взаимные помехи между ортогональными несущими, потоками I и Q и, следовательно, увеличивается BER.

Имеется целый ряд различных методов прогноза нарушений связи, вызванных селективными замираниями. Фирма “Nera” выбрала использование метода сигнатур, описанных в отчёте 784-3 МСЭ-Р.

Этот метод достаточно хорошо согласуется с результатами измерений и ясно показывает способность радиоаппаратуры противостоять селективным замираниям.

Вероятность появления селективного замирания равна:

$$P_{\text{СЕЛ}} = 4.3 \cdot 10^{-1} \cdot \eta \cdot sf \cdot \frac{\tau_m^2}{\tau_0} \quad \%, \quad (\text{П.13})$$

где $sf = 1.8 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент сигнатуры оборудования;

τ_m – типовое значение задержки отражённого сигнала на пролёте,

нс, определяется по следующей формуле: $\tau_m = 0.7 \cdot \left(\frac{R_0}{50}\right)^{1.5}$;

τ_0 – время задержки отражённого сигнала во время измерения кривых сигнатуры; $\tau_0 = 6,3$ нс;

η – коэффициент активности замирания, находится по следующей формуле:

$$\eta = 1 - \exp\left(-0.2 \cdot \left(\frac{P_0}{100}\right)^{\frac{3}{4}}\right) \quad (\text{П.14})$$

Общая вероятность нарушения радиосвязи, вызванная многолучевым замиранием, равна сумме вероятностей нарушений, вызванных плоским и селективным замиранием:

$$P_{\text{сум}} = P_{\text{плоск}} + P_{\text{сел}} \quad \%, \quad (\text{П.15})$$

В методике Nera нет детального расчета параметра SESR. Его значение будем брать из программы Territories. Упрощенно этот расчет можно отобразить следующей формулой:

$$\text{SESR} = \left(\frac{K_{\text{инт}} - 1}{\phi_{\text{инт}}} + 1 \right) \cdot T_{\text{инт}} \cdot \varphi_{\text{инт}} + T_0 \cdot \varphi_{\tau 0}, \quad (\text{П.16})$$

где $T_{\text{инт}}$ – процент времени, в течение которого величина коэффициента ошибок на

выходе ЦРРЛ превосходит максимально допустимый коэффициент ошибок из-

за многолучевых (интерференционных) замираний на интервале;

T_0 – процент времени, в течение которого величина коэффициента ошибок на

выходе цифровой РРЛ превосходит максимально допустимый коэффициент

ошибок из-за субрефракционных замираний, происходящих по причине экрани-

рующего влияния препятствий при субрефракции;

$K_{\text{инт}}$ – коэффициент интерференции (обычно $K_{\text{инт}} = 1$);

$\varphi_{\text{инт}}$ – коэффициент готовности в условиях интерференционных замираний;

$\varphi_{\tau 0}$ – коэффициент готовности в условиях субрефракционных замираний.

Расчет вероятности нарушения связи, вызванного дождем

Передача СВЧ-сигнала подвержена влиянию осадков. Дождь, снег, частички льда и град ослабляют и рассеивают СВЧ-сигнал, что определяет готовность системы с точки зрения качества передачи. Энергия ослабляется из-за переизлучения (рассеяние) и поглощения (нагревания).

Так как радиоволны представляют собой переменное во времени электромагнитное поле, оно наводит в дождевой капле дипольный момент. Диполь дождевой капли изменяется во времени так же, как и радиоволна и поэтому действует как антенна, переизлучающая энергию. Дождевая капля представляет собой антенну с очень небольшой направленностью и какая-то доля энергии переизлучается по различным направлениям, что приводит к частым потерям энергии. Когда длина волны меньше размера дождевых капель, большая часть энергии уходит на нагревание капель. Напряжённость поля радиоволны сильно меняется из-за наведения дипольного момента.

Увеличение дождевых капель приводит к изменению их формы, они приобретают форму отличную от сферической. Это отклонение от сферической формы вызывает их растяжение в горизонтальном направлении. Следовательно, капли будут ослаблять горизонтально поляризованную волну больше, чем вертикально поляризованную. Это значит, что вертикальная поляризация предпочтительней на высоких частотах, где доминирует «простой» радиолинии, вызванный дождём.

Поскольку дождь имеет тенденцию идти зарядами (особенно дожди с высокой скоростью), только часть пролёта радиолинии будет подвержена влиянию дождя.

Эффективная длина пролёта, содержащего дождевые заряды, определяется выражением:

$$\psi = \frac{R_0}{1 + \frac{R_0}{35 \cdot \exp(-0.015 \cdot I)}} \quad \text{км}, \quad (\text{П.17})$$

где $I = 70 \frac{\text{мм}}{\text{ч}}$ – интенсивность дождя (значение было приведено в исходных данных, выбирается в зависимости от региона).

Затухание на пролёте, вызванное дождём, может быть найдено по формуле:

$$A = \psi \cdot k \cdot R^\alpha, \quad \text{дБ} \quad (\text{П.18})$$

где $k = 0.00454$, $\alpha = 1.327$ – коэффициенты регрессии для данного частотного диапазона, как функции частоты и поляризации (взяты из методики фирмы Nera). Расчёт неготовности, вызванной дождём, будет вестись для горизонтальной поляризации, т.к. в этом случае затухание в осадках электромагнитной волны выше.

Неготовность, вызванная дождём, может быть найдена по формуле:

$$P_{\text{ДОЖ}} = 10^{11.628 \cdot \left(-0.546 + \sqrt{0.29812 + 0.172 \cdot \log\left(0.12 \cdot \frac{A}{M}\right)} \right)} \quad (\text{П.19})$$

Чтобы избежать мнимых значений, необходимо использовать округленное значение $\frac{A}{M} = 0.155$, если $\frac{A}{M} < 0.155$.

Учет рефракции радиоволн

Рефракцией называется искривление траектории волн, обусловленное неоднородным строением тропосферы. Коэффициент преломления в тропосфере:

$$n = \sqrt{\varepsilon} \approx 1 + \frac{\varepsilon + 1}{2}, \quad (\text{П.20})$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха, которая находится:

$$\varepsilon = 1 + \left(\frac{1.552 \cdot 10^{-4}}{T} \right) \cdot \left(P + \frac{4810 \cdot e}{T} \right), \quad (\text{П.21})$$

где $T = 273^\circ\text{C} + t^\circ\text{C}$ – температура воздуха по абсолютной шкале;

P – общее давление воздуха, ГПа (1 ГПа = 1 мбар);

e – давление водяного пара, ГПа;

Коэффициент преломления n , также как и ε , в интересующем нас диапазоне частот по величине близок к единице, поэтому чаще пользуются коэффициентом преломления выраженном в «N–единицах»:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \approx \left[\frac{\varepsilon - 1}{2} \right] \cdot 10^6, \quad (\text{П.22})$$

Так как P, e и T являются функциями высоты, N также является функцией высоты. Для нормальной атмосферы (стандартной, хорошо смешанной) изменение N с высотой определяется выражением:

$$N(h) = 315 \cdot e^{-(0.316 \cdot h)}, \quad (\text{П.23})$$

где h – высота над поверхностью Земли, км.

Под величиной a_3 понимают такое значение радиуса Земли, при котором траекторию радиоволн можно считать прямолинейной.

$$\frac{1}{a_3} = \left(157 + \frac{dN}{dh} \right) \cdot 10^{-6}, \quad (\text{П.24})$$

Для определения кривизны луча на практике используется понятие коэффициента рефракции:

$$K = \frac{1}{\left(1 + R_3 \cdot \frac{dN}{dh} \cdot 10^{-6} \right)}, \quad (\text{П.25})$$

Для нормальной атмосферы $dN/dh = -40$. Соответствующее значение K по формуле (2.25) равно:

$$K = \frac{1}{\left(1 + 6370 \cdot (-40) \cdot 10^{-6} \right)} = \frac{4}{3} \quad (\text{П.26})$$

Это значение и будем использовать при моделировании распространения радиоволн в дальнейших расчетах.