

Предисловие

Книга посвящена актуальной и востребованной в отрасли телекоммуникаций теме. Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) занимают сегодня одно из ведущих мест в технологии развития современных направляющих сред электросвязи, постепенно вытесняя линии на медных кабелях.

В промышленной и гражданской деятельности мирового сообщества волоконная оптика становится основным средством передачи информации, активно вытесняя из применения медные кабели как на магистральных и внутризоновых сетях, так и на местных сетях и во всех отраслях жизнедеятельности человека. Учитывая интенсивное внедрение волоконной оптики на стационарных и протяженных объектах, возникла настоятельная необходимость замены медных сетей на полевых и на подвижных объектах (самолетах, кораблях, поездах, спутниках, ракетах и других подвижных объектах).

Транспортные сети и сети доступа активно замещают сети на медных кабелях комбинированными сетями на медных и оптических кабелях или сетями на волокне. Оптические кабельные линии широко внедряются и в городские сети, заменяя традиционную «медь» на соединительных участках между АТС и узлами доступа сетей передачи данных и на участках сети между станцией и абонентом. Наконец, оптические сети находят все более активное применение для подключения конечных потребителей телекоммуникационных услуг — корпоративных и частных абонентов. Создается оптическая инфраструктура нового поколения, основанная на перспективных решениях FTTx, как-то: волокно в распределительный шкаф, волокно в здание (жилой дом, бизнес-центр и т. п.), волокно в офис, волокно на рабочее место, волокно на автоматизированное производство, волокно в рабочий цех. Эти подходы демонстрируют эффективность при реализации масштабных проектов модернизации огромных абонентских сетей связи, таких как Московская городская телефонная сеть.

Пока, согласно действующим стандартам, электрические кабели связи 5–7 категории еще используются в структурированных кабельных системах внутри зданий — на участке этажа, от шкафа до абонента, от модема до телефона, телевизора, компьютера, но и здесь им на смену идут оптические кабели, обладающие необходимыми харак-

теристиками для предоставления всего комплекса современных телекоммуникационных сервисов, включая телефонию, широкополосный доступ в Интернет, цифровое телевидение, передачу данных.

Предлагаемая книга содержит необходимый объем информации о транспортных сетях и сетях доступа, принципах измерений, месте волоконно-оптических линий в этих сетях, а также конструктивных особенностях и технических характеристиках существующих типов оптических волокон и оптических кабелей.

Это чрезвычайно полезное пособие утоляет информационный голод в этой сфере и позволяет получить студентам и начинающим специалистам необходимый объем знаний.

Уверен, что это издание будет одинаково интересно студентам, аспирантам, слушателям курсов повышения профессиональной квалификации и широкому кругу специалистов, занимающихся вопросами внедрения и развития ВОЛС.

1 Волоконно-оптические линии связи

1.1. Природа света

В настоящее время известно, что свет является электромагнитной волной, который подобно радиоволнам подчиняется всем законам физики по распространению. Электромагнитные волны занимают широкий спектр частот (длин волн). Однако не весь спектр виден человеческому глазу. Часть спектра, который мы называем видимым светом, находится в узком диапазоне длин волн от 0,4 мкм (4000 нм) до 0,7 мкм (7000 нм) от ультракрасного до ультрафиолетового. Так, желтый свет солевой лампы находится на длине волны 5860 нм. Наши рецепторы глаз не воспринимают свет ниже инфракрасного до частот ультрафиолетового диапазона, хотя рецепторы глаз ряда животных воспринимают часть этого диапазона.

Считается, что свет распространяется во всех направлениях и по прямой линии. Однако, если его поместить в трубе, то он будет распространяться по этой трубе. Герон из Александрии в древности взял бадью с водой с отверстием в ней. Солнечный свет падал под углом на поверхность воды, и вытекающая из бадьи вода несла солнечный свет, — так были заложены основы преломления и отражения света. Архимед использовал законы преломления солнечного света для уничтожения вражеского деревянного флота, поджигая его лучами. Гюйгенс изучил волновую природу света, Фабри и Перо изучили взаимодействие света и законы интерференции. Кроме электромагнитной природы света, была открыта природа света как процесса распространения частиц, что эффектно доказала комптоновская демонстрация в вакууме. Был изучен состав света, было доказано, что он состоит из большого числа длин волн. Зеeman изучил взаимодействие света с другими полями, и в настоящее время нет сомнений в двойной природе света: электромагнитной и фотонной.

Скорости по разработанным оптическим волокнам (ОВ) не знали ограничений и достигают по одному кварцевому волокну десятки Тбит/с. Новое столетие ставит новые задачи скорости света по оптическим волокнам, и эти задачи непредсказуемы. Что нас ждет

вперед: Пбит/с, Збит/с. Мы можем узнать очень скоро. Речевой и телевизионный трафик увеличивается на 10 % в год, Интернет-трафик — на 80...90 % в год [1.1, 1.2].

Оптическая связь через открытое пространство известна с древних времен и массово применялась для передачи информации, но современная эра оптической связи началась после изобретения лазера в 1960 г., что позволило передавать информацию с высокой монохроматичностью, когерентностью и большой интенсивностью. Лазерное излучение очень похоже на излучение обычных радиопередатчиков СВЧ диапазона, поэтому его используют в качестве несущего колебания в системах телекоммуникаций.

Историю световодов принято начинать с Джона Тиндаля (1820–1893). Этот английский физик, блестящий экспериментатор продемонстрировал в 1870 г. оригинальный опыт. Из большого сосуда через кран вытекала вода и сплошной струей падала в другой сосуд. Вставленная против крана в противоположную стенку линза фокусировала световой пучок от помещенной снаружи угольной дуги и направляла его внутрь вытекающей струи. Свет распространялся по струе воды за счет многократных отражений на границе вода–воздух. В опыте Тиндаля струя на всем протяжении светилась. Принцип жидкостных световодов используется и теперь для подсветки струй фонтанов. В 1880 г. Грехем Белл установил телефонную связь между крышами двух домов в Вашингтоне, используя сфокусированный солнечный луч, т. е. используя прямую передачу света через атмосферу. На этом же принципе работал оптический телеграф, изобретенный Кулибиным в России и Шаппом во Франции в 90-х годах XVIII века. Знаменитый американский физик Роберт Вуд (1868–1955) писал в 1905 г.: «свет без больших потерь можно перевести из одной точки в другую, пользуясь внутренним отражением от стенок палочки из стекла или лучше кварца». Это была идея твердого прозрачного световода, до реализации которой прошло более половины столетия. Хотя однослойные стеклянные волокна были созданы в 1920-х годах, двухслойные оптические волокна с разными показателями преломления были созданы только в 1950-е годы. Они использовались в медицине, голографии, измерительной технике, ядерном и электронно-оптическом приборостроении.

В 1960 г. на основе работ российских ученых-физиков Н.Г. Басова и А.М. Прохорова и американского физика Ч.Х. Таунса были созданы квантовые генераторы — лазеры. И стало очевидно, что необходимо каким-то образом объединить технологии лазерного излучения и оптоволоконна. Однако, поскольку диаметр сердцевины волокна составляет микроны, одна из самых сложных задач — как загнать световой

импульс в такое игольное ушко. Кроме того, необходимым условием возникновения лазерного эффекта является перевод излучающей среды в сильно возбужденное состояние. Это достигается путем «накачки» — например, освещения активного тела лазера мощными лампами или протекания в нем химической реакции с большим энерговыделением. Это решение было непреемлемо, когда в качестве среды распространения предполагалось использовать оптоволокно.

Ситуация изменилась, когда Ж.И. Алфёров с сотрудниками создали первый в мире полупроводниковый гетеролазер, работающий в непрерывном режиме при комнатной температуре.

Классический *p-n*-переход создают в кристалле кремния, добавляя разные примеси (например, бор и мышьяк) по разные стороны будущего перехода. Однако гораздо более выраженные свойства перехода можно получить, если по обе его стороны не один и тот же материал, пусть с разными примесями, а разные полупроводники. Это и есть гетероструктура («гетеро-» означает разнородный). Жоресу Алфёрову принадлежит открытие сверхинжекции в гетеропереходе, когда при протекании сквозь него тока концентрация носителей тока (например, электронов) возрастает в огромной степени. В результате область гетероперехода приобретает свойства активной среды, которая может генерировать лазерное излучение. Оказалось, что лазеры на полупроводниковых гетероструктурах незаменимы как из-за своих малых размеров, так и благодаря тому, что их можно монолитно сростить с оптоволокном, добившись того, чтобы вообще ни «капли» света не просочилось наружу.

В 60-е годы было предложено много технических решений по осуществлению различных видов модуляции лазерных излучателей: частотной, фазовой, амплитудной, частотно-импульсной, по интенсивности и поляризации, и было создано много лазерных систем связи через открытое пространство, которые позволяют в настоящее время передавать информацию на расстояние, не превышающее 5 км.

Основная идея теории передачи по протяженным оптическим волокнам была заложена в 1966 г. учеными Као и Хокемом. Однако оставалась проблема потерь в оптоволокнах большой длины, которые были обусловлены релеевским рассеянием. В 1970 г. удалось уменьшить потери в оптоволокне с 1000 дБ/км до 20 дБ/км. При усовершенствовании технологии изготовления оптических волокон в 1979 г. удалось получить 0,2 дБ/км на длине волны 1550 нм.

Одновременно изучались нелинейные эффекты Брюллюэна и Рамана в оптических волокнах. Эти работы стимулировали изучение таких эффектов, как двулучепреломление, самофазовая модуляция, кросс-модуляция, четырехволновое смешение и другие параметрические эффекты. Новое развитие получило применение в составе ОВ

редкоземельных элементов для создания усилителей и лазеров, например эрбиевых усилителей. Их применение привело к виртуальной революции при создании многоканальных световодных систем. После 2000 г. были разработаны новые типы усилителей на основе нелинейных эффектов Рамана и четырехволнового смешения. Такие усилители требуют наличия редкоземельных элементов и могут работать в любой спектральной области.

Начиная с 1996 г. были созданы и создаются новые типы ОВ: фотонно-кристаллические, микроструктурированные, дырчатые, многосердечниковые и др.

В настоящее время применение волоконно-оптических систем позволяет передавать информацию в большом объеме и большому числу объектов и использовать цифровое видео, речь, данные. В бизнесе и промышленности ВОС (волоконно-оптические сети) становятся универсальными для передачи на большие расстояния необходимой информации в любом объеме и с большими скоростями.

Компонентами системы оптической передачи являются электрооптический преобразователь как передатчик света в начале линии, собственно волоконно-оптическая линия и электрооптический преобразователь как приемник света на конце линии. Устройства, расположенные между ними, — это усилители и регенераторы.

Оптические и электрические системы передачи имеют одни и те же электрические устройства сопряжения. Это означает, что при внедрении волоконно-оптической технологии достигнута важная цель, которая, прежде всего, значительно облегчает интеграцию в существующие сети.

1.2. Существующие среды передачи [1.1–1.3]

Основным преимуществом оптических и полимерных волокон в конструкциях оптических кабелей связи является спектр электромагнитных волн, свободный от других источников сигналов (рис. 1.1).

Наиболее распространенной средой передачи в сетях является симметричный кабель и коаксиальный кабель. Симметричный кабель применяется как на сети общего пользования, так и в локальной сети. Симметричные кабели локальных сетей отличаются от кабелей сети общего пользования тем, что каждая пара этого кабеля имеет свой шаг скрутки, согласованный с другими парами кабеля.

Кроме симметричного кабеля в локальных сетях и в сетях кабельного телевидения применяются коаксиальные кабели. Коаксиальные радиочастотные кабели классифицируются по размеру RG/PK и по волновому сопротивлению: RG-8, RG-11 соответствуют кабелям PK-50, RG-58/PK-50 (другого размера), RG-59/PK-75 — для сети кабельного телевидения, RG-62/PK-93.



Рис. 1.1. Среда передачи данных (все, что используется для обмена сообщениями)

В настоящее время на сети кабельного телевидения на магистральных участках сети используется оптическое волокно, а на распределительном участке используется коаксиальный кабель типа RG-11/ПК-75, на абонентском участке также коаксиальный кабель типа RG-6/ПК-75.

Напомним преимущества ВОЛС по сравнению с медными кабельными линиями.

1. Высокая помехоустойчивость, нечувствительность к внешним электромагнитным полям и практически отсутствие перекрестных помех между отдельными волокнами, уложенными вместе в кабель. Не подвержен электромагнитной индукции и грозовым разрядам при полностью диэлектрической конструкции.

2. Значительно большая широкополосность: одномодовое оптическое волокно имеют полосу пропускания несколько десятков ГГц·км, поэтому суммарные скорости по одному волокну могут достигать нескольких Тбит/с. Передаваемая информационная емкость в десятки и сотни раз превышает информационную емкость, передаваемую по коаксиальным кабелям. Одномодовое волокно может использовать диапазон 59 ТГц, а с учетом многомодового диапазона — 80 ТГц.

3. Малая масса и габаритные размеры. Уменьшение массы и габаритных размеров примерно в 10 раз и более по сравнению с существующими медными кабельными линиями связи при одинаковом числе каналов связи. Внешний диаметр оптического волокна в первичном покрытии составляет 0,25 мм, тогда как медного проводника в изоляции симметричной пары составляет 0,7 мм, а коаксиальной пары и того больше — 6...10 мм. Вес оптического кабеля составляет 0,1...0,3 от веса медного кабеля той же емкости. Это приводит к уменьшению стоимости и времени прокладки оптического кабеля.

4. Полная электрическая изоляция между входом и выходом системы связи, поэтому не требуется общее заземление передатчика и

приемника. Можно производить ремонт оптического кабеля, не выключая оборудования.

5. Отсутствие коротких замыканий, вследствие чего волоконные световоды могут быть использованы для пересечения опасных зон без боязни коротких замыканий, являющихся причиной пожара в зонах с горючими и легковоспламеняющимися средами.

6. Потенциально низкая стоимость. Хотя волоконные световоды изготавливаются из ультрачистого стекла, имеющего примеси меньше, чем несколько частей на миллион, при массовом производстве их стоимость должна быть невелика. Кроме того, в производстве волоконных световодов не используются такие дорогостоящие цветные металлы, как медь и свинец, запасы которых на Земле ограничены. Стоимость же электрических линий, коаксиальных кабелей и волноводов постоянно увеличивается как с дефицитом меди, так и с удорожанием энергетических затрат на производство меди и алюминия.

7. Расстояния между усилительными пунктами на ВОЛС в несколько раз превышают расстояния на медных (симметричных и коаксиальных) кабелях связи.

8. При строительстве волоконно-оптических линий используются те же методы прокладки, что и при строительстве медных кабелей, однако со значительно большими строительными длинами и с меньшими энергетическими затратами.

9. Оптический кабель не подвержен коррозии так, как медный кабель.

10. Стоек к высоким температурам: кремний плавится при температуре 1900 °С.

11. ОВ имеет малую толщину, и к нему очень трудно подсоединиться и снять информацию без специального оборудования.

12. Кремния в земной коре примерно 29,6 %, тогда как меди 0,0047 %.

13. Низкие потери оптического волокна от 0,35 дБ/км (1,3 мкм) до 0,2 дБ/км (1,55 мкм), тогда как коаксиальный кабель имеет коэффициент затухания 19 дБ/км на частоте 60 МГц.

14. Малое энергопотребление.

15. Возможность постоянного усовершенствования систем связи в связи с усовершенствованием ОВ передатчиков, приемников и методов модуляции с повышением требований к характеристикам к системам передачи при полном сохранении совместимости с другими телекоммуникационными системами.

Принципиальная разница: волоконно-оптическая система использует световые импульсы (фотоны) для передачи данных по линии вместо электронных импульсов для передачи данных по медным кабелям.

Волоконно-оптические системы имеют также и недостатки, к которым в основном относятся дороговизна прецизионного монтажного оборудования, относительно высокая стоимость лазерных источников излучения, чувствительность ОВ к воздействию воды, газов и ионизированного излучения и требования специальной защиты волокна. Однако преимущества от применения волоконно-оптических линий связи настолько значительны, что несмотря на перечисленные недостатки дальнейшие перспективы развития технологии ВОЛС в информационных сетях более чем очевидны.

Основные параметры оптических волокон, составляющих основу современной оптической инфраструктуры телекоммуникаций, были определены 20 лет назад и никто не предполагал о возникновении таких ограничений по передаваемой мощности. Максимальная суммарная скорость передачи на существующих оптических волокнах должна быть не больше 100 Тбит/с, которая в 1,5 раза больше существующей суммарной скорости передачи по ОВ. Существующие оптические усилители и их полоса усиления определяют скорость передачи по ОВ. В окне S-диапазона 1460...1530 нм (70 нм — 9,4 ТГц) вместе с C-диапазоном 1530...1565 нм (35 нм — 4,4 ТГц) и L-диапазоном 1565...1625 нм (60 нм — 7,1 ТГц). В сумме получим 1460...1625 нм (165 нм — 20,9 ТГц). На практике общая емкость будет ограничена 150 Тбит/с. В настоящее время максимальная суммарная емкость составляет 10 Тбит/с (8 пар ОВ с 1,28 Тбит/с на одно ОВ) с питанием подводной системы от материка по оптическим усилителям. При суммарной скорости 100 Тбит/с возникают ограничения по оптической мощности, особенно это ощутимо для магистральных межматериковых подводных систем, что требует создания нового поколения подводных кабельных систем для преодоления эффекта оплавления сердцевин существующих оптических волокон при увеличении скорости передачи до 1 Пбит/с. Пути преодоления этого эффекта могут быть только комплексными: создание оптических волокон с большим числом сердцевин, мультиплексирование с помощью модового или пространственного деления и многоуровневого формата модуляции.

Для преодоления барьера по мощности необходимо создать и внедрить оптические волокна с большим числом сердцевин под одной оболочкой (около 10) либо увеличить диаметр сердцевины в 3 раза. Для получения высокой спектральной эффективности необходима когерентная система передачи с модовым или пространственным мультиплексированием. При широкой глобализации оптических сетей необходимо найти или создать новые технологии, при которых преодолевались бы возникшие ограничения по полосе усиления, по вводимой мощности и потребляемой мощности с учетом всех элементов, составляющих волоконно-оптическую линию телекоммуникаций.

1.3. Общие особенности ВОЛС и радиосвязи и различия между ними

Микроволновые радиосистемы связи в коммерческое использование внедрялись с 1940 годов, а частоты до 4 ГГц уже использовались в 1947 г. между Нью Йорком и Бостоном. В последующие годы и до настоящего времени микроволновая связь интенсивно развивается, создавая конкуренцию оптическому волокну, чего нельзя сказать о симметричных и коаксиальных кабелях связи [1.1–1.4].

Несмотря на многие преимущества, привнесенные электронной обработкой сигналов и цифровой технологией коммуникации, нужно отметить, что оптическая волоконная сеть существенно отличается от радиоканалов связи и фундаментально, и технологически. Некоторые основные отличия обобщены в табл. 1.1–1.3.

Самое важное фундаментальное различие между оптической и радиочастотной связью заключается в присутствии нелинейных искажений в оптическом волоконном канале связи. Высокое поперечное ограничение оптического сигнального поля в сердцевине волокна с эффективным сечением от 20 до 110 мкм² является причиной того, что интенсивность света достигает или превышает мегаватт/см². При таких высоких оптических интенсивностях показатель преломления оптоволокна реагирует на присутствие оптических сигналов в виде оптического эффекта Керра и вызванные сигналом изменения показателя преломления переходят в изменения фазы оптических сигналов. На расстояниях с оптическим усилением, достигающих многих сотен или даже несколько тысяч километров, эти вращения фазы

Таблица 1.1

Общие особенности ВОЛС и радиосвязи

Волоконно-оптическая линия	Радиосвязь	Примечания
Электрооптический преобразователь, модулятор	Модулятор или формирователь сигналов	По форматам модуляции радиосвязь впереди
Источник оптического сигнала	Передатчик или модем	Выход сигнала низкого уровня
Волоконно-оптическая среда передачи. Возможна передача через атмосферу	Передача через атмосферу, по оптическому волокну и медным парам	Радиосвязь по оптическому волокну — форматы модуляции совпадают. Используется когерентная передача
Приемник оптического сигнала	Приемник радиосигнала	Порог срабатывания определяет уровень ошибок
Схема формирования выходного сигнала	Выход приемника и формирователь выходного сигнала	

Таблица 1.2

Показатели качества ВОЛС и радиосвязи

Показатель	Радиосистемы	ВОСП
Коэффициент битовых ошибок	10^{-9}	10^{-12}
Потери, дБ	Потери с расстоянием	Потери с расстоянием
Замирания	Возникают	Отсутствуют
Накопленный джиттер	Влияет	Мало влияет
Незащищенность	Низкая	Высокая
Емкость канала	Низкая/средняя	Очень высокая
Потери поглощением при дожде	На частоте 10 ГГц	Нет
Чувствительность к электромагнитному излучению	Существует	Нет
Генерация электромагнитного излучения	Существует	Нет
Шум	Тепловые шумы	Квантовый шум
Интерференция	Много лучей, много пользователей	Многоканальность, переходный разговор при ВОСП-СР
Канал	Линейный канал, замирание	Нелинейность ОВ + дисперсия
Динамика канала, байт/кГц	$10 \dots 10^3$	10^7
Ширина полосы	Ограничена спектральным диапазоном	Ограничена технологией: 60 ГГц
Передача	Когерентные решения	Переходит к когерентным решениям
Затраченная мощность на информационный бит	Очень высокая	Чрезвычайно низкая

Таблица 1.3

Сравнение оптических и радиочастотных систем коммуникации

Параметр	Оптическая связь	Радиочастотная связь
Фундаментальные		
Шум	Квантовый	Тепловой
Помехи	Многочувствительность, перекрестные помехи WDM	Многопутевые, многопользовательские
Канал	Нелинейность оптоволокна + дисперсия	Линейный канал, замирание
Динамика канала	~кГц (постоянная, для $\sim 10^7$ битов)	~кГц (постоянная, для $\sim 10 \dots 10^3$ битов)
Технологические		
Электрическая полоса пропускания	~ 60 ГГц — ограничена технологией (полоса пропускания/несущая от 10^{-4} до 10^{-6})	Ограничена регулированием спектра (полоса пропускания/несущая от 10^{-2} до 10^{-4})
Обнаружение	Преимущественно квадратичное	Преимущественно когерентная (I/Q) демодуляция
Цифровая обработка	Довольно простая компенсация и FEC	Экстенсивно используется, комплексная
Показатель мощности на информационный бит	Довольно низкий	Очень высокий

вместе с дисперсией волокна приводят к различным волновым искажениям, которые увеличиваются с мощностью сигнала. Как следствие и как абсолютный контраст с классическими RF системами, пропускная способность оптического канала связи достигает максимума при определенном уровне мощности сигнала, который обеспечивает оптимальный компромисс между шумом оптического усилителя (усиленной спонтанной эмиссией, ASE) и нелинейностью Керра в волокне.

Второе главное различие между оптическими и радиочастотными системами коммуникации как с фундаментальными, так и с технологическими последствиями, — высокая *абсолютная полоса пропускания* оптических коммуникационных сигналов. В общем случае и как доказано историческим развитием оптических систем, максимально возможная битовая скорость в канале всегда приводила к самой низкой стоимости, занимаемой площади и потребляемой мощности в расчете на передачу одного информационного бита из конца в конец сети каждый раз, когда основополагающие технологии достигали достаточной зрелости. Поэтому оптические системы коммуникации всегда поднимали ограничения, свойственные высокоскоростным электронным и оптикоэлектронным компонентам, вплоть до современных систем передачи на скорости 100 Гбит/с.

Микроволновая связь (сотовая, подвижная связь с использованием спутников, базовых станций и т. д.), преодолевая различные технологические барьеры, может работать со скоростями до 200 Мбит/с. Всего лишь 5 % мирового трафика идет по спутниковым каналам вследствие высокой стоимости, малой надежности и недостаточной емкости. Емкость спутниковых каналов измеряется в Мбит/с, тогда как кабельных каналов в Гбит/с и Тбит/с. Но самое главное: оптические каналы предлагают гораздо меньшую задержку во времени. Например, задержка на длине 5200 км на современном оптическом кабеле составляет 60 миллисекунд или 11,5 нс/км, тогда как задержка сигнала со спутника на геостационарной орбите составляет 0,12 с до приемной станции на поверхности Земли и с Земли до спутника 0,12 с. При этом нужны когерентные источники передачи, когерентные приемники и необходимая среда передачи. Изобретение лазера разрешило проблему когерентного источника, но необходимо было передать световой сигнал через среду передачи, которая бы позволила преодолеть расстояния сотни и тысячи километров. Затухание стало непреодолимым препятствием передачи на большие расстояния.

В 1965 г. в МГТС была включена одна из первых оптических линий связи через открытое пространство протяженностью 4,7 км с помощью лазерного луча на длине волны 0,628 мкм (Москва, Зубовская площадь — МГУ) с системой передачи ИКМ-12. К началу семидесятых годов в Советском Союзе около 5 атмосферных лазерных линий