

ОТЧЕТ МСЭ-R F.2106

Применения фиксированной службы с использованием оптических линий связи в свободном пространстве

(Вопрос МСЭ-R 237/9)

(2007)

Сфера применения

В настоящем Отчете приводится ответ на Вопрос МСЭ-R 237/9, касающийся оптических линий связи в свободном пространстве (FSOL) для применений фиксированной службы (ФС).

В следующих ниже разделах представлены характеристики оборудования, возможные применения ФС, а также технические и эксплуатационные аспекты оптической передачи в свободном пространстве (см. Примечания 1 и 2).

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – В настоящем Отчете при обсуждении вопроса о передаче в свободном пространстве внимание уделяется системам для работы вне помещений.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Оптическое соединение в свободном пространстве между станцией-концентратором и подвижными/кочующими терминалами, выступающее в качестве беспроводной локальной сети, не входит в сферу применения настоящего Отчета; однако в настоящем Отчете рассматривается фиксированная линия между станциями-концентраторами.

Сокращения

ААС:	Автоматическая регулировка ослабления Automatic attenuation control
APD:	Лавинный фотодиод Avalanche photo diode
FSO:	Оптические сигналы в свободном пространстве Free-space optics
FSOL:	Оптическая линия связи в свободном пространстве Free-space optical link
LD:	Лазерный диод Laser diode.

Справочные материалы**Рекомендации МСЭ-R**

Рекомендация МСЭ-R F.1668 – Показатели качества по ошибкам для реальных цифровых фиксированных беспроводных линий, используемых на гипотетических эталонных трактах и соединениях протяженностью 27 500 км

Рекомендация МСЭ-R F.1703 – Показатели готовности для реальных цифровых радиорелейных линий, используемых на гипотетических эталонных трактах и соединениях длиной 27 500 км

Рекомендация МСЭ-R P.1814 – Методы предсказания, требуемые для разработки наземных оптических линий для связи в свободном пространстве

Рекомендация МСЭ-R P.1817 – Данные о распространении сигнала, требуемые для разработки наземных оптических линий для связи в свободном пространстве

Рекомендации МСЭ-T

Рекомендация МСЭ-T G.640 – Находящиеся в одном и том же месте продольно совместимые интерфейсы для оптических систем в свободном пространстве

ITU-T Recommendation G.692 – Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers.

1 Введение

В последнее время оптические линии связи в свободном пространстве (FSOL) становятся привлекательной транспортной средой передачи для применений фиксированной службы малого радиуса действия. FSOL обладают следующими преимуществами:

- возможностью широкополосной передачи;
- компактностью приемопередающего оборудования;
- почти полным отсутствием необходимости в координации для предотвращения помех между FSOL.

Следовательно, для того чтобы расширить существующие и будущие применения на их основе, требуется рассмотреть технические и эксплуатационные аспекты FSOL, используя методы теоретического анализа, а также экспериментальные методы, описанные в настоящем Отчете.

2 Описание конфигурации системы и основных параметров

2.1 Объяснение параметров

2.1.1 Передающая сторона

2.1.1.1 Площадь излучения, E_a

Площадь излучения, E_a , представляет собой поверхность окна передачи, выраженную в квадратных метрах (m^2).

Площадь излучения является параметром, используемым для определения класса безопасности лазера.

2.1.1.2 Мощность излучения, E_p

Мощность излучения, E_p , – это мощность, которая передается в площади излучения E_a и выражается либо в дБм, либо в мВт. Она является одним из ряда параметров, используемых для определения класса безопасности лазера и для расчета запаса на линии. Измерение мощности должно осуществляться вне FSO и как можно ближе к окнам излучения FSO. По возможности, следует проводить измерение, передавая сигналы "0" и "1" с равными вероятностями появления. Мощность представляет собой среднее значение величины для высокого уровня (бит "1") и низкого уровня (бит "0").

По соображениям безопасности необходимо определять точность измерения мощности, например, $E_p = 10 \text{ дБм} \pm 1 \text{ дБ}$.

Кроме того, в целях безопасности, при наличии в терминале функции автоматической коррекции расходимости, E_p определяется для минимальной величины расходимости, а для терминалов с автоматическим регулированием мощности передачи (АРМП) максимальное значение E_p соответствует максимальному значению мощности излучения.

Для терминалов с многолучевой системой должны указываться значения E_p для каждой E_a и полная мощность (сумма лучей, в мВт). Полная мощность – это сумма всех значений E_p для каждого излучающего терминала при сведении всех лучей; этот параметр используется в целях безопасности. Должно также указываться расстояние между двумя E_a при расходимости лучей.

В терминалах с голографическим оптическим рассеивателем для получения сверхпротяженного источника, с тем чтобы обеспечить высокую эффективность диффузионной передачи с контролируемой площадью рассеяния, а также увеличить эффективность передачи при конфигурации с классом безопасности 1 (в соответствии со стандартом МЭК 60825-1 [3]), должны указываться значения E_p , базирующиеся на E_a .

2.1.1.3 Расходимость луча, V_d или θ

Расходимость луча, V_d , – это максимальное из значений углов между центральной осью луча, соответствующей максимальной плотности мощности, и направлением, соответствующим плотности мощности с уровнем -3 дБ.

Данная величина имеет важное значение для определения класса безопасности лазера и расчета запаса на линии. Эта величина может выражаться через половинный угол или полный угол, однако это должно быть указано. Единицей измерения обычно служит миллирадиан (мрад). В случае применения коррекции расходимости должны указываться минимальное и максимальное значения.

2.1.1.4 Длина волны, W_a или λ

Длина волны, W_a или λ , – это центральная длина волны и ее полная ширина на половине максимума (FWHM). Значение центральной длины волны также имеет важное значение для расчета класса безопасности лазера. В качестве единицы измерения должен использоваться нанометр (например: $\lambda = 849 \pm 2$ нм).

Если применяется передача с уплотнением по длинам волн (WDM), то может быть проще указывать спектральный диапазон.

2.1.1.5 Класс безопасности лазера

Класс безопасности терминала FSO соответствует нормативному справочному документу МЭК 60825 и должен контролироваться сертифицированной лабораторией. Для терминала FSO предпочтительным является класс безопасности 1 или 1M.

2.1.2 Приемная сторона

2.1.2.1 Площадь приемника, R_a

Площадь приемника, R_a , – это полная площадь приемника или поверхность окна приемника. Единицей измерения может служить квадратный метр (m^2).

2.1.2.2 Чувствительность, S_e

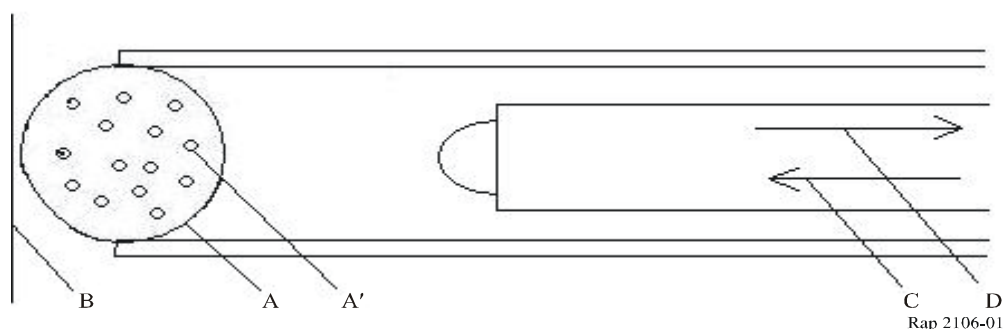
Чувствительность, S_e , – это минимальный уровень оптической мощности при передаче данных с рассматриваемым качеством (например, коэффициент ошибок по битам (BER) должен быть лучше, чем 10^{-6} , т. е. $BER \leq 10^{-6}$).

Единицей измерения должен быть дБм, и измерение должно осуществляться вблизи окна приемника FSO.

Если в терминале имеются окна нескольких приемников, то должны указываться значения S_e для каждой R_a , а также общая чувствительность.

Если в терминале имеется состоящая из микросфер приемная система (A), которая легирована с использованием примесного элемента (A') в соответствии с резонансной длиной волны сопровождающего луча (B), взаимодействующего с лазерным передатчиком (C), что при определенной длине волны и корректируемой мощности позволяет повысить запас энергии в линии на резонансной частоте примесных элементов, содержащихся в микросферах, то чувствительность, S_e , терминала (D) будет представлять собой чувствительность такой системы при передаче данных с тем же рассматриваемым качеством (рисунок 1).

РИСУНОК 1
Терминал с микросферой



2.1.2.3 Чувствительность в области насыщения, S_s

Чувствительность в области насыщения, S_s , – это максимальный уровень оптического сигнала при передаче данных с рассматриваемым качеством (например, BER должен быть лучше, чем 10^{-6} , т. е. $BER \leq 10^{-6}$) с использованием автоматической регулировки ослабления (AAC) или без нее.

Единицей измерения должен быть дБм, и измерение должно осуществляться вблизи окон приемника FSO.

Если в терминале имеются окна нескольких приемников, то должны указываться значения S_s для каждой R_a , а также общая чувствительность.

Разность между чувствительностью в области насыщения (с AAC, если имеется) и чувствительностью составляет динамический диапазон.

2.1.2.4 Зона обзора, F_v

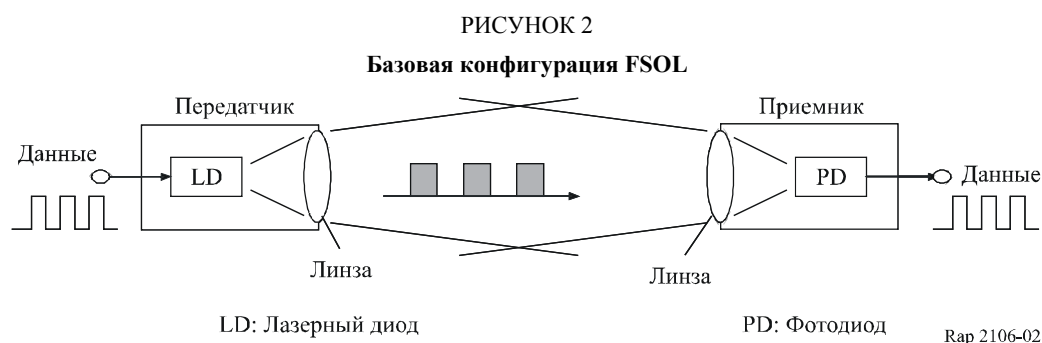
Зона обзора, F_v , – это угол между центральной осью и угловым измерением, соответствующим уровню -3 дБ. Эта величина может выражаться через половинный угол или полный угол, однако это должно быть указано. Единицей измерения может быть миллирадиан (мрад).

2.1.2.5 Потери в системе, S_l

Данный параметр должен применяться для сведения, и он не используется при расчете класса безопасности лазера и запаса на линии вследствие точек измерения излучения и приемника. Единицей измерения должен быть дБ.

2.2 Конфигурация системы

Базовая конфигурация FSOL для применений ФС изображена на рисунке 2.



На многих FSOL функция электрооптического (E/O) или оптоэлектрического (O/E) преобразования выполняется в лазерном диоде (LD) передатчика (Tx) или в фотодиоде (PD) приемника (Rx), соответственно. В последнее время в некоторых системах стало применяться оборудование WDM, которое дает возможность использования нескольких оптических несущих для пары передатчик/приемник, чтобы повысить пропускную способность линии [1] [2]. Однако, с точки зрения экономного использования, возможно, потребуются дальнейшее развитие систем WDM, в частности, для технологии разделительных фильтров на приемной стороне.

В этом оборудовании используется модуляция лазерного луча для обмена двоичными данными в обоих направлениях по паре передатчик/приемник (лазерный диод/APD или PIN-диод) на каждом конце. Это оборудование применяется для связи пункта с пунктом на двунаправленных линиях в пределах прямой видимости (LoS).

Каждая единица оборудования состоит из нескольких модулей:

- На передающей стороне:
 - a) абонентский интерфейс: электрический или оптический, для отправки и приема цифровых данных;
 - b) модуль электрооптического преобразования (в случае оптического интерфейса);
 - c) модуль фильтрации и усиления электрического цифрового сигнала;
 - d) модуль оптического передатчика, содержащий лазер.
- На приемной стороне:
 - a) модуль оптического приемника, содержащий диод;
 - b) модуль фильтрации и усиления электрического цифрового сигнала;
 - c) модуль оптоэлектрического преобразования (в случае оптического интерфейса);
 - d) абонентский интерфейс: электрический или оптический, для отправки и приема цифровых данных.

Иногда с оборудованием поставляется управляющее программное обеспечение, позволяющее настраивать параметры линии связи и получать качественную и количественную информацию от различных модулей.

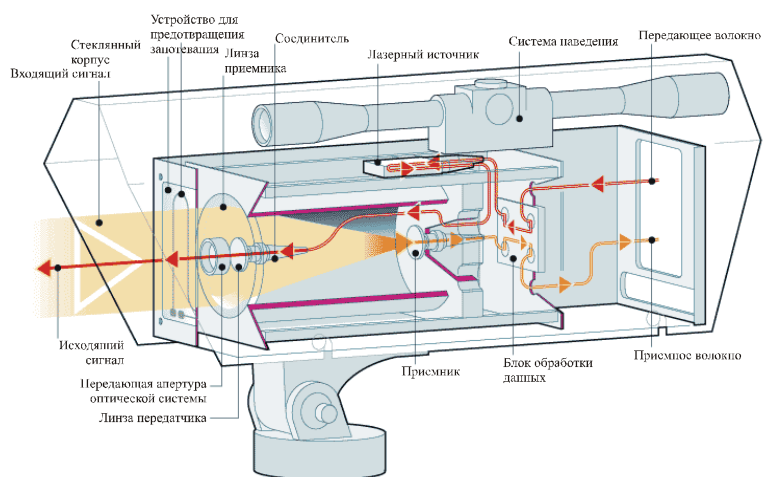
В зависимости от производителя реализуются дополнительные функциональные возможности, например:

- система слежения, АРМП, ААС;
- вспомогательная радиолиния с ограниченной скоростью передачи на случай прерывания работы лазерной линии связи.

На рисунке 3 приведен пример структуры оборудования FSO.

РИСУНОК 3

Пример терминала FSO (предназначенного для оптического доступа, Сан-Диего, США)



Rap 2106-03

2.3 Базовые параметры системы

При определении оптических линий связи должны учитываться следующие основные параметры:

Дальность: этот параметр меняется в зависимости от оборудования от нескольких десятков метров до нескольких километров. Одни производители указывают максимальную дальность, другие указывают типовую дальность для различных погодных условий, и наконец, третьи сообщают "рекомендуемую" дальность, включающую запас по сравнению с максимальным значением. Эти цифры должны рассматриваться как порядок величины, а не как абсолютные значения.

Безопасность: категория лазера в оборудовании – это важный фактор, которой должен учитываться, поскольку он обуславливает использование более простых или более сложных методов установки и обслуживания FSOL. При определении категории лазера должны учитываться такие параметры, как длина волны сигнала, наблюдаемая мощность и форма луча. В нормативном справочном документе МЭК 60825-1 рекомендуется выбирать класс терминала 1 или 1M.

Скорость передачи данных и вид рекомендуемого применения: многие системы являются прозрачными для скорости передачи данных и протокола; зачастую это довольно важно для диапазона скоростей передачи. В таком случае применения зависят от максимальной пропускной нагрузки, которую может передать система, и неизменно сосредоточены в области электросвязи и обработки данных. Прозрачные системы со скоростью передачи до 200 Мбит/с будут способны передавать, например, сигналы STM-1, ATM, FDDI или Fast Ethernet. В других терминалах указываются скорость передачи данных, интерфейс и, следовательно, заданный вид использования, например данные с интерфейсом E1 (2,048 Мбит/с) или Ethernet (10 Мбит/с).

Частоты/длины волн, используемые для FSOL: существует два основных диапазона частот/длин волн, которые широко используются в применениях FSOL, а именно диапазон 230–200 ТГц/1300–1500 нм и диапазон 375–385 ТГц/780–800 нм. Эти диапазоны обладают преимуществами по сравнению с другими диапазонами вследствие весьма небольшого атмосферного поглощения в свободном пространстве. Кроме того, в волоконно-оптических системах характеристики передачи в этих диапазонах длин волн соответствуют такому высокому качеству, что полупроводниковые оптоэлектронные устройства являются экономически доступными. Разработана технология прецизионного управления для длин волн, в частности, в диапазоне около 1500 нм, в котором в настоящее время рассматривается оборудование WDM. В связи с этим 15-й Исследовательской комиссией МСЭ-Т проведены исследования, касающиеся размещения длин волн для волоконно-оптической передачи. С точки зрения прозрачности атмосферы удобен также диапазон длин волн 2000–2200 нм, поскольку влияние аэрозольного рассеяния и молекулярного поглощения становится минимальным в данном диапазоне, в частности, около 2200 нм [10] [11]. Данный диапазон обладает еще одним преимуществом, поскольку оптический луч в нем менее подвержен отклонению, вызываемому изменением температуры атмосферы (см. п. 7.1). С другой стороны, дорогие оптоэлектронные устройства для генерации и обнаружения сигнала в диапазоне 2000–2200 нм еще не доступны. 3-й Исследовательской комиссией МСЭ-R (Рабочими группами 3J и 3M) исследованы характеристики распространения оптических сигналов в свободном пространстве для широкого диапазона оптических частот, включая спутниковые и наземные линии (см. п. 3).

Мощность передачи лазерного диода: мощность передачи лазерного диода (LD), используемого на FSOL, в настоящее время составляет порядка 10 мВт. Следовательно, проектирование линии, о котором идет речь в дальнейших разделах, осуществляется на основе этого значения. Однако развитие технологии повлечет за собой появление оптических устройств с гораздо более высокой пропускной способностью, и это может расширить сферу применения FSOL в ближайшем будущем.

При выборе системы должны также учитываться следующие вторичные параметры:

- длина волны, на которой работает оптическая линия: данный параметр влияет на класс безопасности терминала;
- тип и количество оптических передатчиков и/или приемников, от которых зависит запас на линии;
- простота процесса реализации и операций технического обслуживания;
- простота и удобство в использовании программного обеспечения для контроля, позволяющего управлять двумя (или несколькими) терминалами (или несколькими линиями) из одного места (дистанционное управление); и
- стоимость системы.

3 Характеристики распространения в свободном пространстве, имеющие отношение к проектированию линии

В настоящем разделе приводятся характеристики распространения в свободном пространстве для FSOL, которые основаны на результатах исследований, содержащихся в рекомендациях МСЭ-R серии Р. За более подробными справочными материалами по данному разделу можно обратиться к соответствующим рекомендациям серии Р (Рекомендации МСЭ-R Р.1814 и Р.1817).

3.1 Распространение в условиях ясного неба

При распространении оптических волн в дополнение к потерям, которые называются потерями в свободном пространстве, даже при ясной погоде наблюдается ослабление в атмосфере. Данное ослабление, L_{atm} , вызвано релеевским рассеянием и/или молекулярным поглощением, влияние которого сильно зависит от длины волны.

Кроме того, принимаемая мощность колеблется вследствие турбулентности атмосферы при температурном градиенте, которая приводит к отклонению луча, нестабильности пятна или мерцанию в тракте распространения оптической волны.

Обычно влияние L_{atm} не слишком велико в диапазонах длин волн, упомянутых в п. 2.3 (частота/длина волны для FSOL), для линий короче примерно 1 км. Отказы линии, возникающие вследствие таких явлений, можно легко уменьшить за счет регулировки расходимости оптического луча на передающей стороне, таким образом чтобы диаметр пятна луча на приемной стороне достиг определенного размера, например нескольких метров.

Еще одним способом улучшения готовности линии в зависимости от воздействия условий распространения является применение на электрическом уровне схемы регенерации сигнала и/или прямого исправления ошибок.

3.2 Влияние тумана

3.2.1 Оценка ослабления в тумане с использованием атмосферной видимости

Причиной ослабления вследствие тумана является рассеяние M_i , [4], которое зависит от количества частиц (плотности тумана). Как правило, непосредственно измерить плотность тумана или получить по ней статистические данные трудно. Влияние ослабления вследствие тумана, $Attfog$ (дБ/км), можно связать с атмосферной видимостью, V (км), определяемой через максимальное расстояние, на котором можно распознать черный объект на фоне неба [5] [6]. В частности, видимость определяется для метеорологических целей. Она характеризуется прозрачностью атмосферы, оцениваемой человеком-наблюдателем. Видимость измеряется в соответствии со шкалой метеорологической оптической дальности с помощью трансмиссометра или диффузометра.

В данных случаях видимость, V , измеряется через расстояние, на котором передаваемая оптическая мощность уменьшается в ϵ раз по сравнению с исходной величиной. В литературе встречаются следующие два значения ϵ , равные 0,02 или 0,05.

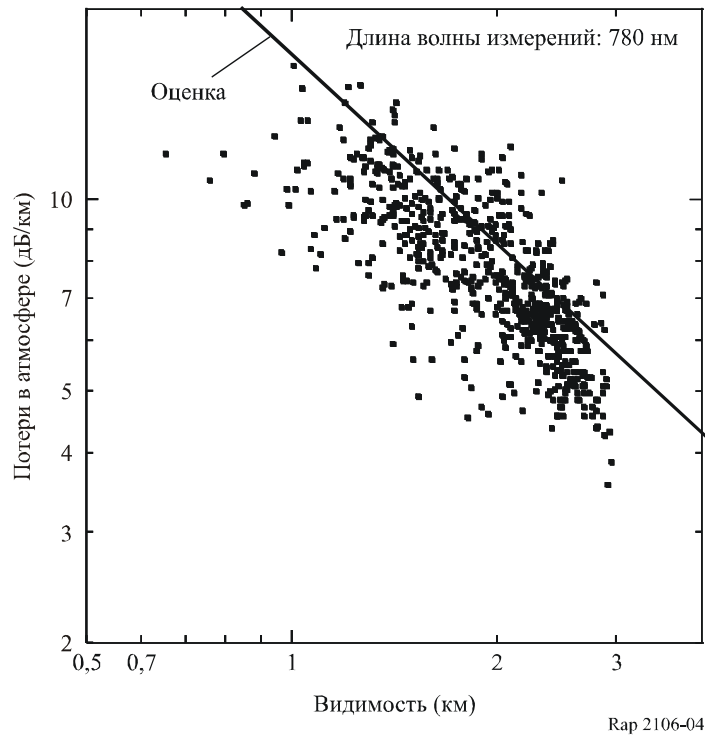
В таком случае зависимость между $Attfog$ и V можно выразить в виде следующего уравнения, которое может применяться независимо от вида тумана и оптической длины волны для дальности V меньше 3 км:

$$Attfog = 10 \log_{10}(\epsilon)/V. \quad (1)$$

Таким образом, ослабление оптических волн вследствие тумана можно оценить с использованием статистических данных о видимости. Описанный выше метод прогнозирования на основе уравнения (1) продемонстрирован и учтен при проектировании линии [5] [7]. На рисунке 4 изображена зависимость между $Attfog$ и V для измеренных данных [7].

РИСУНОК 4

Ослабление в атмосфере вследствие тумана



3.2.2 Подробный анализ ослабления в аэрозоле (тумане)

В настоящем подразделе представлен более подробный анализ для случаев, когда известен тип тумана.

Причиной ослабления в атмосфере является совокупное воздействие поглощения и рассеяния инфракрасного света присутствующими в атмосфере аэрозолями и молекулами газа. Прозрачность как функция от расстояния задается соотношением Бера-Ламберта:

$$\tau(\lambda, d) = \frac{P(\lambda, d)}{P(\lambda, 0)} = \exp[-\sigma(\lambda)d], \quad (2)$$

где:

$\tau(\lambda, d)$: прозрачность на расстоянии d от передатчика;

$P(\lambda, d)$: передаваемая мощность на расстоянии d ;

$P(\lambda, 0)$: передаваемая мощность;

$\sigma(\lambda)$: конкретное ослабление или коэффициент поглощения света на единицу длины.

Ослабление вследствие тумана на линии длиной d (км) связано с прозрачностью следующим соотношением:

$$Att_{fog,d} = 10 \log_{10}(1/\tau(\lambda, d)) \quad \text{дБ.} \quad (3)$$

Коэффициент поглощения света $\sigma(\lambda)$ является суммой четырех слагаемых:

$$\sigma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda), \quad (4)$$

где:

- α_m : коэффициент молекулярного поглощения ($N_2, O_2, H_2, HO, CO_2, O_3, \dots$);
- α_a : коэффициент поглощения в аэрозолях (малых твердых или жидких частицах, содержащихся в атмосфере (лед, пыль, дым, ...));
- β_m : коэффициент релеевского рассеяния в результате взаимодействия волны с частицами, размер которых меньше длины волны;
- β_a : коэффициент рассеяния Ми. Это рассеяние возникает, когда размер частиц имеет тот же порядок величины, что и длина передаваемой волны.

Поглощение преобладает в инфракрасном диапазоне, в то время как рассеяние – в диапазонах видимого и ультрафиолетового излучений. В основном, ослабление в атмосфере (являющееся функцией от длины волны) обратно пропорционально видимости и является параметром, характеризующим непрозрачность атмосферы при наличии тумана. При малых значениях коэффициентов молекулярного и аэрозольного поглощения, а также релеевского рассеяния коэффициент поглощения света можно выразить с помощью следующих соотношений Ал-Набулси и соавторов:

Адвективный туман, образующийся при прохождении теплого влажного воздуха над более холодной поверхностью:

$$\sigma(\lambda)_{fog,adv} = \frac{0,11478\lambda + 3,8367}{V} \quad (5)$$

Радиационный туман, образующийся в результате радиационного охлаждения воздушной массы во время ночного излучения при благоприятных метеорологических условиях:

где:

$$\sigma(\lambda)_{fog,rad} = \frac{0,18126\lambda^2 + 0,13709\lambda + 3,8367}{V} \quad (6)$$

где:

- λ : длина волны FSO (мкм);
- V : видимость (км).

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Эти соотношения рассчитаны для длин волн от 690 до 1550 нм, видимости от 50 до 1000 м, ослабления в тумане для излучения лазера и двух типов туманов, доступных в программе FASCOD: адвективного и радиационного. Эти два соотношения действительны только для расстояний от 50 до 1000 м, и пользователь в праве выбирать то или иное соотношение, которое соответствует типу тумана.

3.3 Влияние дождя

В случае дождя ослабление возникает в результате геометрического рассеяния, вызванного каплями дождя. Независимо от длины волны данное ослабление $Attrain$ (дБ/км) выражается следующей теоретической зависимостью от распределения размера капель дождя, fI :

$$Attrain = 27,29 \times 10^5 \cdot \int_0^{\infty} r^2 \cdot fI dr \quad (7)$$

где:

- r : диаметр капель дождя (м).

Для определенных мест и длин линий, fI можно задать с помощью статистических данных об интенсивности дождевых осадков (во многих случаях используется интенсивность выпадения осадков в течение часа, R (мм/ч)) следующим образом [8]:

$$fI = B \exp(C R^k r). \quad (8)$$

Следующие примеры параметров, используемые в уравнении (8), соответствуют собранным в Японии статистическим данным:

Пример (на основе модели Маршалла-Палмера); $B = 0,16$, $C = -82$ и $k = -0,21$.

Далее, влияние $Attrain$ можно вывести в общем виде как функцию от интенсивности осадков R (мм/ч) с использованием уравнений (7) и (8).

$$Attrain = \alpha * R^\beta. \quad (9)$$

Интенсивность дождя является основным параметром, используемым для локального описания дождя. Параметры α и β будут братья в зависимости от места (см. таблицу 1). Параметры, полученные во Франции, соответствуют параметрам из Рекомендации МСЭ-R P.1814.

ТАБЛИЦА 1

Примеры параметров, используемых для оценки ослабления в дожде

Место	α	β
Япония	1,58	0,63
Франция	1,076	0,67

Как оказалось, описанные выше методы прогнозирования, которые, в основном, аналогичны методам для миллиметрового диапазона электрических волн [9], обеспечивают неплохую оценку для распространения оптических волн [5] [7] [15].

Измерение интенсивности дождя осуществляется либо непосредственно с помощью пьювиометров, либо с использованием метеорологических радаров. Если известен запас на линии, полученный из энергетического потенциала оптической линии связи, то вероятность прерывания связи на линии вследствие дождя можно вывести с помощью метода дихотомии. Ниже приводится пример расчета с использованием параметров, измеренных во Франции:

Пример:

$$R = 18 \text{ мм/ч};$$

$$Att_{rain} = 1,076 \times 18^{0,67} = 7,46 \text{ дБ/км};$$

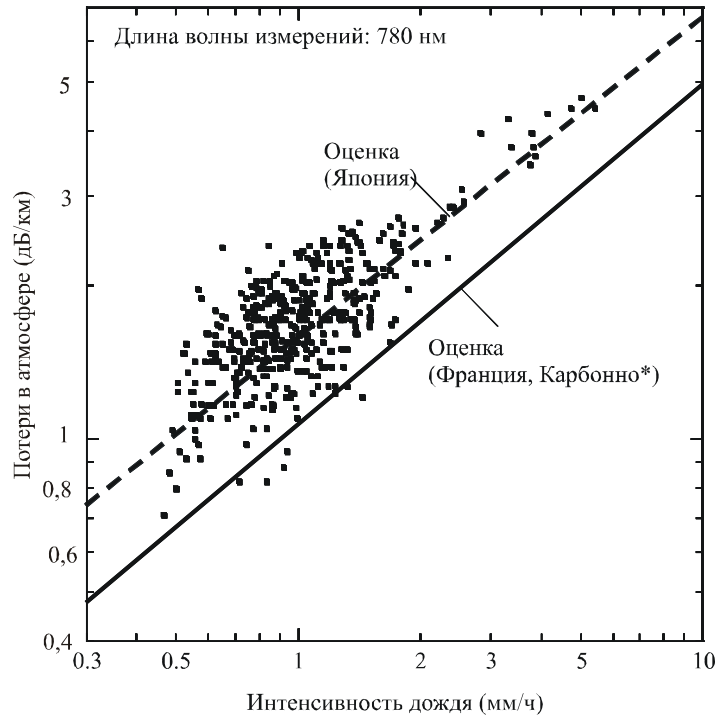
$$Att_{Rain} = 7 \text{ дБ/км}.$$

На рисунках 5а) и 5б) показана зависимость между $Attrain$ и R , которая получена с использованием параметров из таблицы 1 для данных, измеренных в Японии [7]. Можно заметить, что в области сильных ливней оценка на основе Рекомендации МСЭ-R P.1814 также дает хорошую аппроксимацию для данных, полученных в Японии.

РИСУНОК 5

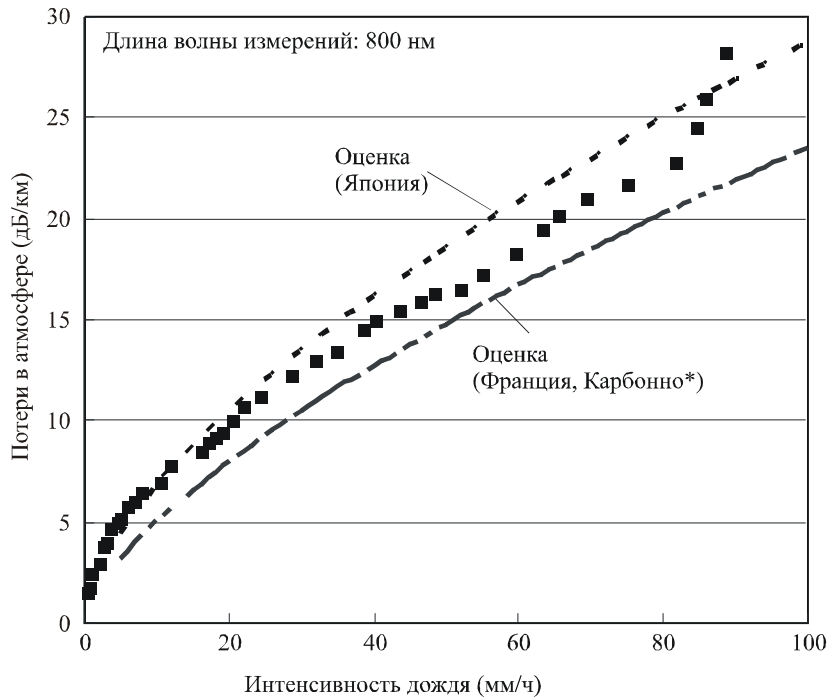
Ослабление в атмосфере вследствие дождя

а) Пример 1



* Данная оценка согласуется с Рекомендацией МСЭ-R P.1814

б) Пример 2



* Данная оценка согласуется с Рекомендацией МСЭ-R P.1814

3.4 Ослабление в снеге

Ослабление вследствие снега является функцией от длины волны, λ_{nm} , и интенсивности осадков S (мм/ч) и описывается следующими соотношениями:

– мокрый снег (высота < 500 м):

$$Att_{snow} = (0,0001023 * \lambda_{nm} + 3,7855466) * S^{0,72} \quad \text{дБ/км} \quad (10)$$

– сухой снег (высота > или = 500 м):

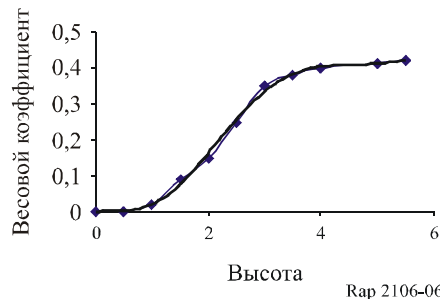
$$Att_{snow} = (0,0000542 * \lambda_{nm} + 5,4958776) * S^{1,38} \quad \text{дБ/км} \quad (11)$$

Интенсивность снега, S , является основным параметром, используемым для локального описания снега. Его измерение осуществляется на метеорологической станции.

Характеристики осадков в виде снега выводятся из характеристик осадков в виде дождя в системе функции от высоты. К интенсивности выпадения дождевых осадков, R_p , которая превышает для любого заданного процента, p , в обычном году в любом месте, применяется весовой коэффициент как функция от высоты (км) (рисунок 6). Если известен запас на линии, полученный из энергетического потенциала оптической линии связи, то вероятность прерывания связи на линии вследствие снегопада можно вывести с помощью метода дихотомии.

РИСУНОК 6

Весовой коэффициент для снега/дождя как функция от высоты



Рар 2106-06

Пример:

Высота = 147 м, $\lambda = 850$ нм, $S = 40$ мм/ч;

$Att_{snow} = ((0,0001023 \times 850) + 3,7855466) \times 40^{0,72} = 55,14$ дБ/км;

$Att_{snow} = 55$ дБ/км.

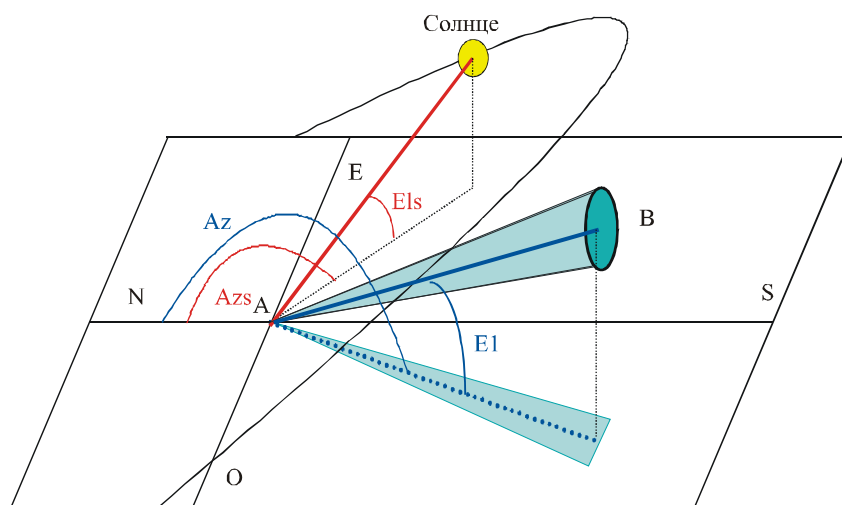
3.5 Влияние общей освещенности

Солнечная засветка возникает тогда, когда солнце или его отражение располагается в мгновенной зоне обзора оптического приемника, F_v , или вблизи этой зоны. Приемник, как правило, имеет, как минимум, такой же размер, как и расходимость луча передачи. В настоящем разделе будет рассчитываться вероятность того, что положение солнца параллельно оптической линии и что мощность излучения солнца, попадающая внутрь приемника, больше мощности сигнала, принимаемого от передатчика.

3.5.1 Траектория солнца

На рисунке 7, ниже, схематически представлена геометрия пути движения солнца по небу относительно FSOL (А – приемник, В – излучатель).

РИСУНОК 7
Схема пути движения солнца относительно FSOL



Rap 2106-07

Для каждого дня, часа, минуты и секунды года выводятся различные параметры солнца (высота, азимут) на основе его угла склонения и прямого восхождения.

3.5.2 Мощность солнечного излучения в приемнике

Мощность, излучаемая солнцем ($\text{Вт}/\text{м}^2$), определяется следующим уравнением:

$$\text{Power_radiated} = 1200 * \cos\left(\frac{\pi}{2} - \text{Elevation_radian}\right), \quad (12)$$

где:

Elevation_radian : высота солнца.

Проникающая внутрь приемника мощность описывается следующим уравнением:

$$P_{solar} = F_{solar} * \text{Power_radiated} * \text{Capture_surface} * \text{Width_band}_{\text{receiver(nm)}} / 100, \quad (13)$$

где:

F_{solar} : спектральная мощность солнечного излучения как функция от длины волны;

Capture_surface : площадь поверхности захвата приемника;

$\text{Width_band}_{\text{receiver(nm)}}$: ширина полосы приемника.

3.6 Влияние сцинтилляции

Под влиянием термической турбулентности в среде распространения наблюдается образование временных ячеек переменного размера (10 см – 1 км) и различной температуры. Эти разнообразные ячейки имеют различные индексы рефракции и тем самым приводят к рассеянию, многолучевости и изменению углов прихода: возникают быстрые флуктуации принимаемого сигнала с частотой флуктуаций от 0,01 Гц до 200 Гц. Аналогичным образом меняется фронт волны, что приводит к фокусировке и расфокусировке луча. Такие флуктуации сигнала называются сцинтилляциями. Амплитуда и частота сцинтилляций зависят от соотношения размера ячеек и диаметра луча. В случае, когда неоднородности велики по сравнению с поперечным сечением луча, луч отклоняется, когда они невелики, луч расширяется.

Влияние тропосферной сцинтилляции обычно описывается в виде логарифма амплитуды χ (дБ) наблюдаемого сигнала ("логарифмической амплитуды"), определяемого как выраженное в децибелах

отношение мгновенной амплитуды к среднему значению амплитуды. Интенсивность и скорость флуктуаций (частота сцинтилляций) растут с увеличением частоты сигнала. Для плоской волны, слабой турбулентности и конкретного приемника дисперсия сцинтилляции σ_x^2 (дБ²) может быть выражена следующим соотношением:

$$\sigma_x^2 = 23,17 * k^{7/6} * C_n^2 * L^{11/6}, \quad (14)$$

где:

- k (м⁻¹): номер волны $\frac{2\pi}{\lambda}$;
- L : длина линии связи (м);
- C_n^2 (м^{-2/3}): структурный параметр индекса рефракции, представляющий собой интенсивность турбулентности. Является функцией от неровности, солнечной радиации, влажности и альбедо земли.

Сцинтилляции имеют пик амплитуды, равный $4\sigma_x$, и ослабление из-за сцинтилляций, равное $2\sigma_x$. При сильной турбулентности наблюдается насыщение дисперсии, определяемое вышеприведенным соотношением [13]. Следует отметить, что параметр C_n^2 имеет разные значения на миллиметровых и оптических длинах волн [14]. Миллиметровые волны, главным образом, чувствительны к флуктуациям влажности, тогда как в диапазоне оптических волн индекс рефракции, в основном, является функцией температуры (влиянием водяного пара можно пренебречь). На миллиметровых волнах значение C_n^2 примерно равно $10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$, что соответствует средней турбулентности (обычно, на миллиметровых волнах $10^{-14} < C_n^2 < 10^{-12}$), а на оптических волнах значение C_n^2 примерно равно $2 \times 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$, что соответствует слабой турбулентности (обычно, на оптических волнах $10^{-16} < C_n^2 < 10^{-13}$) [13].

3.7 Другие факторы

При распространении вне помещения FSOL вряд ли будет подвергаться какому-либо фоновому шуму. Однако работа FSOL может быть прервана солнечным лучом, в случае когда он пересекается с направлением приемного луча FSOL. В случае, когда направление солнечного луча совпадает с направлением главной оси приемного луча, концентрирующее тепловое воздействие линзы может стать столь существенным, что приведет к выходу из строя приемника. Направление оптической линии должно выбираться таким образом, чтобы не допускать пересечения с солнечным лучом.

4 Применения фиксированной службы

4.1 Общие характеристики

FSOL обладает следующими преимуществами:

- широкополосная или высокоскоростная передача данных;
- малогабаритное и простое оборудование;
- работа на безлицензионной основе;
- выгодная цена;
- быстрота и простота в развертывании;
- быстрота повторного использования и переноса линии.

Для ряда конкретных применений использование FSOL дает некоторые дополнительные преимущества, помимо тех, которые обеспечиваются за счет традиционных фиксированных линий, либо тех преимуществ, которые связаны с волоконно-оптическими линиями. Ниже приводится ряд примеров возможных применений:

- линия для специального мероприятия;
- временная линия: быстрая установка на ограниченное время в ожидании окончательной обычной линии;
- линия связи в чрезвычайных ситуациях: установка линии связи в чрезвычайных ситуациях в случае разрыва связи;
- межстанционная линия, независимая сеть (ПЦИ, СЦИ, АТМ, Ethernet 10/100/1000);
- замкнутое оптическое кольцо;
- резервная линия;
- сеть с плотным расположением узлов;
- инфраструктура подвижной связи, например линии GSM или линии нано- или пикосот IMT-2000.

FSOL имеет следующие недостатки:

- готовность зависит от расстояния;
- условие наличия прямой видимости (LoS).

С другой стороны, при передаче оптических волн в свободном пространстве приходится преодолевать ряд проблем, связанных с распространением, о которых говорилось в п. 3.

4.2 Примеры основных применений

Типовые применения FSOL реализуются на ограниченном расстоянии, используя ее преимущества. В настоящем пункте представлены примеры соединительной линии между зданиями для локальных сетей передачи данных (LAN) и соединения для расширения инфраструктуры подвижной связи, как показано на рисунках 8 и 9.

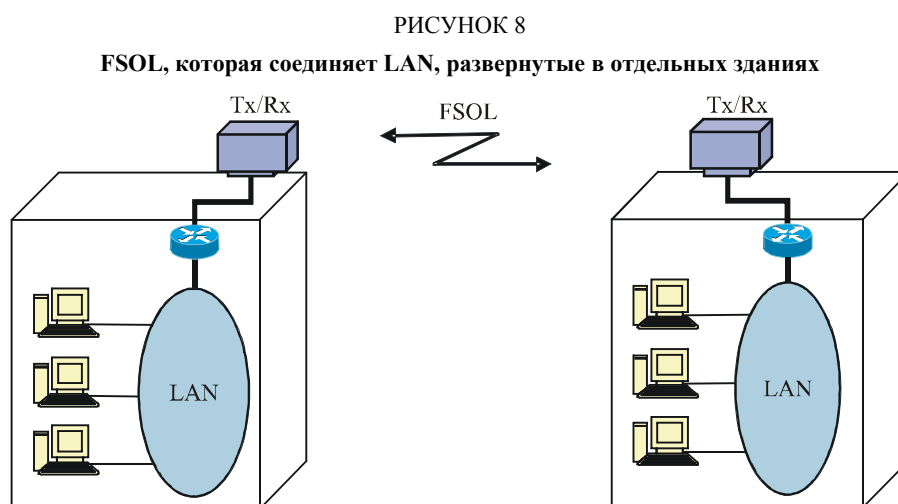
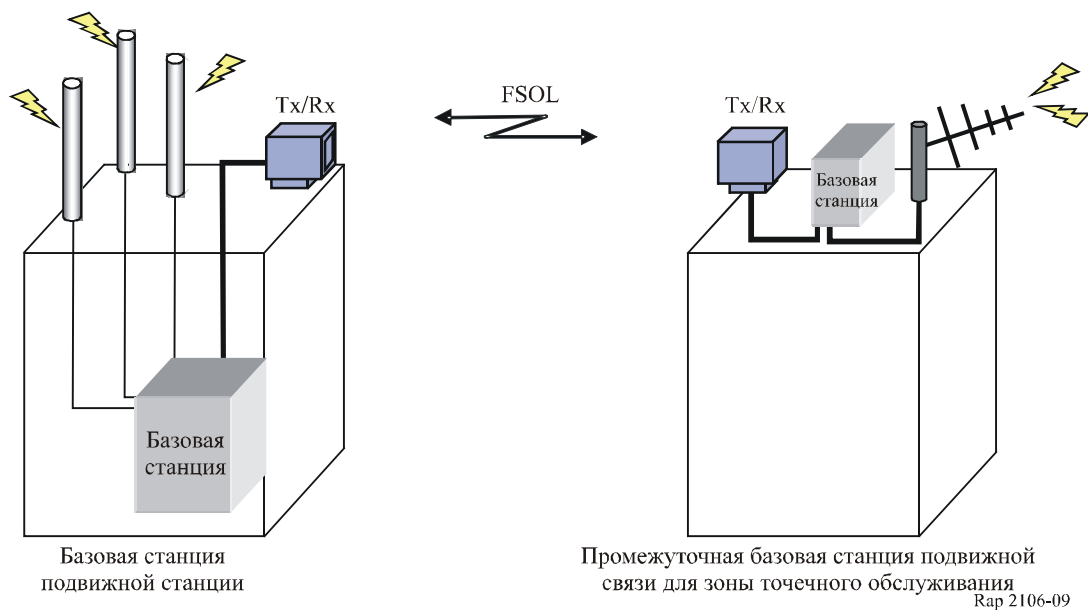


РИСУНОК 9

FSOL для расширения инфраструктуры подвижной связи



4.3 Примеры фактического развертывания

В настоящем пункте приводится пример развертывания FSOL, которая в сочетании с волоконно-оптическими системами обеспечивает решение для широкополосной локальной сети.

На рисунке 9 изображена конфигурация школьной сети, предназначенной для высокоскоростного доступа в интернет, в которой используется FSOL в сочетании с волоконно-оптическими системами. Такая инфраструктура широкополосной сети развернута во многих школах с использованием различных сред передачи: от спутниковой, волоконно-оптической, фиксированного беспроводного доступа до FSOL. В Японии FSOL используются в качестве линий связи более чем в 100 школах.

Имеются случаи, когда одно здание используется для радиорелейного оборудования, обеспечивающего расширенные линии к нескольким школам. Создание таких ответвлений легко реализуется с использованием сигнала той же частоты/длины волны. Параметры системы для FSOL, изображенной на рисунке 10, приведены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2

Параметры FSOL

Максимальная длина линии (км)	Порядка 2 ⁽¹⁾
Пропускная способность (Мбит/с)	300
Запас на ослабление (дБ)	20
Оптическое устройство (диапазон длин волн)	Лазерный диод/Si-APD (диапазон 0,8 мкм)
Кабельный интерфейс	Волоконно-оптический 1,3 мкм

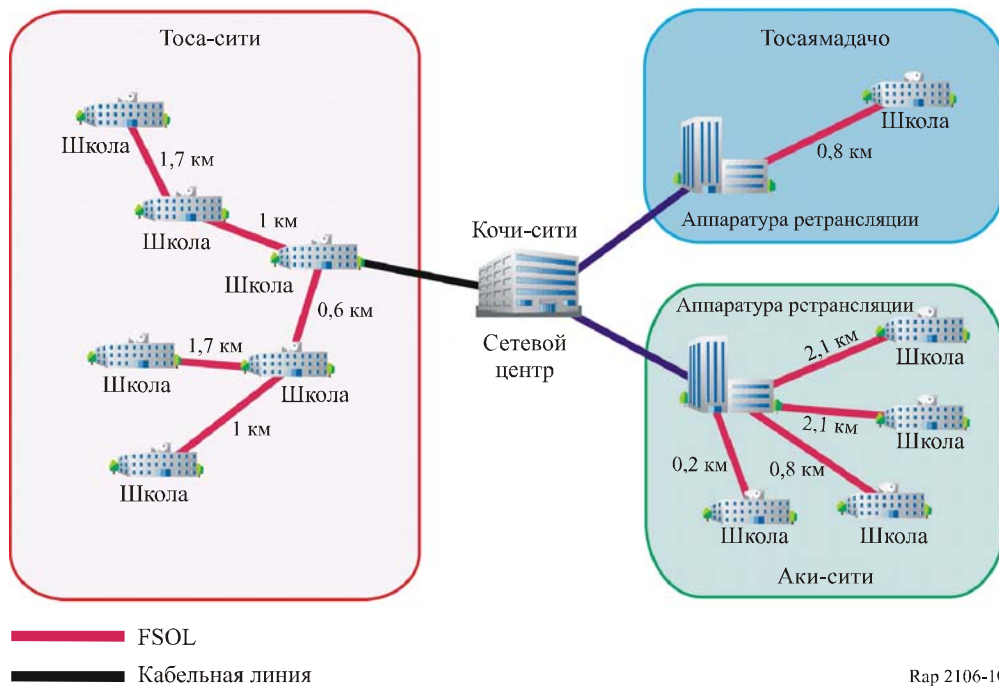
⁽¹⁾ Готовность линии свыше 99%.

APD: лавинный фотодиод.

Проектная готовность линии для FSOL получена на основе статистических данных о видимости, накопленных местной метеорологической службой (см. п. 3.2.1).

РИСУНОК 10

Пример развертывания широкополосной школьной сети с использованием FSOL



Rap 2106-10

5 Соображения, касающиеся проектирования линии

5.1 Запас на линии

Одним из важных параметров, которые необходимо знать при передаче с использованием FSO, является запас на линии лазерной связи. Необходимые параметры оборудования для использования в моделях прогнозирования включают в себя (неполный перечень):

- мощность передачи;
- чувствительность приемника;
- площадь захвата приемника;
- расходимость луча передатчика.

Запас на оптической линии связи – это имеющаяся мощность, превышающая чувствительность приемника. Он определяется следующим соотношением:

$$M_{link} = E_p + |S_s| - Att_{Geo} - Att_{mol} - Sl, \quad (15)$$

где:

- M_{link} : запас на линии (дБ);
- E_p : мощность излучаемого сигнала (дБм);
- S_s : чувствительность (дБм);
- Att_{Geo} : геометрическое ослабление на линии (дБ);
- Att_{mol} : молекулярное ослабление на линии (дБ);
- S_{loss} : потери в оборудовании (дБ), задаваемые производителем (возможно, умноженные на 2; считаются равными 0 дБ).

Пример:

$$\begin{aligned}
 d &= 271 \text{ м}, \theta = 4 \text{ мрад}, E_p = 12 \text{ дБм}, S_s = -50 \text{ дБм}; \\
 Att_{Geo} &= 21 \text{ дБ}; \\
 Att_{mol} &= 0,11 \text{ дБ}; \\
 S_{loss} &= 0 \text{ дБ}; \\
 M_{link} &= 12 + |-50| - 21 - 0,11 - 0 = 40,89; \\
 M_{link} &= 41 \text{ дБ}.
 \end{aligned}$$

В следующем ниже пункте описываются различные фиксированные виды ослаблений, которые должны учитываться при расчете запаса на линии и некоторых других значений, которые надо знать.

В случае передачи с WDM для умножения скорости передачи данных по той же самой FSOL, возможно, было бы проще использовать приведенное в данном пункте, выше, соотношение для одной длины волны.

5.1.1 Диаметр пятна

Размер пятна представляет собой поверхность фронта волны на расстоянии " d ", соответствующую расходимости рассматриваемого луча, которая определяется следующим соотношением:

$$S_d \approx d \times \tan(\theta), \quad (16)$$

где:

- θ : расходимость луча (полный угол) (рад);
- d : протяженность линии (м);
- S_d : диаметр пятна на расстоянии d (м).

Пример:

$$\begin{aligned}
 d &= 271 \text{ м}, \theta = 4 \text{ мрад} = 0,004 \text{ рад}; \\
 S_d &= 271 \times \tan(0,004) = 1,084; \\
 S_d &= 1,084 \text{ м}.
 \end{aligned}$$

5.1.2 Геометрическое ослабление

Посылаемый передатчиком луч подвержен расходимости (1–3 мрад), и в ячейку приемника поступит только часть передаваемой энергии. Следующее соотношение описывает геометрическое ослабление:

$$Att_{Geo} = \frac{S_{surf}}{S_{capture}} = \frac{\frac{\pi}{4}(d\theta)^2}{S_{capture}}, \quad (17)$$

где:

- S_{surf} : поверхность пятна на расстоянии d ;
- $S_{capture}$: площадь поверхности приемника (Ra);
- θ : расходимость луча (Bd);
- d : расстояние между передатчиком и приемником.

Пример:

$$\begin{aligned}
 S_d &= 0,92 \text{ м}^2, Ra = 0,00785 = 7,85 \times 10^{-3} \text{ м}^2; \\
 Att_{Geo} &= 10 \log_{10} (0,9228 / 0,00785) = 20,70 \text{ дБ}; \\
 Att_{Geo} &= 21 \text{ дБ}.
 \end{aligned}$$

Ослабление переводится в децибелы следующим образом:

$$Att_{dB} = 10 \log_{10}(Aff) . \quad (18)$$

5.1.3 Молекулярное ослабление

Молекулярное ослабление (O₂, H₂, CO₂, O₃, ...) представляет собой хорошо известную составляющую ослабления в атмосфере, а также является частью функции от используемой длины волны. Некоторые типовые (погонные) значения приведены в таблице 3:

ТАБЛИЦА 3
Типовые значения молекулярного ослабления

Длина волны (нм)	Att_{lin} = Конкретное молекулярное ослабление (дБ/км)
550	0,13
690	0,01
780	0,41
850	0,41
1 550	0,01

Молекулярное ослабление для линии рассматриваемой длины задается следующим соотношением:

$$Att_{mol}(дБ) = Att_{lin}(\lambda) * d , \quad (19)$$

где:

- Att_{lin} : погонное молекулярное ослабление;
 d : расстояние между передатчиком и приемником.

Пример:

$$\begin{aligned} d &= 271 \text{ м, } \lambda = 850 \text{ нм, тогда } Att_{lin} = 0,41 \text{ дБ/км;} \\ Att_{mol} &= 0,271 \times 0,41 = 0,111 \text{ дБ;} \\ Att_{mol} &= 0,11 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

5.1.4 Уровень принимаемого сигнала

Уровень принимаемого сигнала – это уровень мощности сигнала, принимаемой приемником на данном расстоянии, и это значение является существенным для процесса установки. Уровень принимаемого сигнала описывается следующим уравнением:

$$R_{level} = Ep - Att_{Geo} - Att_{mol} - S_{loss} , \quad (20)$$

где:

- R_{level} : уровень принимаемого сигнала (дБм);
 Ep : мощность сигнала передачи (дБм);
 Att_{mol} : молекулярное ослабление на линии (дБ);
 S_{loss} : потери в оборудовании (дБ), задаваемые производителем (возможно, умноженные на 2; считаются равными 0 дБ).

Пример:

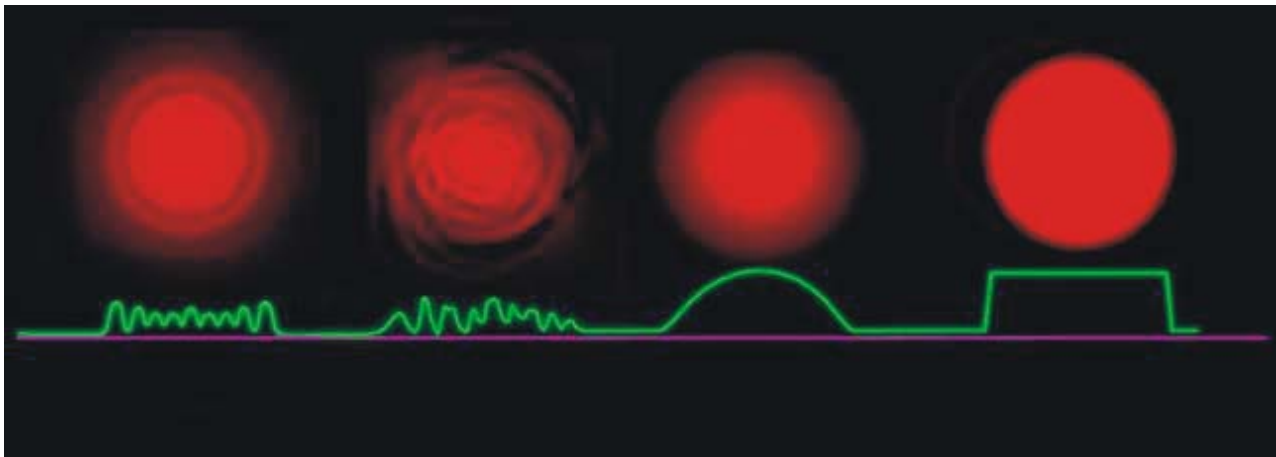
$$\begin{aligned}
 d &= 271 \text{ м, } \theta: 4 \text{ мрад, } E_p: 12 \text{ дБм, } S_s: -50 \text{ дБм;} \\
 Att_{Geo} &= 21 \text{ дБ;} \\
 Att_{mol} &= 0,11 \text{ дБ;} \\
 S_{loss} &= 0 \text{ дБ;} \\
 R_{level} &= 12 - 21 - 0,11 - 0 = -9,11 \text{ дБм;} \\
 R_{level} &= -9 \text{ дБм.}
 \end{aligned}$$

5.1.5 Однородность луча по фронту волны

Одним из факторов, влияющих на однородность луча по фронту волны, является качество используемых источников и оптических устройств. Эти элементы обеспечивают качество проецируемого луча и оценку линии. Теоретически цель заключается в том, чтобы достичь равномерного пятна с однородным распределением мощности (в форме цилиндра) и чтобы разность мощности по фронту волны луча не превышала 3 дБ. На рисунке 11 показаны лучи с разной степенью однородности.

РИСУНОК 11

Различные пятна FSO и их однородность



Rap 2106-11

5.1.6 Запас на единицу расстояния

Для рассматриваемой линии заданной протяженности одним из важных элементов (но не единственным), которые необходимо знать, является запас в пересчете на единицу расстояния, обеспечивающий один из критериев для сравнения терминалов. Этот запас определяется следующим соотношением:

$$L_{margin} \text{ (дБ/км)} = M_{link} / d, \quad (21)$$

где:

- L_{margin} : запас (дБ/км) на единицу расстояния;
- M_{link} : запас на линии (дБ);
- d : расстояние (км).

Пример:

$$d = 0,271 \text{ км}, M_{link} = 41 \text{ дБ};$$

$$L_{margin} = 41/0,271 = 151,29 \text{ дБ/км};$$

$$L_{margin} = 151 \text{ дБ/км}.$$

6 Развертывание FSOL в конкретных климатических районах

Как указано в предыдущем разделе, для FSOL, как правило, требуется довольно большой запас на случай ливней и тумана. Если FSOL развертывается в районах, где дождей практически не бывает, длина линии существенно увеличится. На основе несложного расчета предполагается, что обеспечение запаса в 20 дБ приведет к увеличению длины линии в 10 раз. Однако в таком случае следует учесть влияние ослабления в атмосфере L_{atm} (см. п. 3.1), а также отклонение оптического луча. Эти эффекты, которые возникают, в основном, под влиянием молекулярного поглощения или атмосферной рефракции вследствие изменения температуры, могут приводить к замираниям, вызванным сцинтилляцией, т. е. к флуктуации уровня принимаемого сигнала. Степень флуктуации в пустыне, задаваемая уравнением (14) в п. 3.6, нуждается в дальнейшем изучении. Однако для полупустынных районов Зильберманом и соавторами [12] разработана модель вертикального профиля для Ближнего Востока, описывающая интенсивность рефрактивной турбулентности C_n^2 , которая базируется на большом наборе измерений с помощью лидаров для формирования изображений. Данная модель может применяться к пустынным районам, до тех пор пока в будущем не будет предложена более обобщенная модель.

В качестве действенного средства преодоления данного вида замираний, вызванных сцинтилляцией, может служить разнесенный прием с использованием конструкции с раздельными линзами.

Еще одним вопросом, который требуется рассмотреть, является влияние песчаных бурь в пустыне, которые могут существенно ухудшать условия видимости на пролете между передатчиком и приемником. Пыль и песок, сдуваемые ветром пустыни, состоят из сыпучих мелкозернистых почв (например, содержащих кальций, кремний, алюминий и серу). Влияние песчаной бури на видимость на FSOL зависит от скорости ветра. Несмотря на то, что определенные компьютерные программы способны рассчитывать общий коэффициент передачи (поглощение и рассеяние) в пустынных районах, данный вопрос еще не полностью исследован и, возможно, также нуждается в дальнейшем изучении.

Однако в настоящее время компьютерная программа FASCOD (компании ONTAR), в которой используется модель для пустыни (где аэрозоли представляют собой в высокой степени взвешенные частички песка), может применяться для расчета общего коэффициента передачи (поглощение и рассеяние) в пустынном районе. Необходимыми входными данными является видимость на уровне земли и скорость ветра на высоте 10 м. Пользователь имеет возможность определять свои собственные климатические и аэрозольные модели для расчета ослабления в атмосфере либо использовать измеренное распределение аэрозольных частиц по размерам, объемную и числовую концентрацию, полученную Зильберманом и Копейкой [12] на основе измерений с помощью лидара на разных высотах в средиземноморском регионе (Израиль).

7 Соображения в отношении эксплуатационных аспектов

Оптические линии развертываются в любое время и в любом месте. Это развертывание основано на предположении об отсутствии вероятности того, что потребуются координация с целью предотвращения помех между такими линиями, эксплуатируемыми различными операторами.

В принципе, помеха между FSOL может возникнуть при следующих условиях:

- когда две системы используют одну и ту же частоту (длину волны) либо взаимно близкие частоты (длины волн);
- и в то же время они работают при малом географическом разнесении.

Когда используемые частоты являются взаимно близкими, может возникнуть перекрытие спектров передаваемых оптических волн двух FSOL, приводящее к неприемлемой помехе. В некотором смысле выбор частот (длин волн) может являться вопросом, требующим рассмотрения операторами, для того чтобы не допустить влияния помехи FSOL (см п. 2.3).

Однако помеха никогда не окажет вредного воздействия, если только две линии не будут работать в весьма ограниченных с географической точки зрения условиях. Как отмечалось в п. 3.1, пятно луча световой волны на приемной стороне обычно регулируется таким образом, чтобы его диаметр составлял около нескольких метров при длине линии порядка 1 км. Это означает, что передаваемая мощность FSOL в значительной степени сконцентрирована в узком луче с углом апертуры порядка $0,1^\circ$. С другой стороны, апертура линз на приемной стороне имеет несколько более широкий угол, с тем чтобы гибко адаптироваться к колебанию здания или другим факторам нестабильности. Следует отметить, что мощность оптической волны существенно уменьшится за пределами пятна приемного луча, например, на несколько десятков дБ.

Таким образом, предполагается, что вероятность возникновения проблемы с помехами между различными FSOL операторов мала, если только линии не развернуты параллельно друг другу и на них не используется одна и та же частота (длина волны).

При выборе места расположения станции FSOL операторам возможно потребуется уделять больше внимания влиянию солнечного луча, которое обсуждалось в п. 3.7.

7.1 Время распространения

Еще одной представляющей интерес характеристикой оборудования FSO является скорость передачи цифровых данных, которая теоретически позволяет, например, отказаться от маршрутизатора для линии LAN.

В действительности, большая часть оборудования FSO является прозрачной для протокола передачи. Как правило, содержимое или вид данных не подвергается никакой обработке, что обеспечивает относительно короткое время распространения.

Следующие параметры должны учитываться при расчете времени распространения до момента доступа:

- время электронной обработки данных оборудованием FSO (передатчиком и приемником);
- время распространения света в атмосфере между единицами оборудования А и В (время распространения света в атмосфере: около 3×10^{-9} с/м);
- время распространения до момента доступа, являющееся суммой этих двух параметров;
- пример:
 - длина линии 500 м,
 - скорость передачи данных 155 Мбит/с,
 - примерное время электронной обработки данных оборудованием FSO:
 $3 \times 10^{-7} \times 2 = 6 \times 10^{-7}$ с;
 - время распространения света в атмосфере между единицами оборудования А и В:
 $500 \text{ м} \geq \text{время распространения } 1,5 \times 10^{-6}$ с;
 - время распространения равно: $6 \times 10^{-7} + 1,5 \times 10^{-6} = 2,11 \times 10^{-6}$, т. е. 2,11 мкс.

7.2 Конфиденциальность передаваемых данных

Большинство производителей используют "уникальный" тип амплитудной модуляции для передачи данных с помощью лазера. Как правило, протокол передачи бывает прозрачным, но возможности для "взлома" довольно ограничены.

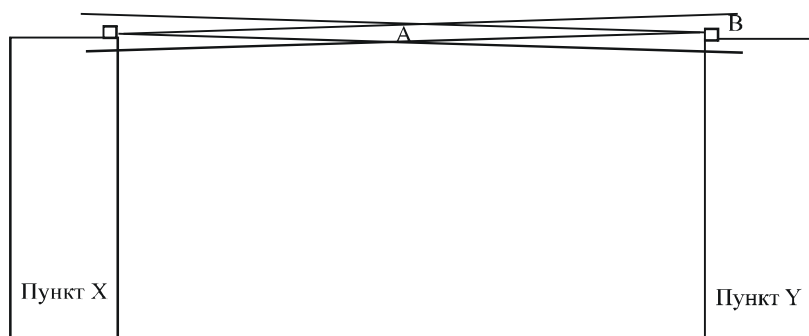
Помимо любого непосредственного воздействия на оборудование или доступа к нему существуют только два решения, позволяющие физическому лицу "восстановить" переданные данные, при наличии важных технических навыков и сложных критериев вмешательства.

Взлом информации возможен только в том случае, если физическое лицо выполняет следующие действия:

- 1 Приобретение того же самого оборудования FSO от того же производителя, сбор и декодирование данных.
- 2 Осуществление "сбора" данных от части луча, который, однако, является чрезвычайно направленным. Требуется также "собрать" достаточное количество энергии, чтобы обработать эти данные (рисунок 12):
 - либо в точке А между двумя пунктами, чтобы получить данные, передаваемые только из пункта X или из пункта Y. При этом существует дополнительная трудность, которая заключается в том, чтобы не допустить прерывания луча;
 - либо, например, в точке В позади пункта Y, чтобы получить данные, передаваемые из пункта X. При этом надо учитывать, что ослабление сигнала имеет чрезвычайно большое значение при удалении от источника;
 - либо, например, в точке В перед оборудованием пункта Y, чтобы получить данные, передаваемые из пункта Y. При этом существует дополнительная трудность, которая заключается в том, чтобы не допустить прерывания луча.
- 3 И наконец, последняя трудность заключается в том, чтобы узнать протокол передачи, для того чтобы суметь понять собранные данные.

РИСУНОК 12

Для сбора битов данных, передаваемых из пунктов X или Y, хакер должен "собрать" часть энергии лучей



Rap 2106-12

7.3 Руководящие указания по реализации FSOL

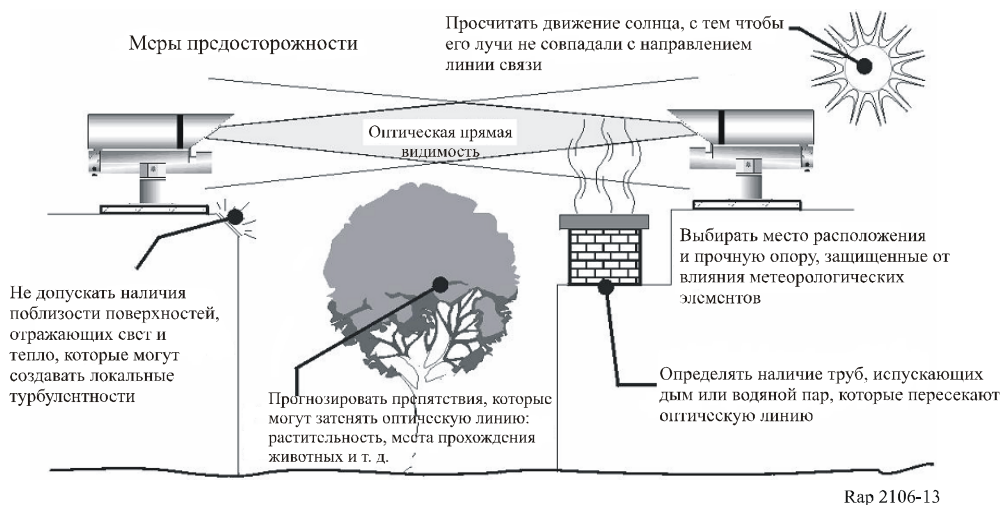
7.3.1 Процесс установки оборудования FSO

Как правило, оборудование FSO устанавливается таким же способом, как и оборудование системы фиксированной беспроводной связи:

- процесс технического проектирования линии (например, с помощью программного обеспечения "Прогнозирование FSO"), для того чтобы определить ее готовность;
- установка на высшей точке (здание, опора, водонапорная башня, ...);
- наличие прямой видимости при отсутствии препятствий на действующей или будущей траектории распространения;
- время установки меньше одного дня на линию.

Однако в зависимости от данной конкретной технологии в процессе установки должны учитываться некоторые факторы и приниматься меры предосторожности (рисунок 13).

РИСУНОК 13

Меры предосторожности при установке FSO

При заданных характеристиках оборудования (малая расходимость лазерного луча) необходима очень точная ориентация. Соединение по оптической линии характеризуется взаимной ориентацией передатчика и приемника. Механические вибрации могут привести к обрыву соединения. Установщик системы связи должен:

- осуществлять крепление материалов к неподвижной опоре или к несущей стене, чтобы она как можно меньше подвергалась вибрациям или ударам (край стены, сторона стены, ...);
- не допускать непосредственной ориентации оптических устройств в направлении на солнечные лучи;
- не допускать наличия поблизости элементов конструкции, которые могут способствовать образованию атмосферной турбулентности (труба, отражающая поверхность, ...).

7.3.2 Пример процесса ориентации оборудования FSO

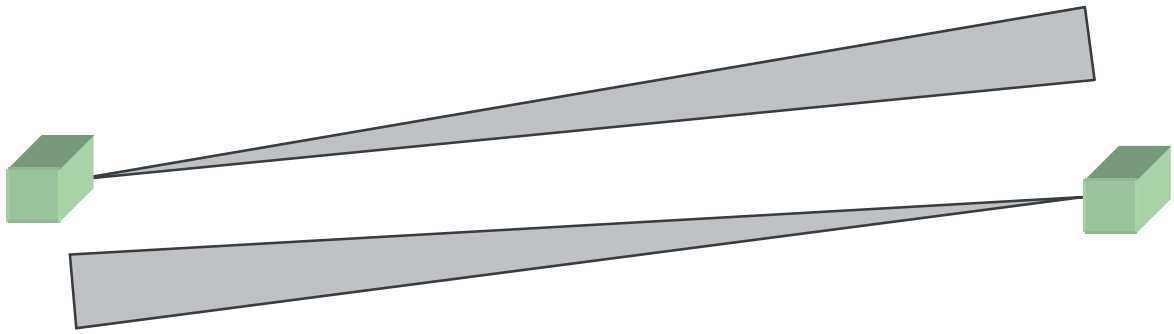
Процесс ориентации оборудования FSO может осуществляться на основе некоторых предварительно рассчитанных значений, например:

- уровень принимаемого сигнала;
- диаметр пятна.

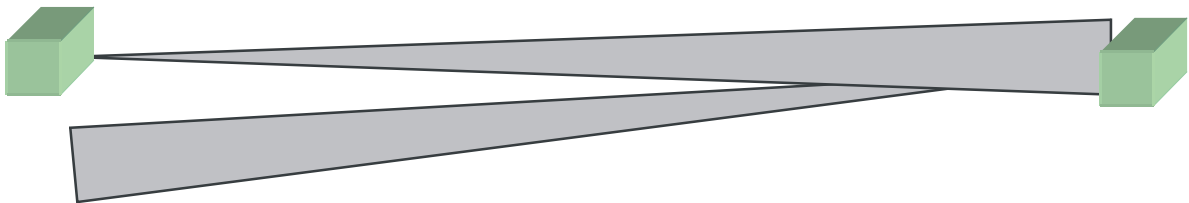
Первый уровень ориентации осуществляется на обеих сторонах зрительно по высоте и азимуту.

Точная ориентация должна осуществляться с помощью камеры, звукового уровня, звуковой частоты и показаний измерителя мощности, и должны выполняться следующие шаги (см. рисунки 14 и 15).

РИСУНОК 14
Пример процесса ориентации



а) Ориентация луча FSO на стороне 1 по отношению к приемнику FSO на стороне 2



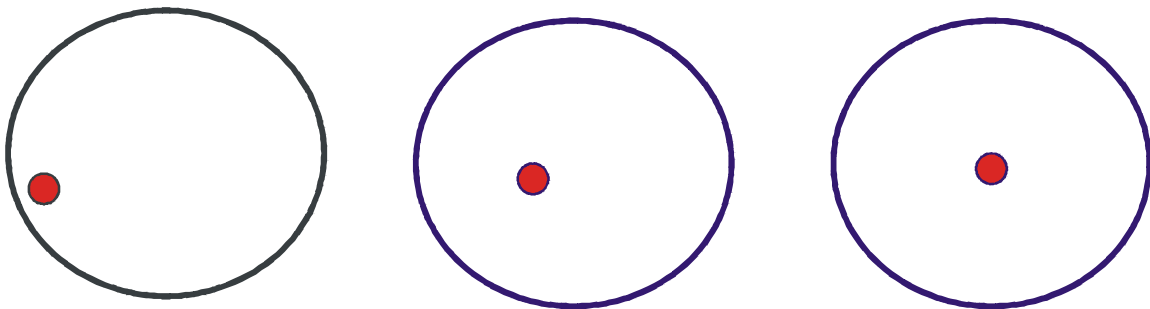
б) Ориентация луча FSO на стороне 2 по отношению к приемнику FSO на стороне 1



с) Дополнительное точное центрирование фронта волны луча (по высоте и азимуту) в месте расположения станции 1 (изображено фиолетовым цветом) относительно площади приемника (Ra) (изображено красным цветом) в месте расположения станции 2, и наоборот

Rap 2106-14

РИСУНОК 15
Процесс точной ориентации



Rap 2106-15

7.4 Наличие многих FSOL

В случае, когда на одной и той же длине волны и с одинаковым уровнем приема реализовано много FSOL, должны соблюдаться следующие меры предосторожности, чтобы не допустить появления битов с ошибкой:

- минимальный разнос по диаметру пятна между двумя параллельными или почти параллельными FSOL в два раза важнее, чем диаметр пятна на более короткой FSOL;
- минимальный угловой разнос между двумя FSOL в два раза важнее, чем полный угол расходимости луча на более короткой FSOL;
- следует отметить, что по данному вопросу ИК 15 МСЭ-Т разработана Рекомендация МСЭ-Т G.640 – Находящиеся в одном и том же месте продольно совместимые интерфейсы для оптических систем в свободном пространстве.

8 Резюме

В настоящем Отчете рассматриваются характеристики FSOL для применений ФС, а также их технические/эксплуатационные требования. В изложенных в предыдущих разделах соображениях акцентируется внимание на FSOL для применений фиксированной службы, а также отмечается, что имеются другие типы FSOL, например, относящиеся к подвижной службе или космическим службам. К числу вопросов, нуждающихся в дальнейшем изучении или требующих учета, можно было бы отнести следующее:

- тенденции развития технологий в области оптических устройств;
- расширение применений ФС;
- совместимость, при необходимости, с FSOL для применений других служб радиосвязи.

Дальнейшие исследования могут охватывать предназначенные для работы вне помещений системы FSO для связи со многими пунктами, предназначенные для работы внутри помещений системы FSO для связи пункта с пунктом и пункта со многими пунктами, а также процессы испытаний и измерения.

Справочные документы

- [1] G. Nykolak, *et al.*, "4 X 2.5 Gb/s 4.4 km WDM free-space optical link at 1 550 nm," in Proc. OFC'99, PD11, 1999.
- [2] Y. Aburakawa, "Dense wavelength division multiplexed optical wireless link towards terabit transmission," in Proc. Of MWP'03, pp. 135, 2003.
- [3] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 60825-1 standard, "Safety of laser products".
- [4] G. Mie, Ann. Physik., Vol. 25, pp. 377-445, 1908.
- [5] K. Morita, *et al.*, "Light wave attenuation in propagation through the atmosphere," Review of Electrical Communications Labs., Vol. 19, No. 714-725, pp. 798-842, 1971.
- [6] Final Approach Visibility Studies, 1955, U.S. Weather Bureau.
- [7] Y. Aburakawa, *et al.*, "Experimental evaluation of 800-nm band optical wireless link for radio access network," IEICE Trans. Electron., Vol. E86-C, pp. 1 175-1 183, No. 7, 2003.
- [8] J.S. Marshal and W.M. Palmer, "The distribution of raindrops with size", Journal of the Meteorology, Vol. 5, No. 6, pp. 165, 1948.
- [9] K. Morita, and I. Higuchi, "Statistical studies on electromagnetic wave attenuation due to rain," Review of Electrical Communications Labs., Vol. 19, No. 7-8, pp. 798-842, 1971.

- [10] N. Hiromoto, "Novel detector technologies for infrared communication and sensing, CRL International Topic Workshop on Space Laser Communication Current Status and Future Perspectives, pp. 90-95, 1997.
- [11] M. Akiba, *et al.*, "Measurement of optical propagation characteristics for free-space optical communication during rainfall", IEICE Trans. Commun., Vol. E87-B, No. 7 July 2004.
- [12] Zilberman A., Kopeika N. S., "Aerosol and turbulence characterization at different heights in semi-arid regions", Proc. SPIE Vol. 5891, p. 129-140.
- [13] P. Bataille, "Analyse du comportement d'un système de télécommunication optique fonctionnant à 0,83 micron dans la basse troposphère", Thèse, Université Rennes, 1992.
- [14] H. Vasseur, *et al.*, "Influence de la troposphère sur les liaisons sans fil aux ondes millimétriques et optiques", Propagation électromagnétique du décimétrique à l'angström, 3ièmes journées, Rennes 1997.
- [15] T.H. Carbonneau, D.R. Wiseley, "Opportunities and challenges for optical wireless; the competitive advantage of free-space telecommunications link in today's crowded marketplace", SPIE Conf. on optic. Wireless Com., Boston, USA, Vol. 3232, 1998.

Приложение 1

Примеры энергетического потенциала линии связи

1 Пример энергетического потенциала линии связи

Расчет энергетического потенциала линии связи для FSOL осуществляется, в основном, на основе требуемой готовности линии с учетом характеристик распространения в том месте, где разворачивается линия.

В таблице А1-1 указаны примеры системных параметров для двух типов FSOL. В обеих системах применяется лазерный диод (LD) с одинаковой мощностью передачи. Кроме того, потери на расходимость луча, L_p , выбираются равными значению 24 дБ. Потери на расходимость луча составляют основные потери на линии между передатчиком, Tx, и приемником, Rx, для FSOL, т. е. потери в свободном пространстве минус усиления антенн в случае электрической волны. Теоретическое значение L_p выражается следующей формулой:

$$L_p = (A_r / w_r)^2 L_{atm}, \quad (A-1)$$

где:

w_r : диаметр пятна луча передаваемого светового сигнала на расстоянии r (длина линии);

A_r : эффективная апертура приемной линзы.

Параметры w_r и A_r могут подстраиваться путем регулировки сходимости в оптических линзах, установленных в передатчике или приемнике. Потери в атмосфере, L_{atm} , обычно считаются незначительными, как отмечено в п. 3.1.

Требуемая мощность принимаемого сигнала выводится на основе расчета L_p , с добавлением необходимых запасов, учитывающих влияние тумана и ливня. В приведенных в таблице А1-1 примерах проектируемый общий запас составляет около 22 дБ для обоих типов линий.

Как видно, две FSOL разной длины могут работать при равных мощностях передачи и потерях на расходимость луча, и при этом их показатели отказов будут довольно сильно различаться.

Следует отметить, что коэффициент отказов на линии, равный 0,1% для линии первого типа, может быть неприемлем для соединений в сети общего пользования, например КТСОП или ЦСИС. С другой стороны, FSOL второго типа, которая имеет гораздо меньший коэффициент отказов, может служить в качестве системы фиксированного беспроводного доступа, подсоединенной к базовым сетям общего пользования.

ТАБЛИЦА A1-1

Пример расчета энергетического потенциала линии связи для FSOL

Параметры	Тип 1	Тип 2
Длина линии (м)	900	350
Пропускная способность линии (Мбит/с)	622,08	
Требуемый BER	BER = 10^{-9}	
Коэффициент отказов на линии	0,1% (около 9 ч/год)	0,004% (около 20 мин/год)
Мощность передачи (на выходе LD: номинальная)	13 дБм (20 мВт)	
Вносимые потери Tx (дБ)	3	
Потери на расходимость луча (дБ)	24	
Вносимые потери Rx (дБ)	3	
Запас на туман (Примечание 1) (дБ)	14,0	15,5
Запас на ливень (Примечание 1) (дБ)	8,0	6,5
Чувствительность приемника (дБм)	-40	

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Исходя из статистических данных, которые наблюдались в Токио [7] [9].

2 Пример прогнозирования готовности линии FSO

Одним из важных параметров, которые необходимо знать при передаче с использованием FSO, является запас на линии FSO. Действительно, если взять, например, оборудование радиооператора или радиорелейные системы, то знание запаса на данной линии является вопросом первостепенной важности. При установке линии математические модели позволяют рассчитать готовность линии в течение одного года или, например, в течение наиболее неблагоприятного месяца.

На первом шаге предстоит узнать запас на линии. Данный параметр позволяет определить пропускную способность лазерного оборудования для передачи цифровых данных, несмотря на изменения погодных условий.

Необходимые параметры оборудования для использования в моделях прогнозирования включают в себя (неполный перечень):

- мощность передатчика;
- чувствительность приемника;
- площадь захвата приемника;
- расходимость луча передатчика.

На основе этих данных можно, например, определить значение геометрического ослабления, а также запас на линии и, наконец, готовность.

2.1 Некоторые примеры запаса на линии

В таблице ниже приведены некоторые примеры расчета запаса на линии для трех видов типового оборудования. Расчеты выполнены для расстояния 500 м, при этом молекулярное ослабление не берется в расчет. Эти запасы на линии (данные приведены в качестве примера) являются базовыми параметрами для дальнейшего прогнозирования ослабления лазерного сигнала под влиянием климатических явлений (тумана, дождя, снега, сцинтилляции, ...).

ТАБЛИЦА А1-2

Пример трех запасов на линии

Мощность излучения (дБм)	10	13	26
Чувствительность (дБм)	-35	-40	-36
Геометрическое ослабление (дБ) ($D = 500$ м)	26	17	18
Потери в системе (дБ)	1	2	0
Запас на линии (дБ)	18	34	44

2.2 Готовность и качество обслуживания

В данной части представлен конкретный пример исследования в части качества обслуживания (QoS) на заданной линии с использованием характеристик трех типов оборудования FSO.

В этом примере были рассмотрены следующие параметры:

- протяженность линии: 500 м;
- производитель: три производителя из разных стран (А, В и С);
- оборудование: волоконно-оптический интерфейс СЦИ со скоростью 155 Мбит/с;
- модель: были использованы модели компании France Telecom, с помощью которых определяется ослабление в аэрозолях (тумане), являющееся наиболее мешающим ослаблением для FSOL;
- место расположения станции: исследуется только одно место в Ренне (Франция).

Исследование QoS является процессом, который осуществляется в три этапа; в соответствии с этим данный процесс можно частично или полностью компьютеризировать.

2.2.1 Пример расчета минимальной видимости

Рассматривается линия длиной 500 м с интерфейсом 155 Мбит/с. Значение минимальной видимости определяется на основе погонного запаса на линии путем применения модели France Telecom для ослабления.

ТАБЛИЦА А1-3

Пример расчета трех значений минимальной видимости

	Оборудование А	Оборудование В	Оборудование С
Длина волны (нм)	690	850	1 550
Протяженность линии (м)	500	500	500
Мощность передачи (дБм)	10	13	26
Чувствительность (дБм)	-35	-40	-36
Геометрическое ослабление (дБ)	25,94	17,4	18,59
Молекулярное ослабление (дБ)	0,05	0,205	0,05
Потери в системе (дБ)	0	0	0
Запас на линии (дБ)	19	35	43
Погонный запас (дБ/км)	38	71	87
Значение минимальной видимости (м)	470	250	210

2.2.2 Пример метеорологических статистических данных

На основе метеосводок, представленных Météo France для города под названием Ренн, содержание которых составляет ежечасная информация о проценте прозрачности тумана, синтезированы данные за продолжительный период времени; были построены графики, отражающие накопленный процент прозрачности тумана за три периода времени:

- с 8 до 20 часов;
- с 20 до 8 часов;
- за весь день с 0 до 24 часов.

В этих метеосводках содержатся следующие характеристики:

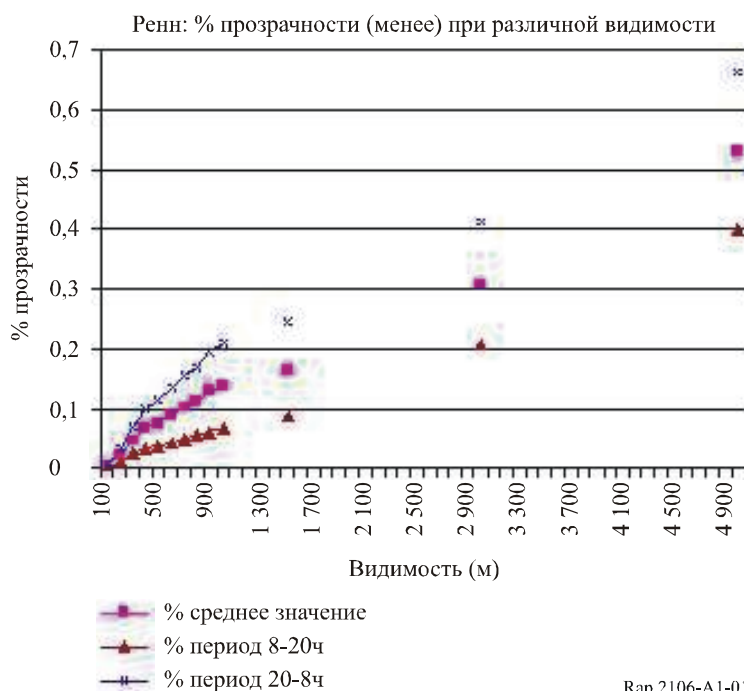
- почасовая видимость;
- расстояние от 100 до 5000 м;
- период с 1992 по 2002 год;
- свыше 73 000 наблюдений;
- накопленный процент прозрачности тумана;
- три периода почасовых наблюдений.

На графике изображены три кривые, для которых имеем:

- по оси X: минимальное значение видимости (м) (т. е. плотность тумана);
- по оси Y: процент прозрачности тумана при различной минимальной видимости (%).

РИСУНОК А1-1

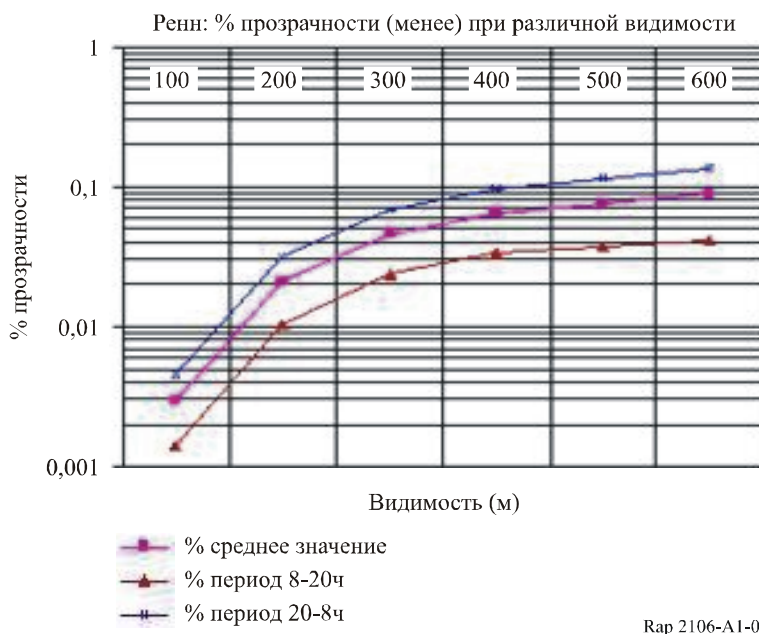
Процент прозрачности тумана при заданном значении видимости



Для лучшей наглядности ось X представлена в логарифмическом масштабе.

РИСУНОК А1-2

Процент прозрачности тумана при заданном значении видимости (логарифмический масштаб)



2.2.3 Пример расчета готовности линии

FSOL оказывается неготовой, когда плотность тумана выше запаса на линии. Используя метеорологические графики, можно выяснить процент времени, в течение которого FSOL будет неготовой. Соответственно, исследуется готовность рассматриваемой FSOL, выраженная в процентном отношении и в количестве часов (или минут) в год. Для исследования неготовности FSOL берется значение минимальной видимости для каждого оборудования (по оси X) и

определяется процентное значение прозрачности тумана. Зная данное значение, можно оценить неготовность FSOL, которая будет меньше этого значения.

В приведенных ниже таблицах представлены процентные значения прозрачности и значения неготовности для каждого типа оборудования.

ТАБЛИЦА А1-4

Сравнение видимости и периодов

% прозрачности		Оборудование А	Оборудование В	Оборудование С
Значение минимальной видимости (м)		342	184	150
Приближенное вычисление по модели	День	0,052	0,015	0,008
	8-20 ч	0,028	0,007	0,004
	20-8 ч	0,08	0,022	0,012

Соответственно, определяются готовность рассматриваемой FSOL, выраженная в процентном отношении и в количестве часов (минут) в год. В отношении рассматриваемого места расположения станции см. таблицу А1-5.

ТАБЛИЦА А1-5

Готовность линии в месте расположения станции в Ренне для трех различных единиц оборудования А, В и С

Оборудование А	% готовности	Неготовность – кол-во часов/год
Год	99,948	4,56
Период с 8 до 20 часов	99,972	1,23
Период с 20 до 8 часов	99,920	3,50

8 760 часов = 1 год

Оборудование В	% готовности	Неготовность – кол-во часов/год
Год	99,985	1,31
Период с 8 до 20 часов	99,993	0,31
Период с 20 до 8 часов	99,978	0,96

8 760 часов = 1 год

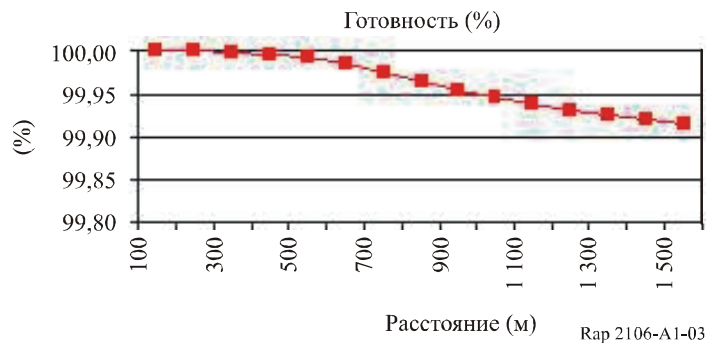
Оборудование С	% готовности	Неготовность – кол-во часов/год
Год	99,992	0,70
Период с 8 до 20 часов	99,996	0,18
Период с 20 до 8 часов	99,988	0,53

2.2.4 Пример расчета готовности в зависимости от протяженности линии

Еще один метод заключается в представлении QoS в виде зависимости от протяженности FSOL для рассматриваемого места расположения станции.

РИСУНОК A1-3

Готовность для района Ренна в зависимости от протяженности



В связи с данным примером следует сделать три важных замечания:

- QoS на FSOL имеет весьма сильную зависимость от местных метеоусловий (например, тумана), и существенное значение приобретает применение к этим климатическим данным методов обработки данных.
- Управление QoS зависит от протяженности линии (при одинаковых метеоусловиях), и изменения или улучшения данного параметра можно было бы добиться путем выбора оборудования или производителя. Например, как следует из предыдущего рисунка, если в Ренне требуется обеспечить QoS выше 99,95%, то необходимо, чтобы длина FSOL не превышала 900 м.
- Данный процесс и другие процессы, связанные с климатическими параметрами, можно компьютеризировать.

Приложение 2

Сравнение рекомендаций МСЭ-R и программного обеспечения "Прогнозирование FSO", предназначенного для определения качества обслуживания (по результатам проведенного во Франции эксперимента)

1 Введение

Оператором (FSO 04) выполнена оценка пропускной способности изделий для FSO и разработано собственное программное обеспечение "Прогнозирование FSO". Для достижения этих целей предусматривалось провести эксперимент, позволяющий сопоставить пропускные способности оборудования FSO с метеоданными. Исследование проводилось в месте расположения станции France Telecom около Тулузы, на протяжении приблизительно шесть месяцев (12.01.2004 – 31.05.2005 гг.), во время зимнего сезона, который является наихудшим сезоном для изделий, в которых используется технология FSO для передачи числовых данных.

Определены две цели:

- Сопоставить результаты использования программного обеспечения "Прогнозирование FSO" с данными испытаний на практике на протяжении одного достаточно длительного периода, с тем чтобы отойти от соответствующих статистических данных.
 - Статистический анализ направлен главным образом на исследование наиболее неблагоприятных явлений для оптической линии, т. е. ослабления в тумане и ослабления в атмосфере.
 - Проверить обоснованность результатов при других явлениях ослабления и с использованием данных полевых испытаний.
- Сопоставить результаты, полученные для линии FSO, с показателями из рекомендаций МСЭ-R на базе СВЧ-линии:
 - Рекомендации МСЭ-R F.1703 – Показатели готовности для реальных цифровых радиорелейных линий, используемых на гипотетических эталонных трактах и соединениях длиной 27 500 км;
 - Рекомендации МСЭ-R F.1668 – Показатели качества по ошибкам для реальных цифровых фиксированных беспроводных линий, используемых на гипотетических эталонных трактах и соединениях протяженностью 27 500 км.

После краткого представления характеристик места расположения станции, в котором проводился эксперимент, и оборудования FSO делается небольшое вступление, посвященное программному обеспечению "Прогнозирование FSO" для определения качества обслуживания по модели оптической линии, разработанному научно-исследовательским подразделением France Telecom.

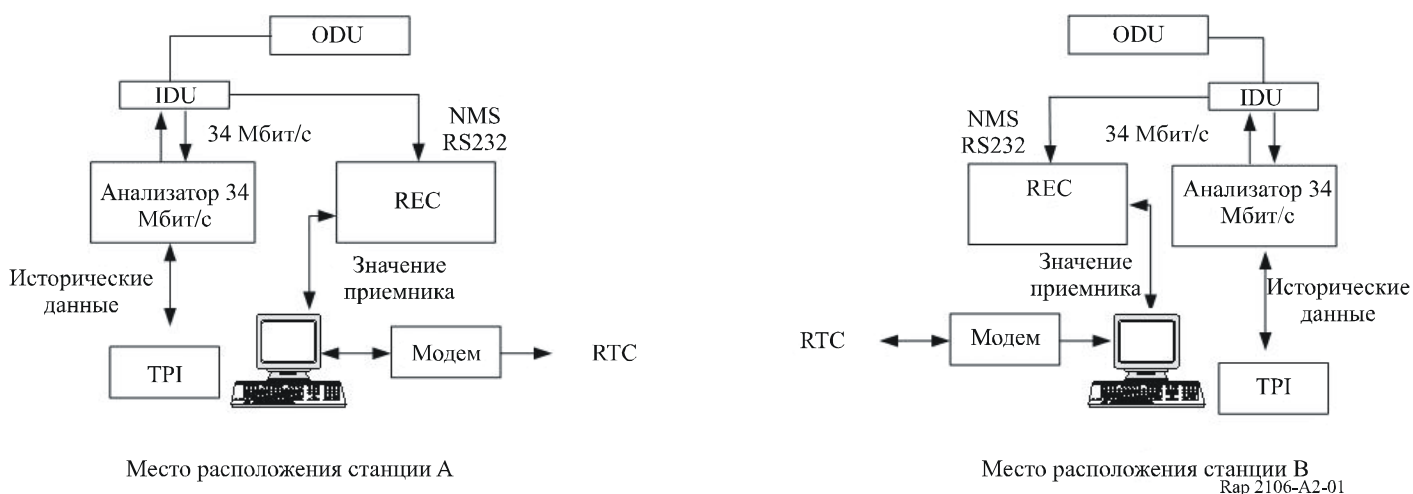
Полученные с использованием программного обеспечения результаты далее сравниваются с данными оптической линии и метеоданными, собранными за рассматриваемый период, с тем чтобы достичь этих двух целей.

2 Полевое испытание FSOL

2.1 Характеристики места расположения станции и оборудования

РИСУНОК A2-1

Характеристики линии



Место расположения станции А

Место расположения станции В
Rap 2106-A2-01

Описание оборудования на каждой станции:

- Оборудование FSO (ODU – блок для использования вне помещений и IDU – блок для использования внутри помещений) передает двунаправленные кадры ПЦИ на расстояние приблизительно 270 м (0,2 мили) между двумя зданиями, обозначенными А и В.
- Анализатор передачи кадров ПЦИ под названием "Виктория" записывает каждую секунду возможные ошибки или информацию о неблагоприятных условиях и передает результаты на компьютер каждые 15 минут по соединению RS-232. Данный вид анализа проводится на двух направлениях. Среди записанных данных отбираются и объединяются:
 - ES: секунда с ошибкой (бит с ошибкой);
 - SES: секунда со значительным количеством ошибок;
 - неготовность.
- Собственное программное обеспечение по контролю каждую минуту регистрирует уровень принимаемого сигнала (чувствительность) и непрерывно передает данные компьютеру.
- На случай проблемы установлен аварийный модем с часами реального времени, работающий с помощью программного обеспечения "PC anywhere".
- Метеоданные поступают с французской метеостанции, расположенной в аэропорту Бланьяка (менее 500 м (около 0,4 мили) от места расположения станции France Telecom), в котором проводится эксперимент. Данные передаются каждую неделю по электронной почте и определяются с помощью следующих измерительных приборов:
 - трансмиссометра, определяющего значение видимости (все значения с частотой раз в минуту, приблизительно 40 000 значений в месяц);
 - плювиометра, дающего показания интенсивности осадков (максимальное значение с частотой раз в 6 минут);
 - снегомера, показывающего интенсивность выпадения снега (максимальное значение);
 - пиранометра, измеряющего интенсивность света (максимальное значение).

2.2 Проектирование линии

2.2.1 Технические данные

FSOL организуется с использованием двух единиц терминального оборудования (каждое с блоками ODU и IDU), направленных друг на друга и обеспечивающих двунаправленное соединение ПЦИ на расстоянии приблизительно 270 м. Существенное значение имеет некоторая информации [BOU 06] относительно структуры установки линии, а именно:

- запас на линии,
- уровень принимаемого сигнала,
- диаметр пятна.

2.2.2 Эксплуатационные данные

Данные, измеренные на линии в каждом направлении после процесса установки, представлены в таблицах А2-1 и 2:

ТАБЛИЦА А2-1

Чувствительность в направлении от А к В

Направление: от А к В	Уровень принимаемого сигнала	Теоретический	-9 дБм
		Фактический	-11 дБм⁽¹⁾
	Запас на линии	Теоретический	41 дБ
		Фактический	39 дБ

⁽¹⁾ Разницу в 2 дБ, вероятно, можно уменьшить с помощью более точного наведения.

ТАБЛИЦА А2-2

Чувствительность в направлении от В к А

Направление: от В к А	Уровень принимаемого сигнала	Теоретический	-9 дБм
		Фактический	-16 дБм⁽¹⁾
	Запас на линии	Теоретический	41 дБ
		Фактический	34 дБ

⁽¹⁾ Разница в 5 дБ между двумя направлениями намеренно сохранена, с тем чтобы исследовать чувствительность, определяющую запас, в сравнении с критериями готовности и качеством обслуживания.

3 Программное обеспечение для моделирования

Программное обеспечение "Прогнозирование FSO" V3.00 позволяет:

- рассчитывать проект оптической линии для любой географической точки;
- рассчитывать готовность данной линии для любой точки на территории Франции (в данной версии).

3.1 Окно ввода данных

Значения, соответствующие данным о месте расположения станции, и результаты измерения оборудования FSO записываются в первом окне программного обеспечения "Прогнозирование FSO", которое разделено на шесть блочных разделов: данные о месте расположения станции, оборудование, общие данные о месте расположения станции, общие данные оборудования, окружающая среда и информация. Далее запускается процесс вычисления, позволяющий определить различные параметры линии и установить QoS и готовность на основе метеосводок.

РИСУНОК А2-2

Окна ввода данных

Rap 2106-A2-02

3.2 Окно отчета

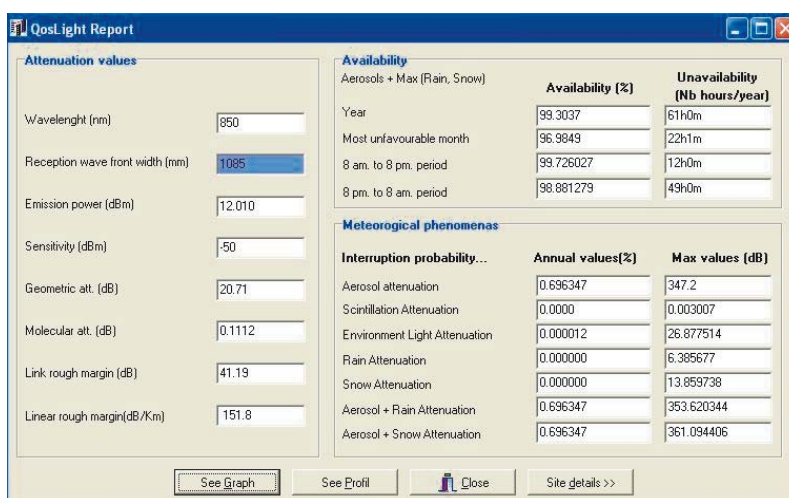
В окне отчета показываются:

- Блочный раздел по готовности.
 - Готовность в течение года 99,3037% соответствует прерыванию связи в течение 61 часа.
 - Готовность в течение наиболее неблагоприятного месяца 96,9849% соответствует 22 часам прерывания связи, что составляет 36% от годового объема времени прерывания связи.

- Готовность в течение дня 99,7260% соответствует 20% от суточного объема времени прерывания связи.
- Готовность в течение ночи 98,8813% соответствует 80% от суточного объема времени прерывания связи.
- Блочный раздел по метеорологическим явлениям.
 - Влияние тумана 0,696347%, соответствует 99,9982% от объема явления.
 - Влияние общей освещенности 0,000012% соответствует 0,0018% от объема явления.
- Влияние сцинтилляции, дождя и снега отсутствует.

РИСУНОК А2-3

Окно отчета



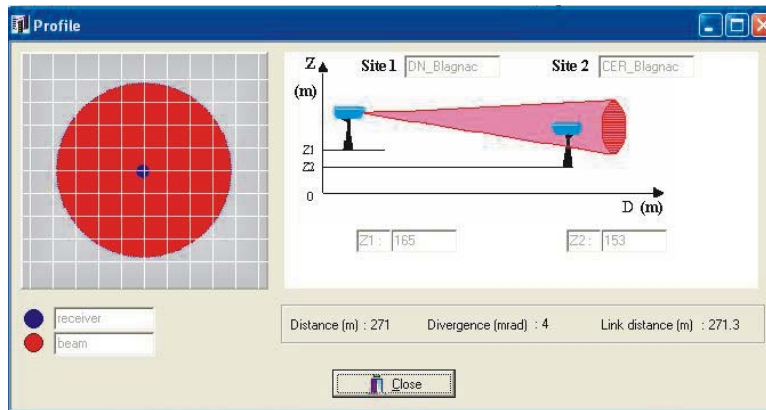
Rap 2106-A2-03

3.3 Окно профиля

В данном окне обозначаются эти два места расположения станции и разница между пятном луча в приемнике и площадью поверхности приемника. Это отношение определяется путем деления размера пятна луча на площадь поверхности приемника и равно $1085/100 = 10,85$. Данное значение указывает на то, что:

- это важная пропорция, позволяющая достичь наведения двунаправленной линии при хороших условиях;
- имеется хорошая сопротивляемость явлениям вибрации или колебания опор (зданий).

РИСУНОК А2-4
Окно профиля



Rap 2106-A2-04

4 Сравнение результатов

В настоящей главе приводится сравнение данных, собранных в ходе шестимесячного эксперимента, критерия готовности и QoS со значениями, полученными с помощью программного обеспечения.

4.1 Сравнение данных программного обеспечения "Прогнозирование FSO" с фактическими данными линии FSO и французской метеостанции

4.1.1 Ослабление в аэрозоле (тумане)

Проводится анализ и сравнение трех формул для ослабления в аэрозоле или тумана, с тем чтобы проверить модели, которые определены Ал-Набулси и соавторами и включены в программное обеспечение "Прогнозирование FSO".

К числу этих трех моделей относятся:

- модель Кима и соавторов,
- модель адвективного тумана для дневного периода Ал-Набулси и соавторов, и
- модель радиационного тумана для ночного периода Ал-Набулси и соавторов.

Пример ослабления в радиационном тумане (см. уравнение (3) в п. 3.2.2 в основном тексте)

$$Aff_{fog,d} = 10 \log_{10}(1/\tau(\lambda, d)) = 10 \log_{10}(1/\exp(-\sigma(\lambda)d)) = 10 \log_{10} \exp(\sigma(\lambda)d) = 10 \frac{\ln(\exp(\sigma(\lambda)d))}{\ln 10}.$$

Это эквивалентно следующей формуле: $Aff_{fog,d} = \frac{10}{\ln 10} \sigma(\lambda)d$.

Например, при видимости в тумане 80 м, имеем: $\sigma(850)d = 49,97$ и $Aff_{fog}^* = 217$ дБ/км.

4.1.1.2 Обработка

Данные подвергаются обработке, с тем чтобы обеспечить возможность использования сравнительных моделей, базирующихся на прерывании соединения FSOL. Эти данные выбираются при достаточно густом тумане (данные о видимости из метеосводки), способном вызвать прерывание соединения на оптической линии.

Например, видимость в тумане 100 м эквивалентна ослаблению в аэрозоле порядка 180 дБ/км, что составляет около 49 дБ для протяженности линии. Данное значение выше, чем запас на линии (погонный запас: 124 дБ/км), следовательно, теоретически соединение должно прерваться.

Прерывание соединения из-за тумана должно подтверждаться в системах одного и того же типа времени (ММ:ДД:ГГ–ЧЧ:ММ) посредством файлов данных анализатора передачи (значение неготовности линии) и данных программного обеспечения по контролю за FSO (значение чувствительности – $S < -55$ дБм – эквивалент прерывания соединения во время лабораторных испытаний).

Отбираются лишь те данные, при которых прерывание соединения происходит только под влиянием тумана.

4.1.1.3 Результаты

Было отобрано приблизительно более 400 значений, соответствующих описанным выше характеристикам. Некоторые несоответствующие данные (имеющие важное значение видимость и эксплуатационное соединение) были отклонены. Их возникновение можно объяснить за счет относительного расстояния между FSOL при проведении эксперимента и местом расположения французской метеостанции (500 м), которое предполагает незначительные временные сдвиги в записях, когда направление движения тумана перпендикулярно этим двум местам; либо за счет искаженных результатов, когда направление движения тумана параллельно этим двум местам.

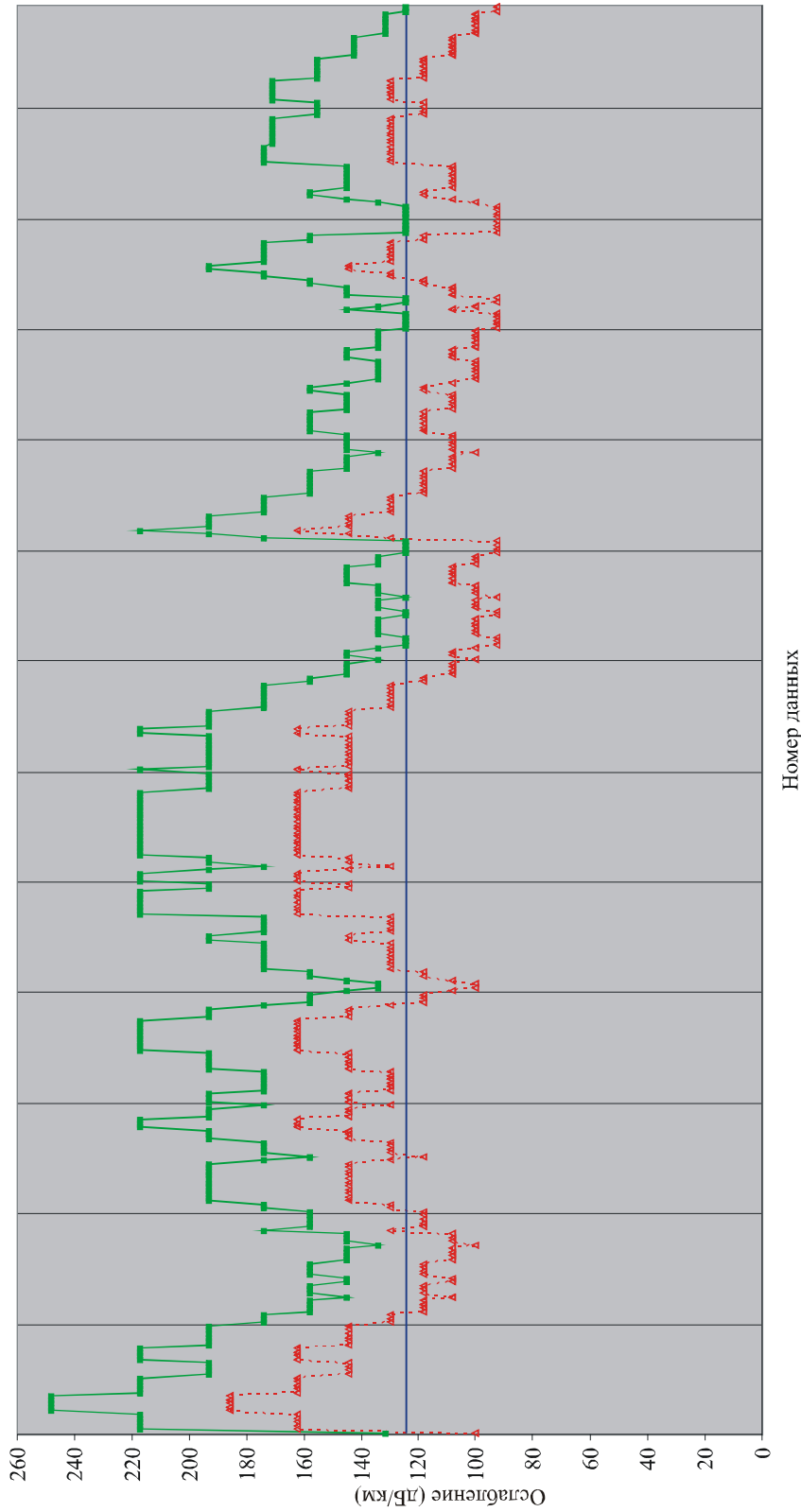
Результаты представлены на графике в настоящем разделе, ниже:

- погонный запас на оптической линии, который составляет 124 дБ/км (голубая прямая линия),
- формула для ослабления в тумане Кима и соавторов (красная пунктирная кривая),
- формулы Ал-Набулси для ослабления в тумане, которые приводятся в соответствие с почасовыми значениями события, для выбора одной из двух моделей (зеленая кривая).

Все значения, представленные на этом графике, были отобраны вследствие чрезвычайно низкой видимости, которая подразумевает большое значение ослабления в тумане, приводящее к обязательному прерыванию соединения на оптической линии.

Получается, что для конфигурации прерывания соединения на линии формулы Ал-Набулси для ослабления в тумане обеспечивают полное соответствие запасу на линии (100%), в то время как формула для ослабления в тумане Кима и соавторов не соответствует почти в 50% случаев. Представляется, что формулы Ал-Набулси для ослабления в тумане в большей степени соответствуют действительности.

РИСУНОК А2-5
Сравнение графиков ослабления в тумане



4.1.2 Другие виды ослабления

4.1.2.1 Ослабление в дожде

Ослабление из-за дождя является функцией интенсивности осадков R (мм/ч), определяемой следующим соотношением (А-2):

$$Att_{rain} = 1,076 * R^{0,67} \quad \text{дБ/км}, \quad (\text{А-2})$$

где:

R : интенсивность осадков (мм/ч).

Программа "Прогнозирование FSO" дает нулевое значение неготовности для ослабления в дожде. Согласно показаниям французской метеостанции, максимальное измеренное значение для дождя в рассматриваемом периоде составило $R = 1,6$ мм дождя в течение 6 минут 13 мая 2005 года, и, возможно, пессимистический прогноз соответствует 16 мм/ч.

Ослабление в дожде: $R = 16$ мм/ч, $Att_{rain} = 1,076 \times (16)^{0,67} = 6,89$; $Att_{rain} = 7$ дБ/км.

Ослабление на линии в дожде $Att_{rain-link} = (271 \times 7)/1000 = 1,89$ дБ; т. е. $Att_{rain-link} = 2$ дБ.

Данное значение ниже, чем запас на линии, следовательно это явление не нарушит работу оптической линии. Программа "Прогнозирование FSO" обеспечивает соответствие климатическим данным за рассматриваемый период.

4.1.2.2 Ослабление в снеге

Ослабление из-за снега является функцией от длины волны (λ_{nm}) и интенсивности осадков S (мм/ч), определяемой следующими соотношениями (формула для мокрого снега, высота места ниже 500 м) (А-3):

$$Att_{snow} = (0,0000542 * \lambda_{nm} + 5,4958776) * S^{1,38} \quad \text{дБ/км} . \quad (\text{А-3})$$

Программа "Прогнозирование FSO" дает нулевое значение неготовности для ослабления в снеге. Согласно показаниям французской метеостанции, измерение значений для снега на станции выполнялось в двух видах:

- эквивалентный слой воды для снега (соответствует количеству осадков),
- снежный покров на уровне земли.

В течение рассматриваемого периода уровень снега, согласно показаниям метеорологической станции Тулуза-Бланьяк, был недостаточно большим, чтобы составлять измеряемую величину. Следовательно, для климатического явления в виде снега имеется нулевое значение ослабления.

Таким образом, $Att_{snow} = 0$ дБ.

Очевидно, что данное значение меньше, чем запас на линии, следовательно это явление не нарушит работу оптической линии. Программа "Прогнозирование FSO" обеспечивает соответствие климатическим данным за рассматриваемый период.

4.1.2.3 Ослабление из-за общей освещенности

Солнечная засветка возникает тогда, когда солнце находится в зоне обзора оптического приемника. В программе "Прогнозирование FSO" рассчитывается каждая минута в году, для которой существует вероятность того, что солнце будет располагаться параллельно оптической линии, и проникающая в приемник мощность солнечного излучения будет больше, чем мощность, принимаемая от излучателя.

В программе "Прогнозирование FSO" определяется ослабление из-за общей освещенности по следующей формуле (Закон Стефана - 9):

$$F_{emis} = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} d\lambda = \sigma T^4, \quad (A-4)$$

где:

- λ : длина волны (м);
- C : скорость света (3×10^8 м/с);
- T : температура (К);
- $K = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К;
- $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ Вт м⁻² К⁻⁴;
- $H = 6,62 \times 10^{-34}$ Дж/с;

Следовательно, в спектральном окне изделия для FSO (фильтр на длине волны 720–950 нм), получается:

$$F_{emis} = \int_{\lambda=720nm}^{\lambda=950nm} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} d\lambda = 11,5 \text{ МВт/м}^2.$$

Определение уровня принимаемого приемником сигнала производится в зоне обзора, при значениях угла 5 мрад и диаметра 100 мм (A-5),

где:

- диаметр Солнца: 1,4 млн. км;
- расстояние от Земли до Солнца: 150 млн. км

$$\theta = \arctan g\left(\frac{\text{SunDiameter} / 2}{\text{EarthSunDistance}}\right) \quad (A-5)$$

$$\theta = \arctan g\left(\frac{1,4 / 2}{150}\right) = 0,004333 \text{ rad}$$

$\theta = 4,3$ мрад (меньше 5 мрад), следовательно, на изделие для FSO при определенной конфигурации приходится вся сила света, излучаемая солнцем.

Согласно показаниям французской метеостанции, максимальная сила света в течение рассматриваемого периода составила $S = 3500$ Дж/см², что приблизительно соответствует 1000 Вт/м².

$$C_n^2 = F_1(\text{roughness}) * F_2(\text{solar - radiation}) * F_3(\text{humidity}) * (1 + A)$$

* Коэффициент потерь из-за солнечной энергии (космос + атмосфера)

$$\frac{\text{TotalLightFlux}}{\text{EarthTotalLightFlux}} = \frac{\text{FilteredLightFlux}}{\text{FilteredReceivedFlux}} \quad (A-6)$$

$$\frac{64 \times 10^6 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}}{1 \text{ 000 Вт} \cdot \text{м}^{-2}} = \frac{11,5 \times 10^6 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}}{\text{FilteredReceivedFlux}}.$$

Таким образом, принимаемый поток после фильтрации = 180 Вт/м².

Считается, что входящий поток полностью приходится на приемный диод, т. е.:

$$\text{ReceivedPower} = \text{FilteredReceivedFlux} * \text{ReceptionArea}, \text{ ReceivedPower} = 180 * \left(\frac{\pi}{4} * 0,1^2\right).$$

Следовательно, мощность принимаемого сигнала равна 1,4 Вт или 31,5 дБм.

Данное значение надлежит сравнить со значениями уровня принимаемого сигнала в приемнике FSO, равными -11 дБм или -16 дБм. Как показывает программа "Прогнозирование FSO", значение неготовности под влиянием общей освещенности равно 0,000012%. При некоторых положениях солнца данное значение мощности солнечного излучения выше, чем уровень принимаемого сигнала, следовательно, данное явление оказывает влияние и приводит к нарушению работы оптической линии, когда солнце оказывается в зоне обзора приемника FSO. Результаты моделирования с использованием программы "Прогнозирование FSO" соответствуют климатическим данным за рассматриваемый период.

4.1.2.4 Влияние сцинтилляции

В программе "Прогнозирование FSO" определяется влияние сцинтилляции.

Согласно показаниям французской метеостанции, максимальное значение солнечной радиации и гидрометрических данных равно 3500 Дж/см² (либо приблизительно 1000 Вт/м²) и 100%, соответственно.

Влияние сцинтилляции: $F1 = 8,99 \times 10^{-14}$; $R = 1000 \text{ Вт/м}^2$; $F2 = 26,6$; $H = 100$; $F3 = 0,19$; таким образом $C_n^2 = 4,5 \times 10^{-13}$

$$L = 270 \text{ м}; \lambda = 850 \text{ нм}; K = 7,4 \times 10^6; \sigma_X^2 = 1,23 \times (7,4 \times 10^6)^{7/6} \times 4,5 \times 10^{-13} \times (270)^{11/6} = 1,65$$

$$Aff_{\text{Scintillation-Link}} = 2,57 \text{ дБ.}$$

Данное значение меньше, чем запас на линии, следовательно это явление не нарушит работу оптической линии. Программа "Прогнозирование FSO" обеспечивает соответствие климатическим данным за рассматриваемый период.

4.2 Сравнение QoS и готовности для FSO с Рекомендацией МСЭ-R

4.2.1 Сравнение QoS для FSO с Рекомендацией МСЭ-R F.1668

В Рекомендации МСЭ-R F.1668 предлагается показатель качества по ошибкам для реальных цифровых фиксированных беспроводных линий, и он применяется на цифровых фиксированных СВЧ-линиях связи пункта с пунктом. Данная Рекомендация использована в отсутствие конкретной рекомендации, касающейся FSO. Содержащиеся в этой Рекомендации показатели для сети доступа со скоростью 34 Мбит/с приведены в таблице А2-3.

ТАБЛИЦА А2-3

Показатели качества по ошибкам

	В месяц	В год
Число секунд с ошибкой (ES)	< 389	< 4668
Число секунд со значительным количеством ошибок (SES)	< 14 580	< 174 960

Результаты, характеризующие качество обслуживания на FSOL, для двух направлений в рассматриваемый период приведены в таблице А2-4.

Из этих результатов, а также из критериев для СВЧ-линии следует, что FSOL не соответствует критериям качества обслуживания из Рекомендации МСЭ-R F.1668.

ТАБЛИЦА А2-4

QoS

Месяц	Направление: от А к В				Направление: от В к А				Результаты
	Число ES	Уровень	Число SES	Уровень	Число ES	Уровень	Число SES	Уровень	
Декабрь 2004 г.	17	Удовл.	16	Удовл.	120	Удовл.	120	Удовл.	100%
Январь 2005 г.	104	Удовл.	45	Удовл.	619	Удовл.	619	Неуд.	75%
Февраль 2005 г.	1 048	Удовл.	1 048	Неуд.	134	Удовл.	134	Удовл.	75%
Март 2005 г.	157	Удовл.	154	Удовл.	88	Удовл.	88	Удовл.	100%
Апрель 2005 г.	1 688	Удовл.	1 688	Неуд.	329	Удовл.	329	Удовл.	75%
Май 2005 г.	272	Удовл.	264	Удовл.	149	Удовл.	149	Удовл.	100%

4.2.2 Сравнение готовности для FSO с Рекомендацией МСЭ-R F.1703

В Рекомендации МСЭ-R F.1703 предлагается показатель готовности для любых реальных цифровых фиксированных беспроводных линий, относящихся к сети доступа, и он применяется на цифровых фиксированных СВЧ-линиях связи пункта с пунктом. Данная Рекомендация использована в отсутствие конкретной рекомендации, касающейся FSO. Содержащиеся в этой Рекомендации показатели для сети доступа со скоростью 34 Мбит/с приведены в таблице А2-5.

ТАБЛИЦА А2-5

Показатели готовности

	В течение наиболее неблагоприятного месяца	В течение года
Готовность	> 99,4 ⁽¹⁾ (либо 3 154 мин. или 189 240 с неготовности)	> 99,99 (либо 53 мин. или 3 180 с неготовности)

⁽¹⁾ Исходя из готовности 100% в течение остальных 11 месяцев.

Результаты, характеризующие готовность FSOL, для двух направлений в рассматриваемый период приведены в таблице А2-6.

ТАБЛИЦА А2-6

Готовность

Месяц	Направление: от А к В		Направление: от В к А		Результаты
	Секунды	Уровень	Секунды	Уровень	
Декабрь 2004 г.	0	Удовл.	0	Удовл.	100%
Январь 2005 г.	1 601	Удовл.	38 839	Неуд.	50%
Февраль 2005 г.	232	Удовл.	0	Удовл.	100%
Март 2005 г.	13	Удовл.	0	Удовл.	100%
Апрель 2005 г.	818	Удовл.	0	Удовл.	100%
Май 2005 г.	0	Удовл.	0	Удовл.	100%

Из этих результатов, а также из критериев для СВЧ-линии следует, что FSOL не соответствует критериям качества обслуживания из Рекомендации МСЭ-R F.1703.

4.3 Сравнение готовности FSOL с результатами программного обеспечения "Прогнозирование FSO"

Результаты моделирования с использованием программы "Прогнозирование FSO" сравниваются с данными о готовности FSOL, зарегистрированными в течение шести месяцев, и представлены в таблице А2-7.

ТАБЛИЦА А2-7

Прогнозирование FSO

	В течение наиболее неблагоприятного месяца	В течение года	Результат
Прогнозирование FSO	96,9849%	99,3037%	Правильный
Линия FSO	98,5016% ⁽¹⁾	99,8768% ⁽²⁾	Правильный

⁽¹⁾ Годовой прогноз.

⁽²⁾ Исходя из наибольшего значения неготовности.

Результаты, полученные с помощью программного обеспечения "Прогнозирование FSO", соответствуют готовности FSOL в течение рассматриваемого периода и являются немного более пессимистичными, с разницей менее 0,58% в течение года и 1,56% в течение наиболее неблагоприятного месяца.

Замечания и комментарии

- Следует отметить, что разница в запасе (5 дБ) между двумя направлениями оптической линии совершенно отчетливо отражается на результатах готовности.
- Дым, выходящий из трубы, которая расположена на крыше здания А, а также дым из кухонь иногда препятствовали работе оптической линии, однако данное затруднение возникало при весьма определенных сочетаниях факторов (температуры, направления и скорости ветра, ...) и не было количественно оценено.
- Восход и закат солнца также служили препятствиями для нормальной работы оптической линии, и в программном обеспечении "Прогнозирование FSO" их влияние учитывается, однако данное препятствие могло бы возникать более часто.
- Находившиеся на месте проведения эксперимента люди подтвердили, что во время испытательного периода значения видимости (туман) носили исключительный характер (примечательное явление в виде тумана в 2005 году не наблюдалось по меньшей мере с 1995 года). В связи с этим целесообразно периодически обновлять метеоданные в программном обеспечении "Прогнозирование FSO".

5 Выводы

В первую очередь проведение эксперимента с использованием оптической линии позволило достичь двух целей:

- сопоставить эти результаты с данными программного обеспечения "Прогнозирование FSO":
 - использование статистического анализа оптической линии на основе прерывания соединения из-за тумана подтвердило более высокую точность моделей, используемых в этом программном обеспечении;
 - результаты синтеза данных испытаний применительно к другим факторам ослабления согласуются с результатами, полученными с помощью программного обеспечения;
 - результаты готовности, полученные с помощью программного обеспечения, соответствуют фактическим показателям FSOL и являются несколько более пессимистичными;
- сопоставить результаты, полученные для линии FSO, с показателями из рекомендаций МСЭ-R, базирующимися на критериях для СВЧ-линии:

- результаты для оптической линии не соответствуют Рекомендации МСЭ-R F.1703 – Показатели готовности для реальных цифровых радиорелейных линий, используемых на гипотетических эталонных трактах и соединениях длиной 27 500 км;
- результаты для оптической линии не соответствуют Рекомендации МСЭ-R F.1668 – Показатели качества по ошибкам для реальных цифровых фиксированных беспроводных линий, используемых на гипотетических эталонных трактах и соединениях протяженностью 27 500 км.

Справочные документы

[BOU 06] Olivier BOUCHET *et al.* [2006] *Free-space Optics: Propagation and Communication*. ISTE Publishing Company. ISBN: 1905209029.

[FSO 04] <http://www.francetelecom.com/en/>.
