

АННОТАЦИЯ

Магистерская диссертация «Разработка и исследование системы связи для ведомственных служб на основе Атмосферной Оптической Линии Связи» посвящена актуальной задаче разработки и исследованию системы связи для ведомственных служб на основе Атмосферной Оптической Линии Связи в Республике Узбекистан. В диссертации проводится комплексный анализ и исследование характеристик и особенностей применения атмосферных оптических линий связи. В работе использованы различные методы анализа, синтеза, дедукции при исследовании систем атмосферных оптических линий связи. Значимость полученных результатов заключается в том, что они могут быть использованы практически при установке аппаратуры АОЛС на местных широкополосных сетях доступа с учетом требований к коэффициенту готовности атмосферного канала.

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СВЯЗИ, ИНФОРМАТИЗАЦИИ И
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЕСПУБЛИКИ
УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

На правах рукописи

УДК 621.391:518.72

МАВЛЯНОВ КАРЕЛ - ИЕРОНИМ МИРОСЛАВОВИЧ

**Разработка и исследование системы связи для ведомственных служб
на основе Атмосферной Оптической Линии Связи**

**5A311103- Радиотехнические устройства и средства связи
Диссертация на соискание академической степени магистра**

**Научный руководитель:
Д.ф.-М.н., проф., академик АН РУз.
Раджабов Т.Д.**

Ташкент 2013

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СВЯЗИ, ИНФОРМАТИЗАЦИИ И
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЕСПУБЛИКИ
УЗБЕКИСТАН

ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ

Факультет РРТ

Магистрант Мавлянов К.-И.М.

Кафедра РТ и РС

Научный руководитель Раджабов Т.Д.

Учебный год 2012/2013

Специальность 5А311103-Радиотехнические
устройства и средства связи

АННОТАЦИЯ МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Магистерская диссертация посвящена актуальной задаче разработки и исследованию системы связи для ведомственных служб на основе Атмосферной Оптической Линии Связи в Республике Узбекистан. В диссертации проводится комплексный анализ и исследование характеристик и особенностей применения атмосферных оптических линий связи. В работе использованы различные методы анализа, синтеза, дедукции при исследовании систем атмосферных оптических линий связи. Значимость полученных результатов заключается в том, что они могут быть использованы практически при установке аппаратуры АОЛС на местных широкополосных сетях доступа с учетом требований к коэффициенту готовности атмосферного канала.

Результаты исследований обсуждались на семинарах кафедры Радиотехника и радиосвязь, на Республиканских научно-технических конференциях

Научный руководитель _____

Магистрант _____

**STATE COMMITTEE FOR COMMUNICATIONS, INFORMATION
AND TELECOMMUNICATION TECHNOLOGIES OF THE REPUBLIC
UZBEKISTAN**

TASHKENT UNIVERSITY OF INFORMATION TECHNOLOGY

Faculty RRT

Master of Mavlyanov K.-I.M.

The chair RT and RC

Scientific director of Radjabov T.D.

The academic year 2012/2013

Specialty 5A311103 - Radio engineering
and radio communications

SUMMARY OF MASTER DISSERTATION

Master dissertation is devoted to the actual problem of development and research for departmental communications services based on the atmospheric optical communication lines in the Republic of Uzbekistan. In the thesis, a comprehensive analysis and study of the characteristics and features of the application of atmospheric optical communication links. We used a variety of methods of analysis, synthesis, deduction systems in the study of atmospheric optical communication links. The significance of these results is that they can be used practically when installing equipment FSO broadband local access networks to the requirements of the coefficient of readiness to atmospheric channel.

Results of researches were discussed at seminar “Radio engineering and radio communications” Department at Republican scientific and technical conferences.

Scientific director of _____

Master of _____

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава I. Обзор беспроводных технологий широкополосного доступа ...	8
1. Технология Wi-Fi.....	8
2. Технология WiMAX.....	11
3. Предпосылки создания АОЛС.....	14
4. Технология АОЛС.....	17
Выводы к главе I	25
Глава II. Классификация и основные составляющие АОЛС	27
1. Классификация АОЛС.....	27
2. Источники излучения.....	29
3. Приемники излучения.....	33
Выводы к главе II	35
Глава III Разработка АОЛС на примере локальной вычислительной сети ведомственной службы	37
1. Структура сети на основе АОЛС для связи сегментов ЛВС ведомственной службы.....	37
2. Особенности работы АОЛС.....	43
3. Расчет дистанции АОЛС с заданным коэффициентом готовности.....	51
Выводы к главе III	63
Заключение	64
Список литературы	67

Введение

Обоснование темы диссертации и актуальность. В Республике Узбекистан создана современная и мощная законодательная база в сфере инфокоммуникационных технологий [1-4]. В республике предусмотрены проведение модернизации, технического и технологического перевооружения предприятий, широкое внедрение современных гибких технологий. Ставится задача ускорения реализации принятых отраслевых программ модернизации, технического и технологического перевооружения производства [7]. Одной из важнейших задач, которая стоит перед нашим обществом, является обеспечение поступательного и устойчивого развития страны [8]. В Постановлении Президента Республики Узбекистан «О мерах по дальнейшему внедрению и развитию современных информационных технологий» принята «Программа дальнейшего внедрения и развития информационно-коммуникационных технологий в Республики Узбекистан на 2013-2014 годы», в которой большое внимание уделяется развитию инфраструктуры информационно-коммуникационных технологий, в частности, разработке и реализации технических проектов, направленных на обеспечение предоставления населению услуг широкополосного доступа [5,6].

В процессы модернизации и технического перевооружения входят и разработка и внедрение новых технологий, которые позволяли бы расширить их функциональные и сервисные возможности, уменьшить массогабаритные показатели, увеличить надежность их работы и повысить экономический эффект.

Поэтому задача исследования применения атмосферных оптических линий связи в ведомственных службах Республики Узбекистан является актуальной.

Объект и предмет исследований. *Объектом* исследований является атмосферная оптическая линия связи. *Предмет* исследований – разработка научно обоснованных рекомендаций по эффективному применению

атмосферных оптических линий связи в Республики Узбекистан.

Цель и задача исследований. Целью диссертационной работы является проведение комплексных исследований характеристик и особенностей применения атмосферных оптических линий связи.

Для достижения данной цели необходимо было решать следующие задачи:

- провести систематизированный анализ беспроводных технологий широкополосного доступа;

- рассмотреть развитие широкополосного доступа, применительно к Республике Узбекистан.

Гипотеза исследований. При проведении исследований в данной диссертации предполагается, что результаты исследований могут быть использованы практически для развития атмосферных оптических линий связи.

Краткий литературный обзор по теме диссертации. В настоящее время во всемирной научной литературе большое внимание уделяется развитию широкополосного доступа. Вопросами исследования и развития атмосферных оптических линий связи занимались ведущие специалисты и ученые в области информационно-коммуникационных технологий всего мира. Результаты исследований широко освещены в мировой научной литературе, интернете.

Методы исследований. В работе были использованы методы анализа, синтеза, индукции, дедукции полученных результатов исследования атмосферных оптических линий связи.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы практически для установки аппаратуры АОЛС на местных широкополосных сетях доступа с учетом требований к коэффициенту готовности атмосферного канала.

Научная новизна исследований. На основе проведенных

исследований получены следующие научные результаты:

- выполнен обзор и анализ беспроводных технологий широкополосного доступа;

- внедрение АОЛС – есть принципиально новый подход к построению беспроводных сетей связи с высокими скоростями и в оптическом (наиболее свободном) диапазоне.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Основной текст диссертации занимает 70 страниц. Работа содержит 8 рисунков, включая графики, 7 таблиц, а также список литературы из 35 наименований.

Глава I. Обзор беспроводных технологий широкополосного доступа

Бурное развитие телекоммуникационного рынка требует высокоскоростных линий передачи данных. Однако внедрение проводных технологий (например, прокладка оптического волокна) подразумевает солидные инвестиции, которые не всегда возможны. Естественной альтернативой в этом случае являются беспроводные линии связи.

На сегодняшний день существует несколько основных беспроводных решений – это использование широкополосных радиоканалов WiFi / WiMax, радиорелейных линий (РРЛС) или атмосферных оптических линий связи (АОЛС).

1. Технология Wi-Fi

Стандарт IEEE 802.11, является базовым стандартом и определяет протоколы, необходимые для организации беспроводных локальных сетей (WLAN), его разработка была завершена в 1997 г. Основные из них - протокол управления доступом к среде MAC (Medium Access Control - нижний подуровень канального уровня) и протокол PHY передачи сигналов в физической среде. В качестве последней допускается использование радиоволн и инфракрасного излучения.

Стандартом 802.11 определен единственный подуровень MAC, взаимодействующий с тремя типами протоколов физического уровня, соответствующих различным технологиям передачи сигналов - по радиоканалам в диапазоне 2,4 ГГц с широкополосной модуляцией с прямым расширением спектра (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) и частотных скачков (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS) , а также с помощью инфракрасного излучения. Обе эти широкополосные технологии предлагаются в двух частотных диапазонах: один в районе частоты 915 МГц, другой в диапазоне от 2400 МГц до 2483,5 МГц. Но именно диапазон

2,4 ГГц является наиболее интересным для использования его в беспроводных сетях, так как он наименее "зашумлен" посторонними сигналами и позволяет расширить полосу передачи. В режиме FHSS весь диапазон 2,4 ГГц используется как одна широкая полоса (с 79 подканалами). В режиме DSSS этот же диапазон разбит на несколько широких DSSS-каналов, которых одновременно может быть использовано не более трех [9].

Метод FHSS предусматривает изменение несущей частоты сигнала при передаче информации. При использовании FHSS конструкция приемопередатчика получается очень простой. Но этот метод применим, только если пропускная способность не превышает 2 Мбит/сек.. Спецификациями стандарта предусмотрены два значения скорости передачи данных - 1 и 2 Мбит/с. По сравнению с проводными ЛС Ethernet возможности подуровня MAC расширены за счет включения в него ряда функций, обычно выполняемых протоколами более высокого уровня, в частности, процедур фрагментации ретрансляции пакетов. Это вызвано стремлением повысить эффективную пропускную способность системы благодаря снижению накладных расходов на повторную передачу пакетов. В качестве основного метода доступа к среде стандартом 802.11 определен механизм CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance - множественный доступ с обнаружением несущей и предотвращением коллизий).

В основу стандарта 802.11 положена сотовая архитектура, причем сеть может состоять как из одной, так и нескольких ячеек. Каждая сота управляется базовой станцией, называемой точкой доступа (Access Point, AP). Вместе с находящимися в пределах радиуса ее действия рабочими станциями пользователей она образует базовую зону обслуживания (Basic Service Set, BSS). Точки доступа многосотовой сети взаимодействуют между собой через распределительную систему (Distribution System, DS), представляющую собой эквивалент магистрального сегмента кабельных

ЛС. Вся инфраструктура, включающая точки доступа и распределительную систему образует расширенную зону обслуживания (Extended ServiceSet). Стандартом предусмотрен также односотовый вариант беспроводной сети, который может быть реализован и без точки доступа, при этом часть ее функций выполняются непосредственно рабочими станциями.

IEEE 802.11a Спецификация, являющаяся наиболее "широкополосным" из семейства стандартов 802.11, предусматривая скорость передачи данных до 54 Мбит/с (редакцией стандарта, утвержденной в 1999 г., определены три обязательных скорости - 6, 12 и 24 Мбит/с и пять необязательных - 9, 18, 36, 48 и 54 Мбит/с). В отличие от базового стандарта, ориентированного на область частот 2,4 ГГц, спецификациями 802.11a предусмотрена работа в диапазоне 5 ГГц. В качестве метода модуляции сигнала выбрано ортогональное частотное мультиплексирование (OFDM) [9].

Наиболее существенное различие между этим методом и радио технологиями DSSS и FHSS заключается в том, что OFDM предполагает параллельную передачу полезного сигнала одновременно по нескольким частотам диапазона, в то время как технологии расширения спектра передают сигналы последовательно. В результате повышается пропускная способность канала и качество сигнала. К недостаткам 802.11a относятся более высокая потребляемая мощность радиопередатчиков для частот 5 ГГц, а так же меньший радиус действия (оборудование для 2,4 ГГц может работать на расстоянии до 300м, а для 5ГГц - около 100м). Подводя краткий итог отметим, что данная версия является как бы "боковой ветвью" основного стандарта 802.11. Для увеличения пропускной способности канала здесь используется диапазон частот передачи 5,5 ГГц. Для передачи в 802.11a используется метод множества несущих, когда диапазон частот разбивается на подканалы с разными несущими частотами (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), по которым поток передается

параллельно, разбитым на части. Использование метода квадратурной фазовой модуляции позволяет достичь пропускной способности канала 54 Мбит/сек [10].

IEEE 802.11b Обладает высокой скоростью передачи данных (до 11 Мбит/с), практически эквивалентной пропускной способности обычных проводных ЛС Ethernet, а также ориентации на "освоенный" диапазон 2,4 ГГц, этот стандарт завоевал наибольшую популярность у производителей оборудования для беспроводных сетей. В окончательной редакции стандарт 802.11b, известный также как Wi-Fi (wireless fidelity), был принят в 1999г. В качестве базовой радио технологии в нем используется метод DSSS с 8-разрядными последовательностями Уолша. Поскольку оборудование, работающее на максимальной скорости 11 Мбит/с имеет меньший радиус действия, чем на более низких скоростях, то стандартом 802.11b предусмотрено автоматическое понижение скорости при ухудшении качества сигнала. Как и в случае базового стандарта 802.11, четкие механизмы роуминга спецификациями 802.11b не определены. Этот стандарт является наиболее популярным на сегодняшний день и, собственно, он носит торговую марку Wi-Fi [10]. Как и в первоначальном стандарте IEEE 802.11, для передачи в данной версии используется диапазон 2,4 ГГц. Он не затрагивает канальный уровень и вносит изменения в IEEE 802.11 только на физическом уровне. Для передачи сигнала используется метод прямой последовательности (Direct Sequence Spread Spectrum), при котором весь диапазон делится на 5 перекрывающихся друг друга поддиапазонов, по каждому из которых передается информация. Значения каждого бита кодируются последовательностью дополнительных кодов (Complementary CodeKeying). Пропускная способность канала при этом составляет 11 Мбит/сек.

2. Технология WiMAX

В основе технологии WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) лежит протокол IEEE 802.16, который в отличие от других технологий радиодоступа, обеспечивает высокоскоростные соединения на больших расстояниях даже при отсутствии прямой видимости объекта, на отраженном сигнале. Она также позволяет работать в любых условиях, в том числе в условиях плотной городской застройки, обеспечивая высокое качество связи и скорость передачи данных. В общем виде WiMAX сети состоят из следующих основных частей: базовых и абонентских станций, а также оборудования, связывающего базовые станции между собой, с поставщиком сервисов и с Интернетом [11].

Для соединения базовой станции с абонентской используется высокочастотный диапазон радиоволн от 1,5 до 11 ГГц. В идеальных условиях скорость обмена данными может достигать 70 Мбит/с, при этом не требуется обеспечения прямой видимости между базовой станцией и приёмником.

Между базовыми станциями устанавливаются соединения (прямой видимости), использующие диапазон частот от 10 до 66 ГГц, скорость обмена данными может достигать 140 Мбит/с. При этом, по крайней мере одна базовая станция подключается к сети провайдера с использованием классических проводных соединений. Однако, чем большее число БС подключено к сетям провайдера, тем выше скорость передачи данных и надёжность сети в целом.

Структура сетей семейства стандартов IEEE 802.16 схожа с традиционными GSM сетями (базовые станции действуют на расстояниях до десятков километров, для их установки не обязательно строить вышки — допускается установка на крышах домов при соблюдении условия прямой видимости между станциями) [11].

Технологию WiMAX можно использовать для создания

широкополосных соединений "последней мили", развертывания точек беспроводного доступа, организации сети между филиалами компаний и решения других задач, которые ранее были ограничены традиционными технологиями.

Набор преимуществ присущ всему семейству WiMAX, однако его версии существенно отличаются друг от друга. Разработчики стандарта искали оптимальные решения как для фиксированного, так и для мобильного применения, но совместить все требования в рамках одного стандарта не удалось. Хотя ряд базовых требований совпадает, нацеленность технологий на разные рыночные ниши привела к созданию двух отдельных версий стандарта (вернее, их можно считать двумя разными стандартами). Каждая из спецификаций WiMAX определяет свои рабочие диапазоны частот, ширину полосы пропускания, мощность излучения, методы передачи и доступа, способы кодирования и модуляции сигнала, принципы повторного использования радиочастот и прочие показатели. А потому WiMAX-системы, основанные на версиях стандарта IEEE 802.16 e и d, практически несовместимы. Краткие характеристики каждой из версий приведены ниже.

802.16-2004 (известен также как 802.16d и фиксированный WiMAX). Спецификация утверждена в 2004 году. Используется ортогональное частотное мультиплексирование (OFDM), поддерживается фиксированный доступ в зонах с наличием либо отсутствием прямой видимости. Пользовательские устройства представляют собой стационарные модемы для установки вне и внутри помещений, а также PCMCIA-карты для ноутбуков. В большинстве стран под эту технологию отведены диапазоны 3,5 и 5 ГГц. По сведениям WiMAX Forum, насчитывается уже порядка 175 внедрений фиксированной версии. Многие аналитики видят в ней конкурирующую или взаимодополняющую технологию проводного широкополосного доступа DSL.

802.16-2005 (известен также как 802.16e и мобильный WiMAX).

Спецификация утверждена в 2005 году. Это — новый виток развития технологии фиксированного доступа (802.16d). Оптимизированная для поддержки мобильных пользователей версия поддерживает ряд специфических функций, таких как хэндовер, idle mode и роуминг. Применяется масштабируемый OFDM-доступ (SOFDMA), возможна работа при наличии либо отсутствии прямой видимости. Планируемые частотные диапазоны для сетей Mobile WiMAX таковы: 2,3-2,5; 2,5-2,7; 3,4-3,8 ГГц [12].

WiMAX технология позволяет обеспечить доступ в Интернет со скоростями и зоной покрытия, существенно большими, чем у современных сетей WiFi. Wi-Fi – это технология беспроводной связи для небольших расстояний: в офисном здании, кафе... Расстояние от хот-спота Wi-Fi до компьютера не превышает десятков метров. Технология WiMax – это сеть широкополосного беспроводного доступа, которая создается на территории целого города, а расстояние от приемника до базовой станции измеряется уже километрами.

3. Предпосылки создания АОЛС.

Оптическая связь осуществляется путем передачи информации с помощью электромагнитных волн оптического диапазона. В качестве примера оптической связи можно привести применяемую в прошлом передачу сообщений с помощью костров или семафорной азбуки. В 60-е годы XX века были созданы лазеры и появилась возможность построения широкополосных систем оптической связи, передающих не только телефонные, но и телевизионные и компьютерные сигналы [13].

Оптические системы связи делятся на открытые, где сигнал передается в атмосфере или космосе, и закрытые, то есть использующие световоды. В настоящем обзоре рассматриваются только открытые атмосферные линии связи.

Оптическая атмосферная система связи между двумя пунктами состоит из двух спаренных приемопередающих устройств, расположенных в пределах прямой видимости на обоих концах линии и направленных друг на друга. В передатчике находится генератор-лазер и модулятор его оптического излучения передаваемым сигналом. Модулированный лазерный луч коллимируется оптической системой и направляется в сторону приемника. В приемнике излучение фокусируется на фотоприемник, где производится его детектирование и выделение передаваемой информации. Так как лазерный луч передается между пунктами связи в атмосфере, то его распространение сильно зависит от метеоусловий, от наличия дыма, пыли и других загрязнений воздуха. Кроме того, в атмосфере наблюдаются турбулентные явления, которые приводят к флуктуации показателя преломления среды, колебаниям луча и искажениям принимаемого сигнала. Однако, несмотря на указанные проблемы, атмосферная лазерная связь оказалась вполне надежной на расстояниях нескольких километров и особенно перспективной для решения проблемы "последней мили".

В СССР первые атмосферные линии связи (АЛС) были созданы в 60-х годах XX века. В Москве была пущена телефонная линия между зданием МГУ на Ленинских горах и Зубовской площадью протяженностью более 5 км, а в Тбилиси - телевизионная АЛС от студийного комплекса до передатчика длиной в 3,5 км. Качество передаваемого сигнала полностью соответствовало нормам МККР. В те же годы успешные опыты с АЛС проводились в Ленинграде, Горьком и в Ереване. В первых АЛС использовался гелий - неоновый лазер типа ЛГ-36 с длиной волны излучения 0,63 мкм и мощностью 40 мВт. Амплитудная модуляция осуществлялась модулятором типа ОПМШ-100 на базе эффекта Поккельса, а фотоприемником служил фотоумножитель ФЭУ-51. В те годы считалось, что плохие погодные условия (снег, дождь, туман) делают лазерную связь ненадежной, и она была признана неперспективной [14].

Современное широкое распространение АЛС во многих странах мира началось в 1998 году, когда были созданы недорогие полупроводниковые лазеры мощностью в 100 мВт и более. В это же время возникла потребность в лазерной связи, так как стали стремительно развиваться информационные технологии. Резко увеличивается число абонентов, требующих предоставления таких телекоммуникационных услуг, как Интернет, IP-телефония, кабельное телевидение с большим числом каналов, компьютерные сети и т. д. В результате возникла проблема "последней мили", то есть подключение широкополосного канала связи к конечному пользователю. Прокладка новых кабельных сетей требует крупных капиталовложений, а в ряде случаев, особенно в условиях плотной городской застройки, очень трудна или даже невозможна. Оптимальным решением проблемы последнего участка является использование беспроводных линий передачи. Стандарт IEEE 802.11 предусматривает для этих целей СВЧ или оптический (ИК) диапазоны излучений.

Преимущества беспроводных линий связи очевидны: это экономичность (так как не требуется рыть траншеи для укладки кабеля и арендовать землю); низкие эксплуатационные расходы; высокая пропускная способность и качество цифровой связи; быстрое развертывание и изменение конфигурации сети; легкое преодоление препятствий - железных дорог, рек, гор и т. д.

В то же время беспроводная связь в СВЧ-диапазоне ограничена перегруженностью и дефицитом частотного диапазона, недостаточной скрытностью, подверженностью помехам, в том числе и преднамеренным, и с соседних каналов, повышенным энергопотреблением [15].

В отличие от СВЧ оптический диапазон совершенно свободен, и его использование не требует согласования частотного канала. Он позволяет обеспечить высокую скорость передачи информации, ее защиту от несанкционированного доступа, помехоустойчивость, низкое

энергопотребление. Поэтому наиболее полным решением проблемы "последней мили" является передача информации лазерным лучом. Опасения потенциальных пользователей АЛС относительно ее зависимости от погодных условий (дождь, снег, туман, смог и т. д.) были сняты экспериментальными измерениями вероятности ошибок BER (bit error rate) на заданной дальности [28].

4. Технология АОЛС

Сама технология АОЛС (в разных источниках также встречаются аббревиатуры FSO – Free Space Optics, АОСП – Атмосферные Оптические Системы Передачи данных, БОКС – Беспроводные Оптические Каналы Связи, ЛАЛ – Лазерные Атмосферные Линии) основывается на передаче данных модулированным излучением в инфракрасной (или видимой) части спектра через атмосферу и их последующим детектированием оптическим фотоприёмным устройством.

Лазерная связь двух объектов осуществляется только посредством соединения типа «точка-точка». Передатчиком служит мощный полупроводниковый лазерный диод. Информация поступает в приемопередающий модуль, в котором кодируется различными помехоустойчивыми кодами, модулируются оптическим лазерным излучателем и фокусируется оптической системой передатчика в узкий коллимированный лазерный луч и передается в атмосферу. При этом в качестве излучателя обычно используются инфракрасные лазеры класса 1 или 1М (к лазерам 1-го класса относят полностью безопасные лазеры, выходное коллимированное излучение которых не представляет опасности при облучении глаз и кожи), для низкоскоростных коммуникаций на небольшие расстояния могут использоваться светодиоды. В качестве приёмника используются лавинные или кремниевые фотодиоды.

На принимающей стороне оптическая система фокусирует

оптический сигнал на высокочувствительный фотодиод (или лавинный фотодиод), который преобразует оптический пучок в электрический сигнал. При этом, чем выше частота (до 1,5ТГц), тем больше объём передаваемой информации. Далее, сигнал демодулируется и преобразуется в сигналы выходного интерфейса [22].

Длина волны в большинстве реализованных систем варьируется в пределах 700—950 нм или 1550 нм, в зависимости от применяемого лазерного диода.

780–850 нм. Эти длины волн подходят для работы FSO -систем и целый ряд производителей предлагает мощные лазеры, работающие в этом диапазоне длин волн. На длине волны 780 нм работают лазеры, использующиеся в CD -приводах, однако при проектировании систем необходимо учитывать срок службы данных лазеров (к примеру, работа лазеров на мощности, значительно меньшей максимально допустимой позволяет существенно увеличить срок их службы). В районе 850 нм широко распространены высокоскоростные приемные и передающие компоненты, обычно используемые в сетях и передающем оборудовании. В этом диапазоне могут быть использованы высокочувствительные кремниевые лавинные фотодиоды (APD) и лазеры с вертикальной излучающей поверхностью (VCSEL). Возможным недостатком является возможность перехвата излучения с помощью приборов ночного видения, однако демодуляция сигнала с помощью этой техники невозможна.

1520–1600 нм. Эти длины волн хорошо подходят для FSO - применений и к настоящему времени доступны высококачественные компоненты для приема и передачи излучения. Сочетание малого затухания и высокого качества электронных компонентов для данного диапазона позволяет создавать FSO системы с волновым мультиплексированием WDM (Wavelength Division Multiplexing, Спектральное уплотнение каналов). Однако указанные компоненты стоят дороже, приемники обладают меньшей чувствительностью малыми

размерами приемной площадки по сравнению с кремниевыми ЛФД-приемниками, работающими на 850 нм. Как уже было сказано, этот диапазон длин волн применяется в волоконно-оптических системах при работе на большие расстояния и много компаний работает над снижением стоимости и увеличением скорости компонент в области 1200-1600 нм. Кроме того, на этих длинах волн работают эрбиевые усилители (EDFA), что очень важно для создания мощных (>500 мВт) и высокоскоростных (> 2.5 Гбит/с) систем. В заключение отметим, что в диапазоне 1520-1600 нм по сравнению с диапазоном 780-850 нм, может быть передано в 50-65 раз больше мощности для того же класса лазерной безопасности, ввиду меньшего поглощения человеческим глазом излучения для этих длин волн.

10000 нм (10 мкм). Этот диапазон длин волн относительно нов для коммерческих FSO - систем и планируется к применению вследствие меньшего поглощения данного излучения дымными средами. Сейчас широко обсуждается эффективность данного явления поскольку оно очень сильно зависит от вида дыма и его протяженности. На рынке присутствуют компоненты для построения систем на 10 мкм, но они обычно не используются в телекоммуникационном оборудовании. Кроме того излучение 10 мкм не проходит через стекло и поэтому невозможна установка данного оборудования внутри помещений. С другой стороны, слабое пропускание стеклом означает невозможность его концентрации оптическими приборами (например биноклями), что позволяет работать с большими мощностями без ограничений по безопасности. Далее, следует рассмотреть скорость работы FSO -систем с точки зрения атмосферного распространения излучения разных длин волн в условиях сильного задымления. До недавнего времени считалось, что чем больше длина волны, тем больше возможная дистанция связи. Однако, недавние исследования показали, что свыше 780-1600 нм поглощение за счет сильного задымления практически постоянно и, фактически, нет никаких преимуществ вплоть до миллиметрового диапазона. В то же время,

огромное количество исследований показывает, что излучение 10 мкм распространяется лучше в условиях тумана и сильного дыма. Однако данные условия обычно не составляют проблем для качественно спроектированных передатчиков FSO -систем на дистанциях, типичных для их коммерческого применения. Следовательно, реальное улучшение сильно зависит от типа дыма и его протяженности. Стандартные модели атмосферного рассеяния, использующие теорию Ми или различные расчетные средства, такие как MODTRAN не показывают улучшения работы на 10 мкм. Даже когда центр распределения радиусов частиц дыма меньше 5 мкм, вклад верхней части распределения (когда рассеяние пропорционально квадрату радиуса частиц) не показывает какого либо преимущества на данной длине волны.

Физические ограничения АОЛС по скорости передачи определяются только собственной частотой несущей электромагнитной волны ($10^{15} \dots 10^{16}$ Гц), поскольку в отличие от ВОЛС, среда передачи (атмосфера) не вносит временной дисперсии сигналов. Этот фактор является во многих случаях определяющим при выборе средства передачи.

Во многих случаях потребителей привлекает отсутствие необходимости согласования частотного диапазона, поскольку оптический диапазон не регламентирован. И существенно важно, что причин для введения частотных ограничений фактически нет, что связано с чрезвычайно узкой диаграммой направленности излучения лазерных передатчиков и отсутствием боковых лепестков диаграммы направленности оптических антенн. Достаточным условием отсутствия влияния двух близко расположенных линий является угловое или линейное расстояние между диаграммами направленности излучения передатчиков этих линий, при котором излучение одной линии не попадает на приемники другой. Это, как правило, 1...20 или 5...10 метров.

Существенным достоинством АОЛС является нечувствительность к помехам радиодиапазона. Это позволяет использовать оптические линии в местах с большой насыщенностью радиосистем [26].

С узкой диаграммой оптических антенн связано также другое значительное преимущество АОЛС - защищенность канала связи от несанкционированного доступа. По этому критерию данная технология является уникальной. Во всех остальных случаях (волоконные и медные кабели, радиолинии) для защиты информации требуется использование специальных кодов. В открытой оптической линии защита обеспечивается за счет узкой диаграммы направленности излучения. С помощью внешних ИК-приборов можно обнаружить наличие канала связи, но для перехвата информации необходимо установить приемник непосредственно в канал связи, что практически неосуществимо. Многие производители отмечают в качестве достоинства АОЛС быстроту организации линии связи. Действительно, кроме общих временных затрат, связанных с оформлением аренды мест установки аппаратуры, время на инсталляцию канала при отработанной технологии исчисляется часами.

Основным недостатком АОЛС является зависимость пропускания атмосферой оптического излучения от состояния погоды. Эта специфика устройств АОЛС является основной причиной, сдерживающей их широкомасштабное внедрение.

Распространение лазерного излучения в атмосфере сопровождается тремя существенными для лазерной связи процессами:

- флуктуациями принимаемого сигнала вследствие рефракции излучения на турбулентных неоднородностях показателя преломления воздуха;
- рассеянием излучения на аэрозолях,
- экранирование излучения механическими предметами

Остальными процессами, такими как резонансное поглощение, молекулярное рассеяние и аэрозольное поглощение, при правильном выборе длины волны можно пренебречь.

Рассмотрим основные процессы, которые влияют на помехоустойчивости АОЛС. Влияние флуктуаций обусловлено следующими факторами. После прохождения через турбулентную атмосферу лазерное излучение, изначально имеющее плавный профиль распределения интенсивности в поперечном сечении пучка, приобретает пятнистую структуру. В плоскости приемной антенны это проявляется в хаотическом чередовании темных и ярких пятен. Поперечный размер и частота "мерцания" пятен зависит от расстояния между источником излучения и экраном и характера атмосферной турбулентности, т.е. состояния погоды. В каждой точке мишени при этом могут наблюдаться флуктуации сигнала с частотой от десятков герц до нескольких килогерц. На практике это выражается в том, что возникают т.н. замирания оптического сигнала на входе в фотоприёмник. Связь становится неустойчивой, появляются ошибки $10^{-6} \dots 10^{-3}$. Этот эффект проявляет себя наиболее сильно в ясную погоду при слабом ветре в любое время года, но особенно - в жаркие летние месяцы. Самым простым способом уменьшения влияния турбулентной рефракции на качество канала связи, которым пользуются разработчики, является увеличение размера приемной оптической антенны [25]. При этом происходит осреднение флуктуаций излучения, пришедшего на отдельные участки этой апертуры в фокальной плоскости антенны, где установлен фотоприемник. Вторым методом является некогерентное сложение в одном информационном канале излучения нескольких лазеров.

Также к основным факторам влияния на качество сигнала относятся аэрозоли. К аэрозолям относятся дисперсные системы, состоящие из твердых частиц и капель жидкости, находящихся во

взвешенном состоянии. В данном случае это туманы, смог, дождь, снег. Как известно, при распространении в рассеивающей среде согласно закону Бугера мощность излучения уменьшается экспоненциально по длине трассы. Поэтому увеличение расстояния для лазерной связи является серьезной проблемой, требующей значительного наращивания энергетического потенциала.

Вследствие сложной структуры аэрозолей в реальной атмосфере расчет потерь излучения с приемлемой точностью чрезвычайно затруднен, и на практике используют интегральную характеристику пропускания атмосферы - видимость или метеорологическую дальность видимости - МДВ (S_m) [23].

По определению МДВ представляет собой наибольшее расстояние, на котором днем видны крупные темные предметы. Однако метеослужбы определяют МДВ путем измерения пропускания эталонного излучения на калиброванной трассе. Поэтому она однозначно связана с характеристикой оптической прозрачности атмосферы и представляет собой её условное выражение.

Для каждой конкретной аппаратуры АОЛС и дальности связи можно рассчитать минимальное, или критическое, значение МДВ – S_{min} , при котором при ухудшении погодных условий происходит нарушение работоспособности канала АОЛС. Тогда, зная метеорологическую статистику конкретной местности, например, используя данные метеослужб [23], можно с определенной точностью предсказать доступность канала связи. Другим способом теоретически рассчитать параметр доступности невозможно. Именно поэтому прогноз погоды до сих пор не удается обеспечить с приемлемой точностью.

Здесь необходимо отметить еще одну особенность работы лазерной линии связи. Как известно, количество ошибок на бит информации определяется уровнем превышения сигнала над всеми

шумами на приемнике. При увеличении уровня сигнала на фотоприемнике в два раза уровень ошибок снижается с 10^{-6} до 10^{-10} , а весь располагаемый динамический диапазон изменения сигнала - $10^3 \dots 10^6$.

Это свойство АОЛС проявляется в том, что при нормальной погоде качество передачи очень хорошее (если решена проблема флуктуаций сигнала) до момента, когда за счет ухудшения погодных условий сигнал на приемнике уменьшается до порогового значения. Линия может работать длительное время идеально в снег или дождь, туман средней интенсивности, а затем, если туман сгущается до критической МДВ, за несколько минут канал полностью прерывается. В это время число ошибок возрастает от $10^{-10} \dots 10^{-12}$ до 1. Так же быстро нормальная работа линии восстанавливается при улучшении погодных условий.

Надежность канала связи определяется отношением времени бесперебойной работы линии к общему времени эксплуатации. Это основной параметр, характеризующий потребительские свойства системы. Поэтому большинство производителей в своих рекламных материалах приводят параметр доступности в первую очередь. Опыт эксплуатации АОЛС показал, что дожди, дымки и снег средней интенсивности мало влияют на работоспособность линий связи, обладающих достаточным динамическим потенциалом [23]. Основной причиной нарушения работоспособности последних являются туманы. Кроме того, ухудшение видимости менее 1000 метров при метелях, снегопадах, дождях и моросях имеет повторяемость не более 5-10%, остальные 90-95% приходятся на туманы. Вероятность образования тумана, его характер, интенсивность и продолжительность существенно зависят от широты места, географических особенностей, сезона года, характера атмосферных процессов. Из практики известно, что в одних случаях туман сплошь застилает значительную территорию, в других -

возникает местами, то есть имеет большую пространственно-временную изменчивость. Наличие в непосредственной близости от АОЛС водоема также может повлиять на количество возникающих туманов, а значит, и на доступность линии.

Для обеспечения работоспособности линии связи на требуемой дистанции с определенным уровнем надежности связи (или доступности канала) необходимо иметь достаточный динамический запас энергетического потенциала линии или диапазон допустимого затухания мощности сигнала на приемнике, при котором линия сохраняет работоспособность. Верхняя граница динамического диапазона определяется геометрическими потерями и флуктуациями, т.е. это максимальная величина сигнала на приемной антенне, которая реализуется при отсутствии потерь на пропускание атмосферы. Нижняя граница обусловлена чувствительностью приемника и определяет уровень работоспособности системы при плохих погодных условиях [24].

Выводы к главе I

1. Рассмотрены особенности технологии Wi-Fi и установлено, что основными отличительными свойствами технологии Wi-Fi являются: обеспечение связи на небольшой территории и внутри помещений; обеспечение высокоскоростной (до 74 Мбит/с) передачи данных и простота принципов построения и функционирования сети. Приведены характеристики и режимы работы Wi-Fi.

2. Рассмотрены особенности технологии WiMAX и установлено, что основными отличительными свойствами технологии WiMAX являются: обеспечение доступа в Интернет со скоростями и зоной покрытия, существенно большими, чем у современных сетей Wi-Fi. Приведены характеристики и режимы работы WiMAX.

3. Рассмотрены предпосылки создания АОЛС, которые обусловлены стремительным развитием информационных технологий. Резкое увеличение числа абонентов, требующих предоставления таких телекоммуникационных услуг, как Интернет, IP-телефония, кабельное телевидение с большим числом каналов, компьютерные сети и т. д. В результате возникла проблема "последней мили", то есть подключение широкополосного канала связи к конечному пользователю. Оптимальным решением проблемы последнего участка является использование беспроводных линий передачи.

4. Рассмотрены особенности технологии АОЛС и установлено, что основными отличительными свойствами технологии АОЛС являются: физическое ограничение АОЛС по скорости передачи определяются только собственной частотой несущей электромагнитной волны ($10^{15} \dots 10^{16}$ Гц); нечувствительность к помехам радиодиапазона, что позволяет использовать оптические линии в местах с большой насыщенностью радиосистем. Приведены характеристики и диапазоны длин волн используемых АОЛС.

Глава II. Классификация и основные составляющие АОЛС.

1. Классификация АОЛС

Активная схема построения АОЛС

В активной схеме источник и приемник излучения находятся внутри приемопередающего оптического блока. Как правило, в фокусе или вблизи объектива. Схема активного исполнения АОЛС показана на рис. 2.1. К плюсам данной схемы следует отнести большую площадь фотоприемника, что в свою очередь, увеличивает угол поля зрения, а это благоприятно сказывается на уменьшении энергетических потерь и требований к угловым перемещениям приемопередающих оптических блоков друг относительно друга. К недостаткам данной схемы следует отнести необходимость подведения питания непосредственно к оптическим блокам, что не всегда возможно.

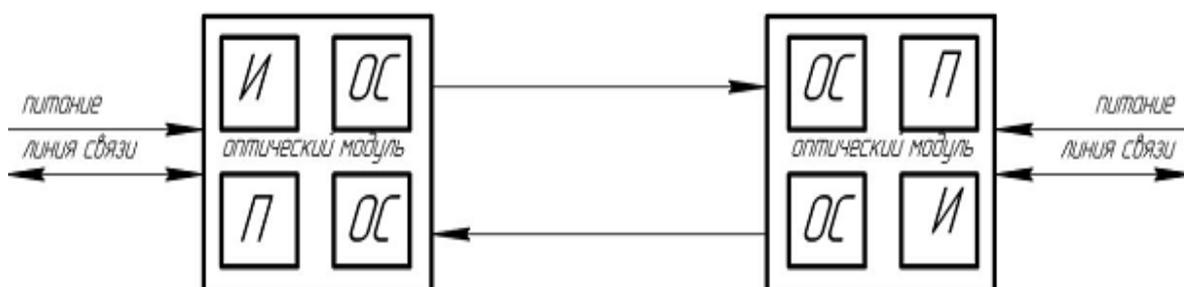


Рис. 2.1. Схема активного исполнения АОЛС (И – источник, П -приемник, ОВ – оптическое волокно, ОС – оптическая система)

Пассивная схема построения АОЛС

Пассивная схема построения АОЛС осуществляется следующим образом. Источник и приемник излучения располагаются непосредственно в корпусе медиаконвертеров, которые осуществляют преобразования

интерфейсов «витая пара - одномодовый (многомодовый) оптический кабель». Схема пассивного исполнения АОЛС показана на рис. 2.2.

Соединение медиаконвертера с оптическим блоком осуществляется с помощью одномодового или многомодового оптического кабеля оконцованного коннектором. В данной схеме источником и приемником оптического излучения является торец оптического волокна, расположенного в непосредственной близости к фокусу приемопередающей оптической системы. Недостатком пассивной схемы следует отнести достаточно жесткие требования к юстировке оптических блоков по углу из-за малых размеров приемной площадки, которая является торцом оптического волокна: диаметр одномодового волокна 5...9 мкм, многомодового 50...62.5 мкм. Для увеличения поля зрения необходимо увеличивать в несколько раз диаметр падающего пучка на торец волокна приемника, что приводит к геометрическим потерям из-за разности площадей оптического волокна приемника и пятна излучения [25].

К достоинствам можно отнести отсутствие необходимости подвода питания к оптическим блокам.

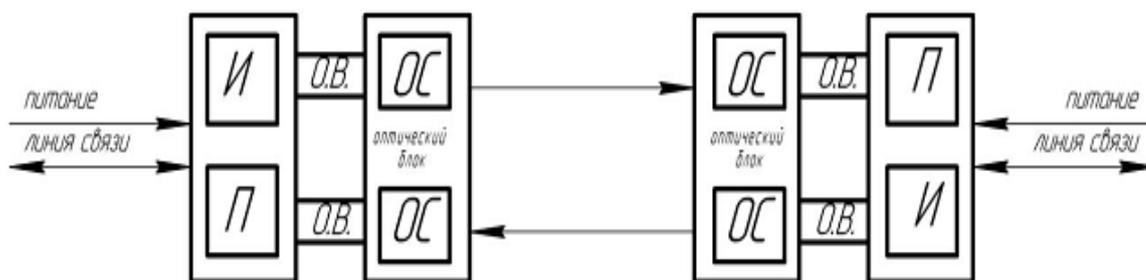


Рис. 2.2. Схема пассивного исполнения АОЛС (И – источник, П – приемник, ОВ – оптическое волокно ОС – оптическая система)

Смешанная схема построения АОЛС

В том случае, когда невозможно реализовать активную или пассивную схему, используется смешанная схема, которая изображена

на рис. 2.3. Существует несколько вариантов реализации данной схемы, например, когда в одном приемепередающем оптическом блоке источник и приемник излучения находятся внутри оптического блока, а в другом источник и приемник излучения располагаются непосредственно в медиаконвертере, которые соединяются с приемепередающим оптическим блоком с помощью оптического волокна.

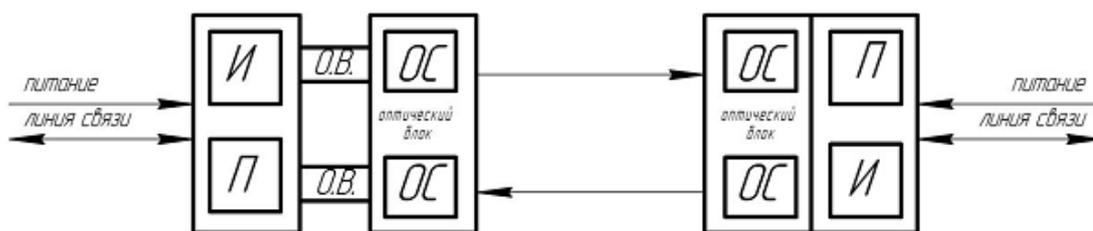


Рис. 2.3. Схема смешанного исполнения АОЛС (И – источник, П – приемник, О.В. – оптическое волокно ОС – оптическая система)

2. Источники излучения

В оптических системах связи и обработки информации могут применяться различные источники света: газоразрядные, полупроводниковые, твердотельные лазеры, светодиоды, суперлюминесцентные диоды и др.

Полупроводниковые лазеры.

Принцип действия полупроводниковых лазеров (ППЛ) основан на вынужденной излучательной рекомбинации электронно-дырочных пар, в активных полупроводниковых структурах, получаемых при прохождении через такие структуры электрического тока накачки. Наибольшее распространение получили лазеры на гетероструктурах (гетеролазеры), лазеры с распределенной обратной связью (РОС-лазеры) и лазеры на квантоворазмерных структурах (КРС-лазеры) [20].

Современные ППЛ, применяемые в системах оптической связи, обычно работают в спектральных диапазонах высокой прозрачности

кварцевого оптоволокна - 0.82...0.90 мкм, 1.30...1.33 мкм и около 1.55 мкм. Типичная мощность излучения таких ППЛ от 1 до 5 мВт; увеличение выходной мощности ППЛ для магистральных волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСПИ) сверх 5-10 мВт нецелесообразно, так как срок действия мощных лазеров сравнительно невелик. Кроме этого, при больших плотностях мощности в одномодовом волокне заметную роль начинают играть нелинейно-оптические явления, приводящие к искажениям передаваемых сигналов.

Ширина спектра излучения лучших образцов промышленных полупроводниковых лазеров около 0.1 нм при уровне боковых частот ниже 20 дБ. В одночастотных ППЛ, используемых в системах когерентной оптической связи, полуширина спектра генерации менее 500 МГц. Величина порогового тока накачки РОС-лазеров составляет несколько десятков мА, у ППЛ на основе квантово размерных структур пороговый ток накачки существенно меньше – от 3 до 15 мА. Как правило, ППЛ для ВОЛС выпускаются в виде компактных оптоэлектронных модулей, содержащих сервисную электронику (усилитель подводимого сигнала, систему авторегулировки мощности, температуры и др.), фотоприемник для контроля мощности выходного излучения, терморезистор и полупроводниковый термоэлемент (элемент Пельтье) - «холодильник», управляемый специальным электронным устройством и поддерживающий стабильную рабочую температуру внутри модуля. В таком модуле излучение из активной области ППЛ с использованием микролинз вводится в выходное одномодовое или многомодовое оптоволокно. В последние годы выпуск отдельных излучательных полупроводниковых модулей для ВОСПИ становится ограниченным, и гораздо большее распространение в технике оптической связи находят прямо-передающие оптоэлектронные модули, содержащие в едином компактном блоке полупроводниковые излучатель и фотоприемник. Частота модуляции современных

коммерческих высокоскоростных ППЛ составляет от нескольких десятков – сотен МГц до примерно 1.5...2.5 ГГц. В уникальных образцах ППЛ достигнута скорость передачи сигналов свыше 25 Гбит/с. В последние годы повышенный интерес разработчиков ВОСПИ вызывают «викселы» – полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL – vertical-cavity surface-emitting lasers). В таких лазерах резонатор образован двумя объемными дифракционными решетками Брэгга и излучение генерируется в направлении, перпендикулярном плоскости подложки, являющейся основанием гетеро- и квантоворазмерных слоев полупроводников. Благодаря сверхкороткой длине L резонатора Фабри-Перо, викселы генерируют на одной продольной моде, при этом диаметр выходного пучка лазера достигает 20...30 мкм, что позволяет осуществлять его эффективную фокусировку в одномодовое волокно. Пороговый ток викселов крайне мал – до 2...5 мА, мощность излучения около 1 мВт. Приложением электрического поля в направлении оси резонатора в некоторых (консольных) вариантах VCSEL удастся осуществлять плавную перестройку длины волны генерации в полосе длин волн 1530... 1560 нм. Это создает возможность эффективного применения викселов в перспективных ВОСПИ со спектральным уплотнением (WDM - Wavelength Division Multiplexing и DWDM - Dense Wavelength Division Multiplexing) [18,19].

Полупроводниковые светодиоды

В ВОСП небольшой (0.1...1.0 км) протяженности, а также в низкоскоростных (не более 10 Мбит/с) ВОСП в качестве источников света нередко используются полупроводниковые светодиоды, отличающиеся сравнительно малой мощностью излучения (до 0.5 мВт) и большой (около 20...30 нм) шириной спектра излучения. В основе действия светоизлучающих полупроводниковых диодов (СИД) лежит спонтанная рекомбинация электронно-дырочных пар в активной

области гетеро- либо квантоворазмерной полупроводниковой структуры. Диапазон рабочих длин волн современных СИД весьма широк – от 0.4 до 1.6 мкм. СИД активно используются и в технике систем индикации, в осветительной и сигнальной технике; разработаны СИД с мощностью излучения до 30 мВт в диапазонах длин волн около 690, 590, 470 нм, а также различные типы СИД белого свечения. Степень поляризации выходного излучения СИД близка к нулю. СИД обычно используются в линиях передачи сигналов на основе многомодовых волоконных световодов с большим (десятки-сотни мкм) диаметром сердцевины, в том числе изготовленных из недорогих полимерных материалов. Удобно применение СИД и в открытых системах связи с дальностью действия в пределах 100 м, используемых на промышленных объектах и строительных площадках. Характерная особенность СИД, применяемых в системах связи, – линейная ватт-амперная характеристика в широком диапазоне токов накачки, что делает их весьма удобными в аналоговых оптоэлектронных системах передачи и обработки сигналов. Основные достоинства СИД – малая потребляемая электрическая мощность, дешевизна и значительная долговечность (около 10^5 часов).

Суперлюминесцентные диоды

В суперлюминесцентных диодах (СЛД) последовательно действуют два процесса генерации света: первичное излучение возникает в результате спонтанной рекомбинации электронно-дырочных пар и вторичное - вынужденное излучение – является основой механизма усиления спонтанного излучения в активной среде. Активная среда в СЛД обладает высоким оптическим коэффициентом усиления, оптический резонатор в СЛД отсутствует и такой излучатель, в целом, можно рассматривать как однопроходный усилитель света. В конструкции СЛД достигнута высокая степень подавления лазерных (резонансных)

эффектов, в результате чего широкая, с полушириной около 20...40 нм, спектральная кривая распределения мощности выходного излучения примерно соответствует распределению Гаусса. Мощность излучения СЛД обычно находится в пределах 3...10 мВт (имеются промышленные образцы СЛД мощностью в несколько сотен мВт) при токах накачки величиной от 50 до 150 мА [17].

Спектральный рипл (относительная величина резонансных максимумов на спектральной зависимости мощности излучения) в лучших образцах СЛД менее 0.5 %. Излучение СЛД частично поляризовано (степень поляризации 30-40%), а ватт-амперная характеристика таких излучателей существенно нелинейная. В ВОСПИ СЛД применяются сравнительно редко и основной областью их практического использования являются различные оптические измерительные устройства (например, волоконные гироскопы), датчики, системы индикации.

3. Приемники излучения

Фотоприемники - устройства для преобразования сигналов электромагнитного излучения. Существуют различные типы фотоприемников, в которых используются вещества в разных агрегатных состояниях. Наряду с одноэлементными приемниками существуют многоэлементные приемники, с отдельными приемными элементами, дискретно или непрерывно распределенными по поверхности.

р-І-п-фотодиоды

Р-І-Н фотодиод представляет собой трехслойную структуру из р- и п-полупроводников, разделенную сравнительно протяженной І – областью слаболегированного полупроводника. Поглощение квантов света происходит в обедненной І- области, при этом в результате внутреннего

фотоэффекта в объеме этого слоя образуются электроны и дырки, время жизни которых намного превышает их время жизни в p- и n-слоях (где они быстро рекомбинируют). Во внешнем электрическом поле носители заряда дрейфуют, обуславливая электрический ток в замкнутой электрической цепи фотоприемного устройства [22]. Спектральная чувствительность p-I-n фотодиодов определяется типом полупроводниковой структуры, при этом красная граница фотоэффекта составляет около 0.9 мкм для арсенида галлия, 1.1 мкм для кремния и 1.7 мкм для германия; сегодня разработаны и практически используются более сложные фотоприемные полупроводниковые структуры, в том числе квантоворазмерные, обладающие высокой квантовой эффективностью как в узкой, так и в широкой полосах спектра длин волн. В лучших образцах p-I-n фотодиодов чувствительность фотодиода (отношение величины фототока к мощности падающего излучения) достигает уровня свыше 0.9 А/Вт. Временные характеристики p-I-n фотодиодов определяются толщиной обедненного I- слоя, скоростью дрейфа носителей заряда и собственной емкостью фотодиода и подводимых электродов. Высокоскоростные p-I-n фотодиоды характеризуются временем нарастания-спада регистрируемого оптического сигнала величиной 10 - 100 пикосекунд. Величина обратного напряжения смещения в p-I-n фотодиодах обычно от 10 до 20 В [21].

Лавинные фотодиоды

Лавинные фотодиоды (ЛФД) относятся к полупроводниковым фотоприемникам с внутренним усилением фототока. Конструктивно в лавинных фотодиодах между областью поглощения света (π - областью) и n- областью полупроводниковой p- π -n- структуры расположен дополнительный слой p- полупроводника, тот есть структура ЛФД имеет вид p- π -p-n. При высоком напряжении обратного смещения носители,

дрейфующие в π -области, приобретают кинетическую энергию, достаточную для ударной ионизации атомов кристаллической решетки полупроводника. Благодаря большой, около 105 В/см, напряженности электрического поля вблизи границы p - и n - полупроводников, первичная, образовавшаяся при поглощении одного кванта электронно-дырочная пара может создать десятки-сотни вторичных пар. В результате лавинного умножения числа носителей величина фототока в ЛФД, по сравнению с фототоком в p - I - n - фотодиоде, возрастает в 100 000 раз, что способствует увеличению чувствительности такого фотоприемника более чем на порядок. Основным недостатком ЛФД являются сравнительно большие шумы, вызванные температурными флуктуациями величины коэффициента лавинного умножения. Величина обратного напряжения смещения в современных ЛФД лежит в пределах 30 – 200 В и устанавливается с высокой точностью, например, около 0.1 В. Полоса рабочих частот ЛФД достигает 80 ГГц. и длины регенерационного участка линии передачи [19,20].

Выводы к главе II

1. Рассмотрены основные схемы исполнения атмосферных оптических линий связи, а также установлено, что предпочтительно применение активной схемы АОЛС, где источник и приемник излучения находятся внутри приемопередающего оптического блока. Активная схема АОЛС имеет большую площадь фотоприемника, что в свою очередь, увеличивает угол поля зрения, а это благоприятно сказывается на уменьшении энергетических потерь и требований к угловым перемещениям приемопередающих оптических блоков друг относительно друга.
2. Рассмотрены современные источники излучения применяемые в АОЛС, характеристики и принципы действия. В качестве источника

излучения целесообразно использовать лазерные диоды с длиной волны 1310 нм, мощностью излучения 1,5 мВт, марки ЛТ-53. Данный лазерный диод позволяет передавать информацию со скоростью до 1 Гб/с.

3. Рассмотрены современные приемники излучения применяемые в АОЛС, характеристики и принципы действия. В качестве приемника излучения целесообразно использовать р-і-n фотодиод марки (ДФД-70), со спектральной чувствительностью 0,85 А/Вт при длине волны 1330 нм, с размером площадки до 70 мкм. Это обусловлено следующими его свойствами. Р-І-Н фотодиод обеспечивает требуемый динамический диапазон и быстродействие до 1 Гб/с. Зависимость характеристик фотодиода от изменений окружающих условий (температуры, вибраций) минимальна. Спектральная характеристика согласована с длиной волны излучателя. Кроме того, фотодетектор имеет малые габариты и массу, отвечает условиям совместимости с оптоволоконном и электронными устройствами, потребляет малую энергию.

1. Структура сети на основе АОЛС для связи сегментов ЛВС ведомственной службы

Типичный случай – объединение пользователей внутри здания с помощью проводных технологий (витой пары, коаксиального кабеля) а связь между зданиями организуется с помощью АОЛС (рис.3.1.)

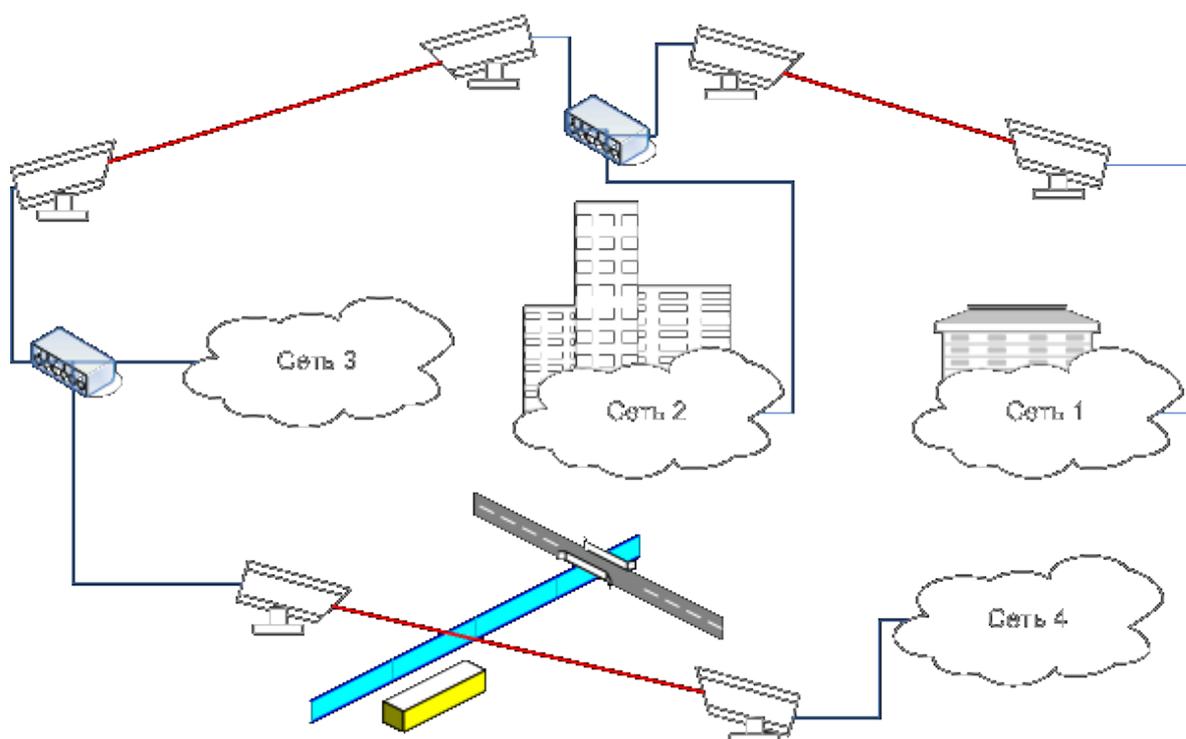


Рис. 3.1. Использование АОЛС для связи сегментов ЛВС

Требования к каналу АОЛС:

- Основное требование, высокое быстродействие. Т.е. решения, не обеспечивающие скорость хотя бы 10 Мбит/с не находят применения . Оптимальным является использование каналов 100 Мбит/с или 1 Гбит/с.

- Необходимая дальность связи может достаточно сильно колебаться (от 10 метров до нескольких километров), но, как правило, не превышает 1 км.
- Высокая надежность – доступность канала должна быть более 99,999%
- Система юстировки и автонаведения, дрейф опорных конструкций (домов, столбов, мачт) под действием ветра, нагрева и других природных факторов слабо сказывается на уходе оптического луча от оптимального направления. Угловые колебания зданий практически всегда лежат в пределах около 0,5 мрад.

Канал АОЛС реализует физическую среду передачи данных и прозрачен для программного обеспечения (далее ПО) станций сети. Это позволяет использовать любое ПО, обеспечивающее передачу данных по тому типу сегмента сети, в которую включен канал АОЛС. Однако необходимо разработать программу мониторинга параметров АОЛС, которая будет с оборудованием АОЛС, получать информацию о ее состоянии и управлять ее параметрами в соответствии с командами пользователя. Для этого в оборудовании АОЛС должен быть предусмотрен отдельный интерфейс.

Очевидно, при использовании АОЛС невозможен компромисс между дальностью передачи и доступностью канала. В этом случае необходимо применять мощные передатчики и высокочувствительные приемники или резервирование с помощью другого канала. Например, в качестве резерва для высокоскоростной АОЛС может использоваться более медленный проводной канал [23].

Другим эффективным решением является дублирование АОЛС с помощью радиоканала. В этом случае существенно повышается дальность передачи, т.к. не существует погодных условий, препятствующих работе одновременно обоих каналов, т.о. возможно использование как АОЛС так

и радиоустройств практически на предельной дальности, не создавая запас мощности на случай плохих метеоусловий (для АОЛС наихудшими условиями является туман, для радио – дождь. Причем одновременное их появление невозможно).

Структура аппаратных и программных средств для реализации канала АОЛС

Рассмотрим схему подключения канала АОЛС к ЛВС или отдельной ЭВМ. Один из возможных вариантов представлен на рис. 3.2.

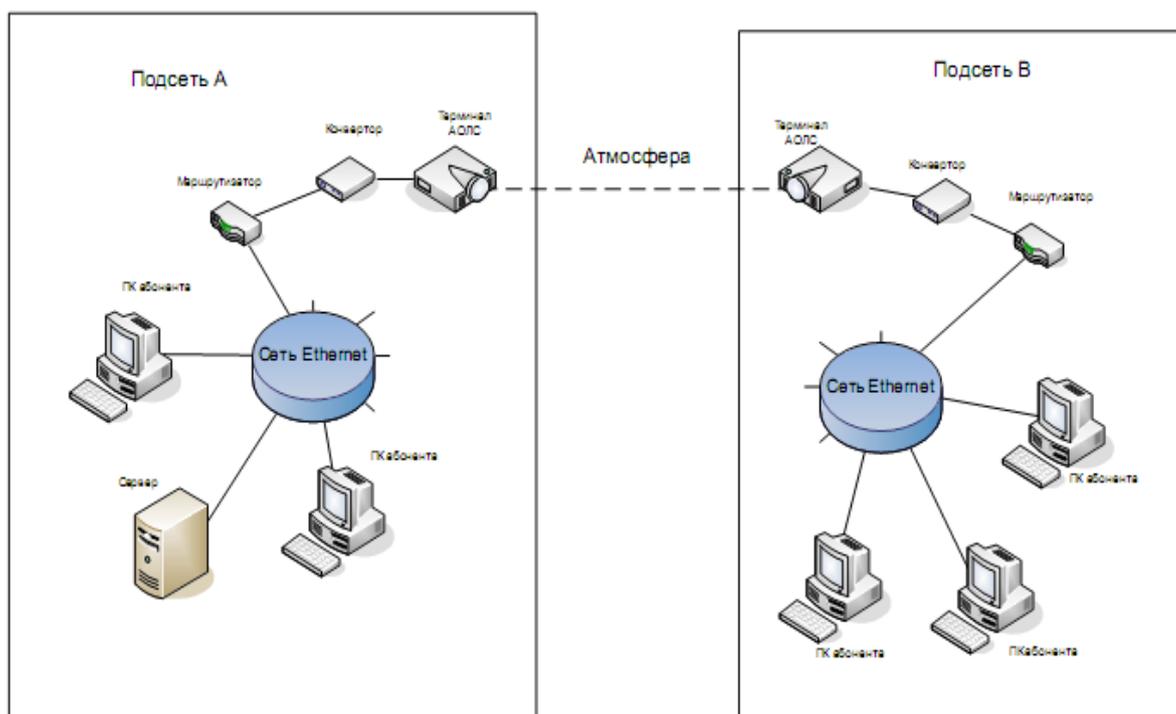


Рис. 3.2. Один из вариантов подключения канала АОЛС между двумя подсетями

При простейшей реализации канала АОЛС он прозрачен на физическом уровне и представляет собой просто “удлинитель” среды передачи, т.е. передатчик АОЛС выполняет только простейшее преобразование сигналов (например, напряжение в мощность оптического сигнала), не затрагивая даже способ кодирования. Приемник выполняет обратное преобразование.

Т.о. обеспечивается минимальная задержка в распространении сигнала (порядка нескольких битовых интервалов), а весь контроль корректности и защиты передачи ложится на узлы сети. В этом случае канал АОЛС может совсем не иметь цифровых схем и представлять аналоговый модулятор (передатчик) и усилитель (приемник) с соответствующим оптическим оборудованием [24].

В более сложном случае канал АОЛС обеспечивая прозрачность на физическом уровне, дополнительно выполняет некоторые интеллектуальные функции:

- Перекодировка сигнала. Представление последовательного сигнала, поступающего на вход передатчика, в другом коде с повышения надежности передачи и снижения требования к пропускной способности канала
- Повышение надежности передачи за счет перекодирования в код с большей избыточностью или за счет повторной отправки поврежденных пакетов
- Шифрование информации
- Мультиплексирование нескольких каналов

В этом случае задержка, вносимая каналом, существенно возрастает.

Еще один вариант, это реализация канала АОЛС на канальном уровне или сетевом уровне. В этом случае устройства АОЛС реализуют функции коммутатора или маршрутизатора. Это увеличивает сложность оборудования АОЛС, но позволяет более гибко управлять передачей. Очевидно, что задержка, вносимая каналом в этом случае, максимальна.

Структура аппаратных средств АОЛС

Была разработана следующая структура терминального устройства (ТУ) канала АОЛС (рис. 3.3.).

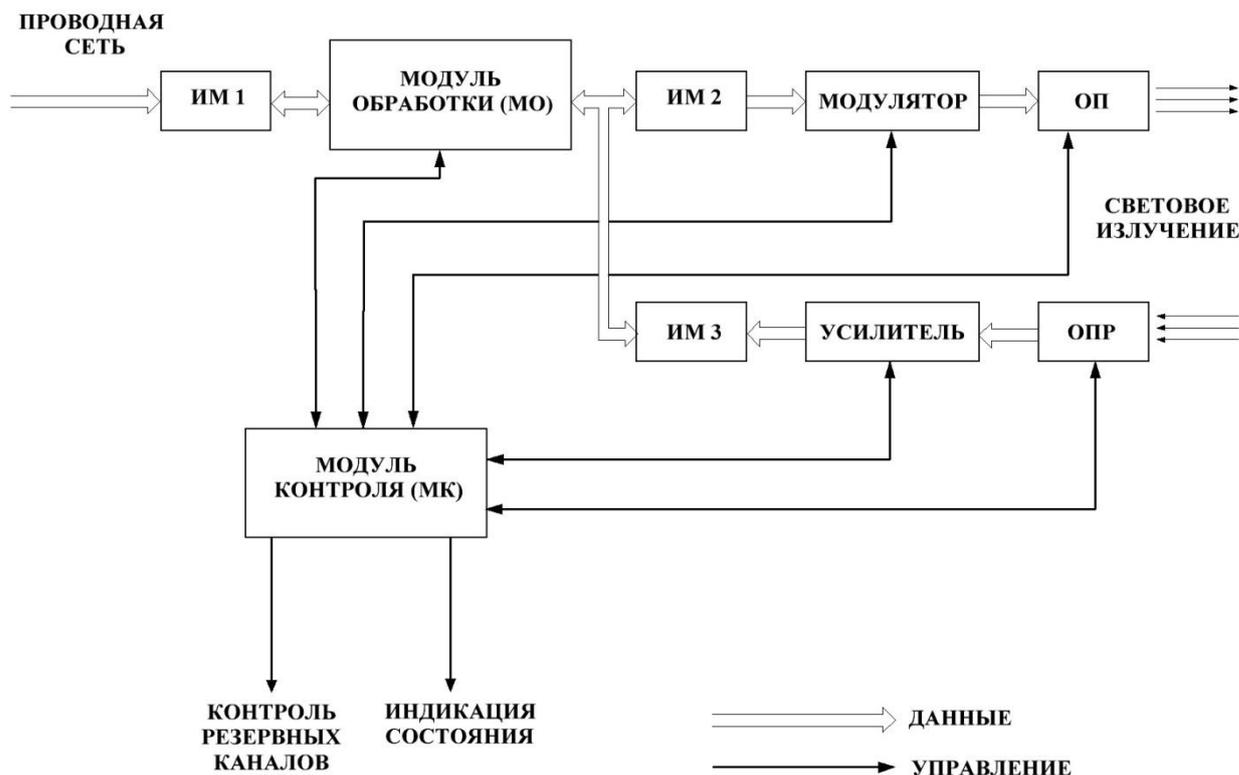


Рис. 3.3. Структурная схема ТУ канала АОЛС

Модуль обработки (МО) выполняет логическое преобразование данных. Конструктивно МО может быть выполнен как микроконтроллер или FPGA.

Интерфейсные модули ИМ1, ИМ2, ИМ3 предназначены для согласования сетевых сигналов, сигналов к модулятору и от усилителя с шиной МО. Введение в схему структурно выделенных интерфейсных модулей обусловлено требованиями универсальности. В этом случае возможна замена принимающего или передающего оптоэлектронного блока или интерфейса с проводной сетью не затрагивая остальные модули системы, а только заменяя относительно простые интерфейсные модули ИМ3, ИМ2 и ИМ1 соответственно. Это позволит на общей аппаратной базе разработать ряд продуктов, охватывающих большой сегмент рынка.

Модулятор предназначен для управления излучателем световых волн в соответствии с сигналами, поступающими от МО через ИМ2.

Оптический передатчик ОП представляет собой устройство для создания светового потока и в зависимости от конструкции может включать в себя набор лазерных элементов или светодиодов, оптическое устройство фокусировки и т.д.

Оптический приемник ОПР выполняет прием оптического сигнала. Может выполнять его преобразование в электрический сигнал.

Усиление сигнала от ОПР перед вводом его МО через ИМЗ выполняется отдельным усилителем.

Для контроля за состоянием и работой АОЛС введен модуль контроля МК. Он выполняет следующие функции:

- осуществляет прямой мониторинг исправности узлов ТУ
- осуществляет прием от МО информации о логическом состоянии оптического канала – количества ошибок, времени недоступности канала и т.д.
- получает от ОП и ОПР информацию о физическом состоянии оптического канала – уровне фоновой засветки, мощности сигнала от другого ТУ, отклонении светового потока и.п.
- получает от датчиков информацию о температуре, влажности, атмосферном давлении, на основании которой осуществляет коррекцию мощности излучателя
- осуществляет обмен информацией с другим ТУ
- активирует в случае неработоспособности канала АОЛС резервный канал
- осуществляет взаимодействие с внешним управляющим устройством через специальный порт или через сетевой интерфейс (например, доступ к МК может осуществляться по ТСР/IP протоколу).

Технологически МК может реализовываться как отдельный модуль или совместно с МО.

Возможны различные варианты отображения логической структуры ТУ на физическую. Основные варианты следующие:

- компоновка ТУ в виде единого блока
- размещение МО, МК и интерфейсных модулей в одном блоке, а оптических модулей, модулятора и усилителя – в другом. Этот вариант может применяться, когда необходимо защитить МО и МК от воздействия внешней среды, или если проводная линия связи с ТУ проходит вне офиса фирмы или банковского филиала (например, при размещении ТУ на крыше здания) и необходимо предотвратить перехват информации. В этом случае информация по проводному каналу связи с ТУ передается уже закодированная. Подобную компоновку использует большинство существующих промышленных устройств.
- размещение в выносном блоке исключительно оптической системы, сигнал к (и от) которой передается по световоду от основного блока. Этот вариант, в дополнение к преимуществам, позволят полностью устранить влияние электромагнитного излучения на проводную линию связи с выносным устройством, минимизировать стоимость выносного оборудования, обеспечить максимальную электрическую развязку (что весьма важно для защиты от молний), позволяет избежать подвода питания к выносному устройству.

2. Особенности работы АОЛС

Отличительной особенностью АОЛС, является зависимость прохождения оптического излучения от состояния атмосферы. В данном случае основное негативное влияние на работоспособность лазерных линий могут оказывать такие факторы, как флуктуации из-за

неоднородностей плотности воздуха и ослабление мощности излучения при рассеянии на частицах аэрозолей (например, в тумане).

Флуктуации

Наличие флуктуации приводит к тому, что в плоскости приемной антенны образуется спекл-структура - хаотичная и нестационарная совокупность ярких и темных пятен. Если уровень мощности сигнала на приемной антенне при попадании на нее темного пятна оказывается меньше допустимого, связь прерывается: в линиях Ethernet происходит значительное снижение скорости связи, а в плезиохронных и синхронных сетях это означает отсутствие канала.

Для борьбы с флуктуациями применяется некогерентное сложение излучения нескольких лазеров и усреднение приемной антенной: при достаточной площади антенны в апертуру попадает большое количество ярких и темных пятен и уровень мощности усредняется. Отметим, что наличие в системе нескольких передатчиков еще не означает, что на дальнем конце линии связи происходит усреднение и снижается влияние флуктуации. Влияние флуктуации зависит от конструктивных особенностей оборудования, распределения температур, скорости ветра и других факторов, поэтому скажем лишь, что почти во всех существующих системах на рекомендованных дистанциях воздействие этого эффекта минимизировано. Тем не менее, всегда полезно запрашивать у поставщика данные о потерях на флуктуации (D_{fl}) для каждой модели и дистанции.

Молекулярное поглощение

Влияние линий резонансного молекулярного поглощения, вызванных наличием примесей газов, паров воды, в современной аппаратуре можно не учитывать, поскольку эти линии общеизвестны специалистам и применяются передатчики, работающие в так

называемых "окна прозрачности", где нет сколько-нибудь заметных линий поглощения.

Геометрические потери

В ВОЛС благодаря полному внутреннему отражению в волокне вся мощность передатчика, за вычетом поглощаемой в материале волокна, попадает в приемник. В АОЛС излучение из передающих антенн выходит с некоторой угловой расходимостью, поэтому в плоскости приемных антенн, удаленных на длину линии связи, пятно излучения имеет размер, как правило, значительно превышающий размер приемной антенны. Часть энергии, которая не попадает на приемную антенну и теряется, называется геометрической потерей [25].

Наличие таких потерь приводит к уменьшению мощности сигнала на приемнике (на 15-40 дБ) и увеличению зависимости работоспособности линии от погодных условий.

Ослабление мощности излучения

Ослабление сигнала вследствие рассеяния излучения в тумане остается основным фактором ограничения дальности работы АОЛС. Надежность оптических линий связи напрямую зависит от энергетических характеристик оборудования, речь о которых пойдет ниже.

Технические характеристики

В качестве источников излучения в АОЛС применяются лазеры или светодиоды. Полупроводниковый лазер, или лазерный диод, - тот же светодиод, только грани кристалла которого тщательно обработаны и являются резонатором. Такое преимущество светодиодных систем, как отсутствие влияния флуктуации, сегодня практически осталось в прошлом. Недостатком светодиодных систем по сравнению с лазерными являются

гораздо большие геометрические потери (до 40 дБ!) и, следовательно, большая зависимость от погодных условий.

Поэтому во всем мире производители рекомендуют светодиодные системы к использованию на дистанциях не более 400-500 м. В остальном все системы аналогичны, и к ним одинаково применимы все характеристики, перечисленные ниже:

- средняя мощность передатчиков на выходе из передающей антенны, P_{tr} . При модулировании цифрового сигнала передатчик излучает сигнал со средней мощностью, примерно в 2 раза меньшей, чем пиковая. Далее излучение проходит через передающую оптику, потери мощности в которой тоже надо учитывать;
- эффективная ширина диаграммы направленности передатчиков, ϕ_0 . Этот параметр с допустимой точностью можно считать равным ширине на уровне 0,5 от максимального значения в пересчете на круговую диаграмму. Значение ϕ_0 определяет величину геометрических потерь и требования к стабильности установки и наведения оборудования. Угловые колебания зданий практически всегда лежат в пределах около 1 мрад, поэтому при $\phi_0 = 1$ мрад (пятно излучения диаметром 1 м на дистанции 1 км) и менее система работоспособна только при наличии функции автонаведения.

Однако во всем мире автонаведение является пока экзотикой, и об успешном опыте эксплуатации еще не известно. Принято иметь полуторный запас, то есть ϕ_0 не менее 1,5 мрад. Существенное значение имеет форма диаграммы направленности. Разные модели лазеров имеют различные формы диаграммы, отличающиеся соотношениями осей эллипса, поэтому удобнее их приводить к общей, среднеквадратичной величине. При наличии заметных провалов в огибающей графика распределения мощности по углу малейшие

колебания терминалов могут приводить к пропаданию сигнала на приемнике и разрыву связи;

- минимально допустимый уровень сигнала на входе в приемную антенну Pr_{min} при уровне ошибок $BER < 10^{-9}$ зависит от характеристик приемника, связанных также со скоростью передачи информации, и потерь в приемном оптическом тракте. Применяются два типа приемников: pin-диод и лавинный фотодиод (ЛФД). Чувствительность ЛФД близка к предельной величине, определяемой квантовым шумом сигнала, и примерно в 100 раз лучше, чем у pin-диода. Поэтому оборудование с pin-диодами реально применяется на дистанциях не более 500 м;
- максимально допустимый уровень сигнала на входе в приемную антенну Pr_{max} при уровне ошибок $BER < 10^{-9}$. Высокие энергетические характеристики передающего тракта, мощные передатчики и низкие геометрические потери, приводят к повышению приходящей на приемник мощности. В условиях прозрачной атмосферы мощность может превысить Pr_{max} , происходит насыщение приемника и связь прерывается. Если у аппаратуры отсутствует автоматическая регулировка уровня мощности сигнала в диапазоне 10-20 дБ, требуется установка ослабителей или расширение диаграммы направленности, что приводит к снижению энерговооруженности и надежности канала связи;
- площадь приемных антенн S_r . С помощью этого параметра определяются геометрические потери и устойчивость к флуктуациям. Можно считать, что существующие лазерные системы с $S_r < 10^2 \text{ м}^2$ устойчивы к флуктуациям на дистанциях до 1 км.

Энергетические характеристики

При установке оборудования на дистанции L геометрические потери $D_{\text{геом}}$ равняются отношению площади пятна излучения в плоскости приемной антенны к ее площади:

$$D_{\text{геом}} = 10 \lg(\pi \varphi^2 L^2 / 4S_r), \text{ дБ} \quad (3.1.)$$

Максимальная (при отсутствии потерь в атмосфере) мощность P_{max} попадающая в приемную антенну, равна:

$$D_L = Pr_{\text{max}} - D_{\text{геом}}, \text{ дБм} \quad (3.2.)$$

Динамический диапазон

При условии $P_{\text{max}} < Pr_{\text{max}}$ запас на потери мощности в атмосфере D_L равен:

$$D_L = Pr_{\text{max}} - Pr_{\text{min}} - D_{\text{геом}} - D_{fl}, \text{ дБ} \quad (3.3.)$$

Если $P_{\text{max}} > Pr_{\text{max}}$ то запас на потери $D_L \leq Pr_{\text{max}} - Pr_{\text{min}} - D_{\text{геом}} - D_{fl}$ не превышает динамический диапазон приемника. В этом случае необходимо уточнять у производителя, каким образом происходит снижение мощности на приемнике и каким остается значение D_L . Величина D_L имеет различные названия в разных источниках: динамический диапазон, запас на затухание, запас на потери мощности, бюджет линии, энергетический потенциал и др. При правильной форме диаграммы направленности передатчиков и правильной установке оборудования именно величина D_L однозначно и полностью описывает энергетику линии, поскольку включает в себя все

основные технические характеристики оборудования и дальность линии связи. Эта величина также однозначно и полностью определяет устойчивость линии к погодным условиям. АОЛС работоспособна только при условии превышения D_L над потерями в атмосфере. Удобным и наглядным является использование величины D_L на дистанции 1 км приведенного динамического диапазона D_1 . При $D_{fl}=0$ (3.3.) запас на потери D_L выглядит так:

$$D_L = D_1 - 20 \lg(L), \text{ где } L \text{ в км} \quad (3.4.)$$

На сегодняшний день значения приведенного динамического диапазона D_1 находятся в интервале от 17 дБ для светодиодных систем до 45-50 дБ для лазерных. Интересно отметить, что мощность и количество передатчиков не являются определяющими в энергетике АОЛС так же, как и площадь приемных антенн. Удвоение количества или мощности передатчиков приводит к увеличению динамического диапазона системы всего на 3 дБ. Гораздо большее значение имеет применение высокочувствительных приемников (+20 дБ), выбор оптимальной диаграммы направленности и некоторые другие технические решения.

Доступность канала связи

Доступность канала связи определяется отношением времени бесперебойной работы линии к общему времени эксплуатации. По сути, это основной параметр, характеризующий потребительские свойства системы при заданном интерфейсе. Например, значение доступности 99,9% означает, что работоспособность линии связи будет нарушаться в течение 8,5 часов за год, а 99,8% - 17 часов в год и т.д. Из чего следует, что изменение показателя доступности на десятые доли процента приводит к изменению времени отсутствия связи в разы. Поэтому повышение показателя доступности даже на десятые и сотые доли процента является важнейшей задачей.

Мировая и отечественная практика показывает, что приемлемые значения доступности АОЛС должны находиться в диапазоне от 99,0% (при объединении сегментов локальных сетей) до 99,5-99,8% (для передачи голоса в телефонных сетях общего пользования и сетях мобильной связи). Для IP-приложений требуется доступность 99,2-99,5%.

Для определения доступности линии связи с заданной длиной необходимо знать вероятность того, что величина потерь мощности сигнала, вызванная аэрозольным рассеянием, не превысит значение динамического диапазона D_L системы. Такой расчет выходит за рамки настоящей статьи, поэтому отметим лишь основные моменты.

Дальность видимости

Вследствие сложной структуры аэрозолей в реальной атмосфере расчет потерь излучения с приемлемой точностью чрезвычайно затруднен и на практике обычно используют интегральную характеристику пропускания атмосферы - видимость или метеорологическую дальность видимости (МДВ, S_m).

В настоящее время МДВ измеряется метеослужбами путем пропускания эталонного излучения на калиброванной трассе, поэтому эта величина напрямую связана с характеристикой оптической прозрачности атмосферы и представляет собой ее условное выражение. МДВ, S_m - это расстояние, на котором видимое излучение источника света уменьшается в 20 раз (в 50 раз по определению видимости) по отношению к первоначальной величине. Пересчет для длин волн 0,78-0,86 мкм не требуется, поскольку в этом диапазоне ослабление излучения практически не зависит от длины волны.

Для каждой конкретной модели АОЛС и определенной дальности связи можно рассчитать минимальное, или критическое, значение МДВ - S_{min} , при котором ослабление мощности сигнала в

атмосфере при ухудшении погодных условий превышает динамический диапазон системы и происходит нарушение работоспособности канала АОЛС.

$$S_{min} = 13L/D_L \quad (3.5)$$

Если реальное значение МДВ на трассе становится меньше или равно S_{min} , уровень ошибок при передаче данных превышает допустимый уровень и линия прекращает работу до момента превышения значения МДВ над S_{min} .

На дистанции 1 км типичная диодная система с $D_1=17$ дБ имеет $S_{min}= 0,76$ км, лазерная с $D_1 = 50$ дБ имеет $S_{min} = 0,26$ км. Вероятность наблюдения МДВ в диапазоне 760 м и ниже многократно больше, чем в 260 м, поэтому и доступность системы с меньшим динамическим диапазоном будет значительно ниже - соответственно 98 и 99,9% для условий Москвы. Потери в атмосфере экспоненциально зависят от значения МДВ, поэтому снижение S_{min} существенно повышает доступность на любой дистанции. Кроме того, для каждого значения МДВ можно определить предельную дальность связи для конкретной модели оборудования. Таким образом, зная распределение вероятности наблюдения определенного значения МДВ в данном регионе за длительный период времени (5-10 лет), можно оценить среднюю доступность конкретной линии связи или выдать рекомендации по устройству такой линии с требуемой доступностью. Другим способом теоретически рассчитать параметр доступности невозможно.

3. Расчет дистанции АОЛС с заданным коэффициентом готовности.

Проектирование систем АОЛС требует учета климатических особенностей географического региона (ГР), где будет проходить трасса АК связи. Необходимо выполнить согласование интегральной функции

распределения километрического затухания (ИФР-КЗ) инфракрасного (ИК) излучения в атмосфере данного географического региона (ГР) с энергетическим ресурсом использованной аппаратуры АОЛС для определения протяженности атмосферного канала с требуемым коэффициентом готовности.

Энергетические характеристики аппаратуры АОС являются паспортными данными изделия и сообщаются изготовителем. Определение ИФР-КЗ ГР – сложная задача, для решения которой требуется усреднение экспериментальных данных по метеорологической дальности видимости ($MДВ$, $S_{MДВ}$) в определенном ГР. Экспериментальные данные по МДВ ГР должны охватывать длительный период времени (минимум 3–5 лет).

Без положительного разрешения вопроса определения ИФР-КЗ ГР ни о каком широком внедрении АОЛС не может быть и речи.

На основании статистики метеорологической дальности видимости, предоставленной городским аэропортом г.Ташкента, определим интегральную функцию распределения километрического затухания для г.Ташкента для длин волн, на которых работает современная аппаратура атмосферной оптической связи, а также рассмотрим технические характеристики современной аппаратуры атмосферной оптической связи и рассчитаем дистанцию, на которой способна работать данная аппаратура с учетом требований к коэффициенту готовности атмосферного канала в г.Ташкента;

Метод определения дистанции атмосферного канала связи с заданным коэффициентом готовности.

На рис. 3.4. приведен ход лучей от передатчика до приемника в системе АОЛС. Принята следующая система обозначений: L_{AK} – протяженность атмосферного канала связи, ϕ_{PACX} – угол расходимости лазерного излучения, $d_{ПРИЕМ}$ – диаметр линзы приемного устройства.

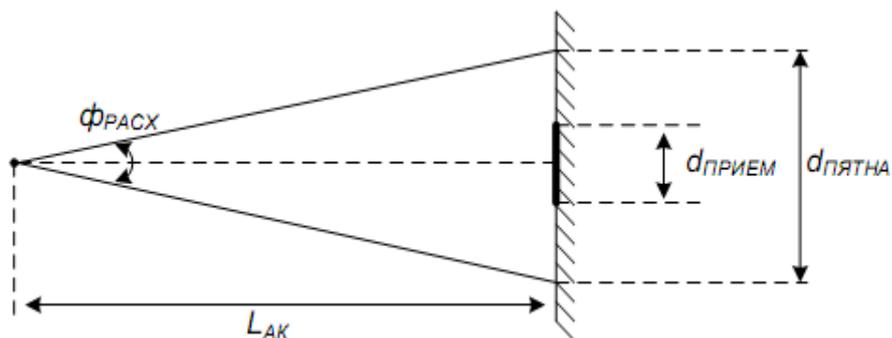


Рис. 3.4. Ход лучей от передатчика до приемника в системе атмосферной оптической связи

При прохождении через атмосферу оптический сигнал ослабевает по мощности из-за рассеивания и поглощения света атмосферой на величину P_1 , дБ:

$$P_1 = \gamma \cdot L_{AK} \quad , \quad (3.6)$$

где γ – величина километического затухания оптического сигнала в атмосфере, величина переменная. Выбор величины километического затухания на трассе необходимо осуществлять по интегральной функции распределения километического затухания географического региона, где будет эксплуатироваться проектируемая система атмосферной оптической линии передачи с учетом требуемого оператором коэффициента длины волны λ . Детально этот вопрос будет рассмотрен ниже. Таким образом, справедлива зависимость:

$$\gamma = f(K_G, \lambda) = \gamma_{K_G, \lambda} \quad . \quad (3.7.)$$

Анализируя рис. 3.4., можно выделить второй вид потерь, обусловленный расходимостью излучения. На рис. 3.4. видно, что лишь часть оптической мощности попадает на линзу приемного устройства. Потери за счет расходимости (P_2 , дБ) можно определить из следующих соотношений:

$$P_2 = 10Lg \frac{S_{ПЯТНА}}{S_{ПРИЕМ}} = 10Lg \left(\frac{\pi d_{ПЯТНА}^2}{4} \cdot \frac{4}{\pi d_{ПЯТНА}^2} \right) = 20Lg \left(\frac{d_{ПЯТНА}}{d_{ПРИЕМ}} \right). \quad (3.8.)$$

Диаметр «оптического пятна» ($d_{ПЯТНА}$) на приемной стороне может быть получен из простого геометрического соотношения:

$$d_{ПЯТНА} = L_{АК} \cdot \varphi_{РАСХ}. \quad (3.9.)$$

Формула справедлива при величине угла расходимости излучения порядка нескольких мрад. Диаметр приемной линзы сообщается в техническом паспорте оборудования. Из (3.8.) и (3.9.) получаем:

$$P_2 = 20Lg \left(\frac{L_{АК} \cdot \varphi_{РАСХ}}{d_{ПРИЕМ}} \right). \quad (3.10.)$$

Общие энергетические ($P_{ОБЩ}$) потери на трассе длиной $L_{АК}$ составляют сумму потерь, обусловленных рассеиванием и поглощением света (P_1), и потерь за счет расходимости (P_2):

$$P_{ОБЩ} = P_1 + P_2. \quad (3.11.)$$

Раскрывая каждое слагаемое в (3.11.), получаем следующее соотношение:

$$P_{ОБЩ} = \gamma_{КГ, \lambda} \cdot L_{АК} + 20Lg \left(\frac{L_{АК} \cdot \varphi_{РАСХ}}{d_{ПРИЕМ}} \right). \quad (3.12.)$$

Условием доступности системы АОЛС является соотношение (3.13.):

$$P_{ОБЩ} \leq A, \quad (3.13.)$$

где A – энергетический ресурс аппаратуры АОЛС.

Энергетический ресурс аппаратуры АОЛС определяется как разность между мощностью передатчика (P_S) и чувствительностью приемника (P_R), которые являются паспортными данными аппаратуры:

$$A = P_S - P_R \cdot \quad (3.14.)$$

Если передающая установка состоит из нескольких излучающих лазеров (светодиодов), мощность передатчика определяется как сумма их мощностей. В случае использования однотипных источников излучения P_S определяется:

$$P_S = P_{Si} \cdot N, \quad (3.15.)$$

где N – количество излучателей в передатчике.

Анализируя современную аппаратуру АОЛС, можно сказать, что количество излучателей в передатчике лежит в пределах от 1 до 3.

Из формул (3.14.) и (3.15.) получаем:

$$P_S = P_{Si} \cdot N - P_R, \quad (3.16.)$$

а условие доступности принимает вид:

$$\gamma_{KГ, \lambda} \cdot L_{AK} + 20Lg \left(\frac{L_{AK} \cdot \Phi_{PACX}}{d_{ПРИЕМ}} \right) \leq P_{Si} \cdot N - P_R \cdot \quad (3.17.)$$

Если выполняется соотношение (3.17.), система АОЛС работает. В противном случае наблюдается перерыв связи.

Километрическое затухание оптического излучения в атмосфере γ является переменной величиной и изменяется в широких пределах: от нескольких десятых дБ/км до сотен дБ/км.

Зависит от климатических условий региона, где проектируется трасса АОЛС и носит вероятностный характер. Вероятность того, что величина γ не превысит некоторого порогового значения, при котором соотношение (3.17.) не выполняется, можно определить, используя интегральную функцию распределения километрического затухания.

Для определения ИФР-КЗ ГР (интегральная функция распределения километрического затухания географического региона) предлагается использовать статистику по МДВ, полученную с аэропорта, находящегося в данном географическом регионе (ГР).

Статистика метеорологической дальности видимости (МДВ) г. Ташкента предоставлена городским аэропортом. В табл. 3.1. представлены обработанные статистические данные, охватывающие период измерения МДВ за 10 лет.

Таблица 3.1.

Статистика метеорологической дальности видимости

$S_{\text{МДВ}}$, км	<0.1	<0.2	<0.4	<0.6	<0.8	<1	<1.5	<3	<5
Процент времени	0.1	0.2	0.4	0.5	0.7	0.8	1.3	3.5	7.7

Метеорологические данные в аэропортах и на метеостанциях ведутся на длине волны:

$\lambda = 0.55$ мкм. Актуальным становится вопрос пересчета статистики МДВ на длине волны

$\lambda = 0.55$ мкм (далее ИФР МДВ_{0,55}) в ИФР-КЗ на любой другой длине волны $\lambda \neq 0.55$ мкм.

Как правило, АОЛС в инфракрасном диапазоне в пределах от 0.78 до 1.6 мкм. Наиболее распространены источники с длинами волн 0.785 мкм, 0.83 мкм, 0.85 мкм, 0.98 мкм, 1.06 мкм, 1.55 мкм. Учитывая вышесказанное, целесообразно вести следующий пересчет:

ИФР МДВ_{0,55} → ИФР – КЗ_{0,78÷1,6}.

Для определения ИФР-КЗ на основе данных метеослужбы аэропорта необходимо провести пересчет $S_{МДВ}$ в километрическое затухание γ [дБ/км] в АК на $\lambda = 0,78\div 1,6$ мкм в соответствии с известной в метеорологии аналитической зависимостью [2]:

$$\gamma(S, \lambda) = \frac{C}{S_{МДВ}} \left[\frac{\lambda / \text{мкм}}{0,55} \right]^{-q(S_{МДВ})} \left[\frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right]. \quad (3.18.)$$

где $C = 13$ дБ = const;

$q(S_{МДВ})$ – показатель степени, являющийся функцией МДВ;

λ – длина волны, на которой определяется величина γ .

Выражение (3.6.) справедливо для $\lambda = 0,55\div 1,6$ мкм.

Значение показателя степени $q(S_{МДВ})$ исследовались и уточнялись учеными в течение длительного времени. В результате чего можно использовать график $q(S_{МДВ})$, приведенный на рис. 3.5.

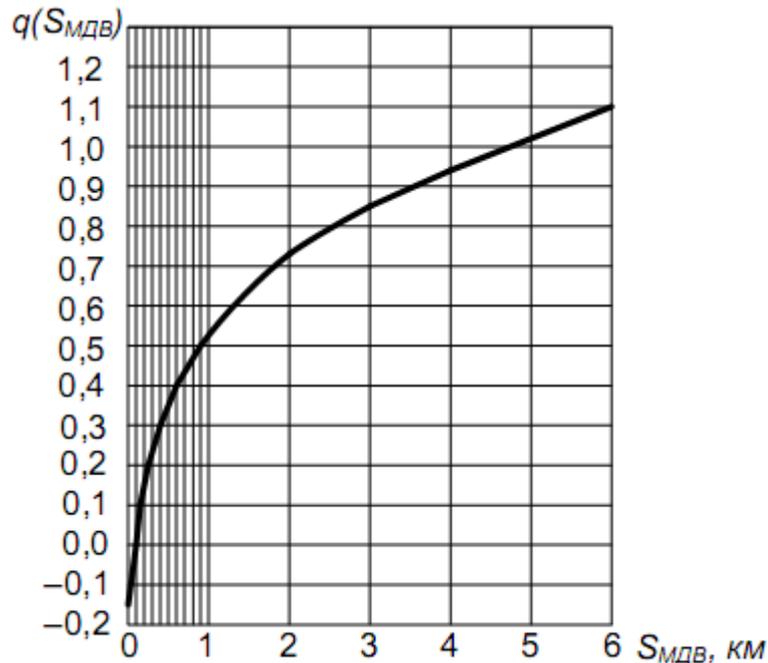


Рисунок 3.5. Зависимость $q = f(S_{МДВ})$

Расчет ИФР-КЗ для г. Ташкент можно провести, основываясь на выражении (3.18.), графике, представленном на рис. 8 и данных табл. 3.1.

В качестве примера расчета рассмотрим случай: $S_{МДВ} = 0.2$ км, $\lambda = 0.785$ мкм. В соответствии с рис. 3 q ($S_{МДВ}$) = 0.129. Подставляя соответствующие значения величин в выражение (11), получаем:

$$\gamma (0,785;0,2) = \frac{13}{0,2} \cdot \left[\frac{0,785}{0,55} \right]^{-0,129} = 62,40 \left[\frac{\partial Б}{км} \right].$$

$$\gamma (0,785;0,4) = \frac{13}{0,4} \cdot \left[\frac{0,785}{0,55} \right]^{-0,3} = 29,25 \left[\frac{\partial Б}{км} \right],$$

Аналогично выполняются расчеты для других длин волн. Результаты проведенных расчетов помещены в табл.3. 2.

Таблица 3.2.

Расчет ИФР – КЗ λ для г. Ташкента

	Процент времени/ длина волны, мкм	0,1	0,2	0,4	0,5	0,7	0,8	1,3	3,5	7,7
Затухание, дБ/км	0,785	>125,12	>62,40	>29,25	>18,80	>13,80	>10,84	>6,95	>3,20	>1,81
	0,83	>123,67	>61,75	>28,60	>18,42	>13,49	>10,53	>6,72	>3,03	>1,69
	0,85	>122,91	>61,43	>28,50	>18,20	>13,33	>10,40	>6,61	>2,98	>1,66
	0,91	>121,67	>60,91	>27,97	>17,74	>12,91	>10,11	>6,45	>2,73	>1,54
	0,98	>121,03	>60,45	>27,33	>17,12	>12,51	>9,75	>6,07	>2,65	>1,44
	1,06	>120,07	>59,80	>26,68	>16,69	>12,03	>9,36	>5,77	>2,48	>1,33
	1,55	>119,56	>56,88	>23,82	>14,32	>10,09	>7,67	>4,60	>1,79	>0,91

На основании данных табл. 3.2., условия (3.17.) и технических характеристик аппаратуры АОЛС [31,32,33,34,35], приведенных в табл. 3.6.,3.7.,3.8. выполним расчет дистанции связи, на которой способна

работать аппаратура в г.Ташкенте с заданным коэффициентом готовности. Результаты расчета поместим в табл. 3.3., 3.4., 3.5.

Таблица 3.3.

Дистанция АОЛС с заданным коэффициентом готовности для г. Ташкента модельного ряда PAV DATA SYSTEMS (Англия)

Тип интерфейса	Коэффициент готовности K_{Γ}		
	$K_{\Gamma}= 0,999$	$K_{\Gamma}= 0,998$	$K_{\Gamma}= 0,997$
1	2	3	4
PAVExpress100	<210	<350	<600
PL-1G/1TX	<340	<610	<1100
PL-100/155/1TX	<310	<550	<1000
PL-100/155/1 TX PD	<250	<420	<750
PL-155/3 TX	<350	<600	<1100
PL-622/1 TX	<350	<630	<1100
PL-622/3 TX	<370	<650	<1200
SC 2E1-2000/L	<250	<420	<750
SC 2E1-4000/L	<350	<600	<1100
SC 4E1-2000	<310	<550	<1000
SC 4E1-2000/L	<250	<420	<750
SC 4E1-4000	<350	<600	<1100
SC4 E1-4000/L	<350	<480	<850
SC E1-2000	<320	<420	<750
SC E1-4000	<350	<480	<870
SN ET-500	<320	<420	<750
SN ET-4000	<350	<600	<1100
SN FET-500	<320	<420	<750
SN FET-2000	<310	<550	<1000

SN FET-4000	<350	<600	<1100
-------------	------	------	-------

Таблица 3.4.

Дистанция атмосферного канала с заданным коэффициентом готовности для г. Ташкента модельного ряда «МОСТКОМ» (Россия)

Тип интерфейса	Коэффициент готовности K_T		
	$K_T= 0,999$	$K_T= 0,998$	$K_T= 0,997$
1	2	3	4
M1 FE-S	<170	<280	<470
M1 GE-S	<180	<290	<480
M1 FE-A	<300	<520	<950
M1 FE-2R	<310	<550	<1000

Таблица 3.5.

Дистанция атмосферного канала с заданным коэффициентом готовности для г.Ташкента модельного ряда торговой марки БОКС (Россия)

Тип интерфейса	Коэффициент готовности K_T		
	$K_T= 0,999$	$K_T= 0,998$	$K_T= 0,997$
1	2	3	4
БОКС 100М-АС1	<300	<550	< 1000
БОКС 100М-АС2	<500	<900	<1800

Таблица 3.6. Технические параметры модельного
модуля DATA SYSTEM (Антенна)

Скорость передачи, Мбит/с	Мощность передатчика, Вт	Чувствительность приемника, дБ	Количество передатчиков	Количество приемников	Расходимость излучения, мрад	Общая площадь приемника, см ²	Рабочая длина волны, мм
2	3	4	5	6	7	8	9
100	0,025	-35	1	1	11	227	910
1000	0,025	-45	1	1	3	227	810
100/155	0,1	-45	1	1	11	227	910
100/155	0,1	-35	1	1	11	227	910
155	0,1	-45	3	1	11	227	910
622	0,035	-45	1	1	3	227	830
622	0,025	-45	3	1	3	227	830
4	0,1	-35	1	1	11	227	910
4	0,1	-45	3	1	11	227	910
8	0,1	-45	1	1	11	227	910
8	0,1	-35	1	1	11	227	910
8	0,1	-45	3	1	11	227	910
8	0,1	-35	3	1	11	227	910
2	0,1	-35	1	1	11	227	910
2	0,1	-35	3	1	11	227	910
10	0,1	-35	1	1	11	227	910
10	0,1	-45	3	1	11	227	910
100	0,1	-35	1	1	11	227	910
100	0,1	-45	1	1	11	227	910
100	0,1	-45	3	1	11	227	910

Таблица

Скорость передачи, Мбит/с	Мощность передатчика, Вт	Чувствительность приемника, дБ	Количество передатчиков	Количество приемников	Расходимость излучения, мрад	Общая площадь приемника, см ²	Рабочая длина волны, нм
2	3	4	5	6	7	8	9
100	0,014	-30	1	1	5	75	785
1000	0,005	-27	1	1	2	75	785
100	0,02	-30	3	2	0,7	72,5	785
100	0,02	-30	3	2	0,55	72,5	785

Тип интерфейса
1
PAVEexpress100
PL-1G/ITX
PL-100/155/ITX
PL-100/155/1 TX PD
PL-155/3 TX
PL-622/1 TX
PL-622/3 TX
SC 2E1-2000/L
SC 2E1-4000/L
SC 4E1-2000
SC 4E1-2000/L
SC 4E1-4000
SC4 E1-4000/L
SC E1-2000
SC E1-4000
SN ET-500
SN ET-4000
SN FET-500
SN FET-2000
SN FET-4000

Тип интерфейса
1
M1 FE-S
M1 GE-S
M1 FE-A
M1 FE-2R

Таблица 3.8.
Технические параметры модельного ряда торговой марки «БОКС» (Россия)

Тип интерфейса	Скорость передачи, Мбит/с	Мощность передатчика, Вт	Чувствительность приемника, дБ	Количество передатчиков	Количество приемников	Расходимость излучения, мрад	Общая площадь приемника, см ²	Рабочая длина волны, нм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
БОКС 100M-AC1	100	0,05	-50	2	1	8	113	785
БОКС 100M-AC2	100	0,15	-65	2	1	3,25	113	785

Выводы к главе III

1. Приведена структура сети, на основе АОЛС для связи сегментов локальной вычислительной сети ведомственной службы. Сформулированы требования, которым должна отвечать спроектированная сеть АОЛС. Приведена структура аппаратных и программных средств для реализации канала АОЛС, а также структурная схема терминального устройства канала АОЛС.

2. Приведены особенности работы АОЛС и установлено, что основной отличительной чертой АОЛС являются: зависимость прохождения оптического излучения от состояния атмосферы. В данном случае основное негативное влияние на работоспособность лазерных линий могут оказывать такие факторы, как флуктуации из-за неоднородностей плотности воздуха и ослабление мощности излучения при рассеянии на частицах аэрозолей (например, в тумане). Также приведено физическое пояснение процессов влияющих на работоспособность АОЛС и методы снижения негативного влияния этих последствий.

3. Приведен расчет дистанции АОЛС с заданным коэффициентом готовности. Рассмотрен инженерный подход к проектированию атмосферных оптических линий передач с заданным коэффициентом готовности. В качестве примера выбран г. Ташкент. Результаты работы могут быть полезны местным операторам связи при установке аппаратуры атмосферной оптической связи на местных широкополосных сетях доступа с учетом требований к коэффициенту готовности атмосферного канала. Приведенная методика определения дистанции атмосферного канала носит универсальный характер и может быть использована для других географических регионов нашей страны и за рубежом.

Заключение

1. Рассмотрены особенности технологии Wi-Fi и установлено, что основными отличительными свойствами технологии Wi-Fi являются: обеспечение связи на небольшой территории и внутри помещений; обеспечение высокоскоростной (до 74 Мбит/с) передачи данных и простота принципов построения и функционирования сети. Приведены характеристики и режимы работы Wi-Fi.

2. Рассмотрены особенности технологии WiMAX и установлено, что основными отличительными свойствами технологии WiMAX являются: обеспечение доступа в Интернет со скоростями и зоной покрытия, существенно большими, чем у современных сетей WiFi. Приведены характеристики и режимы работы WiMAX.

3. Рассмотрены предпосылки создания АОЛС, которые обусловлены стремительным развитием информационных технологии. Резкое увеличение числа абонентов, требующих предоставления таких телекоммуникационных услуг, как Интернет, IP-телефония, кабельное телевидение с большим числом каналов, компьютерные сети и т. д. В результате возникла проблема "последней мили", то есть подключение широкополосного канала связи к конечному пользователю. Оптимальным решением проблемы последнего участка является использование беспроводных линий передачи.

4. Рассмотрены особенности технологии АОЛС и установлено, что основными отличительными свойствами технологии АОЛС являются: физическое ограничение АОЛС по скорости передачи определяются только собственной частотой несущей электромагнитной волны ($10^{15} \dots 10^{16}$ Гц); нечувствительность к помехам радиодиапазона, что позволяет использовать оптические линии в местах с большой насыщенностью радиосистем. Приведены характеристики и диапазоны длин волн используемых АОЛС.

5. Рассмотрены основные схемы исполнения атмосферных оптических линий связи, а также установлено, что предпочтительно применение активной схемы АОЛС, где источник и приемник излучения находятся внутри приемопередающего оптического блока. Активная схема АОЛС имеет большую площадь фотоприемника, что в свою очередь, увеличивает угол поля зрения, а это благоприятно сказывается на уменьшении энергетических потерь и требований к угловым перемещениям приемопередающих оптических блоков друг относительно друга.

6. Рассмотрены современные источники излучения применяемые в АОЛС, характеристики и принципы действия. В качестве источника излучения целесообразно использовать лазерные диоды с длиной волны 1310 нм, мощностью излучения 1,5 мВт, марки ЛТ-53. Данный лазерный диод позволяет передавать информацию со скоростью до 1 Гб/с.

7. Рассмотрены современные приемники излучения применяемые в АОЛС, характеристики и принципы действия. В качестве приемника излучения целесообразно использовать р-і-п фотодиод марки (ДФД-70), со спектральной чувствительностью 0,85 А/Вт при длине волны 1330 нм, с размером площадки до 70 мкм. Это обусловлено следующими его свойствами. Р-І-Н фотодиод обеспечивает требуемый динамический диапазон и быстродействие до 1 Гб/с. Зависимость характеристик фотодиода от изменений окружающих условий (температуры, вибраций) минимальна. Спектральная характеристика согласована с длиной волны излучателя. Кроме того, фотодетектор имеет малые габариты и массу, отвечает условиям совместимости с оптоволоконном и электронными устройствами, потребляет малую энергию.

8. Приведена структура сети, на основе АОЛС для связи сегментов локальной вычислительной сети ведомственной службы. Сформулированы требования, которым должна отвечать спроектированная сеть АОЛС. Приведена структура аппаратных и программных средств для реализации

канала АОЛС, а также структурная схема терминального устройства канала АОЛС.

9. Приведены особенности работы АОЛС и установлено, что основной отличительной чертой АОЛС являются: зависимость прохождения оптического излучения от состояния атмосферы. В данном случае основное негативное влияние на работоспособность лазерных линий могут оказывать такие факторы, как флуктуации из-за неоднородностей плотности воздуха и ослабление мощности излучения при рассеянии на частицах аэрозолей (например, в тумане). Также приведено физическое пояснение процессов влияющих на работоспособность АОЛС и методы снижения негативного влияния этих последствий.

10. Приведен расчет дистанции АОЛС с заданным коэффициентом готовности. Рассмотрен инженерный подход к проектированию атмосферных оптических линий передач с заданным коэффициентом готовности. В качестве примера выбран г. Ташкент. Результаты работы могут быть полезны местным операторам связи при установке аппаратуры атмосферной оптической связи на местных широкополосных сетях доступа с учетом требований к коэффициенту готовности атмосферного канала. Приведенная методика определения дистанции атмосферного канала носит универсальный характер и может быть использована для других географических регионов нашей страны и за рубежом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

I. Законы Республики Узбекистан

1. Закон Республики Узбекистан «О связи». Ведомости Верховного Совета Республики Узбекистан, 1992 г., № 3, ст.159; Ведомости Олий Мажлиса Республики Узбекистан, 1998 г., №3, ст. 38; 2000 г., №5-6, ст. 153; 2003 г., №5, ст. 67.

2. Закон Республики Узбекистан «О телекоммуникациях». Ведомости Олий Мажлиса Республики Узбекистан, 1999 г., №9, ст. 219; Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2004 г., №37, ст. 408; 2005 г., №37-38, ст. 279; 2006 г., №14, ст. 113, 2007 г., №35-36, ст. 353; 2011 г., №52, ст. 557. 3.

Закон Республики Узбекистан «О радиочастотном спектре». Ведомости Олий Мажлиса Республики Узбекистан, 1999 г., №1, ст. 16; 2003 г., №5, ст. 67.

4. Закон Республики Узбекистан «Об информатизации». Ведомости Олий Мажлиса Республики Узбекистан, 2004 г., №1-2, ст. 10

II. Указы и постановления Президента Республики Узбекистан, Постановления Кабинета Министров

5. Постановление Президента Республики Узбекистан «О мерах по дальнейшему внедрению и развитию современных информационно-коммуникационных технологий». 21 марта 2012 г., №13, ст. 139.

6. Программа дальнейшего внедрения и развития информационно-коммуникационных технологий в Республики Узбекистан на 2012-2014 годы. Постановление Президента от 21.03.2012 г., №ПП-1730.

III. Произведения Президента Республики Узбекистан И.А. Каримова

7. Мировой финансово-экономический кризис, пути и меры по его преодолению в условиях Узбекистана / И.А. Каримов. – Т.: Узбекистан, 2009 г. – 48 с.

8. Каримов И.А. Обеспечить поступательное и устойчивое развитие страны – важнейшая наша задача. – Т. «Узбекистан» - 2009 г. – 187 с.

IV. Основная литература

9. Вишнеvский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. -М., Техносфера, 2005.

10. Пролетарский А.В., Баскаков И.В., Чирков Д.Н. Федотов Р.А., Бобков А.В., Платонов В.А. Беспроводные сети Wi-Fi. БИНОМ. – 2007

11. В.Вишнеvский, С.Портной, И.Шахнович. Энциклопедия WiMAX.Путь к 4G. – М: Техносфера, 2009. - 472с.

12. В.С. Сюваткин, В.И. Есипенко, И.П. Ковалев, В.Г. Сухоревров. WiMAX – технология беспроводной связи: теоретические основы, стандарты, применение. – М: Эко-Трендз. – 2005. – 368с.

13. Кобзев В. В., Милинкис Б.М., Емельянов Р. Г. Применение оптических квантовых генераторов для целей связи. М., Связь, 1965, 120 с.

14. Пратт В. Лазерные системы связи. М., 1972.

15. Гауэр Д. Оптические системы связи. М., 1989.

16. Фокин В.Г., Оптические системы передачи и транспортные сети. Учебное пособие. – М., 2008, с. 235.

17. Шредер, Г. Техническая оптика / Г. Шредер, Х. Трайбер. – М, 2006, с. 410

18. Ишанин, Г.Г. Источники и приемники излучения : учеб. пособие / Г.Г. Ишанин, Э.Д. Панков. - СПб: Политехника, 1991, с 86.

19. Ишанин, Г.Г. Источники излучения : учеб. пособие / Г.Г. Ишанин, В.В. Козлов. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005, с. 241
20. Гридин В.Н., Дмитриев В.П., Дмитриев М.В., Оптоэлектронные приборы, системы и сети; Центр информ. технологий в проектировании РАН. – М., 2007, с 215.
21. Бахаревский А., Оптические транспортные сети – М, 2008, с.95
22. Никульский И.Е., Оптические интерфейсы цифровых коммутационных станций и сети доступа. –М, 2006, с. 169.
23. Яременко Ю.И. Теоретические основы построения и применения средств связи оптического диапазона. - СПб.: Военная академия связи, 1992.

V. Периодические издания, статистические сборники и отчеты

24. Ю.В. Писецкий, К.-И.М. Мавлянов. Особенности применения атмосферных оптических линий связи. Ташкент, Вестник ТУИТ 4/2011 с.51
25. Павлов Н.М. Аппаратура атмосферных оптических линий передачи и методы ее классификации // Фотон-Экспресс. 2006. №6. Октябрь, спец. вып. С. 9–13.
26. Поляков С.Ю., Кузнецов С.Н., Беспроводная связь – вопросы выбора // Технологии и средства связи, 2007, №3, часть 2.
27. Павлов Н.М. Применение АОЛП в сетях доступа. Часть 2. 2007. №4. С. 26–29.
28. Павлов Н.М. Атмосферные оптические линии связи и их свойства. Часть 1. 2007. №3. С. 13–15.
29. Милютин Е.Р. Атмосферные оптические линии связи в России // Вестник связи. 2008. №2. С. 89–90.
30. Шельгов В.И., Российский рынок оборудования FSO. ;Сети и системы связи.2007. №1 (149).С.26-30.

VI. Интернет сайты

31. <http://www.pavdata.com/en/products/products.html> (сайт компании PAV Data Systems)
32. <http://www.pavdata.ru/catalog.php> (сайт компании PAV Data Systems)
33. <http://www.moctkom.ru/fsomdrus.htm> (сайт компании ООО "МОСТКОМ")
34. <http://www.laseritc.ru> (сайт компании ЗАО "Лазер АйТиСи")
35. <http://www.optica.ru> (сайт компании "Оптические ТелеСистемы")