

## » Принципы работы FSO - систем (перевод ООО "МОСТКОМ")

June 2003 / Vol. 2, No. 6 / JOURNAL OF OPTICAL NETWORKING

Несмотря на относительную новизну [FSO-технологии](#) в коммерческих приложениях, существует несколько стандартных методик сравнения работы различных систем.

Наша цель - объяснить некоторые конструктивные решения FSO-систем и предоставить важную информацию потенциальным пользователям для оценки уместности специфичных FSO-систем в конкретных приложениях.

Кроме того, мы попытаемся определить реальные ограничения FSO с учетом существующей технологии и, кроме того, установить разумные ожидания с учетом атмосферных условий.

### 1. Как работает FSO

Концепция передачи информации через атмосферу с использованием модулированного света достаточно стара; и хотя значительные достижения были получены за последние 10 лет, идея остается относительно простой: узкий луч света от передающей системы проходит через атмосферу и попадает в приемную систему. Причины по которым мы сейчас обсуждаем [атмосферные системы связи](#) или FSO-системы – это потребность в большей полосе частот и улучшенных системах связи.

Поскольку FSO и волоконно-оптические системы используют инфракрасные (ИК) длины волн и имеют одинаковые возможности по полосе передачи, FSO-системы часто называют "безволоконной оптикой" или "беспроводной оптической" связью.

Кроме того, учитывая тот факт, что оптический спектр нелицензирован в области частот порядка сотен терагерц, большинство FSO систем использует простую амплитудную модуляцию, то есть ту же самую стандартную технику кодирования, которая используется в цифровой волоконной оптике

В системах, использующих цифровое кодирование наличие света кодирует единицу, а его отсутствие – ноль. Эта простая модуляционная схема позволяет конструировать FSO системы как частотно- и протоколо-прозрачные соединения физического уровня.

При рассмотрении работы FSO систем необходимо учитывать ряд важных параметров . Указанные параметры можно разделить на две категории - внутренние и внешние . Внутренние параметры связаны с конструкцией системы и включают мощность излучения, длину волны, полосу частот, угол расходимости и оптические потери на приемной стороне, чувствительность приемника, битовую ошибку (BER), диаметр приемных линз, угол зрения приемника.

Внешние параметры, или неспецифичные для системы параметры связаны со средой в которой должна работать система - они включают видимость и атмосферное поглощение, сцинтиляции, дистанцию связи, потери на окнах зданий и потери наведения. Важно понять, что многие из этих параметров не независимы, а связаны между собой, определяя общее функционирование системы. Например, доступность системы является функцией не только расстояния, но также локального климата и конструкции приемопередатчика.

Кроме того, система, оптимизированная для работы на большие расстояния ( $> 1 \text{ км}$ ) может не быть оптимальной для достижения высокого уровня доступности ( $> 99.9\%$ ) на короткой дистанции. В целом, оптимальное проектирование FSO систем сильно зависит от планируемого применения, требуемой доступности и цены решения.

### 2. Факторы окружающей среды

Работа канала связи FSO системы прежде всего зависит от климатических условий и физических характеристик места установки. В целом, погодные условия и параметры установки, воздействующие на видимость, оказывают влияние и на качество связи FSO системы. Типичная FSO система работоспособна на расстоянии в два-три раза превышающем расстояние прямой видимости в любых условиях окружающей среды. Главные факторы воздействующие на ее работу включают атмосферное поглощение, сцинтиляцию, потери на оконных стеклах, наклоны или движение здания, солнечная засветка и перекрытие прямой видимости.

### 3. Затухание в атмосфере

Ослабление в атмосфере обычно связывается с туманом, но может быть также вызвано низкой облачностью, дождем, снегом, мелкими частицами и их различными комбинациями. Влияние тумана на качество и дальность видимости можно увидеть на Рис. 1, который представляет ряд фотографий, полученных в Денвере, Штате Колорадо. Высокое здание на переднем плане (справа) находится приблизительно в 300 м. от камеры. Первый снимок сделан в условиях с дальностью видимости больше 2 км , как было измерено нефелометром, установленным рядом с камерой. Это соответствует 6.5 Дб/км в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн и 5% контрастности в соответствии со стандартом Всемирной Метеорологической организации ( WMO ). На снимке видны даже горы при том, что они находятся за много километров. На втором снимке виден туман, в котором измеренная дальность видимости составляет приблизительно 113 м . (115 Дб/км). Ближнее здание на расстоянии 300 м . еще видно, тогда как остальные здания и другие наземные ориентиры уже не видны. На третьем снимке, в условиях с дальностью видимости приблизительно 75 м. (173 Дб/км), ближнее здание полностью скрыто

#### 4. Сцинтилляция

Атмосферная сцинтилляция может быть определена как временное и пространственное изменение интенсивности излучения в плоскости приемника, который обнаруживает сигнал от удаленного передатчика. Уровень принимаемого сигнала колеблется в результате температурных изменений показателя преломления воздуха на пути прохождения излучения. Эти изменения связаны с тем, что атмосфера воздействует на свет подобно ряду маленьких линз, которые отклоняют часть излучения, направляя его как наружу, так и внутрь канала передачи. Временной масштаб данных флуктуаций имеет порядок миллисекунд, что приблизительно равно времени, который требуется объему воздуха, соразмерному с поперечным размером луча, пересечь линию связи и, следовательно, определяется скоростью ветра.

Сцинтилляция может изменяться больше чем порядок величины в течение дня, будучи максимальной в полдень, когда температура наиболее высока.

Некоторые эксперименты показали что, в зависимости от атмосферных условий на пути изучения, амплитуда сцинтилляционных колебаний достигает максимума, который не возрастает с увеличением расстояния.



Рис. 1. Денвер, Колорадо. Влияние тумана.

В целом, сцинтилляция вызывает быструю флюктуацию принимаемой мощности и, в самом плохом случае, приводит к высокому уровню ошибок FSO систем. Однако, на расстояниях меньше чем 1 км , большинство FSO систем имеют достаточный динамический диапазон или запас, чтобы компенсировать воздействие сцинтилляции. Кроме того, FSO системы, обеспечивающие 99.9 % или лучшую доступность, обычно имеют достаточный запас, чтобы компенсировать сильное ослабление в атмосфере и, таким образом, имеют более чем достаточный запас для компенсации сцинтилляции. Для больших дистанций связи с меньшим уровнем готовности, существенное снижение влияния сцинтилляции может быть обеспечено конструктивными решениями приемопередатчиков, такими как использование нескольких лазерных передатчиков.

#### 5. Потери на окнах

Одно из преимуществ FSO систем - то, что они позволяют осуществлять связь через окна помещений без необходимости установки антенн на крыше. Это особенно выгодно для заказчиков, которые не имеют доступ к крыше здания, а также должны оплачивать монтаж необходимой

Хотя окна пропускают оптический сигнал, они все его ослабляют. Стеклянные окна без покрытий обычно уменьшают сигнал на 4 % на каждой поверхности, из-за отражения. Это означает, что совершенно чистое окно с двойным стеклом уменьшает уровень всех оптических сигналов по крайней мере на 15 % (четыре поверхности, каждая с отражением 4 %). Окрашенные стекла и стекла с покрытием могут иметь намного большее ослабление, и его величина обычно сильно зависит от длины волны.

Для установки FSO систем с высоким уровнем доступности внутри помещений рекомендуется предварительно провести измерения фактического ослабления окон, что позволит точно рассчитать качество связи. Кроме того, при планировании инсталляции на высоких зданиях необходимо соотносить влияние низкой облачности на систему установленную на крыше с уменьшением уровня сигнала, вызванным поглощением в окне, расположенным значительно ниже. Во многих случаях, ослабление окна может иметь меньший эффект на доступность линии связи

## 6. Юстировка

Один из основных проблем FSO систем – поддержание заданного направления оси приемопередатчика.

Приемопередатчики передают узконаправленные пучки излучения, которые должны попадать в приемную апертуру приемопередатчика на противоположном конце линии связи. Типичный приемопередатчик передает один или несколько световых пучков, каждый из которых составляет 5-8 см в диаметре непосредственно на передатчике и обычно расширяется примерно до 1-5 м . в диаметре на расстоянии 1 км .

В добавление к этому, FSO приемники имеют ограниченный угол зрения, который может быть представлен как "конус приема" приемника и подобен конусу света, проецируемому передатчиком.

Для работы FSO системы очень важно согласование передаваемого пучка и угла зрения приемника с теми же параметрами приемопередатчика на противоположной стороне линии связи.

Несмотря на общепринятые представления, здания фактически находятся в постоянном движении. Это движение - результат ряда факторов, включая тепловое расширение, влияние ветра, и вибрации. Из-за узкой направленности излучения и ограниченного угла зрения приемника движение зданий может влиять на юстировку приемопередатчика и нарушать связь. Это влияние обычно упоминается как "движение опоры" В большинстве обстоятельств, угловые движения (по азимуту и склонению), в противоположность прямолинейному движению, составляют основную проблему для юстировки приемопередатчика. Движение опоры обычно классифицируется как низко-, средне- и высокочастотное. Низкочастотное – это движение с периодом колебаний от минут до месяцев и определяется суточными и сезонными колебаниями температуры. Среднечастотное движение имеет период масштаба секунд и связано с движением зданий под воздействием ветра. Высокочастотные колебания с периодом меньше чем 1 с, обычно называемые вибрацией, вызываются работой крупного оборудования (например, больших вентиляторов), деятельностью человека (ходьба, закрытие дверей). Каждый из перечисленных типов колебаний обсужден более подробно ниже.

## 7. Низкочастотные колебания

Температурные градиенты приводят к изгибу и скручиванию зданий. Амплитуда этих деформаций очень сильно зависит от размеров здания, их формы и конструкции. Это движение настолько малое и медленное, что идет незаметно для жителей зданий. Была показана корреляция, существующая между низкочастотным движением и ежедневными температурными изменениями. Как и ожидалось, отклонение имеет тенденцию к увеличению с высотой здания и может быть существенно для оборудования, установленного на крыше даже для невысоких зданий. Кроме того отмечено, что данные отклонения влияют больше на углы возвышения, чем на азимутальные углы.

## 8. Колебания средних частот

Данные виды колебаний вызываются ветром и могут быть весьма существенны для высоких зданий. К счастью, устойчивость зданий при сильных ветрах - обычно основная цель при проектировании небоскребов. Таким образом, данные колебания могут быть вызваны только очень сильным ветром и, вероятно, только на высоких зданиях. Прерывание связи у FSO систем по данной причине будет кратковременным, поскольку по прекращении порыва ветра здание возвращается в исходное положение. Приемопередатчики с достаточно широким пучком, а также

с достаточно эффективной системой автоматического наведения и слежения способны компенсировать даже эти редкие и сильные отклонения без прекращения связи.

## 9. Высокочастотные колебания

Высокочастотные колебания вызываются вибрацией, имеют частоту выше нескольких герц и сильно зависят от способа установки терминала FSO. Установка на этаже, стене или крыше (то есть на поверхности кровли или парапетной стенки) может дать весьма различающиеся уровни колебаний.

На Рис. 2 представлены графики спектральной плотности мощности вибрации для нескольких зданий, включая два крепления на крыше (поверхности кровли), два высоких административных здания (крепление на этаже), и невысокое деревянное здание (крепление на этаже). Кривые показывают большой разброс в амплитудах вибрации от здания к зданию.

Кроме того, величина вибрации зависит от действий жителей (например, ходьба, закрытие дверей) и может сильно меняться в течение некоторого времени для одного здания. Интересно отметить, что почти все интегрированное движение находится в пределах полосы частот ниже 10 Гц.

Измерения показали, что максимум углового отклонения из-за вибрации с частотой выше 1 Гц, редко превышает 1 мрад, и во многих случаях редко приблизится к половине этого значения. Однако, установка оборудования должна быть тщательно спланирована таким образом, чтобы не усиливать колебания, испытываемые FSO терминалом.

## 10. Ухудшение связи из-за колебаний опоры.

Движение опоры может вызывать прекращение связи двумя способами: за счет увеличения геометрических потерь при ошибке прицеливания и/или большими потерями на поглощение в приемной системе, вызванными неверным наведением. Геометрические потери - это оптические потери на пути от апертуры передатчика в апертуру приемника. Ошибки наведения лазерного луча в приемную апертуру противоположного терминала (пространственный угол связи) увеличивают геометрические потери. Потери на приемнике – это отношение мощности сигнала в плоскости приема к мощности, попадающей в активную зону приемника. Потери данного типа растут по мере смещения пятна принимаемого излучения от центра приемника и могут выражаться как ошибка наведения. По достижении ошибки наведения величины, равной половине угла зрения приемника, эти потери резко возрастают.

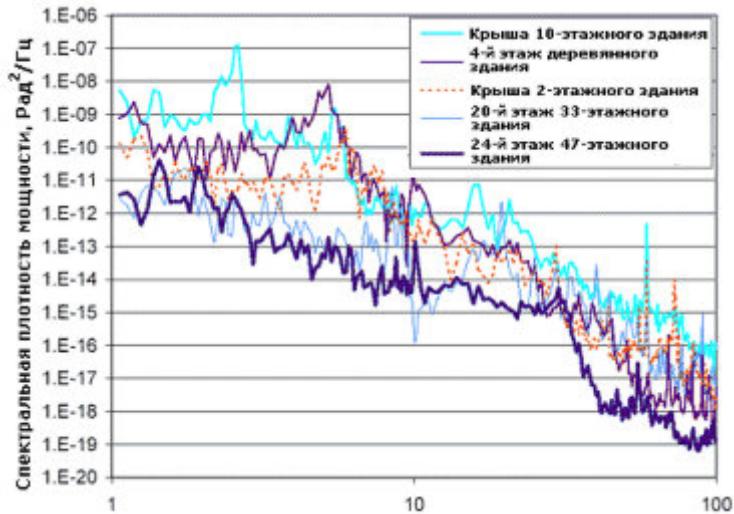


Рис. 2. Спектральная плотность мощности измеренной вибрации.

Имеются два подхода к компенсации влияния колебаний опоры: системы без наведения и системы с автоматическим определением направления и наведением. При проектировании системы без наведения стремятся оптимизировать угол необходимости передатчика для уменьшения геометрических потерь и согласования с углом зрения приемника, чтобы отработать движение опоры. Системы с автоматическим наведением (автотрекингом) могут в значительной степени компенсировать колебания опоры до того, как они скажутся в ошибках наведения. Это дает возможность иметь малые геометрические потери (за счет узконаправленных передатчиков), а также низкий уровень потерь на приеме (даже при малых углах зрения приемника). В связи с тем, что системы с автотрекингом значительно более сложны и

дорогостоящи, выбор между ними и системами без автонаведения заставляют пользователя выбирать между качеством связи и стоимостью решения.

В целом, ошибки наведения и прицеливания должны определяться комбинированным движением опоры (как описано выше) с использованием таких критериев как исходное поле ошибок отклонения (для систем без автонаведения), ошибки соосности и тепловой дрейф.

В Таблице 1 приведены бюджеты ошибок наведения и слежения для FSO -терминалов без автонаведения и с ним. Движение опоры, которое должно быть компенсировано системой наведения рассматривается как функция от частоты перемещения опоры. Колебания разных частот не являются независимыми. Следовательно бюджет, напрямую добавляемый к компонентам движения опоры можно использовать как увеличение низкочастотных колебаний при малом уровне колебаний средней и высокой частоты.

**Таблица 1 Бюджет ошибок наведения и слежения для FSO -терминалов**

Источник ошибок	Ошибки наведения		Ошибки слежения	
	Без автотрекинга	С автотрекингом	Без автотрекинга	С автотрекингом
Исходная расстройка	0.2	Отсутствует	0.2	Отсутствует
Несоосность приемника и передатчика	0.2	0.05	Отсутствует	Отсутствует
Температурный дрейф	0.1	0.02	0.1	0.02
Низкочастотные колебания	1.5	0.01	1.5	0.01
Колебания средней частоты	0.5	0.02	0.5	0.02
Высокочастотные колебания	0.5	0.05	0.5	0.05
<hr/>				
<b>Всего</b>	<b>3</b>	<b>0.15</b>	<b>2.8</b>	<b>0.1</b>

Перечисленные виды нестабильности опоры можно суммировать в некоторые правила, позволяющие оценить в каких случаях возможно влияние данных факторов:

- Низкие (меньше 3 этажей) каменные здания обычно движутся меньше чем высокие здания или деревянные сооружения.
- Перемещение приемопередатчика может быть более существенным чем движение здания.
- Меньше 15% зданий отклоняются более чем на 4-мрад за годовой период.
- Менее 5% зданий отклоняются более чем на 6-мрад за годовой период.
- Менее 1% зданий отклоняются более чем на 10-мрад за годовой период.

## 11. Влияние солнца

В FSO -системах используются высокочувствительный приемник в сочетании с линзами большой апертуры. В результате естественное освещение может потенциально воздействовать на прием сигнала. Это особенно сказывается в случае высокой интенсивности фонового излучения за счет солнечных лучей. В некоторых случаях прямое солнечное излучение может вызвать перерывы связи на период до нескольких минут когда Солнце попадает в поле зрения приемника. Однако такие случаи легко предсказуемы. В том случае, когда не удается избежать прямой засветки , работа системы может быть улучшена за счет сужения угла зрения, а также применения узкополосных световых фильтров. Важно также помнить о возможном воздействии солнечных лучей, отраженных от различных стеклянных поверхностей.

## 12. Конструкция приемопередатчика

Оптимальная конструкция FSO \_систем сильно зависит от требуемой стоимости также как и от дистанции, доступности и скорости передачи для конкретного приложения. Не смотря на установленные ограничения, зависящие от приложения, командой разработчиков должны быть приняты фундаментальные решения, серьезно влияющие на конструкцию приемопередатчиков. Эти фундаментальные решения включают характеристики передатчиков, определение необходимости наличия автотрекинга, выбор одно- или многоапertureных приемников и передатчиков, способы согласования излучения.

## 13. Характеристики передачи излучения

## Длины волн оптического излучения

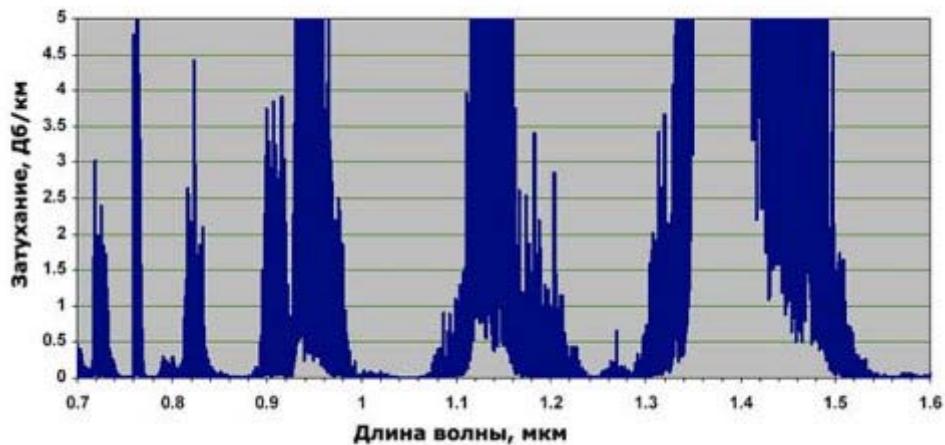
Как правило, все современные коммерческие FSO -системы работают в ближнем инфракрасном диапазоне волн от 750 до 1600 нм, единицы систем работают на 10,000 нм. Физические свойства оптического излучения и его прохождение через атмосферу практически одинаковы для видимого и ближнего инфракрасного диапазона длин волн., однако есть ряд серьезных факторов, влияющих на выбор длины волны разработчиками.

## Атмосферные окна прозрачности

Важно отметить, что, несмотря на высокую прозрачность атмосферы в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, определенные длины волн (или даже полосы) имеют сильное поглощение. Поглощение в ближней ИК области обусловлено в основном частицами воды (т.е. влаги) всегда присутствующими в атмосфере даже в ясную погоду. Вклад абсорбции газами ( CO x или NO x ) в общее поглощение можно не учитывать в силу того, что их коэффициенты поглощения значительно меньше чем у воды. В то же время в длинноволновой ИК области ( $>2000$  нм) газовая абсорбция может доминировать. Рис. 3 показывает поглощение в атмосфере в ясную погоду ( дальность видимости больше 10 миль ) для различных длин волн в ближнем ИК диапазоне (от 0.7 до 1.5 мкм), полученное с помощью программы MODTRAN , разработанной для исследования пропускания атмосферы.

Существует несколько "окон прозрачности" (имеющих поглощение менее 0.2 дБ/км) в диапазоне 700-10000 нм. Эти участки волн включают определенные длины волн на которых работает подавляющее большинство FSO -систем: 780-850 нм и 1520-1600 нм.

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.



**Рис. 3 Расчетная (с помощью MODTRAN ) зависимость затухания излучения в атмосфере в ясную погоду.**

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 ). 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 эрбьевые 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.

## 14. Передатчики

Источник модулированного света, которым обычно является лазер или светодиод ( LED ), обеспечивает передачу оптического сигнала и определяет все передающие свойства системы. Только приемное устройство вносит столь же важный вклад в качество системы. Для телекоммуникационных приложений, при частоте модуляции от 20 Мбит/с до 2,5 Гбит/с только лазеры отвечают требованиям, предъявляемым рынком. Кроме того важен способ модуляции и уровень мощности модулированного излучения. Лазеры, работающие в спектральных диапазонах 780-925 нм и 1550-1580 нм отвечают частотным требованиям и широко представлены на рынке. Хотя излучатели на других длинах волн также используются в коммерческих FSO -системах, наше рассмотрение будет посвящено лазерам, работающим на длинах волн 850 и 1520 нм. Работающие в этом диапазоне FSO -системы должны иметь следующие характеристики:

- Высокие уровни мощности излучения (важно для FSO -систем на длинных дистанциях);
- Высокоскоростная модуляция (важно для высокоскоростных систем);
- Небольшие габариты и потребляемые мощности (важно для общего проектирования систем и их эксплуатации);
- Возможность работы в широком температурном диапазоне без существенного ухудшения параметров связи (для систем внешнего исполнения);
- Среднее время наработки на отказ ( MTBF ) не менее 10 лет.

Для удовлетворения перечисленным требованиям, производители FSO -систем обычно используют лазеры с вертикальным резонатором ( VCSELs ) для ближней ИК области и лазеры с резонатором Фабри-Перо или с распределенной обратной связью для дальней ИК-области длин волн. Другие типы лазеров, как правило, не подходят для использования в высокоскоростных системах.

## 15. VCSEL лазеры

VCSEL -лазеры (850 нм) активно развиваются благодаря их применению в телекоммуникациях и имеют много притягательных особенностей. Эти лазеры вызвали революцию на рынке передающих компонентов благодаря их невысокой стоимости и преимуществам, недоступным ранее применявшимся технологиям. Основные преимущества – способность работать на высоких скоростях при среднем уровне мощности несколько милливатт и высоких значениях срока службы. Доступность связи определяется именно средним, а не пиковым значением мощности излучения. Поскольку на длинах волн 850 нм VCSEL лазеры дешевле их альтернатив, именно этот диапазон длин волн доминирует в недорогих FSO -системах, поскольку в коммерческих

системах требуемые скорости передачи не превышают 1 Гбит/с. Благодаря высокой эффективности этих лазеров не ставится вопрос о рассеянии тепла и не требуется активное охлаждение. Кроме того, их излучение имеет круговую, а не эллиптическую форму. Такая форма пучка прекрасно согласуется с оптическим волокном, что упрощает процедуру согласования излучения с волокном и существенно повышает его эффективность. Успех VCSEL лазеров настолько велик, что многие производители уже сейчас могут поставить лазерные структуры на 850 нм с прямой модуляцией на частоте, достигающей 3 Гбит/с. Продемонстрирована возможность модуляции до 10 Гбит/с, есть коммерческие решения для OC-48 (STM-16) и 10-Гигабит Ethernet.

## 16. Лазеры с резонатором Фабри-Перо и распределенной обратной связью

Лазеры данного типа, представляющие собой полупроводниковые структуры InGaAs / InP и работающие на длинах волн в области 1550 нм, были разработаны специально для волоконно-оптических телекоммуникаций ввиду малого поглощения оптическим волокном излучения в данном диапазоне. Эти лазеры отличаются высокой частотой модуляции, стабильностью длины волны излучения и большим сроком службы. Сегодня маломощные лазеры с распределенной обратной связью продемонстрировали прекрасные частотные характеристики и удовлетворяют самым строгим требованиям телекоммуникационной индустрии.

## 17. Усилители

Эрбьевые (EDFA) и полупроводниковые оптические усилители (SOA), предназначены для усиления излучения маломощных лазерных источников. Обе технологии позволяют усиливать излучение как одной длины волны, так и нескольких длин волн (совмещенных в пространстве по технологии WDM). Благодаря высокому оптическому усилинию, превышающему 30 дБ, EDFA - усилители могут увеличить мощность излучения FSO -системы на 1550 нм до 1-2 Вт. В то же время, из-за высокой стоимости данного решения оно сейчас применимо только в высокоскоростных системах с скоростью передачи не ниже 1 Гб/с. Поскольку решения на длине волны 1550 нм широко используются в телекоммуникациях, есть надежда на снижение стоимости.

## 18. Пиковая выходная мощность

Пиковая выходная мощность это максимально возможная выходная мощность излучателя. Это значение очень часто важно для импульсной работы лазера, когда высокая мощность нужна в короткий период времени. В общем, пиковая мощность и частота повторения импульсов сильно связаны и высокое значение пиковой мощности обычно связано с низкой рабочей частотой, чтобы избежать разрушения устройства. Однако, для большинства коммуникационных систем пиковая мощность лазерных источников не соответствует максимуму потому что в большинстве приложений не используются схемы модуляции мощного излучения при низкой частоте. Обычно используется схемы 50% модуляции. Для большинства FSO -систем пиковое значение мощности соответствует передаче «1» и его уровень соответствует удвоенному значению средней мощности сигнала.

## 19. Средняя выходная мощность

Средняя выходная мощность передающей системы является ключевым фактором в определении доступности связи, поскольку, как большинство цифровых волоконных коммуникационных систем, так и FSO -систем является цифровыми по способу передачи битов по сети. Указанные системы обычно используют способы кодирования (например, 8 B /10 B), обеспечивающие передачу примерно равного количества единиц и нулей для достижения 50% модуляции. В этом случае средняя мощность определяется как половина максимальной мощности (соответствующей передаче единицы). Это значение средней мощности используется для классификации приемопередатчиков FSO по уровню безопасности.

## 20. Расходимость излучения

Одним из основных преимуществ FSO -систем является узкий лазерный пучок, получаемый с помощью хорошо спроектированной оптики. Узкий пучок позволяет осуществлять скрытную и эффективную передачу излучаемой энергии, при которой значительная ее часть собирается приемником. В рамках данной статьи мы ограничимся рассмотрением гауссовского профиля пучков излучения, однако, следует учитывать, что реальное излучение FSO -систем может отличаться от гауссовского. Типичное значение расходимости оптического луча приемопередатчиков FSO без применения систем наведения относительно велико (2-10 мрад, что

эквивалентно диаметру пучка 2- 10 м на расстоянии 1 км ). В данном случае любое отклонение опоры должно компенсироваться расходимостью луча и углом зрения приемника. При наличии системы наведения расходимость луча может быть существенно снижена (обычно до 0.05 - 1 мрад, что эквивалентно размеру пучка 5- 100 см на расстоянии 1 км ) для увеличения доступности связи, в том числе и по погодным условиям. Следует иметь в виду, что стоимость системы наведения может быть велика.

## **21. Модели распространения излучения s (Гауссовые пучки, 1/e, 1/e<sup>2</sup>, and FWHA)**

Величина расходимости луча и его профиль в месте приема – важный критерий оценки качества связи особенно в терминах доступности. Обычно в FSO используется гауссова и прямоугольная модели пучка. Гауссовский профиль пучка получается как собственная форма колебаний в лазерном резонаторе. Большинство лазеров излучает гауссовые пучки имеющие пространственное качество излучения, соответствующее точечному источнику. Например, наиболее узкий пучок излучают одномодовые лазеры; на выходе оптического волокна, согласованного с таким лазером также наблюдается одномодовое излучение.

Выражение для интенсивности излучения гауссова пучка в зависимости от радиальной координаты  $r$  (расстояния от центра пучка) на длине волны  $\lambda$  и при радиусе перетяжки  $w_0$  выглядит следующим образом :

$$J(W/m^2) \simeq J_0/z^2 \exp[-2(\rho/\beta z)^2],$$

$$\beta = (2/\pi)(\lambda/\omega_e).$$

**Энергия пучка радиуса  $r_0$  :**

$$P(W) = 1 - \exp[-2(\rho_0/\beta z)^2].$$

В круге на границе которого происходит снижение амплитуды до уровня 0.135 ( $1/e^2$ ) от максимального значения содержится будет 86% энергии пучка – радиус данного круга называется радиусом пучка  $b$  по уровню  $1/e^2$ , который является фундаментальным параметром гауссовского профиля. С другой стороны, пучок может характеризоваться кругом на границе которого амплитуда уменьшается до 0,368 ( $1/e$ ) своего пикового значения. Третьим способом описания может служить ширина пучка по уровню половинной амплитуды ( FWHA ), которая для гауссовского пучка составляет  $0.589 * b$ . Резкий профиль гауссовского пучка приводит к ухудшению связи при работе на его границе для систем без автонаведения. Другим недостатком гауссовского пучка является то, что пиковое значение интенсивности ограничивает общее значение выходной мощности тогда как излучение приемопередатчика должно соответствовать стандартам лазерной безопасности (по уровню  $1$  или  $M$ ). Пиковое значение мощности не должно превышать пороговое значение с учетом длины волны. Однако это же пиковое значение определяет общую мощность и, соответственно, доступность канала связи для систем с гауссовыми пучками. Таким образом, характеристики гауссовского пучка ограничивают уровень передаваемой мощности.

Преимуществом гауссовского профиля является передача информации для системы слежения непосредственно через приемник коммуникационного канала, что позволяет обойтись без специального детектора целеуказателя и, следовательно, без увеличения стоимости системы. Это свойственно и прямоугольному распределению, которое рассматривается ниже, но с меньшей чувствительностью.

Альтернативным гауссовскому является прямоугольный профиль пучка, соответствующий равномерному распределению мощности в плоскости волнового фронта. Создание такого пучка обычно требует источника с конечными размерами, в качестве которого может быть использовано многомодовое оптическое волокно. Сфокусированный передатчик в котором выходная апертура волокна помещена в фокус выходной линзы дает пучок конечных размеров с распределением интенсивности близким к равномерному, практически во всем сечении пучка. Пучок данного профиля лучше всего характеризуется его FWHA (а не шириной по уровню интенсивности  $1/e$  или  $1/e^2$ ) ввиду резкого изменения интенсивности на его границе и сохранения максимальной интенсивности практически во всем возможном диапазоне углов в пределах его расходимости. Благодаря своим свойствам пучок с прямоугольным распределением интенсивности позволяет передавать максимально возможную энергию с соблюдением требований безопасности для глаз. Для большинства таких пучков FWHA составляет около  $0.9b$ , что обеспечивает также большой запас компенсации отклонений опоры. Основной целью при создании таких пучков является заполнение волокна различными модами изучения таким образом, чтобы ширина пучка была близка диаметру сердцевины волокна.

Следует отметить, что размеры пучка в плоскости приема значительно превышают размеры приемной апертуры, что приводит к малому различию в распределении принимаемой мощности между гауссовским и прямоугольным пучками.

В заключение отметим, большую роль характеристик пучков при сравнении FSO -систем. Гауссовский пучок, характеризуемый шириной по уровню 1 / e 2 относительно высоким значением мощности на его оси и резким ее уменьшением на краях. Это может снизить эффективность системы в отсутствие автотрекинга или при ее установке на нестабильное основание. С другой стороны, прямоугольный пучок имеет меньшую осевую мощность излучения ввиду ее равномерного распределения по всему сечению пучка и больше подходит для пассивной компенсации движения оснований. Оба профиля пучков применимы для систем с активным наведением.

## 22. Одно- и многоапертурные конструкции FSO -систем

Для FSO-систем требуются определенные оптические системы, обеспечивающие прием и передачу излучения. В приемопередатчиках может использоваться одна оптическая система для приема и передачи (общая апертура), однако обычно прием и передача обеспечиваются разными оптическими системами. В любом случае, возможно использование нескольких апертур как для приема, так и для передачи. Существует несколько преимуществ многоапертурных систем, включая большую устойчивость к перекрытию луча, лучшую компенсацию сцинтиляций и резервирование каналов. Однако, при сравнении систем важно учитывать апертуру оптической системы ввиду того, что одна большая апертура (на приеме или передаче) может иметь ту же или большую эффективность чем несколько малых, имеющих тот же «размер». Такое преимущество многоапертурной системы, как устойчивость к перекрытию означает, что вероятность одновременного перекрытия всех лучей (например птицами) очень мала. Кроме того, функционально использование нескольких лазеров повышает надежность системы, имея в виду возможный выход из строя одного из них. Что еще более важно для работы в атмосфере, многоапертурная система значительно снижает влияние сцинтиляций («теплового мерцания»). Минимизация этого эффекта особенно важна для систем работающих на большие расстояния. Недостаток многоапертурных систем заключается в необходимости качественного согласования нескольких приемных апертур. Дополнительные трудности возникают из-за того, что качество согласования приемных и передающих апертур должно поддерживаться в широком температурном диапазоне. Кроме того, усложняется система наведения, поскольку маловероятно получение оптического сигнала от всех апертур на одном датчике, способном управлять принимаемыми и передаваемыми пучками одновременно. Указанные сложности могут увеличить стоимость системы в целом, поэтому выбор многоапертурной системы для некоторых применений может быть неоправданным.

## 23. Приемники и материалы

По сравнению с излучателями, выбор приемников более ограничен. Наиболее распространены два вида материалов, используемых в ближнем ИК-диапазоне. Они основаны на применении кремния или арсенида галлия и мышьяка. Другим материалом, используемом в спектральном диапазоне коммерческих FSO -систем, является германий. Однако этот материал используется реже из-за высоких значений темнового тока. Все указанные материалы чувствительны в широком диапазоне длин волн и, в отличие от лазеров, не могут настраиваться на конкретную длину волн. Если необходим прием конкретного диапазона длин волн, то используются внешние фильтры.

## 24. Кортоколновые приемники

Кремний наиболее распространенный материал для приемников в видимой и ближней ИК-области спектра.

Технология работы с кремнием наиболее широко известна и данный материал может детектировать очень малые интенсивности излучения. Обладая широкой полосой восприимчивости к свету, кремний имеет зависимость чувствительности от длины волны максимум которой находится около 850 нм. Это делает кремниевые приемники идеальными в сочетании с коротковолновыми VCSEL -излучателями, работающим на 850 нм. Однако чувствительность кремния очень сильно уменьшается для длин волн выше 1 мкм. В результате на длина волны 1100 нм является границей применимости кремниевых приемников. Кремниевые приемники могут работать на высоких частотах – недавно было продемонстрировано коммерческое решение в приложениях со скоростью 10 Гб/с и 10 Гб Ethernet системах. Широко доступны менее скоростные (1 Гбит/с) кремниевые PIN -диоды и ЛФД. Также широко распространены кремниевые PIN -диоды со встроенным трансимпедансным усилителем. В таких детекторах чувствительность является функцией полосы модуляции сигнала и обратно

пропорциональна ей. Типичная чувствительность кремниевого PIN -диода составляет -34 Дбм на 155 Мбит/с. Кремниевые ЛФД значительно чувствительнее благодаря внутреннему лавинообразному процессу усиления и являются очень привлекательными для использования в FSO -системах. Значения чувствительности для высокочастотных применений составляют -55 Дбм на нескольких Мбит/с, -52 Дбм на 155 Мбит/с и -46 Дбм на 622 Мбит/с. Кремниевые приемники могут быть большого размера (т.е. 0.2 мм x 0.2 мм ) и могут работать на высоких частотах. Это свойство делает потери минимальными если свет фокусируется на детекторе с помощью линз большого диаметра или параболического отражателя.

## 25. Длинноволновые детекторы

В длинноволновой области в качестве материала для приемников излучения как правило используется соединение InGaAs . Как и кремний, InGaAs обладает широкой полосой и его спектральный отклик (или квантовая эффективность) зависит от длины волны излучения. Последние 10 лет постоянно шла работа над улучшением таких характеристик InGaAs детекторов как чувствительность и частотные параметры для их использования в волоконно-оптических устройствах на длине волны 1550 нм. Практически во всех длинноволновых волоконно-оптических системах в качестве материала для приемника используется InGaAs . Исходя из соображений экономики InGaAs приемники оптимизированы для работы на обеих длинах волн – 1310 и 1550 нм. Из-за сильного снижения чувствительности в коротковолновой области данный материал не применяется для длины волны 850 нм.

Основным преимуществом InGaAs -приемников является их широкая полоса в сочетании с высоким спектральным откликом на 1550 нм. Большинство приемников на InGaAs изготавливаются на основе PIN или ЛФД технологии. Как и в случае с кремнием InGaAs ЛФД-приемники значительно более чувствительны благодаря внутреннему усилиению за счет лавинного процесса. Значения чувствительности для высокочастотных применений составляют -46 Дбм на 155 Мбит/с и -36 Дбм на 1,25 Гбит/с в то время как InGaAs приемники работают на больших скоростях и имеют меньшие размеры чем их кремниевые аналоги.

В таблице 2 представлены некоторые из распространенных материалов для детекторов, используемых в FSO -системах и их основные физические свойства.

**Таблица 2. Основные физические свойства некоторых детекторных материалов.**

Материал/структура	Длина волны	Отклик, А/Вт	Усиление
Кремниевый PIN -диод	300-1100	0.5	1
Германиевый PIN -диод	500-1800	0.7	1
InGaAs PIN- диод	1000-1700	0.9	1
Кремниевый ЛФД	400-1000	77	150
Германиевый ЛФД	800-1300	7	10
InGaAs ЛФД	1000-1700	9	10

Суммируя сказанное, следует помнить, что качество приемника играет доминирующую роль при конструировании FSO -систем. Выбор соответствующей комбинации передатчик-приемник может компенсировать потенциальные недостатки, позволяя, например, использовать маломощные излучатели.

## 26. Лазерная безопасность

Лазерная безопасность – это важный аспект. В первую очередь безопасность определяется возможным облучением глаз или кожи человека. Пучки высокой мощности могут вызвать ожог кожи, но риск повреждения глаз значительно выше из-за их способности фокусировать излучение и, следовательно, концентрировать его энергию. Как правило, лазер безопасный для глаз, является безопасным для кожи. Подобно солнечному свету, излучение лазера представляет собой параллельные лучи, которые, в зависимости от длины волны, глаз фокусирует в точку на сетчатке, покрытой светочувствительными клетками. Как и прямые солнечные лучи (если смотреть на Солнце), лазерное излучение может повредить глаза.

Глаз человека фокусирует на сетчатку только определенный диапазон длин волн – от 0,4 до 1,4 мкм. Другие длины волн поглощаются передней частью глаза (роговицей) до того, как их энергия может сконцентрироваться. Указанное поглощение зависит от длины волны (см. Рис.4). Если говорить об ИК диапазоне, коэффициент поглощения излучения роговицей значительно больше для длинных волн (с длиной волны больше 1,4 мкм). Как следствие, поражение глаза ультрафиолетом и видимым солнечным излучением более вероятно чем лучами ИК-диапазона. Кроме указанных факторов, глаз имеет различную реакцию на длины волн, проникающие в него (0.4-1.4 мкм) потому что он обладает естественной реакцией, уводящей его от наблюдения ярких

видимых источников. Данная реакция не работает для длин больших чем 0.7 мкм, поскольку они невидимы. Хотя ИК излучение может повредить поверхность глаза, порог такого воздействия выше чем для ультрафиолетового излучения.

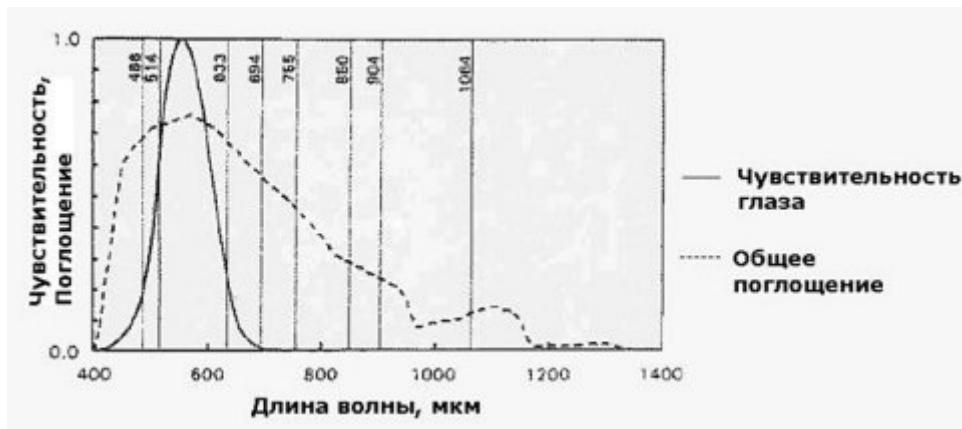


Рис.4 Зависимость поглощения человеческим глазом излучения от длины волны.

## 27. Стандарты лазерной безопасности

Многие страны разработали или адаптировали стандарты безопасности при работе с лазерами, которые относятся ко всем лазерным изделиям, продаваемым в пределах их границ. Обычно указанные стандарты подразделяются на две категории: регламентирующие безопасность лазерного оборудования и относящиеся к безопасному использованию лазеров.

Кроме того, некоторые организации имеют полномочия для разработки юридических стандартов, в то время как другие устанавливают стандарты безопасности при работе с лазерами и рекомендации, которые не осуществимы в соответствии с законом. Вообще, стандарты безопасности при работе с лазерами включают требования к автоматическим или ручным средствам управления безопасности, маркировке и предупреждающим знакам, обучению работе, эксплуатации, и обслуживанию защитного снаряжения. Список основных организаций, разрабатывающих стандарты безопасности при работе с лазерами представлен ниже.

- Center for Devices and Radiological Health (CDRH). CDRH – агентство при United States (U.S.) Food and Drug Administration (FDA). Оно устанавливает стандарты, касающиеся лазеров и лазерного оборудования, подпадающих под действие закона (21 CFR 1040).
- International Electrotechnical Commission (IEC). IEC публикует международные стандарты связанные со всем электрическим оборудованием, включая лазеры и лазерные устройства ( IEC 60825-1). Эти стандарты не поддерживаются непосредственно законодательством и решение по их адаптации и применению принимается отдельными странами по своему усмотрению.
- American National Standards Institute (ANSI). ANSI – Американская организация, публикующая стандарты в области применения лазеров ( ANSI Z 136.1). ANSI стандарты не поддерживаются законодательством, однако лежат в основе законодательных стандартов – « Американских Безопасных условий труда и Администрации Здоровья » ( OSHA ) как и другие подобные стандарты, адаптированные различными государственными службами.
- European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC). CENELEC – это организация, устанавливающая электротехнические стандарты, основываясь на рекомендациях, сформулированных 19 европейскими странами – членами Евросоюза. Эти стандарты не действуют на уровне законодательства, однако наряду со стандартами IEC , часто лежат в основе требований законодательства, принимаемых отдельными странами.
- Laser Institute of America (LIA). LIA – организация, продвигающая безопасное использование лазеров, предоставляющая информацию по лазерной безопасности, спонсирующая лазерные конференции, симпозиумы, публикации и тренировочные курсы.

За последние годы, вышеупомянутые организации разработали классификацию лазеров согласно их типу и мощности. Хотя некоторые критерии слегка изменяются, в целом классификация делит лазеры на 4 класса от первого до четвертого по возрастанию мощности. То, что все эти организации приняли слегка различные стандарты и схемы классификации, явилось фактором, сдерживающим компании желающие работать на глобальном рынке. Для разрешения данной проблемы, IEC , CDRH , и ANSI ведут работы по согласованию методов классификации и требований к продукции. Так, 27 мая 2001 года CDRH издало Laser Notice 50 которое разрешает

распространение в США продуктов, удовлетворяющих второму разделу стандарта IEC 60825-1. Этот документ – первый шаг в процессе редактирования рекомендаций CDRH с целью их соответствия стандартам IEC .

Согласно новому стандарту IEC идентифицируются специальные классы, каждому из них соответствует определенная маркировка и инструкции безопасности. Документ выделяет требования к установке оборудования, основанные на уровне мощности излучения, определяет опасные зоны в пределах передающей апертуры, в которых нельзя находиться исходя из требований безопасности и ограничивает установку некоторых лазерных систем высокой мощности в общественных местах. Согласно новой схеме классификации, системы Класса 1 и 1М признаются безопасными в непосредственной близости без использования оптических приборов (бинокли) для Класса 1М и даже с их использованием для Класса 1. IEC разрабатывает новый стандарт IEC 60825-12 (в дополнение к части 2 стандарта IEC 60825-1), посвященный классификации именно FSO -систем и их использованию. Окончательная редакция этого стандарта ожидается в 2003 г.

Здесь следует отметить, что лазерная классификация (то есть Классы 1, 1М, 3В) основывается не на длинах волн. Другими словами, не существует длины волны, изначально безопасной или наоборот, опасной для человеческого глаза. Это создает фундаментальную возможность создания безопасной лазерной системы на любой длине волны, поскольку лазерная классификация основывается на уровнях выходной мощности (а не на длинах волн). Важным для понимания является то, что новый стандарт регулирует уровень плотности мощности в плоскости апертуры передатчика, а не абсолютное значение мощности лазерного диода, установленного в оборудовании. Так, к примеру, лазерный диод, используемый в FSO -системе может соответствовать даже Классу 3 В , хотя оборудование в целом соответствует Классу 1 или 1М если лазерное излучение проходит через объектив, расширяющий область излучения до его выхода в пространство через апертуру прибора.

Новый стандарт устанавливает, что система Класса 1М, работающая на длине волны 1550 нм может передавать мощность примерно в 55 раз большую, чем система с тем же размером апертуры, работающая на длине волны 850 нм. В то же время, возможно увеличение размера выходной апертуры, позволяющее повысить выходную мощность на меньшей длине волны. Другим способом обеспечения Класса 1 или 1М является использование нескольких больших передающих апертур.

В дальнейшем мы будем рассматривать вопросы лазерной безопасности по классу 1 и 1М, поскольку именно такие системы работают ниже уровня максимальной экспозиции, допустимого для невооруженного глаза и, таким образом, наиболее подходят для широкого применения.

Отличительные особенности этих двух классов рассмотрены ниже.

- Класс 1 Лазеры данного класса безопасны при соблюдении условий эксплуатации, даже при использовании оптических инструментов при рассмотрении пучка излучения. Системы 1 класса могут устанавливаться в любом месте без всяких ограничений.
- Класс 1М Лазерные системы этого класса работают в диапазоне от 302.5 до 4000 нм, который безопасен при соблюдении условий эксплуатации, однако опасность может возникнуть если пользователь воспользуется оптическими инструментами на некоторых участках прохождения луча. В результате, системы класса 1М могут устанавливаться в местах, исключающих возможность использования оптики на опасных участках.

В Таблице 3 приведены допустимые уровни мощности в соответствии с IEC стандартом ( IEC 60825-1, Приложение 2) лазерных систем Класса 1 и 1М для длин волн 850 и 1550 нм.

**Таблица 3. Классификация уровней мощности лазеров в соответствии с IEC 60825-1, Приложение 2**

Класс	Мощность, мВт	Размер апертуры, мм	Расстояние, мм	Плотность мощности, мВт/см <sup>2</sup>
<b>Длина волны 850 нм а</b>				
Класс 1	0.78 b	7 50	14 2000	2.03 0.04
Класс 1М	0.7 c	7	100	2.03
<b>Длина волны 1550 нм</b>				
Класс 1	10	7 25	14 2000	26 2.04
Класс 1М	10	3.5	100	104

а Лазер представляется как точечный источник. Этот предел мощности увеличивается для протяженных источников, который фокусируются в большие пятна на роговице

б Для источников с угловым размером < 0.21 мрад  
с Для источников с угловым размером < 1.5 мрад

## 28. Атмосферные эффекты и доступность канала связи

Уравнение связи для FSO -систем очень простое при общем рассмотрении (если исключить из рассмотрения оптическую эффективность, шумы приемника и т.д.) и выглядит следующим образом:

$$P_{\text{received}} = P_{\text{transmitted}} * \frac{d_2^2}{[d_1^+(D*R)]^2} * 10^{(-a*R/10)}, \quad (1)$$

где

P - мощность,

d1 – диаметр апертуры передатчика (м),

d2 - диаметр апертуры приемника (м),

D - расходимость излучения (мрад) (по уровню 1/e для гауссовских пучков; FWHA для прямоугольного распределения ),

R - дистанция (км),

a – коэффициент затухания в атмосфере (ДБ/км).

В уравнении (1) мощность на приемнике пропорциональна мощности излучения и площади приемной апертуры и обратно пропорциональна квадрату расходимости пучка излучения и квадрату длины линии связи. Она также обратно пропорциональна экспоненте от коэффициента затухания в атмосфере (в единицах 1/длину линии связи), определяя границу доступности. Как видно из (1), контролируемыми параметрами являются мощность излучения, размеры приемной апертуры, расходимость луча и длина линии связи.

Коэффициент атмосферного затухания – неконтролируемый параметр внешней среды и не зависит от длины волны в тяжелых атмосферных условиях. К сожалению, принимаемая мощность экспоненциально зависит от произведения данного коэффициента на расстояние и в реальной атмосфере, для систем с требуемым уровнем доступности 99.9% этот фактор в уравнении является определяющим.

Ключевым моментом в развитии FSO -систем является доступность канала связи, которая зависит от разнообразных факторов, включая надежность оборудования и структуру сети, но все они хорошо известны и предсказуемы. Самое большое неизвестное – ослабление в атмосфере. Хотя большинство аэропортов мира собирают статистику видимости (из которой можно получить коэффициенты затухания), пространственная точность таких измерений очень мала (обычно около 100 м ), а время замеров слишком редко (обычно часы). В результате, оценки доступности 99.9 % или лучше получить затруднительно. Таким образом, базы данных аэропорта практически неприменимы для точного и надежного определения качества обслуживания. В результате, FSO изготовители вынуждены сами собирать более надежные атмосферные данные, используя чувствительные приборы типа нефелометров, измерителей видимости и прозрачности атмосферной трассы.

## 29. Бюджеты связи

Одним из ключевых методов определения качества работы FSO -системы является расчет бюджета связи. Как минимум, бюджет связи определяет величину запаса по усилению или мощности линии для любых определенных условий работы. Эта граница может быть интегрирована с моделью атмосферного поглощения, учитывающего рассеяние и сцинтиляции. Обычно бюджет связи FSO системы включает передаваемый уровень мощности, чувствительность приемника, потери оптической системы, геометрические потери и потери, вызванные разьюстировкой.

Передаваемая мощность – это количество оптической энергии, передаваемой FSO -системой; чувствительность приемника – минимальная оптическая энергия, которая должна приниматься FSO -системой для заданного уровня ошибок.

Обе величины обычно измеряются как для пиковой, так и для средней мощности. Кроме того, они могут быть измерены в передающей или приемной апертуре, то есть у лазеров или детекторов. Если измерения предпринимаются непосредственно перед детекторами или лазерами, необходимо учесть оптические потери в системе. Оптические потери включают рассеяние, отражения от поверхностей, поглощение, и прочие потери.

Геометрические потери - потери, происходящие на пути луча между передатчиком и получателем. Как правило, пучок излучения имеет размеры большие чем принимающая

апертура, и это приводит к потере этой “излишней” энергии. Как правило, увеличение размера приемной апертуры и уменьшение расходимости излучения позволяют уменьшить геометрические потери для определенного расстояния. Для равномерного распределения мощности, геометрические потери можно приблизенно расчитывать по формуле :

$$\text{Geometric loss (dB)} = 10 \cdot \log \left\{ \frac{\text{Receive Aperture Diameter (m)}}{\text{TX Aperture (m)} + [\text{Range (km)} * \text{Divergence (mrad)}]} \right\}^2 \quad (2)$$

Уравнение (2) также может использоваться для аппроксимации геометрических потерь мощности гауссовского пучка с использованием расходимости по уровню  $1/e$ , но с несколько меньшей точностью, поскольку оно получено в приближении однородного распределения мощности.

Следует также отметить, что уравнение (2) соответствует только FSO системам и обычно не используется при расчете микроволновых линий связи, где геометрические потери рассчитываются исходя из дифракции излучения, которое определяется антенной.

Ошибка наведения является следствием неточной юстировки приемника и передатчика - она связана с тем, что большинство FSO -систем передает гауссовые пучки и только часть излучения попадает на приемник. Как правило, система настраивается таким образом, чтобы центр гауссова распределения был совмещен с центром приемника. Если этого не происходит, то приемник собирает энергию «крыльев» распределения с меньшей интенсивностью излучения. Как было показано в разделе 3, данный вид потерь в первую очередь связан с движением опоры. FSO системы с автоматическим наведением и слежением изначально менее подвержены данному виду потерь в силу того, что они постоянно поддерживают оптимальное направление, но, как определено экспериментально, некоторые потери возможны из-за ограниченной способности отработки автоматической системой всех видов движений.

Таблицы 4 и 5 представляют упрощенные значения бюджетов связи для систем без автоматического наведения и с ним соответственно. Интересно отметить улучшение условий связи, которое может быть получено за счет применения систем автотрекинга. Эта система, снижая ошибки наведения и слежения, что позволяет за счет уменьшения расходимости передатчиков существенно снизить геометрические потери.

**Таблица 4. Упрощенные бюджеты связи для FSO -систем без автотрекинга.**

Параметр	Расстояние		Примечание
	300 м	2000 м	
Средняя мощность лазера	10 ДБм	10 ДБм	
Потери в системе	-6 ДБ	-6 ДБ	Общие потери приемопередатчика
Геометрические потери	-27 ДБ	-44 ДБ	8 мрад расходимость передатчика 3 мрад ошибка наведения
Потери сигнала на приемнике	-23 ДБ	-40 ДБ	В чистом воздухе, без потерь на окнах
Чувствительность приемника	-46 ДБм	-46 ДБм	Зависит от длины волны и скорости передачи данных
Запас по усилению для чистого воздуха	23 ДБ	6 ДБ	Для потерь в атмосфере и на окнах

**Таблица 6. Упрощенные бюджеты связи для FSO -систем с автотрекингом.**

Параметр	Расстояние		Примечание
	300 м	2000 м	
Средняя мощность лазера	10 ДБм	10 ДБм	
Потери в системе	-8 ДБ	-8 ДБ	Общие потери приемопередатчика
Геометрические потери	-4 ДБ	-18 ДБ	0.5 мрад расходимость передатчика 0.15 мрад ошибка наведения
Потери сигнала на приемнике	-2 ДБ	-16 ДБ	В чистом воздухе, без потерь на окнах
Чувствительность приемника	-46 ДБм	-46 ДБм	Зависит от длины волны и скорости передачи данных
Запас по усилению для чистого воздуха	44 ДБ	30 ДБ	Для потерь в атмосфере и на окнах

## 30. Измерения

Одна из самых больших проблем, которая стоит перед потенциальными пользователям FSO систем - точное сравнение изделий различных изготовителей. Причина этого в том, что каждый изготовитель имеет тенденцию по своему трактовать различные технико-эксплуатационные

параметры. К примеру, передаваемая мощность может быть пиковой или средней, расходимость излучения может измеряться по уровню  $1/e$ ,  $1/e^2$ , или в единицах FWHA.

Как отмечалось в аннотации, цель данной работы – выработка общего набора параметров FSO систем который позволит их корректное сравнение. С этой точки зрения мы можем предложить производителям FSO систем следующие шесть показателей для их описания.

- Передаваемая мощность
- Расходимость излучения
- Чувствительность приемника
- Поле зрения приемника
- Поле зрения и полоса частот системы наведения и слежения
- Зависимости запаса по усилению и ослабления от расстояния

Используя эти шесть показателей, потенциальный конечный пользователь должен быть способен полностью оценить ожидаемую эффективность данного FSO приемопередатчика для конкретной инсталляции и иметь возможность количественного сравнения различных систем.

### **Передаваемая мощность**

Мы хотели бы предложить, чтобы производители приняли стандартный показатель "Полная максимальная средняя мощность в выходной апертуре". При использовании этого показателя, описание FSO приемопередатчика будет содержать интегрированную сумму испускаемой мощности по всей выходной апертуре, усредненную за период по крайней мере в 25 раз превышающий рабочий тактовый интервал.

Как вариант, производитель FSO системы может использовать параметр «Максимальная средняя выходная мощность передающего лазера» в сочетании с параметром «Оптические потери передающей системы»

### **Расходимость излучения**

Мы предлагаем производителям принять стандартный параметр «Расходимость пучка излучения по уровню  $1/e$ ,  $1/e^2$ , и в единицах FWHA». Эта комплексная информация позволит потенциальному пользователю примерно определить профиль пучка излучения и оценить распределение мощности на различных расстояниях.

### **Чувствительность приемника**

Мы предлагаем производителям принять стандартный показатель «Средняя мощность на входной апертуре, необходимая для получения уровня ошибки не больше  $10^{-9}$ ». Экстраполяция на другие уровни ошибок практически линейна – так, для уровня  $10^{-12}$  это чувствительность, большая примерно на 1 дБ и для уровня  $10^{-6}$  – меньшая примерно на 1 дБ. Как вариант, производитель может указать параметр «Необходимая средняя мощность на детекторе» в сочетании с параметром «Оптические потери в приемной системе».

### **Поле зрения приемника**

Мы предлагаем использовать в качестве стандартного показатель «Поле зрения приемника в единицах FWHA»

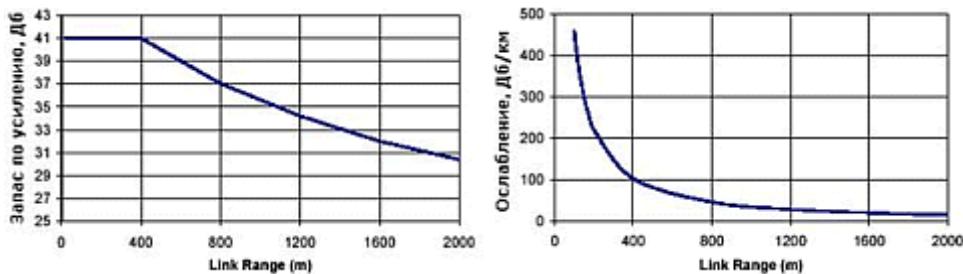
### **Наведение и слежение**

Для систем наведения и слежения мы могли бы предложить две стандартных характеристики – «Область системы слежения» и «Полоса частот системы слежения». Осознавая недостаточность данных характеристик для полного описания систем наведения и слежения, мы считаем, что они могут дать общую оценку работы системы и вполне применимы для корректного сравнения различных приемопередатчиков.

## **31. Зависимость запаса по усилению и ослабления от расстояния**

Последний показатель, который мы предлагаем – это две кривые, показывающие зависимость запаса по усилению и ослабления от расстояния, приведенные на Рис.5. Первая кривая показывает запас системы для данного расстояния, позволяющий компенсировать потери на рассеяние и сцинтиляции. Вторая кривая получена из первой и показывает максимальное расстояние на котором FSO система будет работать при заданном затухании в атмосфере. Вторая кривая корректна для малого затухания ( $<30$  дБ/км) потому что не учитывает сцинтиляционные потери.

Это наиболее важные показатели поскольку данные кривые полностью охватывают практически все аспекты работы системы. Исключением могут быть случаи с неточной юстировкой, описываемые другими показателями. Однако для очень стабильного крепления эти кривые полностью описывают свойства системы и ее надежность.



**Рис. 5 Предлагаемый показатель – зависимости запаса по усилению и ослабления от расстояния.**

## 32. Практические ограничения FSO

Одна из проблем, стоящая сегодня перед производителями FSO систем – неточные спецификации максимальных возможностей данной технологии. Обычно это делается для повышения уровня краткосрочных продаж, но наносит долговременный ущерб репутации данной технологии, потому что несоответствие линий связи заявленным параметрам заставляет заказчиков искать недостатки уже в технологии, а не в агрессивной маркетинговой политике.

В своей основе, FSO технология может применяться практически во всем мире, в том числе для долговременной работы на короткие расстояния. В Таблице 6 суммированы среднегодовые значения доступности канала связи типичных высокоскоростных FSO систем для различных значений доступности и климатических условий.

Насколько можно видеть, FSO системы вполне работоспособны на расстояниях около 1 км - даже в городах с плохими погодными условиями обеспечивается уровень доступности 99,5%; однако для увеличения доступности максимальное расстояние сильно снижается. При доступности не меньшей 99,99% максимальное расстояние обычно меньше 300 м за исключением мест с идеальным климатом.

Для расчета цифр, приведенных в этой таблице была собрана и проанализирована история данных по видимости из различных источников, таких как Национальная служба погоды ( NWS ) – отделение Национального океанического и атмосферного управления США ( NOAA ), Национальный климатический центр данных ( NCDC ) и Министерство обороны США. Данные собирались по различным городам мира за период 16 лет и включают как видимость у поверхности, так и статистику облачности.

**Таблица 6. Расстояния для различных значений годовой доступности и климатических условий.**

Доступность канала связи, %	Города	Расстояние, м
99.5	Феникс - отличная погода	10 000 +
	Денвер - хорошая погода	2400
	Сиэтл - плохая погода	1200
	Лондон - очень плохая погода	630
99.9	Феникс - отличная погода	5200
	Денвер - хорошая погода	850
	Сиэтл - плохая погода	420
	Лондон - очень плохая погода	335
99.99	Феникс - отличная погода	460
	Денвер - хорошая погода	290
	Сиэтл - плохая погода	255
	Лондон - очень плохая погода	185

Данные основываются на испытаниях с использованием двух FSO приемопередатчиков, расположенных на открытом воздухе и работающих в условиях прямой видимости в нормальных условиях эксплуатации.

## 33. Заключение

Хорошо спроектированные FSO -системы обеспечивают 99.9% и лучшую доступность канала связи на расстояниях 500–1000 м для подавляющего большинства городов мира. Они безопасны для зрения и могут использоваться в течении расчетного срока эксплуатации при условии необходимого обслуживания. Авторы данного материала надеются, что изложенные подходы будут использованы в FSO -индустрии в качестве количественного метода определения производительности систем, поскольку долгосрочный успех и принятие этой мощной технологии зависят от непротиворечивой и точной оценки ее возможностей.

## Литература

- ✓ American National Standards Institute (ANSI), Standard for the Safe Use of Lasers , ANSI Z136.1, <http://www.ansi.org>
- ✓ European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), Safety of Laser Products—Part 1: Equipment Classification, Requirements, and User's Guide , EN 60825-1:1994 (CENELEC, 1994), <http://www.cenelec.org> .
- ✓ European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), Safety of Laser Products—Part 2: Equipment Classification, Requirements, and User's Guide , EN 60825-1:1994 (CENELEC, 1994), <http://www.cenelec.org> .
- ✓ International Electrotechnical Commission (IEC), Safety of Laser Products— Part 1: Equipment Classification, Requirements, and User's Guide , IEC 825-1 (IEC, 1993), © 2003 Optical Society of America JON 2330 June 2003 / Vol. 2, No. 6 / JOURNAL OF OPTICAL NETWORKING 199 <http://www.iec.ch> . Published in 1993 and amended in 1997, the standard is being redesigned as IEC 60825-1.
- ✓ International Electrotechnical Commission (IEC), "Amendment 2 (2001)," Safety of Laser Products—Part 1: Equipment Classification, Requirements, and User's Guide , IEC 60825-1 (IEC, 2001), <http://www.iec.ch> . New classification standard adopted as of 1 March 2001.
- ✓ The Photonics Directory (Laurin Publishing, Pittsfield , Mass. , 2002), <http://www.photonicsdirectory.com> .
- ✓ D. Sliney and M.Wolbarsht, Safety with Lasers and Other Optical Sources (Plenum, New York , 1980).
- ✓ U.S. Center for Devices and Radiological Health (CDRH), Laser Product Performance Standard, Code of Federal Regulations, Vol. 21, Section 1040 (21 CFR 1040) (CDRH, Washington , D.C. , 2002).
- ✓ M. J.Weber, ed., CRC Handbook of Laser Science and Technology (CRC Press, Boca Raton , Fla. , 1982), Vols. 1 and 2.
- ✓ M. J. Weber, ed., CRC Handbook of Laser Science and Technology, Supplement 1 (CRC Press, Boca Raton, Fla., 1989).
- ✓ R.Weiner, "Status of laser safety requirements," in Laser and Optronics 1990 Buying Guide (1990).
- ✓ D. C. Winburn, Practical Laser Safety , 2nd ed. (Marcel Dekker, New York, 1990).