

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.1814*

Методы прогнозирования, требуемые для разработки наземных оптических линий для связи в свободном пространстве

(Вопрос МСЭ-R 228/3)

(2007)

Сфера применения

Данная новая Рекомендация содержит методы прогнозирования распространения для целей планирования наземных оптических систем для связи в свободном пространстве. В ней также рассматриваются мерцание и искажения из-за действия солнечного света.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что в условиях Земли для связи доступен видимый оптический и инфракрасный спектр;
- b) что для правильного планирования оптических систем для связи в свободном пространстве (FSO), работающих в участках видимого оптического и инфракрасного спектра, необходимы соответствующие данные о распространении сигналов;
- c) что разработаны методы, которые позволяют рассчитывать наиболее важные параметры распространения, необходимые для планирования оптических систем связи в свободном пространстве, работающих в участках видимого оптического и инфракрасного спектра;
- d) что, насколько возможно, эти методы были проверены для имеющихся данных, и было показано, что они обеспечивают точность, которая как совместима с естественными изменениями свойств распространения, так и адекватна для большинства существующих применений при планировании систем, работающих в участках видимого оптического и инфракрасного спектра,

признавая,

- a) что в п. 78 Статьи 12 Конвенции МСЭ говорится, что функции Сектора радиосвязи включают в себя "...выполнение исследований без ограничений диапазона частот и утверждение соответствующих рекомендаций...",

рекомендует,

- 1 что методы предсказания параметров распространения, приведенные в Дополнении 1 должны использоваться для планирования оптических систем связи в свободном пространстве в соответствующих областях применимости, указанных в настоящем Приложении.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Дополнительная информация, относящаяся к методам предсказания параметров распространения для частот видимого и инфракрасного спектра, содержится в Рекомендации МСЭ-R P.1817 "Данные о распространении сигнала, требуемые для разработки наземных оптических линий для связи в свободном пространстве".

* Данная Рекомендация должна быть доведена до сведения 1-й и 9-й Исследовательских комиссий по радиосвязи.

Приложение 1

1 Введение

При разработке линий FSO должно быть рассмотрено несколько явлений, включая потери на поглощение в атмосфере, рассеяние в атмосфере и турбулентность атмосферы, условия микроклимата и местные эффекты, протяженность линии и неточность установки линии. Кроме того, необходимо рассмотреть проблемы выбора длины волны и скорости передачи данных, вопросы защиты зрения и окружающее солнечное излучение.

Для работы систем FSO требуется прямая видимость (LOS). При проверке наличия LOS, поскольку системы FSO используют расширение луча и колимированный луч, необходимо предусмотреть зазоры между центром луча и любыми препятствиями, равные радиусу луча. Это отличает эти системы от систем радиосвязи, где требуется зазор размером с зону Френеля.

Основным недостатком систем FSO является их подверженность влиянию атмосферных явлений, таких как ослабление и мерцание, которые могут понизить готовность линии. Узкий луч также приводит к тому, что правильная установка терминала лазерной связи становится более критичной, чем для обычных радиосистем.

Ключевым параметром при разработке линий FSO является расчет бюджета линии. Запас на линии M_{link} (дБ), который представляет собой доступную мощность, превышающую чувствительность приемника, можно рассчитать из уравнения (1):

$$M_{link} = P_e - S_r - A_{geo} - A_{atmo} - A_{scintillation} - A_{system}, \quad (1)$$

где:

- P_e (дБм): общая мощность излучателя;
- S_r (дБм): чувствительность приемника, которая также зависит от ширины полосы (скорости передачи данных);
- A_{geo} (дБ): геометрическое ослабление линии из-за рассеивания передаваемого луча с увеличением расстояния;
- A_{atmo} (дБ): ослабление в атмосфере из-за поглощения и рассеяния;
- $A_{scintillation}$ (дБ): ослабление из-за турбулентности атмосферы;
- A_{system} (дБ): представляет все остальные потери в системе, включая ошибки в установке направления луча, оптические потери приемника, потери из-за отклонения луча, уменьшение чувствительности из-за окружающей освещенности (солнечного излучения) и т. п.

В последующих параграфах приводятся определения и вычисления этих значений, а также исходные соображения по планированию линий FSO.

2 Исходные соображения по проектированию линий FSO

Важным аспектом для успешной работы системы FSO является выбор подходящего места размещения линии. При создании линий FSO необходимо учитывать превалирующие погодные условия, физические препятствия и типы поверхности на трассе, а также условия размещения приемопередатчика, которые гарантировали бы оптимальное качество работы линии.

2.1 Погода

- Погодные условия и, в частности, местный климат в окрестностях выбранной трассы линии будут влиять на появление снега, дождя, измороси, тумана, атмосферной дымки, частичек распыленных веществ, которые называются аэрозолями, пыли/песка, которые приводят к поглощению и рассеянию передаваемого сигнала.

2.2 Характеристики трассы

- Физических препятствий на трассе между излучателем и приемником следует избегать. Обязательно стоит заметить, что крупные деревья могут расти на 0,5–1 м в год, и плотность их листвы в течение года меняется.
- Линии между зданиями должны учитывать тепловые потоки, которые могут привести к тому, что горячий воздух будет подниматься, пересекая трассу линии и приводя к появлению турбулентности, результатом которой может стать заметное мерцание на приемнике.
- На качество линии могут заметно повлиять топография и тип поверхности, лежащей под трассой прямой видимости FSO. На линиях FSO, пересекающих долины рек или открытое море, частым явлением может быть туман. Находящиеся под линией связи здания и сооружения могут стать причиной дополнительной тепловой активности в воздухе над ними, что может привести к усилению мерцания принимаемого сигнала.

2.3 Монтаж приемопередатчика

- У большинства систем FSO очень узкий луч, и, в результате, точность установки излучателя и приемника является критичным параметром; любые неточности установки могут привести к значительным потерям сигнала. Телескопические мачты должны быть устойчивыми, а для надежного качества на протяжении длительного периода времени считается важным устанавливать оборудование непосредственно на несущих стенах, или сверху одной колонны. Движение в результате дифференциальных термальных расширений или вибраций под воздействием ветра, должно быть минимизировано.

3 Геометрическое ослабление

Даже при ясной погоде луч расходится и, в результате, детектор принимает сигнал меньшей мощности. Ослабление из-за рассеивания передаваемого луча с увеличением расстояния называется геометрическим ослаблением, и оно вычисляется по следующей формуле:

$$A_{geo}(\text{дБ}) = 10 \log_{10} \left(\frac{S_d}{S_{capture}} \right), \quad (2)$$

где:

$S_{capture}$: поверхность захвата приемника (м^2);

S_d : площадь поверхности луча передачи на расстоянии d , которая аппроксимируется формулой:

$$S_d = \frac{\pi}{4} (d \cdot \theta)^2,$$

где:

θ : угол расхождения луча (мрад);

d : расстояние между излучателем и приемником (км).

На коротких линиях площадь захвата может быть больше площади луча. В этих случаях значение A_{geo} должно быть равным нулю, поскольку в приемнике собирается вся энергия луча.

4 Специфическое ослабление в атмосфере из-за поглощения и рассеяния γ_{atmo}

Специфическое ослабление в атмосфере γ_{atmo} (дБ/км) можно записать в виде суммы двух слагаемых:

$$\gamma_{atmo} = \gamma_{clear_air} + \gamma_{excess}, \quad (3)$$

где:

γ_{clear_air} : специфическое ослабление в условиях чистого воздуха (из-за наличия молекул газов);

γ_{excess} : специфическое ослабление из-за возможного наличия тумана, водяных брызг, дымки, измороси, дождя, снега, града и т. п.

Атмосфера – эта среда передачи, изменяющаяся во времени, и, в результате, γ_{atmo} является стохастическим процессом. Однако, как показано в уравнении (1), установление пределов готовности системы и влияние этого процесса, как правило, рассматривается статистически. Запас на линии M_{link} представляет собой величину ослабления, которая может быть допустимой в данной системе на данном расстоянии.

4.1 Специфическое ослабление в условиях чистого воздуха γ_{clear_air}

Ослабление в условиях чистого воздуха представляет собой, главным образом, поглощение в молекулах газов. Атмосферное поглощение на определенных длинах оптических волн является результатом взаимодействия фотонов с атомами и молекулами (N_2 , O_2 , H_2 , H_2O , CO_2 , O_3 и т. д.), что приводит к поглощению молекулой столкнувшегося с ней фотона и повышению ее температуры. Коэффициент поглощения зависит от:

- типа молекул газа; и
- их концентрации.

Молекулярное поглощение – это явление селективное в отношении длины волны, что приводит к появлению атмосферных окон прозрачности, и атмосферных полос поглощения. Вода, CO_2 , O_3 и O_2 – это основные молекулы атмосферы, для которых свойственно высокое поглощение в полосе инфракрасного излучения.

Поскольку размер молекул газов намного меньше длины волны, то ослабление из-за рассеяния на молекулах газов незначительно.

Обычно, длины волны лазера выбираются так, чтобы они попадали в атмосферные окна передачи, поэтому величина γ_{clear_air} является незначительной. Длины волны, обычно используемые в системах FSO, расположены вблизи 690, 780, 850 и 1 550 нм. Однако, по сравнению с относительно незагрязненными пригородными районами, для работы в плотно застроенной городской местности с высоким содержанием в воздухе частичек распыленных веществ, может быть выгодно использовать другие длины волны.

4.2 Дополнительное специфическое ослабление

Дополнительное ослабление – это ослабление, обусловленное наличием в воздухе частичек тумана, измороси, водяных брызг, дымки, дождя, снега. Наличие этих частичек приводит к угловому перераспределению падающего светового потока, которое называется рассеянием, и уменьшает дальность распространения потока в заданном направлении. Однако здесь не происходит потери энергии, аналогичной поглощению. Тип рассеяния определяется физическим размером неоднородностей, на которых происходит рассеяние, по отношению к длине волны передающего лазера. В таблице 1 показано три различных режима рассеяния, зависящих от размера неоднородностей, на которых происходит рассеяние, с приблизительного соотношения длиной волны и коэффициентом ослабления для данного типа рассеяния (эффективного сечения). Кроме того, в таблице 1 показаны типы неоднородностей, на которых происходит рассеяние в каждом режиме для длин волн видимого спектра или инфракрасного излучения.

ТАБЛИЦА 1

Режимы рассеяния в зависимости от размера неоднородностей, на которых происходит рассеяние r по сравнению с длиной волны передающего лазера λ . Кроме того, показана приблизительная взаимосвязь между длиной волны и коэффициентом ослабления для данного типа рассеяния $Q(\lambda)$

	Рэлеевское рассеяние	Рассеяние Ми	Не селективное или геометрическое рассеяние
	$r \ll \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^{-4}$	$r \approx \lambda$ от $Q(\lambda) \sim \lambda^{-1,6}$ до $Q(\lambda) \sim \lambda^0$	$r \gg \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^0$
Тип рассеяния	Молекулы воздуха Атмосферная дымка	Атмосферная дымка Туман Распыленные неоднородности	Туман Дождь Снег Град

Поскольку для рэлеевского рассеяния используется соотношение $Q(\lambda) \sim \lambda^{-4}$, вкладом, который вносит в общий коэффициент ослабления, рассеяние на молекулах воздуха, можно пренебречь.

Для тех частичек, которые намного больше длины волны, рассеяние можно описать в понятиях геометрической оптики, которая не зависит от длины волны лазера. Капли дождя, снег, град, обрывки облаков и плотный туман будут приводить к геометрическому рассеянию света лазера.

Для тех частичек, размеры которых сравнимы с длиной волны лазера, может применяться теория рассеяния Ми. Туман и распыленные неоднородности являются основными причинами процесса рассеяния Ми.

Можно использовать аналитический подход, в котором расчетные предсказания конкретного ослабления выполняются на основании предполагаемого распределения размеров частичек. Однако очень трудно смоделировать и измерить распределение размеров частичек любого распыленного вещества или тумана, которое является ключевым параметром для определения их физических или оптических свойств.

4.2.1 Оценка ослабления в тумане γ_{fog} (рассеяние Ми)

Поскольку аналитический подход не всегда можно использовать на практике, для расчета ослабления в результате рассеяния Ми специалисты в области FSO используют эмпирические методы. В этих методах коэффициент ослабления из-за рассеяния Ми связывается с видимостью.

Техническое определение *видимости* или дальности видимости звучит так – расстояние, на котором сила света ослабляется до 2% от его начальной силы, или качественная видимость – это расстояние, на котором едва возможно различить темный объект на горизонте. Параметр видимости очень просто измеряется и хранится на метеостанциях или в базах данных аэропортов, он позволяет получить оценку возможного местного качества систем электросвязи, используя распределение этого параметра. Однако данные о видимости, собираемые в аэропортах, могут не всегда представлять условия, свойственные городской или сельской местности, которые могут существенно отличаться как по топографии, так и близости к водоемам.

Упрощенная эмпирическая формула, которую используют специалисты в области FSO для расчета ослабления в тумане, $\gamma_{fog}(\lambda)$ (дБ/км), имеет вид:

$$\gamma_{fog}(\lambda) = \frac{3,91}{V} \left(\frac{\lambda}{550 \text{ нм}} \right)^{-q}, \quad (4)$$

где:

V : видимость (км);

λ : длина волны (нм);

q : коэффициент, зависящий от распределения размеров рассеивающих частиц. Он определен на основании данных экспериментов и имеет значения:

$$\begin{aligned} q &= 1,6 & V > 50 \text{ км} \\ &= 1,3 & 6 \text{ км} < V < 50 \text{ км} \\ &= 0,585V^{1/3} & V < 6 \text{ км}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для получения значения ослабления, превышаемого в течение данного процента времени p (т. е. для данной вероятности), в уравнении (4) требуется подставить значение видимости, которое не превышает в течение данного процента времени p .

4.2.2 Ослабление в дожде γ_{rain}

Ослабление в дожде γ_{rain} (дБ/км) определяется соотношением:

$$\gamma_{rain} = k \cdot R^\alpha \quad (6)$$

В Рекомендации МСЭ-R P.837 приводятся значения интенсивности дождя $R(p)$ (мм/ч), превышаемые в течение любого данного процента времени среднего года (p) и для всех мест размещения, а уравнение (6) определяет ослабление превышаемые в течение данного процента времени p .

Параметры k и α зависят от характеристик дождя, и некоторые значений, полученные на основании измерений, приведены в таблице 2. На рисунках 1 и 2 показана связь между γ_{rain} и интенсивностью дождей R полученная с использованием параметров из таблицы 2 для Японии.

ТАБЛИЦА 2

Параметры, используемые для оценки ослабления в дожде

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

РИСУНОК 1

Ослабление в атмосфере из-за дождя

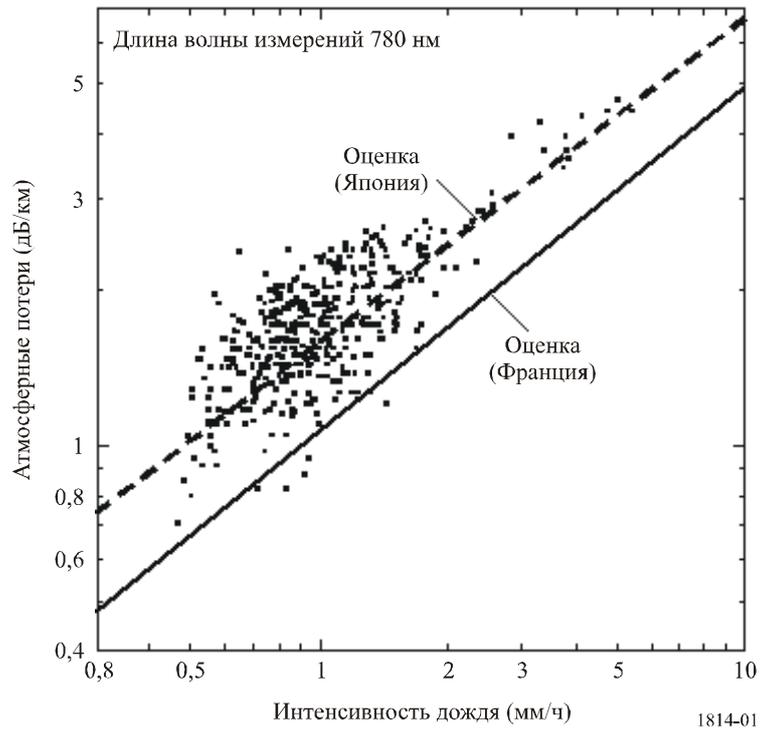
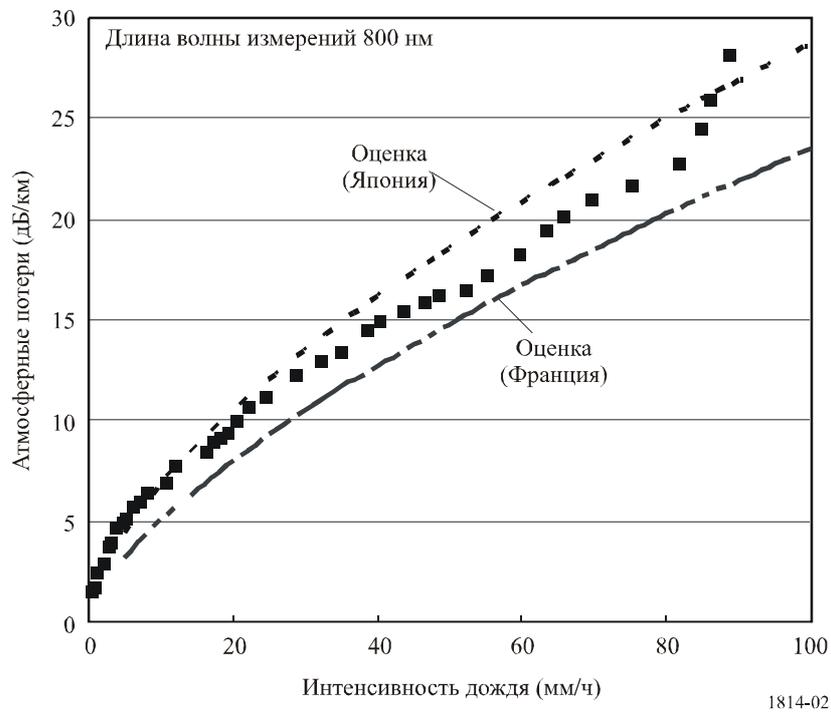


РИСУНОК 2

Ослабление в атмосфере из-за дождя



4.2.3 Ослабление в снеге γ_{snow}

Ослабление в снеге, как функция интенсивности снегопада описывается следующим соотношением:

$$\gamma_{snow} = \alpha \cdot S^b, \quad (7)$$

где:

γ_{snow} : ослабление в снеге (дБ/км);

S : интенсивность снегопада (мм/ч);

α и b : функции от длины волны, λ (нм). Оцененные значения для мокрого и сухого снега приведены в таблице 3.

ТАБЛИЦА

Параметры, используемые для оценки ослабления в снеге

	α	b
Мокрый снег	$0,000102\lambda + 3,79$	0,72
Сухой снег	$0,0000542\lambda + 5,50$	1,38

5 Влияние мерцания

Второй по значимости атмосферный процесс, который влияет на качество лазерных систем связи – это обусловленное турбулентностью атмосферное мерцание, которое приводит к заметным колебаниям мощности принимаемого сигнала.

Турбулентность атмосферы приводит к появлению временных воздушных ячеек со слегка различной температурой, различной плотностью и различными индексами рефракции. Данные могут быть потеряны из-за отклонения луча и мерцания, поскольку луч лазера, проходя через эти неоднородности с различным индексом рефракции, изменяет направление распространения. Значимость каждого эффекта зависит от отношения размера этих ячеек турбулентности к диаметру луча лазера.

Если размеры ячеек турбулентности больше диаметра, то весь луч лазера целиком беспорядочно искривляется, приводя к полной потере сигнала, если луч отклоняется в сторону от апертуры приемника. При более длинных волнах отклонение луча меньше, чем на более коротких длинах волн, хотя зависимость от длины волны довольно слаба.

Более широко распространена ситуация, когда размеры ячеек турбулентности меньше диаметра луча, при этом искривление луча и дифракция приводит к искажениям фронта волны луча лазера. Это приводит к флуктуациям интенсивности луча лазера во времени, которое называется мерцанием, на приемнике с частотой флуктуаций от 0,01 Гц до 200 Гц.

Влияние тропосферного мерцания обычно описывается в виде логарифма амплитуды χ (дБ) наблюдаемого сигнала ("логарифмической амплитуды"), определяемого как выраженное в децибелах отношение мгновенной амплитуды и среднего значения амплитуды. Интенсивность и частота флуктуаций (частота мерцания) растут с увеличением длины волны. Для плоской волны и слабой турбулентности изменение мерцания σ_χ^2 (дБ²) может быть выражено следующим соотношением:

$$\sigma_\chi^2 = 23,17 \cdot k^{7/6} \cdot C_n^2 \cdot L^{11/6}, \quad (8)$$

где:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} : \text{номер волны, (м}^{-1}\text{);}$$

L : протяженность линии связи, (м);

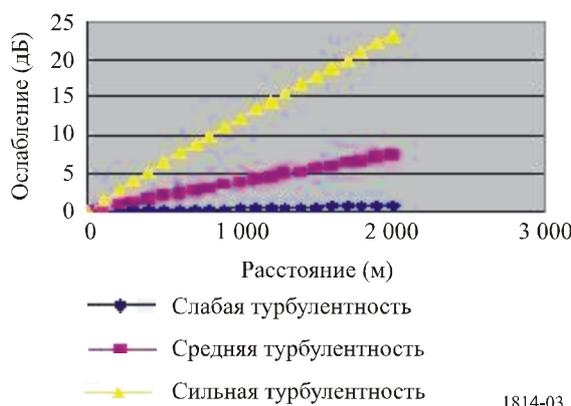
C_n^2 : структурный параметр индекса рефракции ($\text{м}^{-2/3}$).

Мерцание имеет пик амплитуды, равный $4\sigma_\chi$, и ослабление из-за мерцания $= 2\sigma_\chi$. При сильной турбулентности наблюдается насыщение изменения, определяемого вышеприведенным соотношением. Параметр C_n^2 на оптических частотах имеет значение, отличное от значения для миллиметровых волн. Мерцание на миллиметровых волнах обусловлено, главным образом, флуктуациями влажности, тогда как мерцание на оптических частотах является, в основном, функцией температуры. На миллиметровых волнах параметр C_n^2 примерно равен $10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$ (обычно, на миллиметровых волнах C_n^2 принимает значение от 10^{-14} до $10^{-12} \text{ м}^{-2/3}$), а на оптических частотах значение C_n^2 примерно равно $2 \times 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$ при слабой турбулентности (обычно, на оптических частотах C_n^2 принимает значение от 10^{-16} до $10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$).

На рисунке 3 показано изменение ослабления оптического луча с длиной волны 1550 нм при слабой, средней и сильной турбулентности на расстояниях до 2000 м. Заметно, что ослабление возрастает с усилением турбулентности. В таблице 4 показано влияние турбулентности на распространение оптических и радиоволн. Чем больше длина волны оптического сигнала, тем сильнее мерцание.

РИСУНОК 3

Изменение ослабления из-за мерцания в зависимости от расстояния, для разных типов турбулентности на 1550 нм



1814-03

ТАБЛИЦА 4

Таблица значений глубины замираний из-за мерцания, ожидаемого на трассе длиной 1 км

	Турбулентность		
	Слабая	Умеренная	Высокая
C_n^2 для оптических волн ($\text{м}^{-2/3}$)	10^{-16}	10^{-14}	10^{-13}
Ослабление (0,98 мкм) (дБ)	0,51	5,06	16,00
Ослабление (1,55 мкм) (дБ)	0,39	3,87	12,25
C_n^2 для миллиметровых волн ($\text{м}^{-2/3}$)	10^{-15}	10^{-13}	10^{-12}
Ослабление (40 ГГц) (дБ)	0,03	0,09	0,27
Ослабление (60 ГГц) (дБ)	0,03	0,11	0,35

Мерцание можно уменьшить, используя либо несколько передающих лучей, либо большие апертуры приемника. Кроме того, для минимизации влияния мерцания на трассу передачи, не следует устанавливать системы FSO вблизи горячих поверхностей. Поскольку с ростом высоты мерцание уменьшается, рекомендуется, чтобы системы FSO размещались несколько выше крыш (>1 м) и вдали от боковой стены зданий, если системы размещаются в местности, подобной пустыне.

Допуски, распределенные для компенсации ослабления в тумане или дожде, могут также компенсировать и влияние мерцания.

6 Влияние общей освещенности

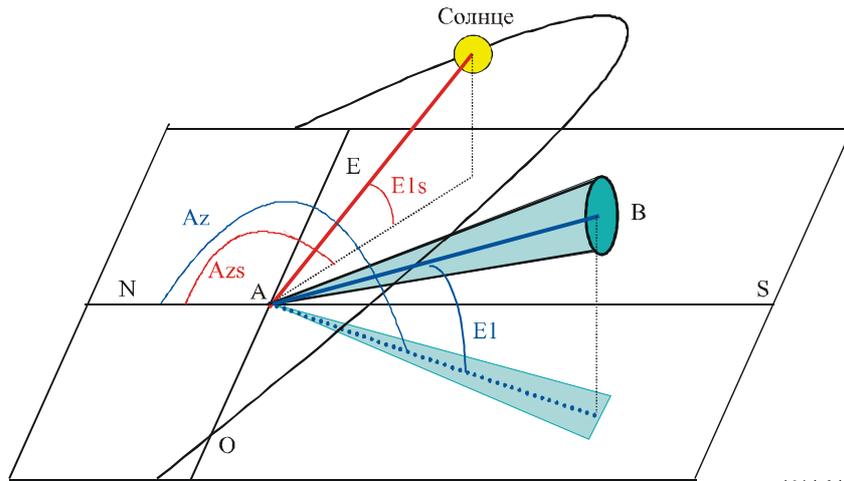
Солнечная засветка возникает, когда солнце или его отражение располагается в мгновенном секторе обзора (IFOV) оптического приемника. IFOV приема, как правило, имеет, как минимум, такой же размер, как и угол расхождения передачи. Эта проблема становится серьезной, когда положение солнца параллельно оптической линии, и энергия солнца, попадающая внутрь приемника, больше, чем энергия света, принимаемого от излучателя.

Солнечные помехи, обычно, можно уменьшить, расположив приемник так, чтобы солнце было всегда вне главной оси приема.

На рисунке 4 показана геометрия пути движения солнца по небу относительно оптической линии для связи в свободном пространстве (А – приемник, В – излучатель).

РИСУНОК 4

Схема пути движения солнца относительно оптической линии для связи в свободном пространстве



1814-04

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

$$P_{radiated} = 1200 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - E_{Is}\right), \quad (9)$$

где E_{Is} – высота солнца в радианах.

Принимаемая мощность определяется выражением:

$$P_{solar} = F_{solar} \cdot P_{radiated} \cdot S_{capture} \cdot W_{receiver} / 100, \quad (10)$$

где:

- F_{solar} : спектральная мощность солнечного излучения как функция от длины волны;
 $S_{capture}$: площадь поверхность захвата приемника (м²);
 $W_{receiver}$: ширина полосы частот приемника (нм);
 F_{solar} : моделируется при помощи следующего графика;

$$F_{solar} = 8,97 \times 10^{-13} \lambda^5 - 4,65 \times 10^{-9} \lambda^4 + 9,37 \times 10^{-6} \lambda^3 - 9,067 \times 10^{-3} \lambda^2 + 4,05 \lambda - 5,70, \quad (11)$$

где:

λ : длина волны (нм).

7 Расчет запаса линии

Запас линии на замирания для системы FSO, приемник которой расположен на расстоянии d (км) от излучателя, можно оценить, выполнив следующие шаги:

Шаг 1: Из уравнения (1) можно получить геометрическое ослабление A_{geo} .

Шаг 2: Обычно, длины волны лазера выбираются так, чтобы они были в пределах атмосферных окон передачи, поэтому величину γ_{clear_air} можно считать незначительной. Однако отдельные оценки ослабления в чистом воздухе можно найти в Рекомендации МСЭ-R P.1817.

Шаг 3: Ослабление из-за тумана γ_{fog} можно получить из уравнений (4) и (5). При отсутствии информации о видимости для данной местности, можно использовать типовые значения видимости из Рекомендации МСЭ-R P.1817.

Шаг 4: Ослабление из-за дождя γ_{rain} можно получить из уравнения (6) и таблицы 2.

Шаг 5: Ослабление из-за снега γ_{snow} можно получить из уравнения (7) и таблицы 3.

Шаг 6: Запас на замирания M_{link} (дБ) определяется по формуле:

$$M_{link} = P_e - S_r - A_{system} - A_{geo} - \gamma_{clear_air} \cdot d - \gamma_{fog} \cdot d - \gamma_{rain} \cdot d - \gamma_{snow} \cdot d,$$

где:

- P_e (дБм): суммарная мощность излучателя;
 S_r (дБм): чувствительность приемника;
 A_{system} (дБ): представляет собой все потери, зависящие от системы. Они включают в себя потери из-за ошибок в установке направления луча, оптические потери приемника, потери из-за отклонения луча, уменьшение чувствительности из-за окружающей освещенности (солнечного излучения) и т. п.

8 Другие проблемы

Другие факторы, которые следует учитывать при проектировании системы FSO, включают в себя следующие:

Международные правила безопасности строго ограничивают максимальную выходную мощность оптических систем. При длине волны 1550 нм, регуляторы допускают мощность в 100 раз большую, чем для более коротких длин волн в целях "защиты глаз". Недостатком этого типа лазера является, главным образом, его высокая стоимость по сравнению с лазером, работающим на более коротких волнах примерно 850 нм.

Приемопередатчики FSO могут располагаться за окнами. При этом критичным является угол между лучом и окном. Этот угол должен быть максимально близок к перпендикуляру, но слегка отличаться (на 5 градусов) для уменьшения обратного воздействия луча на приемник. Кроме того, некоторые окна сделаны из стекла или имеют защитное покрытие для уменьшения отблесков. Поскольку эти окна, зачастую, специально спроектированы так, чтобы не пропускать инфракрасные лучи, это покрытие может уменьшать сигнал на 60% или более.

Плохая видимость может уменьшить эффективность и готовность систем FSO. Плохая видимость может возникать в определенное время года или суток. Кроме того, плохая видимость может быть локальным явлением (прибрежный туман). Одно из решений противостояния отрицательному влиянию плохой видимости заключается в сокращении расстояний между терминалами, что обеспечивает больший запас бюджета линии, позволяющий работать в плохих погодных условиях.
