

**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)**

С. А. Владимиров

**ТЕОРИЯ, СИСТЕМЫ И
УСТРОЙСТВА
ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

Методические указания по курсовому проектированию

СПб ГУТ)))

**Санкт-Петербург
2021**

УДК XXX.XXX.X (XXX)

ББК XX.XXX.X хХХ

В 57

Рецензент

— —

Рекомендован к печати редакционно-издательским советом СПбГУТ

Владимиров, С. А.

В 57 Теория, системы и устройства передачи данных : методическое руководство по курсовому проектированию / С. А. Владимиров ; СПбГУТ. — СПб, 2021. — 59 с.

Предназначены для обучения и методического руководства студентов при выполнении курсового проекта в рамках учебного курса по дисциплине «Теория, системы и устройства передачи данных». Представленные разделы руководства дополняют и углубляют теоретические знания и позволяют приобрести практический навык в применении моделей и методов расчета для систем и устройств передачи данных.

Предназначен для студентов, обучающихся по направлению 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника».

УДК XXX.XXX.X (XXX)

ББК XX.XXX.X хХХ

© Владимиров С. А., 2021

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2021

Содержание

Раздел 1. Задание на курсовое проектирование	4
Раздел 2. Расчет параметров передачи ВОЛС.....	15
Раздел 3. Расчет пропускной способности системы ПД	23
Раздел 4. Выбор способа и расчет параметров модуляции в каналах системы ПД.....	28
Раздел 5. Расчет помехоустойчивости каналов проектируемой системы ..	46
Раздел 6. Разработка и описание структурной схемы цифровой системы передачи данных.....	50
Раздел 7. Моделирование канальных сигналов цифровой системы передачи данных	57

Раздел 1

Задание на курсовое проектирование

1.1. Цели курсового проектирования

Научиться по заданным исходным данным рассчитывать и моделировать технические параметры и характеристики, разрабатывать и проектировать элементы и структуру цифровой системы передачи данных (ПД) для заданного сегмента операторской сети. Получить практический опыт составления технического задания и технического проектирования системы ПД.

1.2. Задание на курсовой проект

Разработать цифровую систему передачи данных на участке операторской сети между населенными пунктами А — место размещения центрального узла муниципальной сети оператора связи и В — место размещения ядра операторской сети, смотри рисунок 1.1, произвести расчет структуры и ее элементов, в том числе:

- составить и представить техническое задание на систему передачи трафика для сегмента операторской сети;
- разработать и представить структурную схему предлагаемой цифровой системы передачи с необходимой детализацией функциональных элементов, однозначно отображающую принцип работы системы, применяемые технологии и способы передачи данных;
- рассчитать, смоделировать и представить необходимые технические параметры, характеристики сигналов и элементов системы передачи, сигнальные созвездия, графики и прочие параметры в соответствии с методическими указаниями курсового проекта.

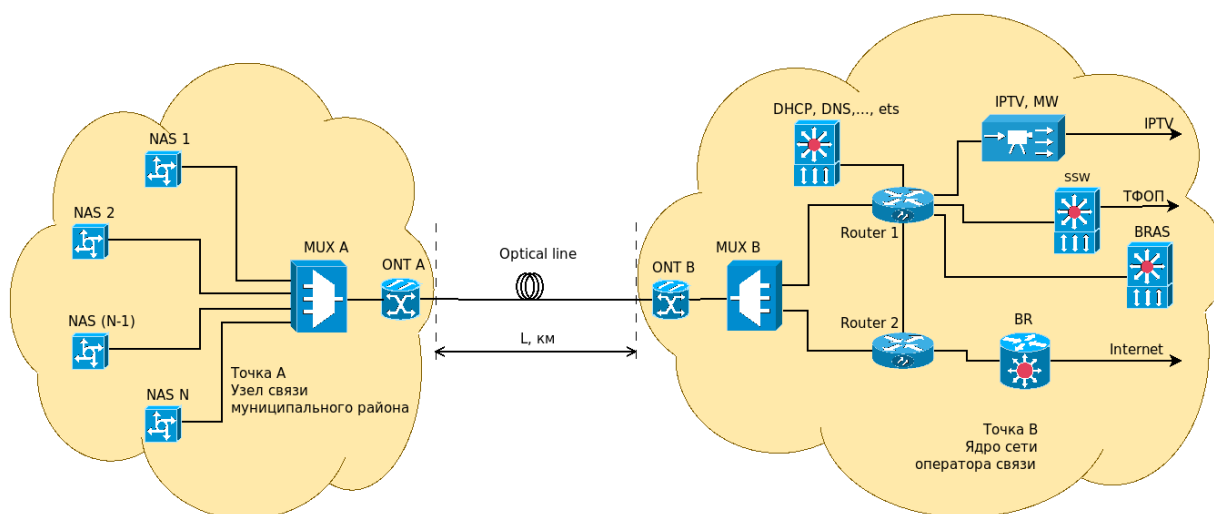


Рис. 1.1. Участок операторской сети между населенными пунктами А и В.

Оформить курсовой проект в виде пояснительной записки по проекту и защитить разработку, доказав ее функциональное назначение, работоспособность и соответствие заданным исходным данным.

1.3. Исходные данные задания для курсового проектирования

Исходные данные задания для курсового проектирования выдает и подписывает преподаватель.

Состав исходных данных обязательного задания (пределы значений величин):

1. Среда передачи сигналов — одномодовая волоконно-оптическая линия связи для окон прозрачности со средними длинами волн $\lambda = 1310nm$ и $\lambda = 1550nm$, выполненная кабелем типа ДПС между пунктами А и В.
2. Расстояние между населенными пунктами (L_{AB}) А и В — от 11км до 80км.
3. Количество абонентов муниципальной сети (N_a) — от 6000 до 24000.
4. Количество узлов доступа для абонентов (N_{NAS}) — от 12 до 34.
5. Распределение абонентов по узлам доступа (A_{NAS}) — $N_{\Sigma} = \sum_{N_{NAS}} A_{NAS} = N_a$
6. Минимальный коэффициент абонентской нагрузки (K_{minA}) муниципальной сети — от 0.11 до 0.43.
7. Максимальный коэффициент абонентской нагрузки (K_{maxA}) муниципальной сети — от 0.81 до 0.98.
8. Коэффициент служебного трафика (K_s) — от 0.31 до 0.47.
9. Количество частотных полос передачи данных по одному волокну (P_D) — от 2 до 7.
10. Коэффициент резервирования трафика (K_{rez}) — от 1.5 до 2.
11. Количество предоставляемых волокон для передачи трафика (N_{vol}) — от 1 до 4.

Дополнительные исходные данные расширенного задания (выполняется по желанию студента):(раздел в разработке).

1.4. Техническое задание на разработку системы ПД

Техническое задание (ТЗ) — перечень требований, условий, целей, задач, поставленных заказчиком перед исполнителем в письменном виде. Документально оформляется и выдается исполнителю работ проектно-исследовательского характера. Такое задание обычно всегда предшествует разработке проекта и призвано сориентировать разработчика на создание такого проекта, который удовлетворяет пожеланиям заказчика и соответствует условиям применения и ресурсным ограничениям.

Допускается составление технического задания и в произвольном порядке следования пунктов, но с обязательным (возможны согласования по отдельным пунктам) соблюдением рекомендаций ГОСТ и прочих руководящих документов. Для создания систем, модулей, программ, комплексов, в том числе комплексов программ требуется техническое задание по ГОСТу. Это достаточно важно, потому что именно там описаны все пункты, по которым возможны споры и разногласия между заказчиком и исполнителем при сдаче-приемке проекта или объекта.

Техническое задание на разработку системы передачи данных выполняется студентом и является обязательным разделом пояснительной записки по курсовому проектированию.

1.4.1. Требования к содержанию и оформлению ТЗ

Техническое задание должно содержать следующие разделы или подразделы:

1. основания для разработки;
2. назначение разработки;
3. требования к системе передачи;
4. требования к документации на разработку системы передачи;
5. технико-экономические показатели;
6. стадии и этапы разработки;
7. порядок контроля и приемки;
8. в техническое задание допускается включать приложения.

В разделе «Основания для разработки» должны быть указаны:

- документ (документы), на основании которых ведется разработка;
- организация, утвердившая этот документ, и дата его утверждения;
- наименование и (или) условное обозначение темы разработки.

Пример.

1. Основания для разработки системы передачи:

курсовое проектирование по дисциплине «Теория систем и устройств передачи данных» по исходным данным, полученным в электронном виде файлом:
ID_KURSOVIK_TSiUPD_Var_1_Systemzshikov_Ivan_IKVT_91.txt

В разделе «Назначение разработки» должно быть указано функциональное и эксплуатационное назначение системы или изделия.

По указаниям ГОСТ раздел «Требования к системе» должен состоять из следующих необходимых подразделов:

1. требования к системе в целом;

2. требования к функциям (задачам), включая требования к функциональным характеристикам, выполняемым системой;
3. требования к надежности;
4. условия эксплуатации;
5. требования к составу и параметрам технических средств;
6. требования к сетевой и аппаратной совместимости;
7. требования к маркировке и упаковке;
8. требования к транспортированию и хранению;
9. специальные требования.
10. требования к видам обеспечения.

Состав требований к разрабатываемой системе, включаемых в данный раздел ТЗ, устанавливают в зависимости от вида, назначения, специфических особенностей и условий функционирования конкретной системы. При необходимости в каждом подразделе приводят ссылки на действующие нормативно-технические документы (НТД), определяющие требования к системам соответствующего вида.

В подразделе «Требования к функциям (задачам) и функциональным характеристикам системы передачи» должны быть указаны требования к составу выполняемых функций, организации входных и выходных интерфейсов и аппаратных стыков, временным характеристикам и другие требования к структуре и функционированию системы, в которых могут быть приведены:

- перечень подсистем, их назначение и основные характеристики, требования к числу уровней иерархии и степени централизации системы;
- требования к способам и средствам связи между компонентами системы;
- требования к характеристикам взаимосвязей создаваемой системы со смежными системами, требования к ее совместимости, в том числе указания о способах обмена информацией (автоматически, пересылкой документов, по телефону или другие);
- требования к режимам функционирования системы;
- требования по диагностированию системы;
- перспективы развития, модернизации системы.

Примеры.

3.2.2. Требования к способам и средствам связи между компонентами системы:

Способы и типы интерфейсов для связи между компонентами системы будут разработаны и утверждены на этапе технического проектирования.

3.2.3. Требования к характеристикам взаимосвязей создаваемой системы передачи со смежными системами передачи и узлами абонентского доступа:

Входящие в состав укрупненного узла А подсистемы и узлы абонентского доступа в процессе функционирования должны обеспечивать обмен данными (информацией) на основе открытых форматов обмена данными, используя для этого входящие в их состав интерфейсные модули и модули сопряжения. Типы интерфейсов и при необходимости форматы передачи данных будут разработаны и утверждены на этапе технического проектирования.

В подразделе «Требования к надежности» должны быть указаны требования к обеспечению надежного функционирования системы (обеспечения устойчивого функционирования, контроля входных и выходных данных (информации), время восстановления после отказа и другие, проясняющие этот подраздел требования и сведения). В требования к надежности включают:

- состав и количественные значения показателей надежности для системы в целом или ее подсистем;
- перечень аварийных ситуаций, по которым должны быть регламентированы требования к надежности, и значения соответствующих показателей;
- требования к надежности технических средств и программного обеспечения;
- требования к методам оценки и контроля показателей надежности на разных стадиях создания системы в соответствии с действующими нормативно-техническими документами.

Пример.

3.3. Требования к надежности и режимам функционирования системы:

Для системы передачи данных (СПД) определяются следующие режимы функционирования: - нормальный режим функционирования; - аварийный режим функционирования.

3.3.1. Основным режимом функционирования СПД является нормальный режим.

В нормальном режиме функционирования системы:

- вся система передачи данных и смежные с ней системы передачи, узлы доступа и технические средства обеспечивают круглосуточную возможность функционирования в течение полной недели;
- допускаются запланированные обслуживающим персоналом отключения — не более одного канала, перерывы на измерения и обслуживание с применением резервных каналов, запланированных в системе или автоматическим переводом трафика абонентов в рабочие каналы системы передачи;
- исправно работает все оборудование, составляющее полный комплекс технических средств передачи данных;

- исправно функционирует системное, базовое и прикладное программное обеспечение системы передачи.

Для обеспечения нормального режима функционирования системы необходимо выполнять требования и выдерживать условия эксплуатации всего комплекса технических средств системы, указанные в соответствующих технических документах (техническая документация, инструкции по эксплуатации и прочие НТД).

3.3.2. Аварийный режим функционирования системы характеризуется отказом одного или нескольких блоков или каналов системы передачи или смежного с ней оборудования и/или средств технического обеспечения и инфраструктуры.

В случае перехода системы в аварийный или предаварийный режим необходимо:

- предусмотреть аварийное выключение из работы всех неработающих блоков и каналов;
- предусмотреть подачу аварийного сигнала на рядовые и стоечные устройства аварийной сигнализации;
- предусмотреть подачу аварийного сообщения сетевыми средствами в централизованную систему мониторинга;
- выполнить автоматически резервное переключение трафика на работающие каналы системы передачи.

После этого необходимо выполнить комплекс мероприятий по устранению причины перехода системы в аварийный режим.

3.3.3. Требования по диагностированию системы передачи:

Требования не предъявляются.

В подразделе «Условия эксплуатации» должны быть указаны условия эксплуатации (температура окружающего воздуха, относительная влажность и прочие характеристики и сведения для выбранных типов оборудования), при которых должны обеспечиваться заданные характеристики, а также вид обслуживания, необходимое количество и квалификация персонала.

В подразделе «Требования к составу и параметрам технических средств» указывают необходимый состав технических средств с указанием их основных технических характеристик.

В подразделе «Требования к сетевой и аппаратной совместимости» должны быть указаны требования к интерфейсам и аппаратным стыкам на входе и выходе оборудования, поддержки сетевых и иных протоколов передачи данных, поддержки и совместимости стыков и методов управления оборудова-

нием. При необходимости должна обеспечиваться защита информации и программ.

В разделе «Стадии и этапы разработки» устанавливают необходимые стадии разработки, этапы и содержание работ (перечень документов, которые должны быть разработаны, согласованы и утверждены), а также, как правило, сроки разработки и определяют исполнителей.

В разделе «Порядок контроля и приемки» должны быть указаны виды испытаний и общие требования к приемке выполненной работы или проекта.

В приложениях к техническому заданию, при необходимости, приводят:

- перечень научно-исследовательских и других работ, обосновывающих разработку;
- схемы алгоритмов, таблицы, описания, обоснования, расчеты и другие документы, которые могут быть использованы при разработке;
- другие источники разработки.

В техническое задание на разработку необходимо включать только те технические требования и параметры разработки которых влияет на исполнение задания в данном проекте или содержит сведения, позволяющие обосновано проводить проектирование и влиять на принятие технических решений. В содержаниях пунктов технического задания желательно избегать текстов типа: требования не предъявляются. Такие пункты задания лучше исключать, но они допустимы, когда исполнение требований будет реализовано на следующем этапе разработки или проектирования. Если требования не определены, а исполнение по нему планируется в ходе исполнения этого проекта, в содержании таких пунктов допустимо указывать следующее: разработать и согласовать в ходе технического проектирования.

Оформить техническое задание возможно в виде структурированного документа или таблицы в соответствии с методическими указаниями и требованиями НТД. На первом листе ТЗ в шапке документа необходимо указать данные о разработчике задания и согласованию задания в целом, с указанием должностей лиц разработчика и проводящего согласования. В случае дополнительных согласований разделов, подразделов или пунктов в ТЗ вводится лист согласований.

1.5. Состав курсового проекта

Курсовой проект оформляется пояснительной запиской. Перечень обязательных разделов для включения в проект:

1. Исходные данные задания для курсового проектирования, подписанные преподавателем.
2. Техническое задание на разработку системы ПД.
3. Расчет параметров передачи ВОЛС.

4. Расчет пропускной способности системы ПД.
5. Выбор способа и расчет параметров модуляции в каналах системы ПД.
6. Расчет помехоустойчивости каналов проектируемой системы.
7. Разработка и описание структурной схемы цифровой системы передачи данных.
8. Моделирование канальных сигналов цифровой системы передачи данных.
9. Рекомендации по применению спроектированной цифровой системы передачи данных.

Пояснительная записка выполняется на одной стороне листа писчей бумаги формата А4. Комбинирование разных способов выполнения и разных шрифтов не допускается.

Содержание пояснительной записки разделяют на разделы, подразделы и при необходимости на пункты. Разделы пояснительной записки целесообразно начинать на новой странице. Все страницы нумеруются: номер проставляется в середине нижней строки страницы. На титульном листе номер не указывается. При оформлении работы нужно использовать рекомендованную университетом для проектов форму титульного листа.

Пояснительная записка должна иметь опрятный вид без заметных пометок и подчисток. Язык пояснительной записки должен быть кратким, ясным и четким, со строгим соблюдением правил правописания, без малоупотребляемых иностранных и жаргонных слов и сокращений (кроме общепринятых). Любое сокращение должно иметь расшифровку понятия при первом употреблении или быть включенным в список сокращений. В формулах в качестве символов следует применять только обозначения, рекомендованные стандартами или другими НТД. Перед первым применением формулы дается ее пояснение с расшифровкой входящих в нее величин. Повторное ее использование допускается без пояснения. Не следует забывать о знаках препинания при написании формул. Текстовые рисунки (схемы, графики и прочий графический материал) рекомендуется выполнять в одном из графических редакторов ПЭВМ. Допускается их выполнение на той же писчей бумаге. Все рисунки должны иметь сквозную нумерацию в пределах всей пояснительной записки, например: рис. 1, рис. 2 и т.д. Надписи к рисункам помещаются под ними, а надписи к таблицам – над ними. Перед расчетами указывается литература, из которой взята методика этих расчетов. Ссылка на литературу (порядковый номер по списку) дается в квадратных скобках, например: [1, 12]. На последней странице пояснительной записки должны обязательно присутствовать дата ее представления преподавателю на проверку и подпись студента.

Если анализ исходных данных технического задания и результаты полученных расчетов делают возможным выполнение нескольких вариантов курсового проекта, то путем логических рассуждений осуществляется выбор одного из них. При этом обосновываются и приводятся параметры выбора технического решения или способа реализации, необходимые для выполнения уточненного задания, не противоречащего исходному и улучшающие требования технического задания или исходных данных.

Расчеты, их обоснования, пояснения и выводы представляют собой краткий последовательный грамотно написанный отчет о проделанной работе, а не сводку использованных в работе формул. Необходимо всегда проводить анализ полученных результатов на соответствие ожидаемым и оценивать их полезность и функциональность (зачем получены, на что влияют и/или где потребуются в дальнейших расчетах и принятиях решений). При выполнении расчетов необходимо использовать усредненные значения параметров или числа с обоснованием применяемой разрядности, поэтому запись результатов с большим количеством значащих цифр – грубая ошибка. Технический специалист должен уметь оценивать получаемый результат по исходному материалу, положенному в основу расчетов.

1.6. Защита курсового проекта

Работа предоставляется преподавателю для проверки за 5 дней до защиты. В процессе проверки курсового проекта преподаватель может сделать письменные замечания по работе, которые должны быть устранены студентом до защиты. Исправления делаются на обратной стороне листа пояснительной записки или на отдельном листе, вложенном в записку. Если студент не согласен со сделанными замечаниями, то он приводит соответствующую запись в тексте с дополнительными обоснованиями, а во время защиты обосновывает свои возражения.

Порядок защиты проектов определяет преподаватель. По решению преподавателя в обсуждении работы могут участвовать все присутствующие студенты группы, которые могут задавать вопросы по курсовому проекту и высказывать о нем свое мнение.

В докладе (ориентировочно 5 минут) студент должен сообщить об основном содержании технического задания, обосновать выбранное решение поставленной задачи и все этапы проделанной работы. Не следует излишне детализировать доклад описанием известных положений. Необходимо обязательно обратить внимание на оригинальные решения. Ответы на задаваемые вопросы должны быть по существу вопроса, краткими и четкими.

При защите курсового проекта, кроме вопросов по проекту, преподаватель может задавать и теоретические вопросы по дисциплине. За курсовой проект выставляется оценка.

1.7. Общие методические указания и рекомендации по выполнению расчетов и проектированию

Проектирование является неизбежным и очень важным этапом разработки любого сложного телекоммуникационного оборудования или радиоэлектронного устройства, особенно такого как цифровая система передачи данных. Проектирование условно можно разделить на две стадии: системное проектирование, связанное с выбором и обоснованием структурной схемы разрабатываемой системы или устройства, и техническое проектирование, связанное с определением компонентов и выбором электрической принципиальной схемы и расчетом ее элементов. Настоящий проект ориентирован на системное и функциональное проектирование с учетом того, что на современном этапе большинство функциональных блоков устройств выполняются на типовых универсальных микроконтролерах или готовых специализированных комплектах микросхем для сигнальной обработки.

Проектирование всегда связано с принятием компромиссных решений. На начальных этапах проектирования должны быть рассмотрены и проанализированы разные альтернативные варианты выполнения технического задания. При выборе оптимального варианта уместны эвристические методы, основанные на опыте разработчика, его интуиции и знании структурных схем аналогичных готовых промышленных изделий. Но любой выбор следует подтверждать предварительными расчетами параметров и характеристик устройства. Необходимо использовать количественные оценки качественных показателей каждого предложенного варианта.

Проектируемое устройство первоначально представляется в значительной степени неопределенным. И принятые решения на данном этапе также могут являться приближенными. По мере накопления результатов и материалов решения должны уточняться. Процесс проектирования является итерационным. На каждом его этапе идет поиск более совершенного решения, чем предыдущее. Начинать работу над заданием надо с проработки материала по методической, учебной и технической литературе, выяснения профессиональных, технологических и технических особенностей оборудования аналогичного назначения. По результатам такого анализа должны быть сформулированы технические требования и составлено техническое задание на разрабатываемую систему или оборудование. Поскольку выполняемый курсовой проект является учебной работой, а не промышленной разработкой, в моделях при расчетах и проектировании используются некоторые априорные предположения на соответствие техническим требованиям отдельных блоков

и функциональных устройств с использованием последующих компромиссных решений, но применяемые модели и методы не противоречат реальным моделям и могут быть использованы в практических реализациях систем передачи.

Примечание. В ходе выполнения расчетов и моделирования допускается использование программ, рекомендованных преподавателем для выполнения практических и лабораторных работ. Любые, полученные в ходе расчетов, результаты должны быть представлены, обоснованы и аргументированы студентом самостоятельно. Следует иметь в виду, что, применяемые для принятия решений, значения параметров и характеристик должны приводить к улучшению технических характеристик и качества разрабатываемой системы по сравнению с параметрами, приведенными в исходных данных или в техническом задании на разработку (общий принцип — система передачи должна обеспечивать параметры не хуже, чем заданы исходными данными).

Раздел 2

Расчет параметров передачи ВОЛС

2.1. Теоретические сведения

Волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС) состоит из следующих основных элементов:

1. Источник оптического излучения. Это электронно-оптический преобразователь, в котором излучение активируется управляющим током. В современных ВОЛС для передачи информации используются два основных вида источников - светоизлучающие диоды (СИД) и лазеры (в основном лазерные диоды (ЛД)). Они обеспечивают генерацию в диапазонах длин волн $\lambda = 0.8, 1.3, 1.5$ мкм. Технология производства и материал, из которого они изготовлены, определяют их основные характеристики:

- а) длину волны излучения λ (мкм);
- б) оптическую мощность P (Вт);
- в) степень когерентности оптического излучения;
- г) коэффициент поляризации оптического излучения
- д) ширину спектра оптического излучения (мкм или нм) и его состав;
- е) угловую расходимость (ширину диаграммы направленности) в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

С точки зрения спектральной характеристики выходного оптического излучения основным параметром источника излучения является ширина спектра излучения — это диапазон частот или длин волн, который способен излучать оптический прибор. Лазер — это когерентный источник, обладающий узкой спектральной шириной излучения $0.1 \div 3$ нм. Обычные светодиодные оптические источники могут иметь спектр излучения до $50 \div 200$ нм. В оптических системах связи наиболее широко применяются следующие типы полупроводниковых лазерных диодов:

- лазеры Фабри-Перо (FP, многомодовые);
- лазеры с распределённой обратной связью (DFB, одномодовые);
- лазеры с распределённым брэгговским отражением (DBR, одномодовые);
- лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL, одномодовые).

Углы отклонения в диаграмме направленности оптического излучения источников по горизонтали (x) и вертикали (y) для СИД составляют $x, y = 90^\circ \div 180^\circ$ и для ЛД находятся в пределах $x = 20^\circ \div 30^\circ$, $y = 30^\circ \div 60^\circ$, что позволяет на выходе лазерных диодов формировать более узкий пучок излучения для более удобного ввода в оптическое волокно.

Быстродействие источников оптического излучения определяет время нарастания переднего фронта сигнальных импульсов τ_s и в свою очередь опре-

деляет максимально возможную частоту модуляции источника. Для СИД обычно $\tau_s = 5$ нс и для ЛД $\tau_s = 0.15$ нс.

2. Устройство модуляции оптического излучения передаваемым сигналом.

Состав устройства для каждой системы передачи определяется применяемыми технологиями, способами модуляции, техническими приемами и новинками.

3. Среду, в которой распространяется оптическое излучение. Волоконный световод (ВС) является основным элементом ВОЛС, который обеспечивает передачу оптического излучения, промодулированного информационным сигналом от передатчика к приемнику. Основными эксплуатационными параметрами ВС являются:

- коэффициент затухания A , определяющий величину потерь оптической мощности при распространении волны по ВС длиной L , для следующих видов потерь оптического сигнала:

- потери в оптоволокне α (поглощение, рассеивание, возможные изгибы), для одномодового кабеля и длины волны 1310 нм потери составят 0.33-0.36 дБ/км, для 1550 нм — 0.22-0.25 дБ/км. Для многомодового кабеля и длины волны 1300 нм – 0.75 дБ, для 850 нм – 3 дБ;

- потери на разъёмных соединениях α_p , приблизительно до 0.5 дБ/разъём, N_p – количество разъёмных соединений (2 на патчкорд, 1 на кросс, 1 на модуль);

- потери на сварке α_s , примерно, для 1550 нм до 0.1 дБ/сплайс (одно сварное соединение), для 1310 нм до 0.2 дБ/сплайс, количество неразъёмных соединений $N_s = \frac{L}{L_c} - 1$, где L_c – строительная длина оптического кабеля, обычно составляет $2 \div 6$ км;

- эксплуатационный запас α_e на старение кабеля, около 3 дБ;

итога, суммарные потери оптического ВС, дБ:

$$A = \alpha L + \alpha_p N_p + \alpha_s N_s + \alpha_e;$$

- полоса пропускания Δf или уширение оптического импульса Δt , определяющие объём информации (или пропускную способность). Этот параметр ВОЛС принято оценивать величиной дисперсии [псек/км], определяющей значение уширение импульса (в пикосекундах), возникающее при прохождении им участка ВС длиной 1 км. По другому, дисперсия — «расплывание» светового импульса при его движения по ВС, приводящее к искажению информации при передаче сигнала. Существует три вида дисперсии:

- модовая дисперсия — возникает по причине того, что разные собственные волны (моды) ВС проходят разные пути и, следовательно, достигают противоположного конца волокна в различные моменты времени (в одномодовых ВС отсутствует);

– материальная (или молекулярная) дисперсия τ_{mat} — образуется из-за того, что ни один реальный источник излучения (СИД или лазер) не может излучать лишь одну длину волны и имеет некоторый спектр с определенной шириной, при этом каждая волна будет распространяться по одному и тому же ВС с разной фазовой скоростью;

– волноводная дисперсия τ_w — наиболее важный вид дисперсии для одномодовых ВС, который обусловлен тем, что свет движется как по сердцевине, так и по оболочке волокна, а это материалы, имеющие различные показатели преломления, поэтому и возникает различие между фазовыми скоростями света в этих слоях, определяется полосой пропускания W , которая накладывает ограничение на максимальную частоту модуляции передаваемого сигнала при длине ВС 1км (для одномодового ВС коэффициент широкополосности достигает $400 \div 1000 \text{ МГц*км}$) $\tau_w = \frac{0.44}{W} [\text{мкс/км}]$.

Материальная и волноводная дисперсии проявляются тем сильнее, чем шире спектр источника света. Часто эти два параметра объединяют под общим названием "хроматическая дисперсия" $\tau = \tau_{mat} + \tau_w$ и еще для оценки возникающих искажений используют величину, называемую удельной хроматической дисперсией (измеряется как $[\text{пс}/(\text{км*нм})]$). Она определяет расширение в пикосекундах оптического импульса в линии связи, которое возникает при прохождении участка ВС длиной 1км при возбуждении его источником с шириной спектра в 1нанометр, для 1550нм можно использовать для расчетов значение D_{OV} 0.2пс/(км*нм), тогда $\tau = D_{OV} \cdot \Delta\lambda \cdot L [\text{пс}]$, где $\Delta\lambda$ — ширина линии излучения СИД или лазера, [нм]. Существует понятие длины волны нулевой дисперсии, на которой дисперсионные искажения сигнала отсутствуют за счет взаимного уничтожения разных по знаку волноводной и материальной дисперсии. Для кварцевых волокон, используемых в ВОЛС, длиной волны с нулевой дисперсией является $\lambda = 1.3 \text{ мкм}$, значит хроматической дисперсией можно пренебречь.

Для реализации задачи, поставленной в задании на курсовой проект предполагается одномодовый волоконный световод типа — single-mode со ступенчатым профилем показателя преломления, диаметром сердечника в мкм и диаметром оболочки D , мкм (SF 10/125 $d_v/D = 8 \div 10/125$).

4. Фотоприемник. Обычно фотодиод (ФД) - полупроводниковый прибор с одним р-п-переходом, обладающий односторонней проводимостью при освещении и преобразующий оптический сигнал в электрический. Фотодиод технологически используется в двух режимах: без внешнего источника питания (вентильный режим), и с внешним источником питания, создающим обратное смещение на р-п-переходе (диодный режим). Характеристики любого ФД следующие:

а) границы спектральной чувствительности, определяющие максимальную и минимальную длины волн оптического диапазона λ_{max} и λ_{min} , которые регистрирует ФД;

б) чувствительность S (или крутизну ватт-амперной характеристики), А/Вт;

в) темновой ток I_T ;

г) обратное смещение U_{cm} на ФД, соответствующее зоне максимальной чувствительности;

д) емкость р-п перехода ФД.

5. Электронные устройства усиления и обработки сигнала служат для восстановления исходного сигнала и представления его в необходимом виде для устройств дальнейшей обработки.

Еще одной специфической особенностью для ВОЛС являются нелинейные эффекты в волокнах, которые наиболее сильно проявляются в WDM системах, так как с увеличением числа длин волн, передаваемых по волокну, увеличивается и передаваемая по нему суммарная оптическая мощность. При этом, кроме явления фазовой самомодуляции волн (SPM — Self Phase Modulation), возникающего при передаче сигналов на одной длине волны начинают проявляться и нелинейные эффекты, свойственные только многоволновым линиям передачи: четырехволновое смешение (FWM — Four Wave Mixing) и перекрестная фазовая модуляция (XPM — Cross Phase Modulation). SPM эффект наблюдается, когда мощность в одном спектральном канале линии передачи достигает 10 дБм (10 мВт). А эффекты FWM и XPM, когда суммарная оптическая мощность в спектральных каналах достигает примерно той же величины. Наиболее вредным нелинейным эффектом является эффект четырехволнового смешения, так как при смешении сигналов передаваемых на нескольких длинах волн в волокне возникают паразитные сигналы на новых длинах волн. Некоторые из этих паразитных сигналов попадают в спектральные каналы WDM системы, что приводит к возникновению перекрестных помех.

2.2. Расчет параметров линейных трактов ЦСПД для ВОЛС

Исходными данными для решения поставленной задачи структурного и функционального проектирования ЦСПД по расчету параметров линейных трактов передачи являются расстояние между пунктами обмена трафиком, количество и тип ОВ, параметры волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) — уровень мощности оптического излучения источника, центральные длины волн и ширина линии излучения СИД, уровень чувствительности фотоприемника, коэффициент резервирования трафика. Пользуясь этими заданными и другими известными или априорно предполагаемыми параметрами необходимо рассчитать технические параметры линейных трактов, частотные и вре-

менные параметры каналов передачи и особенности сигналов для трактов и каналов в разрабатываемой системе передачи данных.

2.2.1. Расчет энергетических и динамических характеристик трактов и каналов ПД

Для начала расчетов необходимо рассмотреть обобщенную предполагаемую в задании на курсовое проектирование схему (рис. 2.1) организации трактов и каналов цифровой системы передачи данных (ЦСПД) на базе волоконно-оптической линии связи (ВОЛС), проложенной между населенными пунктами А и В.

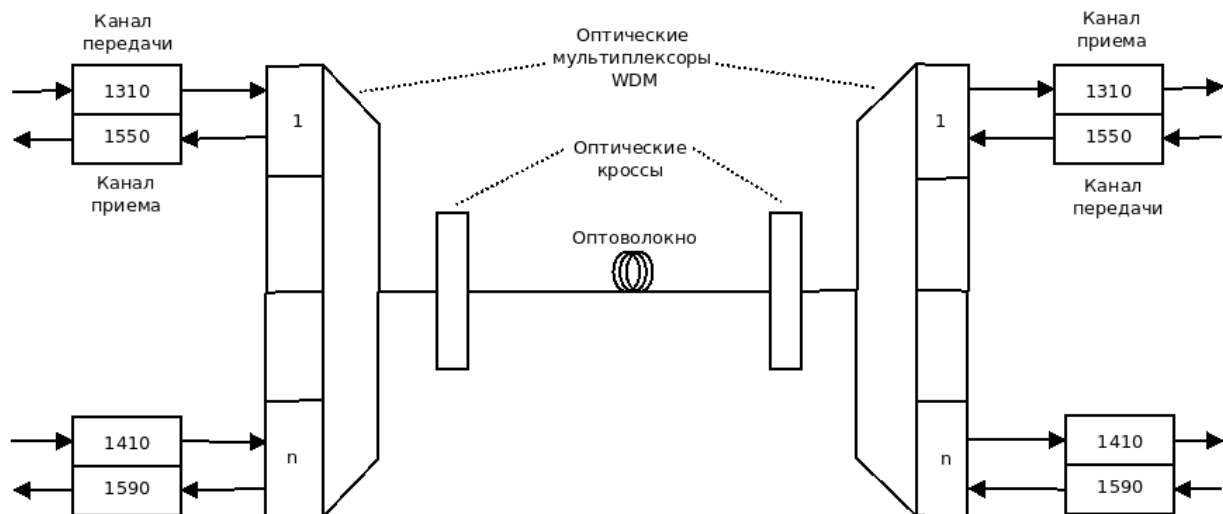


Рис. 2.1. Обобщенная схема организации трактов и каналов ЦСПД на базе ВОЛС.

На обобщенной схеме организации трактов и каналов ЦСПД на базе ВОЛС (рис. 2.1) двусторонние тракты передачи данных организуются с применением технологии спектрального уплотнения WDM — Wavelength Division Multiplexing которая позволяет увеличивать количество каналов в одном волокне. На каждой выделенной длине волны организуется отдельный канал передачи данных в одну сторону. Два спаренных канала передачи из разных диапазонов длин волн, один,— в одну сторону, на длине волны $\lambda_{AB} = 1310\text{ нм}$ и второй,— в обратную сторону, на длине волны $\lambda_{BA} = 1550\text{ нм}$, образуют двусторонний тракт передачи.

Упрощенная схема канала передачи на одной длине волны (рис. 2.2) в одну сторону состоит из: со стороны А — разрабатываемой передающей части цифровой системы передачи (ЦСП), модулятора оптической несущей (М), излучателя в линейное волокно на базе лазерного диода (ЛД), волоконно-оптической линии, состоящей из двух конечных оптокроссов в пунктах А и В плюс линейное оптоволокно, со стороны В — фотоприемник на базе фотодиода (ФД), детектор оптической несущей и разрабатываемой приемной части цифровой системы передачи (ЦСП). WDM мультиплексор на упрощенной

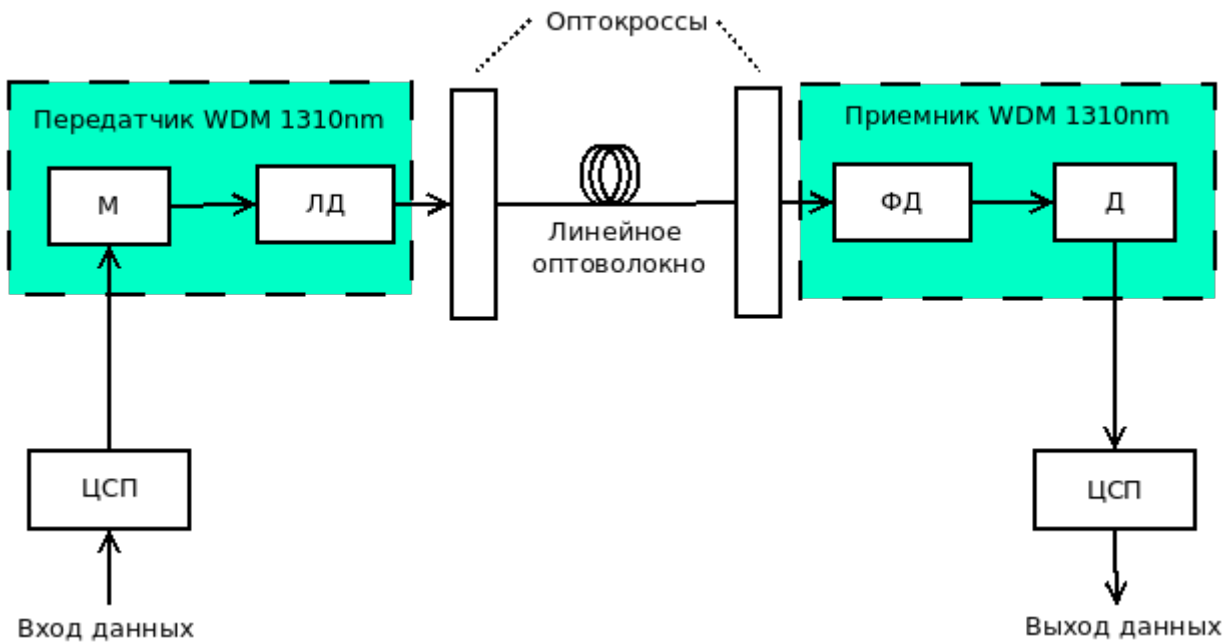


Рис. 2.2. Упрощенная схема канала передачи на одной длине волны.

схеме не показан (шаг спектрального разнеса длин волн оптических несущих $\Delta\lambda = 20\text{нм}$ указывает на применение технологии CWDM).

Расчет начинаем с вычисления оптических потерь в одномодовом волокне на двух центральных длинах волн для каждого диапазона λ_{1310} и λ_{1550} по уже известной формуле:

$$A = \alpha L + \alpha_p N_p + \alpha_s N_s + \alpha_e.$$

Считаем, что магистральный кабель заведен в стойку с оборудованием, поэтому предполагаем по одному оптическому патчкорду на оптокросс каждой стороны и добавляем к неразъемным соединениям 2 сварки (еще по одному сплайсу на каждую сторону — для приварки оптокрасса).

Далее рассчитываем энергетический потенциал оптической системы излучатель-приемник:

$$P_{PR} = P_{SID} - S_{Fot}, \quad (2.1)$$

где P_{PR} – энергетический потенциал (перекрываемое затухание), дБм;

P_{SID} – уровень мощности оптического излучения источника, дБм;

S_{Fot} – уровень чувствительности фотоприемника, дБм.

Любая система для борьбы с сигнальными перегрузками оснащается системой автоматической регулировки усиления. Диапазон регулирования такой системы обычно составляет $\Delta A = 20 \div 24\text{дБ}$.

Исходя из полученных значений рассчитаем максимальный уровень приема оптического сигнала

$$L_{max} = P_{PR} - A,$$

и минимальный уровень приема оптического сигнала в дБм

$$L_{min} = P_{PR} - A - \Delta A.$$

Минимальный уровень приема оптического сигнала не должен превышать уровень -3дБм (это уровень который не сможет компенсировать АРУ и следовательно требуется установка дополнительных аттенюаторов).

Если максимальный уровень приема оптического сигнала получается отрицательным, то это означает нехватку энергетического потенциала системы. В этом случае необходимо повышать мощность излучателя (можно увеличить до +5дБм) и/или увеличивать чувствительность фотоприемника (можно увеличить до -36дБм).

Примечание. Изменить исходные данные задания возможно с разрешения преподавателя четко аргументируя значениями параметров и подтверждая их расчетами по разрабатываемой системе.

Динамический диапазон принимаемых сигналов в [дБ] для канала передачи данных составит

$$D_{sR} = L_{max} - 3.$$

Пользуясь расчетными формулами из лекционных материалов пересчитать сигнальный динамический диапазон из [дБ] в разы.

Уровень шумов на входе приемника в [дБм] по соседнему каналу составит

$$N_{kanR} = P_{SID} - A - 30.$$

Выполнить анализ полученных результатов и сделать заключение о возможностях применения в разрабатываемой системе передачи данных сигналов с полученными динамическими характеристиками.

2.2.2. Расчет частотных и временных характеристик каналов ПД

Пользуясь формулой из раздела теоретических сведений рассчитать дисперсию и оценить «уширение» импульса на входе приемника для случая несущих из диапазона 1550нм.

Используя значение исходных данных полосы излучения СИД (ЛД) получить ширину полосы пропускания в [Гц] для каналов передачи данных на выходе передатчиков.

Выполнить анализ полученных результатов и сделать заключение о возможностях применения в разрабатываемой системе передачи данных сигналов с полученными частотными и временными характеристиками.

2.3. Структурная схема линейного тракта ЦСПД для ВОЛС

Для выполнения расчетов по количеству каналов передачи данных и распределению трафика по каналам рекомендуется составить первоначальную структурную схему линейного тракта ЦСПД на базе ВОЛС с учетом количества предоставляемых для передачи оптических волокон и длин волн оптических несущих.

После выполнения всех требуемых расчетов линейный тракт ЦСПД на базе ВОЛС войдет в состав общей структурной схемы разработанной в курсовом проекте системы передачи. В описании схемы необходимо отобразить назначение, принципы и особенности работы модулей, каналов, функциональных и структурных блоков и узлов системы передачи.

Раздел 3

Расчет пропускной способности системы ПД

Расчет пропускной способности системы передачи всегда связан с ее назначением в операторской сети. Рассматриваемая в курсовом проекте система передачи данных предполагается для связи муниципального сегмента сети доступа в населенном пункте А, с ядром операторской сети в населенном пункте В, формирующим услуги для абонентов сети. В качестве базовой абонентской услуги рассматривается услуга TriplePlay, когда абонентам по одному подключению широкополосного доступа предоставляется одновременно три телекоммуникационных сервиса — высокоскоростной доступ в Интернет, IPTV плюс видео по запросу и голосовые услуги VoIP, включая телефонную связь по ТСОП (телефонная сеть общего пользования). Эти услуги базируются на опорной операторской IP-сети с полной интеграцией услуг передачи речи, данных и мультимедиа. Для организации услуг к ядру операторской сети подключаются сети серверов приложений AS (Application Server) с управлением на базе мультимедийной подсистемы IMS (IP Multimedia Subsystem).

Для проведения расчета пропускной способности заданной системы передачи необходимо выполнить расчет объемов трафика, который позволит заданному количеству абонентов получать заявленные оператором телекоммуникационные услуги. Рассмотрим требования различных услуг к скорости передачи данных.

Голосовые услуги передачи речи — телефония с высоким качеством в соответствии с технологией кодирования ITU-T G.711 требует канальную скорость передачи 64 кбит/с.

По аудио данным: для потокового аудио с MP3 кодированием необходима скорость ПД от 96 до 320 кбит/с, для аудио высокого качества в соответствии с кодированием MPEG со спектральными методами сжатия необходима скорость от 128 до 384 кбит/с, аудио поток без сжатия обычно требует 1441 кбит/с.

По видео данным: для видеоконференции с кодированием ITU-T H.261-263 необходима скорость ПД от 100 до 1200 кбит/с, для потокового видео с MPEG-4 кодированием необходима скорость ПД до 10 Мбит/с, телевидение SD качества и MPEG-2 кодированием требует до 4 Мбит/с, для сервиса «видео по требованию» (Video On Demand, VoD) DVD качества с MPEG-2 кодированием необходима скорость ПД до 6 Мбит/с, телевидение HD качества и MPEG-4 кодированием требует до 12 Мбит/с, и HDTV телевидению высокой четкости с MPEG-2 кодированием потребуется скорость до 34 Мбит/с (в расчетах допустим предел 30 Мбит/с).

Трафик данных и Интернет не предъявляет жестких требований к задержкам при передаче, поэтому он еще называется эластичным трафиком (Elastic traffic) по сравнению с передачей трафика реального времени (Realtime traffic), задержки по которому обычно не должны превышать 150 мс, и поэтому его ещё называют потоковым трафиком (Streaming traffic). По трафику данных и Интернет предположим скорость передачи от 800 до 8000 кбит/с.

Для выполнения расчетов пропускной способности абонентских сетей, как и для расчетов по объему трафика не существует никаких однозначных указаний или рекомендаций, позволяющих получить результат. Обычно расчеты производят по моделям, исходя из применяемых подходов, исходных данных и известных или априорно предполагаемых статистических и технических параметров о работе сети и потребляемом трафике. Для получения результатов близких к истинным значениям существует достаточно большое количество методик и моделей, построенных на разных подходах.

Для расчета общего объема потребляемого трафика применим упрощенную схему расчета по обобщенной мультисервисной модели отдельных звеньев сети с ограниченным доступом к ресурсу. Методику расчета применим на базе линии концентрации информационных потоков с ограниченным доступом по основным предполагаемым услугам. Для этого зададим коэффициенты ограничения доступа к ресурсам услуг с точки зрения общего количества абонентов. По услугам VoIP, включая телефонию общего пользования коэффициент доступности положим равным $K_{VoIP} = 0.25$. По услугам Интернет и передачи данных коэффициент доступности положим равным $K_{IntpD} = 0.8$. По услугам видеоконференций и аудио данным коэффициент доступности положим равным $K_{VA} = 0.25$. По услуге «видео по требованию» (VoD) коэффициент доступности положим равным $K_{VA} = 0.01$.

По услуге IPTV расчет полосы пропускания имеет очень приблизительный характер, потому что для трансляции TV-каналов требуется большая и разная полоса пропускания, зависящая от качества TV-картинки, и взрывной характер трафика из-за смены каналов и динамики TV-картинки. Если все абоненты узла включают на своих TV-приемниках разные каналы, реальная сеть может не выдержать такую нагрузку. Но у этого трафика есть и весомое преимущество — для всех абонентов одной сети 1 канал передается один раз (multicast). Поэтому для расчетов обычно принимается фиксированная скорость ПД на некоторое количество абонентов. Для нашего случая скорость передачи данных для услуги IPTV (независимо от количества и качества программ) возьмем 1 Гбит/с на 500 абонентов одного узла (NAS — 1x500) и 2 Гбит/с на распределенных по разным узлам 500 абонентов (nxNAS — $\sum_n N_a = 500$).

Обобщенная формула расчета скорости по каждой услуге для заданных коэффициентов доступности с учетом объема служебного трафика [бит/с] следующая:

$$V_{usluga} = V_{uslmax} * K_{dost\ usl} * (1 + K_S).$$

Затем по каждой услуге рассчитываем скорость в соответствии с минимальным K_{minA} и максимальным K_{maxA} коэффициентом абонентской нагрузки.

Далее считаем предложенным способом скорость пропускания для услуги IPTV и суммируем ее по узлам.

Сводим расчетные данные в таблицу (можно по узлам и услугам, с учетом VLAN или без него) и суммируем их для получения общей минимальной и максимальной скорости передачи данных в системе.

Затем используя коэффициент резервирования трафика рассчитываем скорость для резервного канала.

Резервирование каналов передачи данных можно производить одним из следующих способов:

- выделить для создания резервных каналов отдельную резервную систему передачи по независимой ВОЛС и присоединить ее к основной;
- выделить отдельное волокно в существующей ВОЛС и организовать по нему каналы передачи данных (так же как и для основных каналов передачи);
- организовать отдельные резервные каналы передачи данных по существующему волокну и присоединить их к основной системе передачи;
- выделить в существующих каналах передачи требуемый резервный ресурс скорости без организации дополнительных каналов;
- выполнить резервирование пропуска трафика комбинируя возможные и доступные способы организации трактов и каналов в системе передачи.

В ходе разработки системы передачи студенту необходимо принять решение о способе резервирования пропуска трафика для качественного и бесперебойного предоставления услуг абонентам муниципальной сети. Для организации резервирования разрешается использовать только выделенные исходными данными ресурсы (использовать дополнительные ресурсы **ЗАПРЕЩЕНО**).

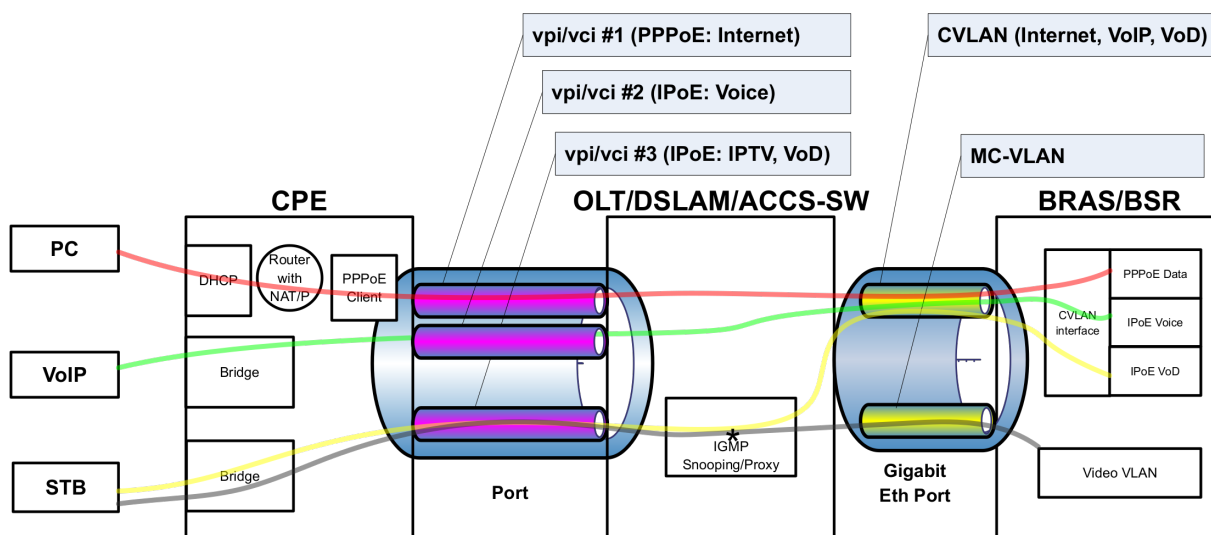
При выполнении расчета пропускной способности сегмента операторской сети муниципального района обязательно необходимо учитывать способы формирования телекоммуникационных услуг для абонентов в рамках сети передачи данных.

Поскольку сеть используется для оказания множества услуг различным пользователям, необходимо решить задачу по идентификации *абонентов «=» требуемых услуг в сети* и обеспечить логическую изоляцию трафика различ-

ных услуг и различных абонентов. При этом такая схема идентификации является универсальной.

В общем случае для идентификации абонентов и услуг на сервисном устройстве используется комбинация из трёх компонентов – стека из двух VLAN и интерфейса подключения к сервисному устройству. При этом интерфейс подключения и внешний тэг (C-VLAN) идентифицируют пользователя в сети, а внутренний тэг (S-VLAN) идентифицирует оказываемую услугу. Комбинация «C-VLAN/S-VLAN» должна быть уникальна в пределах одного порта и может совпадать на разных портах одного сервисного устройства.

При использовании такой схемы идентификации подключений, представленной на рисунке 3.1 важно, чтобы сеть агрегации позволяла сохранить информацию о точке подключения абонента при передаче данных к устройствам сервисной границы. Добиться этого возможно, обеспечив отдельный логический канал между сервисным устройством и устройством доступа в сети. При использовании выделенных каналов для подключения устройств доступа/агрегации, такие логические каналы будут совпадать с физическими.



Гибридная C/S-Vlan модель:

Со стороны OLT/DSLAM/ACCS-SW – **S-Vlan**

Со стороны BRAS – **C-Vlan**

Рис. 3.1. Модель объединения услуг в одной сети ПД оператора связи.

Доступ к общим сетевым ресурсам (например, серверам услуг) в сетях с VLAN осуществляется путем настройки на порту сервера и коммутатора транкового интерфейса, способного поддерживать трафик для нескольких VLAN. При этом на интерфейсе сервера приложения (услуги) создается

по одному сабинтерфейсу с IP-адресом для каждого VLAN. Маршрутизация между VLAN осуществляется с помощью коммутаторов, поддерживающих L3-уровень или путем настройки на маршрутизаторе сервера и коммутатора транкового интерфейса, способного поддерживать трафик для нескольких VLAN. При этом на интерфейсе маршрутизатора создается по одному сабинтерфейсу с IP-адресом для каждого VLAN. Пример типового распределения 12-битных идентификаторов VLAN (VLAN ID) для сегмента операторской сети представлен на рисунке 3.2.



Рис. 3.2. Типовое распределение VLAN-ID в сети оператора связи.

Используя полученные рекомендации для однозначной идентификации абонентов и услуг достаточно выполнить простую фрагментацию сети с использованием преагрегации и агрегации абонентов на коммутаторах Ethernet уровня L2+. Фрагменты клиентской сети C-VLAN должны составлять узлы с общей монтированной емкостью не более 4000 абонентов.

Каждый 4000-й абонентский фрагмент, состоящий из SAN (см. рис. 1.1) муниципальной сети должен быть представлен обособленным кластером VLAN с агрегацией трафика на маршрутизаторе. На структурной схеме системы передачи это может быть показано двумя способами:

- сегментом сети из узлов SAN с нумерацией и емкостью в соответствии с заданием, оконтуренные характерной линией (пунктирной или штрих-пунктирной);
- сгруппированной таблицей кластеров узлов сети по VLAN без указания (или с указанием — эта расчетно-методическая часть выполняется по желанию студента) номеров клиентских C-VLAN и сервисных S-VLAN.

Раздел 4

Выбор способа и расчет параметров модуляции в каналах системы ПД

4.1. Теоретические сведения

Выбор способа модуляции для канала передачи данных определяется физическими свойствами самого канала и его способностью их сохранять или поддерживать в заданных пределах стабильности значений параметры, функционально определяющие скорость передачи информации.

Изменения свойств структуры среды оказывают существенное влияние на процесс распространения и приводят к случайным изменениям уровня сигнала, поступающего на вход приемника. При определенных условиях диапазон изменений уровня сигнала оказывается настолько значительным, что сигнал на входе подвергается глубоким замираниям. В модели замираний сигналов различают две составляющие: одна из них обусловлена относительно медленными изменениями структуры среды, а другая — сравнительно быстрыми изменениями структуры. Поэтому прием сигналов в каналах со случайными параметрами представляет собой значительно более сложную задачу, чем прием в каналах с постоянными параметрами, так как наряду с влиянием аддитивных помех на качество передачи информации существенное влияние оказывает явление замирания сигналов. Замирания приводят к тому, что на некоторых интервалах времени уровень принимаемого сигнала становится соизмеримым с уровнем аддитивных помех (или даже падает ниже этого уровня). В результате достоверность принятой информации резко ухудшается, а скорость передачи падает.

При исследовании приема сигналов в каналах со случайными параметрами полезна модель среды распространения, которую можно представить в виде трех последовательных блоков:

- блок ослабления сигнала — учитывает и определяет ослабление сигнала в идеальной среде — последовательное соединение аттенюатора и линейного фильтра с равномерной частотной и линейной фазовой характеристиками для всех частот;
- блок поглощения сигналов — отображает особенности и физические свойства конкретной среды распространения — учитывает потери энергии сигнала в среде, связанные с поглощением и зависимостью этих потерь от частоты, включая медленные изменения структуры и свойств среды во времени и пространстве;
- блок флуктуации сигнала — учитывает быстрые случайные изменения свойств и структуры среды, которые и приводят к соответствующим изменениям сигнала на входе приемника.

Средой передачи сигнала в курсовом проекте предполагается одномодовое оптическое волокно у которого потери излучения являются основным фактором, ограничивающим длину участка линии связи. Расчеты по практической формуле потерь дают ослабление сигнала, свойственное волоконно-оптической линии связи в рассматриваемом окне прозрачности.

Предположение того, что в рамках заданного окна прозрачности влияние неравномерности частотной и фазовой характеристики одномодового волокна незначительно и может не учитываться, позволяет упростить расчет затухания, исключением линейного фильтра из модели блока ослабления сигналов.

В блоке поглощения сигналов основной вклад влияния при распространении сигнала вносится дисперсией волокна и рассчитывается по практической формуле временного параметра «уширения импульса».

Блок флуктуации сигнала в ВОЛС можно также исключить из рассмотрения по причине отсутствия физических изменений свойств и структуры среды для одномодового оптического волокна.

Для обеспечения нужной скорости передачи данных в канале, стабилизации параметров и повышения качества работы систем передачи цифровой информации используют следующие проверенные на практике способы:

1. применяют многопозиционные сигналы, эффективно использующие отведенную полосу частот;
2. применяют сложные сигналы, эффективно использующие энергию передатчика;
3. применяют корректирующие коды, обнаруживающие и исправляющие ошибки;
4. применяют системы с обратным каналом связи, увеличивающие достоверность передачи.

В практических задачах при использовании ограниченного диапазона частот особенно важным является увеличение спектральной эффективности применяемых методов модуляции для увеличения предельной пропускной способности системы передачи. Технологии, ведущие к повышению спектральной эффективности следующие:

- методы модуляции более высокого порядка (M-ary ASK, PSK, FSK, QAM, TCM);
- мультиплексирование с разделением по длине волны (WDM, CWDM, DWDM);
- мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM).

При практическом создании систем очень часто комбинируют указанные выше возможности, что позволяет обеспечить заданную пропускную спо-

способность каналов и получить высокие качественные показатели работы систем передачи.

Целью цифровой модуляции в разрабатываемой системе является передача информационных символов дискретным изменением амплитуды, и/или фазы, и/или частоты синусоидальной несущей. Символ передается в течение символьного времени и определяет символьную скорость передачи. При двоичной модуляции бит совпадает с символом. Для модуляции высших порядков ($M = 2^k$) символ состоит из $k = \log_2 M$ бит. При двоичной модуляции возможно использование фазовой манипуляции (PSK - phase shift keying), дифференциальной фазовой манипуляции (DPSK - differential phase shift keying), амплитудной манипуляции (ASK - amplitude shift keying), частотной манипуляции (FSK - frequency shift keying), манипуляции с минимальным сдвигом (MSK - minimum shift keying) и гауссовой манипуляции с минимальным сдвигом (GMSK - Gaussian minimum shift keying). В качестве способов модуляции высших порядков возможно использование M-ичной амплитудной манипуляции (MASK - M-ary amplitude shift keying, PAM - pulse amplitude modulation), M-ичной фазовой манипуляции (MPSK - M-ary phase shift keying), квадратурной фазовой манипуляции со смещением (OQPSK - offset quadrature phase shift keying), дифференциальной M-ичной фазовой манипуляции (DMPSK - differential M-ary phase shift keying), M-ичной квадратурной амплитудной модуляции (MQAM - M-ary quadrature amplitude modulation), M-ичной дифференциальной квадратурной амплитудной модуляцией (DMQAM - differential M-ary quadrature amplitude modulation), кодовой манипуляции (CSK - code shift keying), M-ичной частотной манипуляции (MFSK - M-ary frequency shift keying), непрерывной фазовой модуляции (CPM - continuous phase modulation) и многочастотного мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM - orthogonal frequency division multiplexing).

Для каждого примененного метода модуляции необходимо разработать сигнальное созвездие в пространстве сигналов, определить спектральную плотность мощности и разработать функциональную схему модулятора (допускается структурная схема с четким и однозначным определением функциональных особенностей блоков).

4.2. Рекомендации по выбору способа модуляции

Для выбора способа модуляции считаем, что одним из результатов предварительных расчетов является определение сигнала конечной длительности в канале передачи данных с предельными ограничениями по длительности вследствие физических свойств среды и возможных путей прохождения сигнала. Для этого воспользуемся следующей моделью процесса передачи сигнальной информации.

Предполагаем, что на интервале T по каналу передается определенное количество независимых отсчетов $N_T = N_S$, которые возможно предположить элементарными сигнальными символами для передачи информации. Эти отсчеты можно определить, исходя из однозначно различимого сигнала в линии длительностью (определяется дисперсией (величиной уширения импульса) оптического волокна)

$$\tau_T \geq (2.5 \dots 3) * \tau_{DOV},$$

который и определяет верхнюю предельную скорость передачи элементарных сигнальных символов в канале передачи данных

$$V_{S_{max}} \leq \frac{1}{\tau_T} = \frac{N_T}{T}.$$

Далее исходя из полученных минимальной и максимальной канальной скорости передачи оцениваем необходимый коэффициент модуляции канала передачи по отношению к биту.

Следующим шагом оценки по выбору способа модуляции необходимо определить динамический диапазон сигнала, позволяющий однозначно измерять амплитудный уровень на входе приемного тракта, с учетом затухания линии и суммарного воздействия помех, включая шумы. Подход к определению реально работающего динамического диапазона определяют три основных фактора:

- динамический диапазон сигнала на входе приемника, который определяется динамическим диапазоном выходного сигнала передатчика и затуханием сигнала в канале распространения;
- способность приемника обнаруживать все значения входного сигнала, ограниченные снизу значением предельной чувствительности приемника — способностью воспринимать и усиливать до нужного уровня сигналы с малой амплитудой и сверху в большей мере динамическим диапазоном системы автоматической регулировки усиления (АРУ) — способностью быстро автоматически ослаблять сигналы с большой амплитудой (автоматически поддерживать динамический диапазон работы приемника на уровне максимально возможного) и техническими параметрами входного преобразователя, включая первый(е) усилительный каскад входного приемного тракта;
- амплитудный и частотный состав помех на входе приемника, маскирующий и/или искажающий сигнал на входе.

Анализируя перечисленные выше технические параметры, полученные в ходе предварительных расчетов, указанные в техническом задании и априорно предположенные и зафиксированные в составляемой при проектировании расчетной модели (физической и/или математической) вычислить верхнюю и

нижнюю границы чувствительности приемника, значения которых и определяют возможный динамический диапазон сигнала на входе.

Затем, используя исходные данные и полученные в результате расчетов предварительные значения величин, нужно выбрать способ или способы модуляции для передачи сигналов, так, чтобы обеспечить необходимую пропускную способность системы передачи данных.

4.3. Рекомендации по способам применения и комбинированию методов модуляции в каналах ПД

Оптические транспортные сети продолжают быстро развиваться, чтобы адаптироваться к постоянно растущим требованиям электросвязи. Это наиболее заметно по взрывному росту требований к пропускной способности трактов и каналов.

Помимо потребности в высокой пропускной способности, оптическим транспортным сетям требуется большое нерегенерируемое оптическое расстояние передачи для эффективной поддержки муниципальных, городских, региональных и общегосударственных сетевых приложений. Более того, гибкое управление длиной волны, обеспечиваемое такими перспективными элементами систем передачи, как реконфигурируемые оптические мультиплексоры ввода-вывода (ROADM - reconfigurable optical add-drop multiplexers), планируется использовать для обеспечения прозрачности и масштабируемости оптических сетей. Несомненно, что оптические транспортные сети будут продолжать развиваться, чтобы предлагать более высокую пропускную способность, большую дальность действия и более гибкое управление длиной волны при стремлении к минимизации эксплуатационных расходов и капитальных затрат.

Эволюция оптических транспортных сетей обеспечивается технологическими инновациями в ключевых элементах системы оптической связи, одним из которых является оптический транспондер. Оптический транспондер состоит из передатчика, который кодирует информацию о световой волне с помощью оптической модуляции, и приемника, который восстанавливает информацию. Значимой особенностью оптического транспондера является применяемый метод модуляции, который определяет, как информация кодируется в передатчике и как она восстанавливается в приемнике. Методы модуляции определяют возможности каналов на системном уровне, поскольку характеристики передачи оптического сигнала в оптической сети зависят именно от модуляции сигнала. Разные способы модуляции позволяют использовать разную чувствительность приемника, которая напрямую связана с требуемым отношением оптического сигнала к шуму (OSNR), разной спектральной эффективностью и разной устойчивостью к искажениям на приеме, вызванным

влиянием хроматической дисперсии (CD - chromatic dispersion) или модовой поляризационной дисперсии (PMD - polarization mode dispersion), оптической фильтрацией и нелинейностью.

Скорость передачи данных канала в современных оптических транспортных сетях увеличивается с 2,5 Гбит/с до 10 Гбит/с. Скорость передачи данных 40 Гбит/с на канал также находится на горизонте коммерческого развертывания. Помимо увеличения скорости передачи данных на канал, количество самих каналов на каждое волокно также продолжает увеличиваться за счет мультиплексирования с разделением по длине волны (WDM, CWDM) или плотного мультиплексирования с разделением по длине волны (DWDM) с целью дальнейшего повышения общей пропускной способности.

Рассматривая уже реализованные способы достижения 40 Гбит/с можно выделить два основных, достаточно простых, способа применения CWDM систем.

- В первом способе каждый канал используется самостоятельно. Максимальное расстояние передачи ограничено потерями в волокне (так как оптические усилители не применяются) и, как правило, не превышает 70 км. Передача же данных в каждом спектральном канале осуществляется со скоростью 2.5 Гбит/с, что позволяет использовать относительно недорогие DFB лазеры с прямой модуляцией. Совместное использование DWDM и CWDM технологий позволяет за счет постепенного наращивания пропускной способности транспортной сети частично амортизировать стоимость установки дорогостоящей DWDM системы. При этом часто используется следующая стратегия: сначала заполняются каналы CWDM системы, примыкающие к диапазону C (1470, 1490, 1590 и 1610 нм), а затем 16 каналов DWDM системы в C диапазоне.

- Во втором способе высокочастотный цифровой сигнал разбивается на несколько низкочастотных составляющих, каждая из которых передается отдельным спектральным каналом. Так поступают при передаче данных в стандарте 10 Gigabit Ethernet. В этом формате входной сигнал поступает в виде четырех потоков со скоростью 3.125 Гбит/с. Обычно эти четыре потока сначала объединяют в один поток со скоростью 12.5 Гбит/с. Затем, применив новую схему кодирования, скорость суммарного потока уменьшают до 10 Гбит/с и передают по волокну (по одному спектральному каналу). В системе CWDM каждый из этих четырех низкочастотных потоков передается отдельным спектральным каналом. Сюда же относится достаточно старая идея об использовании CWDM системы для передачи потока в 40 Гбит/с в виде четырех потоков по 10 Гбит/с.

Чтобы увеличить общую пропускную способность для каждого канала, а также его спектральную эффективность, необходимо увеличить сиг-

нальный диапазон частот электрических и оптоэлектрических компонентов, что предполагает собой объединение нескольких каналов с низкой пропускной способностью в один канал с высокой пропускной способностью. Однако это требует спектрально эффективного мультиплексирования отдельных каналов с более узким диапазоном частот в целях экономии диапазона частот без использования специальных спектральных защитных диапазонов. Для радио, проводных и оптических канальных технологий передачи данных высокую спектральную эффективность показали методы М-ичных модуляций в сочетании с OFDM.

Для эффективного совместного использования OFDM с вариантами М-ичных модуляций в телекоммуникационной среде необходимо выполнять целый ряд технологических условий — поддерживать точную временную и частотную синхронизацию с обработкой сложных смещений частоты, соблюдать условия амплитудных и мощностных ограничений в условиях множественного доступа, управлять методом модуляции в канале, для повышения его пропускной способности, с привязкой к текущему отношению сигнал/шум.

4.3.1. Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM)

Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM) является методом модуляции с множеством ортогональных поднесущих для мультиплексирования нескольких низкоскоростных сигналов в общий канал передачи с присвоением частот показанным на рисунке 4.1. Разница между ортогональным OFDM и обычным мультиплексированием с частотным разделением (МЧР) состоит в том, что разные поднесущие в системе OFDM перекрываются по спектру и поэтому не могут быть разделены обычной фильтрацией. Спектральный интервал между отдельными суб-носителями определяется как $\Delta f = \frac{1}{T_S}$, где T_S - длительность символа в OFDM. Один символ OFDM состоит из нескольких разделенных на Δf модулированных колебаний, у каждого из которых свои амплитуда и фаза в соответствии с данными, закодированными в символе. Физически процесс заключается в том, что несколько параллельных информационных символов объединяются в один символ OFDM, который вызывает прямоугольную модуляцию отдельных колебаний в каждом частотном канале во временной области со скоростью передачи символов $\frac{1}{T_S}$. Чтобы разделить отдельные поднесущие, необходимо сдвинуть каждую поднесущую в полосу частот исходного сигнала, и далее выполнить интегрирование по периоду символа OFDM. С одной стороны, это обеспечивает идеальное разделение поднесущих, а с другой — согласованную фильтрацию и, следовательно, мак-

симизацию отношения сигнал-шум для каждой поднесущей. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) наиболее точно выполняет эту операцию для всех поднесущих одновременно. И поскольку ДПФ можно упростить, а сложность всего процесса можно существенно снизить за счет использования быстрого преобразования Фурье (БПФ), метод OFDM стал в последнее время очень популярным и исследования по его использованию продолжаются.

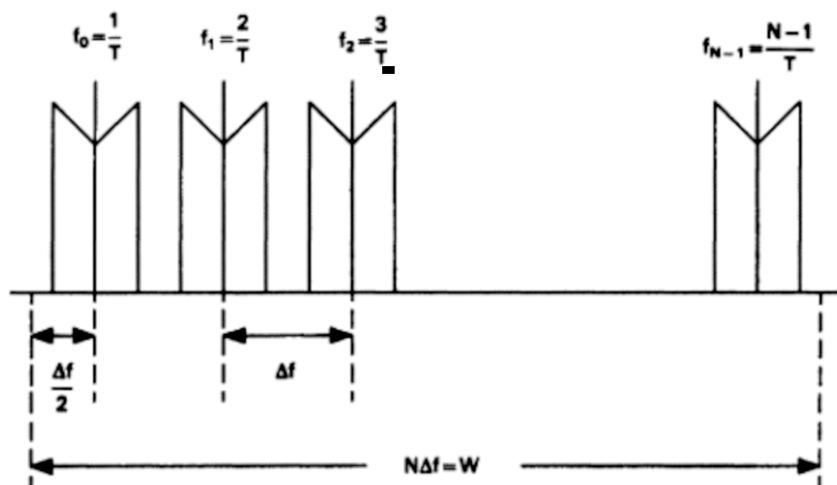


Рис. 4.1. Порядок присвоения частот OFDM

Более простым пояснением этого метода модуляции будет следующая идея — вместо последовательной передачи отдельных бит или символов, разные несущие частоты одновременно могут нести разные биты или символы одного сообщения с более высокой скоростью. Источник данных может быть представлен в параллельном формате, или последовательный источник должен быть представлен в последовательно-параллельном преобразователе так, чтобы выходной сигнал сразу подавался на несколько несущих или сразу представляется в виде сигнала таких несущих.

На рисунке 4.2 показана блок-схема работы OFDM в передатчике и приемнике. После последовательно-параллельного преобразования, модуляция поднесущих выполняется с использованием обратного БПФ (ОБПФ). Устройство расширения циклического префикса используется для синхронизации и сглаживания межсимвольных помех, после чего цифровой (и обычно сложный) сигнал во временной области преобразуется в аналоговый с использованием ЦАП. Затем этот сигнал исходного диапазона частот обычно преобразуется с повышением частоты в соответствующую радио- или оптическую полосу пропускания с использованием электрического или оптического модулятора соответственно. В приемнике сигнал OFDM преобразуется с понижением частоты, оцифровывается аналого-цифровым преобразователем, а затем демодулируется с использованием БПФ и обработки сигнала исходного диапазона частот для восстановления данных. Преимущество OFDM в радиоси-

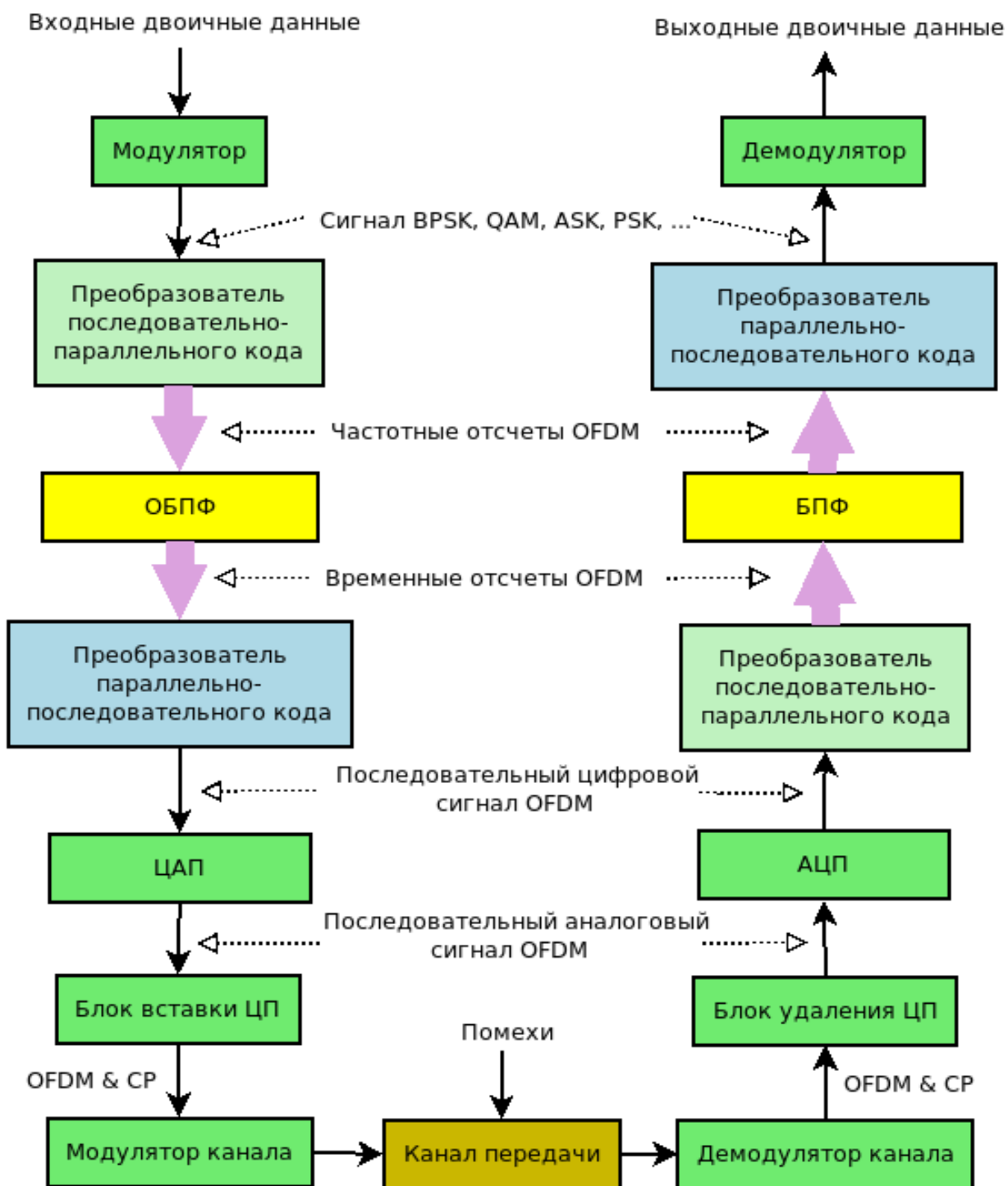


Рис. 4.2. Обобщенная блок-схема OFDM

стемах заключается в его адаптивности: отдельные поднесущие в достаточно узком диапазоне частот могут настраиваться на разные режимы модуляции и/или уровни мощности и, следовательно, имеют возможность адаптироваться под условия распространения сигнала в канальной среде.

С недавнего времени этот способ модуляции и мультиплексирования находит свое применение и в оптических каналах как метод спектрально-эффективной передачи данных с высоким битрейтом.

Первые исследовательские работы по OFDM для оптических систем передачи были опубликованы в 2006 году. Исследования продолжались и было представлено множество экспериментальных установок когерентных и некогерентных оптических систем с использованием OFDM.

Когерентные оптические системы OFDM разделяют на электрически и на оптически мультиплексированные системы OFDM.

В первом случае отдельные субканалы-поднесущие генерируются и мультиплексируются в цифровом виде путем использования цифрового ОБПФ (обратного быстрого преобразования Фурье) в передатчике. Полученный мультиплексированный (суммарный по всем каналам) многочастотный сигнал OFDM затем модулируется на оптическую несущую с помощью оптического модулятора. Прошедший через оптический канал сигнал преобразуется, когерентно распознается, и отдельные субканалы-поднесущие снова разделяются с помощью цифрового прямого БПФ в цифровом сигнальном процессоре (ЦСП) приемника.

Оптически мультиплексированные сигналы OFDM, напротив, генерируются из нескольких ортогональных оптических несущих, которые по-отдельности модулируются в прямоугольные электрические сигналы кодом без возврата к нулю (БВН) и далее подаются на оптические модуляторы. При этом необходимо использовать достаточно стабильные (по частоте и фазе) оптические излучатели, чтобы обеспечить ортогональность между ними и, таким образом, гарантировать демультимплексирование отдельных каналов без перекрестных помех.

В последнее время когерентный оптический OFDM рассматривается как способ мультиплексирования нескольких оптических каналов для формирования одного канала, как из электрически, так и из оптически мультиплексированных сигналов OFDM. Однако, при рассмотрении способов мультиплексирования сигналов OFDM в один оптический канал, требуется обязательно учитывать что стабильность оптических передатчиков имеет большое значение как для электрически, так и для оптически мультиплексированных сигналов OFDM и нестабильность оптической несущей определяет максимально возможную ширину использования для модуляции доступного излучателю спектра. Для ликвидации потребности в когерентных лазерных источниках, был предложен метод оптического мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) с асимметричным ограничением (ACO-OFDM, asymmetrically clipped optical OFDM), в котором для генерации и демультимплексирования сигнала OFDM допускается использовать несинхронизированные лазеры. Использование в методе ACO-OFDM только нечетных поднесущих для передачи информационных символов позволило максимально исключить интерференцию между несущими, что значительно

влияет на уменьшение межсимвольной интерференции, не искажает информационные символы и технологически имеет лучшую энергоэффективность по сравнению с традиционным DCO-OFDM.

4.3.2. Оптический OFDM с асимметричным ограничением (ACO-OFDM)

В системах связи и передачи информации технологически удобнее использовать при передаче только реальные и положительные сигналы, то есть униполярные сигналы. Примерами таких систем связи может быть оптическая связь как по оптоволокну, так и по свободному пространству, некогерентная беспроводная связь и различные формы цифровой связи в основной полосе частот по одному проводу. Разная дисперсия каналов и замирания из-за многолучевого распространения могут вызывать межсимвольные помехи и ухудшать характеристики таких униполярных систем связи.

Для компенсации этих эффектов в каналах связи, можно использовать униполярное мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM). Существуют три различных униполярных метода OFDM:

- Метод OFDM с постоянным смещением (DC-offset, DCO-OFDM), известный как традиционный униполярный метод OFDM, который использует свойство эрмитовой симметрии со смещением постоянного тока для генерации реального и положительного сигнала во временной области; при этом смещение постоянного тока зависит от отношения пиковой мощности к средней мощности (peak-to-average-power ratio, PAPR) символа OFDM и поскольку OFDM имеет высокое PAPR, амплитуда такого смещения постоянного тока обычно значительная. Исследования показали, что требование большого постоянного смещения делает метод DCO-OFDM неэффективным для излучателей оптических передатчиков. Использование более низкого смещения постоянного тока приводит к частому ограничению отрицательных частей сигнала во временной области и вызывает интерференцию между несущими с созданием внеполосных оптических помех.

- Оптический OFDM с асимметричным ограничением (asymmetrically clipped optical, ACO-OFDM) не требует смещения постоянного тока и использует только нечетные поднесущие для передачи информационных символов, а отрицательная часть сигнала временной области ограничивается. Такое ограничение не искажает информационные символы в нечетных поднесущих, хотя их амплитуды масштабируются вдвое. Сравнение энергоэффективности и производительности ACO-OFDM для одномодовых ВОЛС с другими схемами модуляции, такими как двухпозиционная манипуляция и базовый OFDM с постоянным смещением (DC-OFDM), показало, что ACO-OFDM имеет лучшую энергоэффективность в оптических каналах связи. А производительность ACO-OFDM может быть еще дополнительно улучшена за счет

использования схем битовой загрузки и комбинирования разнесения каналов при мультиплексировании.

- Еще одним альтернативным однополярным методом OFDM с ACO-OFDM является метод Flip-OFDM, в котором положительные и отрицательные части извлекаются из реального биполярного символа OFDM, сгенерированного путем сохранения свойства эрмитовой симметрии передаваемых информационных символов. Затем полярность отрицательных частей инвертируется перед передачей как положительных, так и отрицательных частей в двух последовательных символах OFDM. Поскольку передаваемый сигнал всегда положительный, Flip-OFDM также является однополярным методом OFDM, но является менее энергоэффективным, хотя и равным по производительности ACO-OFDM. По требованиям к аппаратному обеспечению сходен с методами базового OFDM.

Из рассмотренного перечня реализаций, оптический OFDM с асимметричным ограничением ACO-OFDM является одним из наиболее практичных и эффективных способов повышения скоростей передачи методами многочастотного мультиплексирования. Такая система передачи может использоваться как система с бинарными входными сигналами ($M = 2$), так и в качестве системы вторичной модуляции после M -ичной ASK, PSK, QAM и другими (с $M \geq 4$). Структурная схема системы передачи ACO-OFDM представлена на рисунке 4.3. В передатчике входящие информационные символы (сигналы) полученные после QAM отображаются на первую половину нечетных поднесущих, S_{2n+1} , где $n = 0, 1, 2, \dots, N/4 - 1$. На входах для всех четных поднесущих устанавливается нулевой сигнал, то есть $S_{2n} = 0$, $n = 0, 1, 2, \dots, N/2$. Поэтому, постоянная составляющая сигнала и четные символы $\frac{N}{2}$ поднесущих в спектре OFDM становятся равными нулю. Далее используем свойство эрмитовой симметрии и подаем на оставшиеся $\frac{N}{2}$ входы комплексно сопряженные входным сигналам для построения реального сигнала. После операции обратного БПФ (IFFT) символ $S_t(k)$ OFDM, вычисленный во временной области в соответствии с формулой преобразования, имеет свойство нечетной симметрии $S_t(k) = -S_t(k + N/2)$. Это позволяет удалить отрицательные временные отсчеты $S_t(t)$ сразу после цифро-аналогового преобразования в передатчике без разрушения исходной информации. Полученный сигнал $S_c(t)$ является унipoлярным сигналом и определяется как $S_c(t) \geq 0$ или нуль в противном случае. Циклический префикс, определяющий начало нового OFDM-кадра (фрейма) к выходному сигналу OFDM добавляется либо в блоке преобразователя параллельно-последовательного кода или сразу после него на выходе. Оптический модулятор преобразует канальный электрический сигнал ACO-OFDM в оптический, путем выбранной модуляции по интенсивности (чаще всего амплитудной).

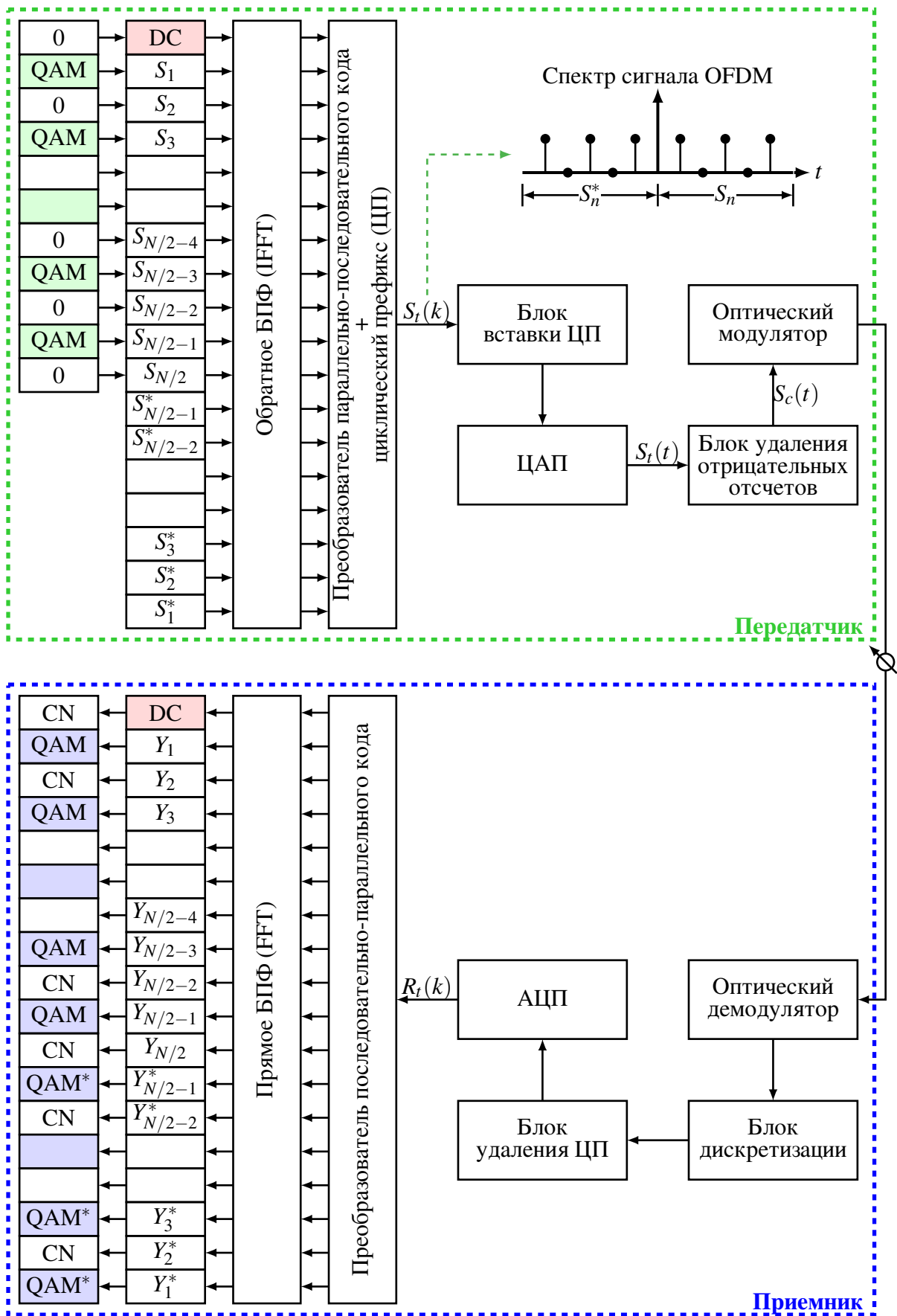


Рис. 4.3. Структурная схема системы передачи ACO-OFDM

На выходе оптической линии связи, образованной одномодовым оптоволоконным световодом, OFDM сигнал $R_c(t)$ принимается методом прямого обнаружения. После демодуляции принятый сигнал $R_t(t)$ дискретизируется и подается на блок удаления циклического префикса, который одновременно выполняет функции блока синхронизации кадров OFDM. После удаления циклического префикса отсчеты OFDM сигнала оцифровываются в аналого-цифровом преобразователе $R_t(k)$ и подаются на вход преобразователя последовательно-параллельного кода для формирования полного временного кадра OFDM. Затем выполняется операция прямого БПФ (FFT), по результатам которой могут быть обнаружены информационные символы (сигналы) QAM Y_n , содержащиеся в нечетных поднесущих.

В четных каналах после прямого БПФ обнаруживаются дискретизированные сигналы канального шума, обозначенные на схеме как CN (clipping noise). Эти данные можно использовать как результат шумовых оценок для первой решающей схемы.

Вторая половина кадра OFDM на выходе системы передачи ACO-OFDM представлена зеркально расположенными в соответствии с эрмитовой симметрией комплексно-сопряженными значениями выходных сигналов M-ичной QAM. Эти выходные сигналы могут быть проигнорированы или задействованы при цифровой обработке при необходимости и по желанию разработчика системы передачи.

Спектральная эффективность — в ACO-OFDM каждый символ OFDM в общем случае несет $\left(\frac{N}{4} - 1\right)$ информационных символов.

Общая энергия в кадре ACO-OFDM равна $\frac{E_s N}{2}$. Следовательно, энергия одного информационного символа в канале ACO-OFDM устанавливается равной $2E_s$. В приемнике, с учетом нулевых нечетных поднесущих и обработке, при которой отбрасывается половина энергии исходного сигнала на выходах QAM, энергия символа возвращается к своему входному значению E_s . Энергия в нечетных поднесущих является канальным шумом и может использоваться как уровень шума ограничения для отсечения помех в канале.

В ACO-OFDM мощность шума составляет половину общеканального шума OFDM и равна $\frac{\sigma_z^2}{2}$, при условии канального белого нормального шума (AWGN) с плотностью $N_0(0, \sigma_z^2)$.

Соответственно, эквивалентный SNR будет равен $SNR = \frac{\sigma_x^2}{2 \cdot \sigma_z^2}$, где σ_x^2 обозначает мощность переданного сигнала.

Коэффициенты битовых ошибок - аналитическое выражение BER для АСО-OFDM в канале AWGN для прямоугольного созвездия M-QAM

$$P_b \simeq \frac{2}{\log_2 M} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3}{2(M-1)}} \operatorname{SNR} \right),$$

где $\operatorname{erfc}(\cdot)$ - дополнительная функция ошибок.

Предварительная многоуровневая квадратурная амплитудно-фазовая модуляция M-QAM является одним из вариантов для наилучшего уплотнения OFDM несущих при мультиплексировании с ортогональным частотным разделением каналов.

4.3.3. Квадратурная амплитудная модуляция

Квадратурная амплитудная модуляция (КАМ) (англ. Quadrature amplitude modulation (QAM)) — это способ или схема линейной модуляции, при которой входные символы информационного сигнала источника определяют амплитуду и фазу несущего сигнала. В отличие от фазовой манипуляции (PSK) огибающая сигнала КАМ (QAM) может быть непостоянна и изменять свою амплитуду в зависимости от расположения сигнальных точек созвездия и их количества. Последовательность из назначенных или определенных K входных информационных символов при КАМ может быть представлена сигналом

$$v_{\xi}(t) = \Re \left\{ \sum_{k=0}^{K-1} \xi_k s(t - kT) e^{j2\pi f_0 t} \right\}, \quad 0 \leq t \leq KT,$$

где дискреты ξ_k определяются как

$$\xi_k \equiv \xi'_k + j\xi''_k = A_k e^{j\phi_k},$$

а $s(t)$ - комплексный информационный сигнал основной полосы частот длительностью T . Если этот информационный сигнал представляет собой прямоугольный импульс единичной амплитуды $s(t) = u_T(t)$, как представлено на рисунке 4.4, то сигнал КАМ можно переписать в виде

$$v_{\xi}(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \left\{ \xi'_k \cos 2\pi f_0 t - \xi''_k \sin 2\pi f_0 t \right\} u_T(t - kT),$$

который выражает передаваемый сигнал в виде пары ортогональных несущих, модулированных набором дискретных амплитуд. Полученное семейство сигнальных созвездий КАМ (QAM) является двумерным и его модулятор и демодулятор имеют такую же структуру, как и при фазовой дискретной манипуляции (PSK), рисунки 4.5 и 4.6.

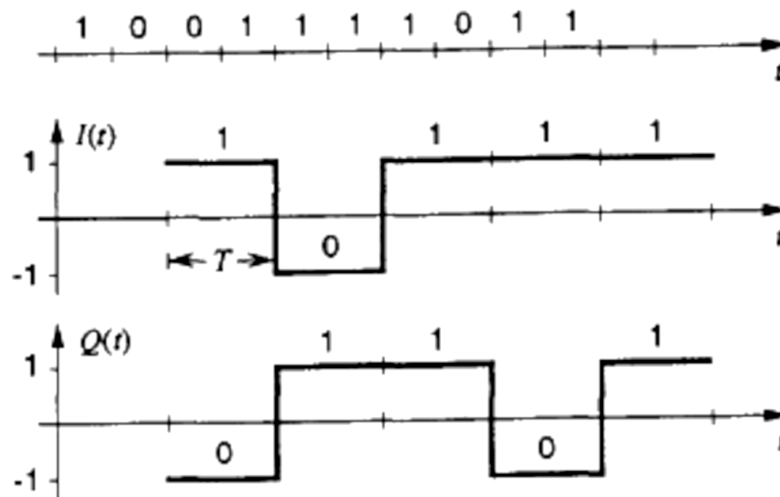


Рис. 4.4. Преобразование информационного сигнала основной полосы частот при КАМ.

Необходимое для представления входного информационного сигнала в векторном пространстве сигнальное созвездие М-арной квадратурной амплитудной модуляции выбирается при проектировании. Оно должно обеспечивать оптимальную реализацию структуры системы передачи данных с точки зрения динамического диапазона используемого канала связи, возможных помех в канале (отношений сигнал/помеха), необходимой пропускной способности канала и упрощения ее практической реализации.

Используя комбинацию множества амплитуд и фаз для передачи каждого из М символов, метод М-арной квадратурной амплитудной модуляции позволяет увеличить пропускную способность канала (-ов) связи за счет уменьшения скорости (темпа) передачи входного информационного потока. Эффективное заполнение пространства сигналов делает метод КАМ (QAM) более эффективным, чем ASK и PSK, особенно с точки зрения зависимости вероятности битовой ошибки от скорости передачи. Это увеличение достигается большим расстоянием между символами созвездия. Для достижения еще более высокой пропускной способности каналы с КАМ мультиплексируются с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM).

Вероятность ошибок

Вероятность появления символьной ошибки для М-ичного квадратного QAM-созвездия, вырезанного из $Z^2 + \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$, выводится из перекрестного произведения двух независимых комбинаций РАМ (ASK) созвездий с \sqrt{M} сигналами каждого и средней энергией, равной половине энергии QAM созвездия (так что энергия бита E_b одинакова для обоих созвездий и РАМ, и QAM). Это обосновано тем, что квадратное созвездие может быть демодулирова-

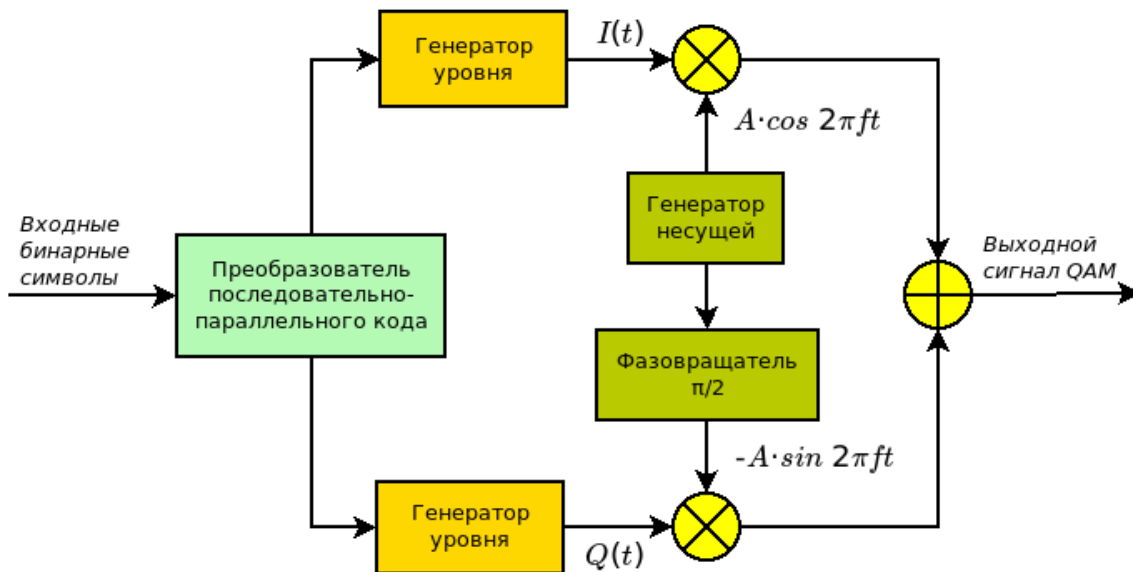


Рис. 4.5. Структурная схема модулятора сигнала КАМ.

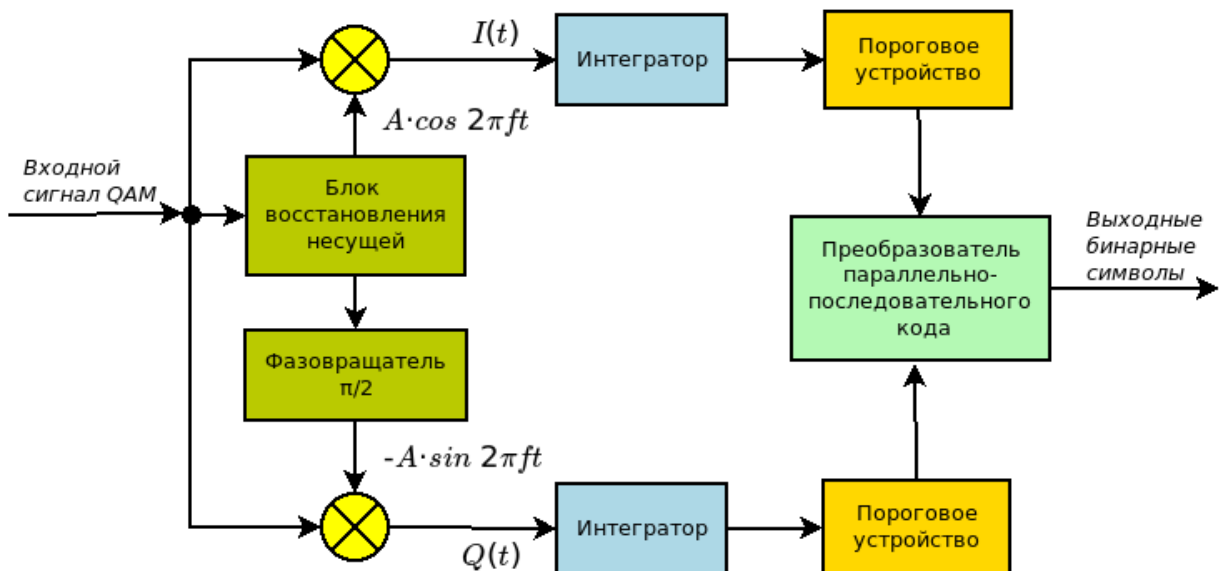


Рис. 4.6. Структурная схема демодулятора сигнала КАМ.

но независимо по двум координатным осям, соответствующим синфазной и квадратурной составляющим.

Таким образом, вероятность правильного обнаружения для М-ичного QAM сигнала в предложенном представлении равна квадрату вероятности правильного обнаружения РАМ (ASK) созвездия с \sqrt{M} сигналами, полученными путем проецирования первого на одну координатную ось. Если p обозначить как вероятность появления символьной ошибки в каждом созвездии РАМ, получим

$$P(e) = 1 - (1 - p)^2 = 2p - p^2.$$

Далее, с учетом влияния расстояния до соседних сигнальных точек определяем

$$p = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{2(M-1)} \frac{E_b}{N_0}} \right).$$

Запишем среднюю сигнальную энергию КАМ для соседних точек, исходя из перекрестного произведения созвездий PAM (ASK)

$$E = \frac{M-1}{6} d_{\min}^2.$$

И тогда простая верхняя оценка вероятности появления символьной ошибки будет

$$P(e) \leq 2 \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{2(M-1)} \frac{E_b}{N_0}} \right).$$

С увеличением M средняя энергия созвездия будет равна

$$E = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |s_i|^2.$$

Примечание. Методические указания по выбору и применению способов модуляции и мультиплексированию сигналов разрабатываемой системы передачи данных являются обобщенными типовыми рекомендациями. Студент, выполняющий настоящее курсовое проектирование вправе сам принимать решения о способах мультиплексирования и модуляции сигналов в разрабатываемой системе. Обязательным к исполнению в курсовом проекте являются значения технических параметров, которые обязаны быть не хуже, чем указанные в задании.

Раздел 5

Расчет помехоустойчивости каналов проектируемой системы

5.1. Теоретические сведения

Вопросы анализа и повышения помехоустойчивости имеют существенное значение при разработке систем передачи цифровой информации.

На вход приемника, кроме сигналов $s_{ki}(t)$ прошедших по каналу передачи цифровой линии связи попадают и различные аддитивные помехи внешнего происхождения (сигналы других систем и соседних по частотному диапазону каналов, промышленные и атмосферные помехи, шумы среды и т.д.) плюс аддитивные внутренние флуктуационные шумы приемника. Таким образом, на входе приемника действует непрерывный случайный процесс

$$y(t) = s_{ki}(t) + \sum_{j=1}^N n_j(t),$$

где $n_j(t)$ — случайный процесс, соответствующий одной из аддитивных помех и N — число независимых источников помех.

В приемнике системы передачи принятая смесь сигнала и помех должна быть преобразована в сообщение, соответствующее переданному. Но из-за действия помех, влияния среды, погрешности преобразований, вызванных неидеальностью и нестабильностью узлов и элементов схемы полного соответствия может и не быть. А сама полнота такого соответствия зависит от множества факторов, которые необходимо учитывать для правильного декодирования поступающих сигналов. Одновременно с перечисленными факторами естественного характера нестрогость теории помехоустойчивости вызвана еще и факторами моделирования и объясняется следующими причинами: трудностью получения точного выражения функции плотности вероятности межсимвольных помех; разнообразием исходных данных при анализе; неаддитивностью межсимвольных помех и неравномерностью их энергетического спектра. Тем не менее известен ряд приближенных методов позволяющих выполнять расчеты и производить оценки с достаточной для практического применения точностью.

5.2. Помехоустойчивость различных видов модуляции

Проведем сравнение видов модуляции по критерию энергетической эффективности. Для этого произведем оценку для каждого вида модуляции необходимой энергии сигнала для передачи информации с одинаковой вероятностью ошибки на бит. Основным соотношением, связывающим вероятность би-

товой ошибки BER с величиной отношения сигнал/шум $SNR = \frac{E_s}{N_0}$ для различных видов модуляции будет функция:

$$BER = \frac{E_s}{N_0},$$

где E_s — энергия, необходимая для передачи одного символа или бита информации, N_0 — спектральная плотность мощности белого шума в канале передачи. Если мощность передатчика равна P , то величина энергии, приходящаяся на один символ или бит информации будет $E_s = P \cdot T_s$, где T_s — длительность символа или бита. В таблице 5.1 приведены зависимости вероятности ошибки на один символ или бит в зависимости от отношения сигнал/шум для различных видов модуляции.

Таблица 5.1

Вероятность символьной ошибки для различных видов модуляции.

№	Вид модуляции	Вероятность ошибки на символ, BER
1	OOK	$erfc\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}}\right)$
2	M-ASK код Грея	$\frac{2(M-1)}{M \cdot \log_2 M} erfc\left(\sqrt{\frac{\log_2 M}{(M-1)^2} \cdot \frac{E_s}{N_0}}\right)$
3	BPSK	$erfc\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}\right)$
4	Некогерентная DBPSK	$\frac{1}{2} e^{\left(-\frac{E_s}{N_0}\right)}$
5	Когерентная DBPSK	$2 \cdot erfc\left(\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}\right) \left(1 - erfc\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}\right)\right)\right)$
6	QPSK код Грея	$erfc\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}\right)$
7	Когерентная DQPSK, при $\frac{E_s}{N_0} \gg 1$	$2 \cdot erfc\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}\right)$
8	M-PSK код Грея	$\frac{2}{\log_2 M} \cdot erfc\left(\sqrt{\frac{2E_s \log_2 M}{N_0} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{M}\right)}\right)$
9	FSK	$erfc\left(\sqrt{\left(1 - \frac{\sin(2\pi \cdot m)}{2\pi \cdot m}\right) \frac{E_s}{N_0}}\right)$
10	MSK	$erfc\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}}\right)$
11	M-MSK	$\frac{2(M-1)}{M \cdot \log_2 M} erfc\left(\sqrt{\log_2 M \cdot \frac{E_s}{N_0}}\right)$
12	QAM код Грея, для $k = \log_2 M$ четных	$BER = \frac{2P_0 - P_0^2}{\log_2 M}$, где $P_0 = \frac{2(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M}} erfc\left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M - 1} \frac{E_s}{N_0}}\right)$

Вероятность символьной ошибки для различных видов модуляции.

№	Вид модуляции	Вероятность ошибки на символ BER
13	QAM код Грея, для $k = \log_2 M$ нечетных	$BER \leq \frac{1}{\log_2 M} \left[1 - \left(1 - 2 \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M-1} \frac{E_s}{N_0}} \right) \right)^2 \right]$

Представленная в таблице функция $\operatorname{erfc}(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_s^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ — это дополнительная функция ошибок сигнального созвездия, M — число позиций сигнального созвездия, m — индекс частотной модуляции.

С увеличением количества позиций модуляции, вероятность битовой ошибки увеличивается (например, формулы M-ASK и M-PSK, $\operatorname{erfc}(s)$ является убывающей функцией аргумента). Таким образом, как правило, при увеличении спектральной эффективности энергетическая эффективность уменьшается.

Битовая ошибка BER для BPSK и QPSK описываются одинаковыми формулами, но при этом QPSK в 2 раза спектрально эффективнее, чем BPSK. Следовательно, QPSK всегда существенно эффективнее, чем BPSK, и, обыкновенно, имеет смысл использовать QPSK, а не BPSK. Физически, это объясняется тем, что в случае QPSK добавляется дополнительная степень свободы: квадратурная составляющая $Q(t)$. В случае BPSK используется только синфазная составляющая $I(t)$. Квадратурная форма когерентного фазового демодулятора приводит к тому, что два канала детектора обеспечивают независимый прием двух бинарных фазомодулированных сигналов. Но для случаев предельных расстояний, когда динамический диапазон сигнала недостаточен для уверенного обеспечения QPSK применение BPSK оправдано и выгоднее с точки зрения энергетического сигнального выигрыша на входе приемника канала. Аналогичное явление имеет место и при сравнении модуляций DBPSK и DQPSK (с относительным кодированием). Хотя выражения для BER несколько отличаются, но на практике они с высокой степенью приближения совпадают. Модуляции с относительным кодированием имеют небольшой энергетический проигрыш по сравнению с обыкновенными BPSK и QPSK (примерно 0.3 – 0.9 дБ). DBPSK с некогерентным детектированием также имеет небольшой проигрыш по сравнению с DBPSK с когерентным детектированием (около 0.5 дБ). Под энергетическим выигрышем понимается разница в величине $SNR = \frac{E_s}{N_0}$ при одинаковом значении вероятности ошибки на бит.

5.3. Расчет помехоустойчивости системы передачи

Выполнение расчетов в курсовом проекте необходимо производить используя теоретические сведения теории сигналов, основ радиотехники и тео-

рии связи, полученные в ходе лекционного обучения, и из учебно-методических и справочных литературных источников.

Расчетная часть этого раздела в составе курсового проекта должна обязательно содержать результаты расчета помехоустойчивости в канале передачи данных при воздействии на сигнал "белого" шума. Моделирование помехоустойчивости и получение графика ошибок $BER = f(SNR)$ необходимо производить с применением всех способов модуляции сигнала предполагаемых к использованию в проектируемой системе передачи данных. По полученному графику необходимо определить граничное (или предельно допустимое) отношение сигнал/шум, при котором полученный уровень BER соответствует нулевому уровню ошибок в системе передачи.

По желанию студента раздел может содержать теоретический анализ помехоустойчивости сигнала по используемым методам модуляции в канале передачи данных с приведением расчетного теоретического графика ошибок и его сравнения с графиком полученным в результате моделирования работы системы.

Примечание. Результаты всех расчетов необходимо приводить с указанием значимых для расчета особенностей априорных предположений примененной математической и/или физической модели. Если такие предположения имеют вид, или могут быть выражены в виде математической, физической или параметрической измеряемой величины, то их указание при отображении результатов **ОБЯЗАТЕЛЬНО!**

Раздел 6

Разработка и описание структурной схемы цифровой системы передачи данных

Структурная схема — это совокупность элементарных звеньев объекта и связей между ними, один из видов графической модели. Под элементарным звеном понимают часть объекта, системы управления и т. д., которая реализует элементарную функцию. В теории автоматического управления

Элементарные звенья изображаются прямоугольниками, а связи между ними — сплошными линиями со стрелками, показывающими направление действия звена. Иногда в поле прямоугольника вписывают математическое выражение закона преобразования сигнала в звене, в этом случае схему иногда называют алгоритмичной.

В схемотехнике вместе со структурной различают также принципиальную и функциональную схему. Среди всех этих схем структурная наименее детализирована.

Она предназначена для отражения общей структуры устройства, то есть его основных блоков, узлов, частей и главных связей между ними. Из структурной схемы должно быть понятно, зачем нужно данное устройство и что оно делает в основных режимах работы, как взаимодействуют его части. Обозначение структурной схемы могут быть достаточно свободными, хотя некоторые общепринятые правила всё же лучше выполнять.

6.1. Рекомендации по разработке структурной схемы системы передачи

Абонентский трафик всех узлов доступа должен быть агрегирован в соответствии с рекомендациями по фрагментации сети клиентских C-VLAN и полученной в результате расчета пропускной способностью для всех абонентов фрагмента сети по всем видам услуг. В результате будет получена схема агрегации сети абонентского доступа (самый простой вариант). Далее в соответствии с принятым вариантом по схеме резервирования (или без него, если резервирование планируется производить как-то иначе) необходимо объединить полученные фрагменты сетей, сохраняя необходимую пропускную способность абонентских узлов доступа. Таким образом будет подготовлена схема агрегации для всех абонентов муниципальной сети передачи данных.

Затем, в соответствии с количеством и пропускной способностью каждого канала передачи данных, выбранного в соответствии с результатами, полученными в разделе по расчету модуляции необходимо распределить трафик по каналам передачи данных системы, используя мультиплексирование

данных с выходов портов коммутаторов. Если до этого момента вопрос с резервированием не решен, то его необходимо учитывать при распределении портов мультиплексоров.

Кроме простых предложенных решений по фрагментации и резервированию абонентского трафика, может использоваться более гибкий, но более сложный в проектировании вариант. На своих сетях передачи данных для управления заявленными услугами операторы связи применяют порталы и личные кабинеты, которые сохраняют назначенные пользователями-абонентами услуги в БД и используя обращения к этим базам BRAS-ов организуют с помощью серверов приложений управление доступом и услугами.

Разделение трафика телекоммуникационных услуг L3 VPN, L2 VPN, VPLS и доступа в Интернет происходит на основе VLAN тегов, по принципу один VLAN на абонента (C-VLAN), для увеличения количества абонентских интерфейсов для крупных узлов используется двойное тегирование, и в этом случае интерфейс абонента определяется двумя VLAN тегами (C-VLAN и S-VLAN). Используется базовая схема доступа AAA на BRAS (трехсторонняя аутентификация или аутентификация на удаленном узле) для серверов услуг, приложений и сетевых пограничных маршрутизаторов.

Абоненту по выбору всегда доступны два вида IP-адресации:

- динамическая;
- статическая.

Некоторые операторы для повышения надежности услуги и стабильности доступа к своей сети используют следующие, более гибкие схемы резервирования. Производится выделение второго C-VLAN для подключения абонента, и это дает возможность резервировать услугу в сетях агрегации и доступа. Для каждого абонента сервисные псевдопровода прокладываются по различным физическим трассам, чтобы исключить обрыв обоих псевдопроводов при аварии одного из каналов в сети агрегации с «приземлением» основного и второго абонентских VLAN-ов на различных коммутаторах или маршрутизаторах агрегации PE-AGG.

При этом на используемых промежуточных коммутаторах протокол STP (xSTP) должен быть включен в конфигурации по умолчанию, для предотвращения широковещательных штормов в случае ошибки коммутации линий связи. Кроме того, при использовании таких схем VLAN на интерфейсах между NAS, маршрутизатором и BRAS, каждый используемый верхний тег должен коммутироваться на абонентские порты нескольких BRAS. Таким образом, широковещательный PPPoE или DHCP discovery запрос «видят» все BRAS, обслуживающие данную группу абонентов, при этом абонент инициирует сессию с первым ответившим на запрос BRAS. Данная схема работы более равномерно распределяет нагрузку между всеми маршрутизаторами BRAS в груп-

пе и обеспечивает резервирование услуги за счет взаимного резервирования BRAS.

6.1.1. Функциональные уровни сети передачи данных с позиции управления услугами

Сеть для предоставления услуг связи абонентам включает в себя следующие функциональные уровни показанные на рисунке (6.1):

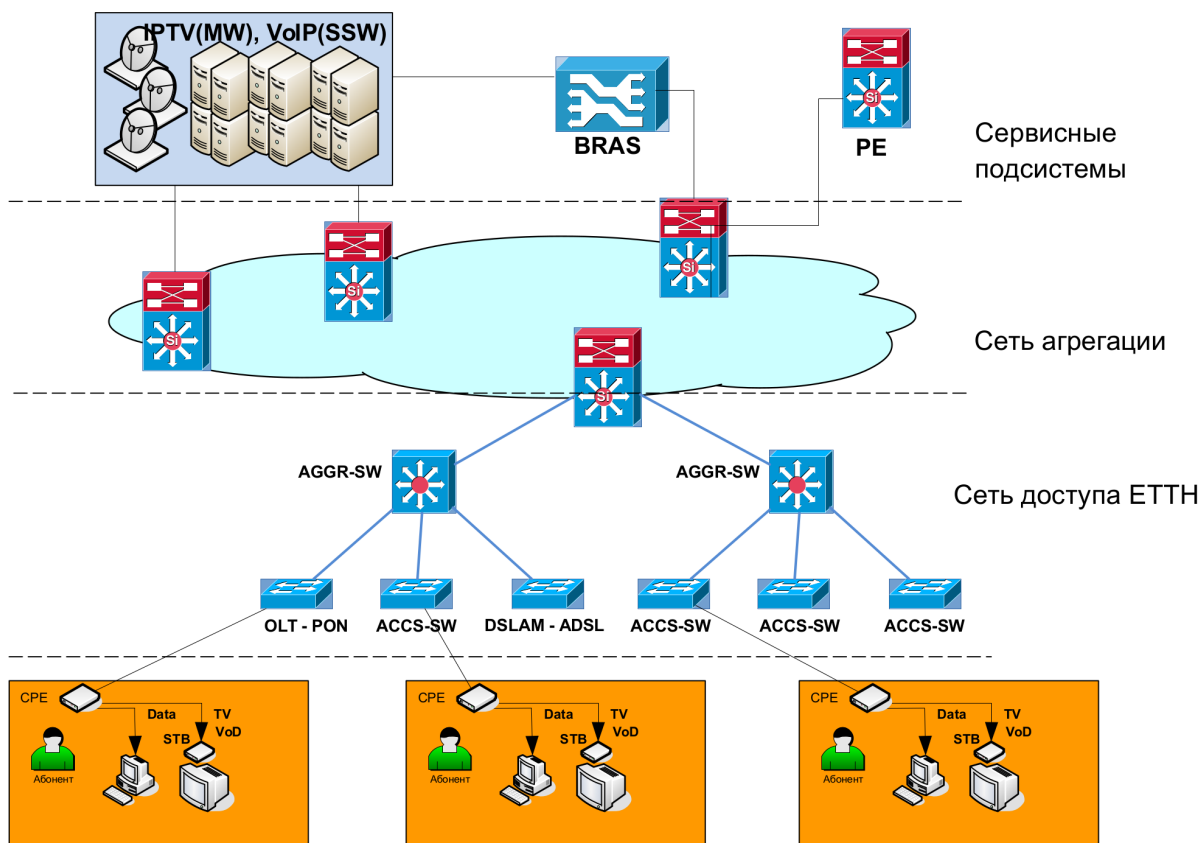


Рис. 6.1. Функциональные уровни управления услугами типовой операторской сети.

- Абонентские устройства. На данном уровне происходит идентификация услуги (S-VLAN) и классификация трафика согласно модели QoS.
- Уровень доступа. В устройства уровня доступа включаются абонентские устройства. На данном этапе происходит промежуточная идентификация абонента (C-VLAN).

Абонентское устройство (ADSL-модем, ONT или CPE) включается в access-порт коммутатора доступа (DSLAM, OLT или ACCS-SW) в зависимости от применяемой на сети абонентского доступа технологии СПД (ADSL, PON или FTTB). На абонентском интерфейсе происходит идентификация клиента посредством наложения (выделения) C-VLAN.

Для обеспечения корректной работы коммутатора доступа по предоставлению сервиса IPTV на нем должна быть включена функция «igmp-snooping».

На каждый коммутатор доступа, подключенный к определенному порту сервисного маршрутизатора, назначается диапазон из C-VLAN по количеству абонентских портов, уникальных для этого интерфейса маршрутизатора. VLAN-ы из этого диапазона назначаются последовательно на все интерфейсы коммутаторов доступа (или NAS). Для предотвращения массовых отказов коммутаторы доступа не должны подключаться друг за другом, образуя цепи.

- **Уровень агрегации.** На этом уровне выполняется агрегирование трафика с уровня доступа и его доставка к устройствам сервисного уровня. Сеть уровня агрегации служит для прозрачной передачи трафика абонентов от устройств уровня доступа к устройствам сервисного уровня. В зависимости от предоставляемого транспорта на сети передачи данных устройства уровня доступа могут включаться в сервисный уровень тремя способами:

1. По выделенным каналам. При этом, осуществляется строительство новых оптических каналов (по аналогии с настоящим курсовым проектированием) либо использование существующих каналов в сети ONT (CWDM или DWDM в зависимости от потребности сети).

2. Через MPLS-сеть агрегации (L2+ сегмент). L2+ сегмент – это промежуточная транспортная сеть, предоставляющая услугу туннелирования Ethernet фреймов.

3. Через L2 сегмент посредством наложенной MPLS-сети. В данном случае в качестве устройства агрегации используется MPLS-агрегатор.

- **Сервисный уровень.** Служит для терминирования пользовательских интерфейсов и назначения политик для доступа к услугам. Основная задача, выполняемая маршрутизаторами на сервисном уровне – L3-терминирование логических каналов, соответствующих сервисам определённых пользователей, кроме этого сервисный уровень обеспечивает:

- идентификацию абонентов и услуг;
- применение политик в соответствии с абонентскими профилями;
- управление правами доступа;
- управление качеством обслуживания;
- дальнейшую маршрутизацию трафика к серверам приложений и/или источникам вещания.

Пара (или две пары) сервисных маршрутизаторов может обеспечить резервирование услуг по портам, причём, в каждый момент времени услуги предоставляются на своем активном маршрутизаторе, второй маршрутизатор может находиться в резерве без абонентского трафика и/или обслуживать свою группу абонентов, выступая резервным для первой группы. Сервисные маршрутизаторы должны быть связаны между собой высоконадежными каналами для того, чтобы обеспечить непрерывный обмен информацией по протоколам, поддерживающим механизмы резервирования услуг. Для этого используется агрегирование физических интерфейсов. Пропускная способность ка-

налов должна соответствовать пользовательской нагрузке, проходящей между сервисными маршрутизаторами по настроенным правилам анонсирования клиентских префиксов в ядро сети (особенно в момент переключения с активного маршрутизатора на резервный).

6.2. Общие методические рекомендации по разработке структурной схемы

Как и любое проектирование выполнять разработку схему нужно поэтапно. Вначале следует составить (на черновике) укрупненную схему системы передачи состоящую например, из следующих, последовательно соединенных функциональных блоков (в качестве примера можно использовать рисунок 4.2, изменяя и дополняя его блоками) для передачи трафика в одну сторону:

- муниципальная сеть с неопределенным количеством выходов;
- входной мультиплексор системы передачи с неопределенным количеством входов и выходов;
- неопределенное количество М-ичных входных модуляторов;
- указанное в задании количество OFDM передатчиков (соответствует количеству поднесущих частот в одну сторону передачи);
- указанное в задании количество оптических модуляторов (соответствует количеству поднесущих частот в одну сторону передачи);
- мультиплексор CWDM стороны А на указанное в задании количество входов (соответствует количеству поднесущих частот в одну сторону передачи) и выходов (соответствует количеству поднесущих частот в другую сторону передачи);
- оптический кросс;
- ВОЛС;
- оптический кросс;
- мультиплексор CWDM стороны В на указанное в задании количество выходов (соответствует количеству поднесущих частот в одну сторону) и входов (соответствует количеству поднесущих частот в другую сторону передачи);
- указанное в задании количество оптических демодуляторов (соответствует количеству поднесущих частот в одну сторону передачи);
- указанное в задании количество OFDM приемников (соответствует количеству поднесущих частот в одну сторону передачи);
- неопределенное количество М-ичных выходных демодуляторов;
- выходной мультиплексор системы передачи с неопределенным количеством входов и выходов;
- ядро сети оператора связи.

На этой же схеме определить и обозначить укрупненные блоки для передачи в другую сторону. Обозначить на схеме количество оптических волокон ВОЛС с увеличением количества блоков и укрупненным продолжением структурной схемы под нужное количество волокон.

Так, как учет резервирования каналов выполнен, окончательно определить для указания в результатах проектирования форму канального резервирования трафика в проектируемой системе передачи с учетом задания и:

- выхода из строя М-ичного входного модулятора (демодулятора) ЦСП;
- выхода из строя OFDM передатчика (приемника) или оптического модулятора (демодулятора) ЦСП;
- обрыва волокна или оптического кабеля;

Следующим этапом (на черновике) выполнить проектирование структурной схемы OFDM передатчика и приемника отдельно, с учетом количества входов (для передатчика) и выходов (для приемника). За образец можно использовать схему ACO-OFDM на рисунке 4.3. Затем принять решение о проектировании дополнительных блоков (по желанию студента).

Затем при любом методе входной модуляции (GMSK, М-ичной ASK, PSK, QAM ..., любой с IxQ представлением входного сигнала), кроме ее полного отсутствия и обычном бинарном сигнале на входах OFDM передатчика, возможно применение схемы модулятора и демодулятора указанных на рисунках 4.5 и 4.6.

Далее рассчитываем входной мультиплексор исходя из полученного по результатам предварительных расчетов количества входных каналов модуляторов — это будут выходы входного мультиплексора и выполняем блочное проектирование входов мультиплексора — определяем количество входов Ethernet ЦСП — выходов маршрутизаторов муниципальной сети (лучше использовать электрический интерфейс 1 Гбит), но можно и 10 Гбит оптический, но уже тогда с расчетом соответствующего демультимплексора на соответствие полосы пропускания вход-выход.

Затем рассчитываем выходной мультиплексор - зеркально по входам — выходам М-ичных демодуляторов и с выходами в соответствии с полосой пропускания по полученным расчетам объединяя их в 10 Гбит оптические выходы для подачи на агрегирующие маршрутизаторы ядра сети (минимум на 2).

Затем с подробностями по выбору студента и в соответствии с рекомендациями из расчета пропускной способности выполняем проработку структурной схемы муниципальной сети стороны А системы передачи.

Далее ориентируясь на рисунок 1.1 выполняем проработку структуры ядра сети оператора.

Общую структурную схему разработанной цифровой системы передачи выполнять в соответствии с проработанными блоками и по правилам исполнения структурных схем. Схему выполнять на соответствующем размеру форматном листе. Допускается ее деление на части с указанием листов и их исполнением на формате А4. Переход связей выполнять в соответствии с правилами выполнения электрических схем. Неизвестные символы и значения десятичного номера допускается заменять косым крестом по размеру шрифта (X).

Раздел 7

Моделирование канальных сигналов цифровой системы передачи данных

Выполнять сигнальное моделирование в канале передачи данных рекомендуется каждый раз при принятии решения о применении способа модуляции или корректировки значений параметров модуляции в разрабатываемой системе передачи.

Основой программного обеспечения могут быть проверенные и рекомендованные к использованию программы моделирования на основе пакета компьютерной алгебры "Octave" для выполнения лабораторных и практических работ, использованные в ходе обучения по курсу «Теория, системы и устройства передачи данных».

Дополнительными программами, рекомендованными к применению для предварительных расчетов в ходе курсового проектирования являются программы на основе пакета компьютерной алгебры "Octave" «raschet-VOLS-kurs-TSiUPD.m» и «raschet-Skorosti-kurs-TSiUPD.m». При их использовании, как и во всех иных случаях модификацию текстов программ и ввод исходных значений и параметров расчетов студент производит самостоятельно.

Перечень обязательных к представлению результатов моделирования канальных сигналов цифровой системы передачи данных следующий:

1. геометрическое представление сигнального созвездия в IxQ координатах на одном из канальных входов блока OFDM передатчика;
2. геометрическое представление сигнального созвездия в IxQ координатах на одном из канальных выходов блока OFDM приемника без циклового префикса в соответствии с правилами мультиплексирования частотных каналов OFDM, примененными в реализации курсового проекта и и при граничном отношении сигнал/шум, который соответствует нулевым ошибкам в канале приема;
3. геометрическое представление сигнального созвездия в IxQ координатах на входе приемника можно с или без использования циклового префикса в соответствии с правилами мультиплексирования частотных каналов OFDM, примененными в реализации курсового проекта и и при граничном отношении сигнал/шум, который соответствует нулевым ошибкам в канале приема (эта сигнальная диаграмма выполняется по желанию студента);
4. временную диаграмму сигнала OFDM с выключенным циклическим префиксом на выходе передатчика (сигнальная реализация отсчетов длительностью $1,5 \div 2,5$ кадра OFDM);

5. временную диаграмму сигнала OFDM с включенным циклическим префиксом на выходе передатчика (сигнальная реализация отсчетов длительностью $1,5 \div 2,5$ кадра OFDM);

6. две временные диаграммы восстановленного биполярного и униполярного сигнала на одном из канальных выходов блока OFDM приемника при граничном отношении сигнал/шум, который соответствует нулевым ошибкам в канале приема (сигнальная реализация на $50 \div 80$ отсчетов);

7. мгновенный спектр сигнала на выходе передатчика;

8. накопленный спектр мощности сигнала на выходе передатчика;

9. графики BER в выбранных пределах канального шума, определяющие качество работы канала передачи с указанным количеством поднесущих частот и выбранным для реализации курсового проекта сигнальным созвездием, характеризующие помехоустойчивость спроектированной системы передачи и в соответствии с расчетом помехоустойчивости (представить в соответствующем разделе проекта).

По результатам моделирования канальных сигналов системы передачи данных выполнить анализ полученных результатов и представить выводы на соответствие спроектированной системы техническому заданию.

Примечание. Графики и диаграммы не отображающие характерные сигнальные точки (типа сильно зачерченных геометрических фигур, на которых невозможно что-то оценить) (за исключением сигнальных созвездий в IxQ координатах) представлять в проекте не нужно (будет считаться ошибкой, как и отображение нехарактерного параметра на диаграмме или графике). На полях графиков и диаграмм рекомендуется отображать координатную сетку, дополнять их необходимыми поясняющими надписями и значениями параметров, но только характеризующими данную зависимость или сигнальную диаграмму.

Владимиров Сергей Александрович

ТЕОРИЯ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ
Методическое руководство по курсовому проектированию

Редактор **Х. Х. Хxxxxxxxxxx**

План изданий 20XX г., п. XX

Подписано к печати **XX.XX.XXXX**
Объем X,0 печ. л. Тираж 10 экз. Заказ **XXXX**

Редакционно-издательский отдел СПбГУТ
193232 СПб., пр. Большевиков, 22
Отпечатано в СПбГУТ