

## Содержание

<b>Ослабление мощности оптического сигнала атмосферой</b>	<b>2</b>
Введение . . . . .	2
Релеевское рассеяние оптического сигнала в атмосфере. . . . .	2
Аэрозольное ослабление. . . . .	3
Влияние молекулярного поглощения. . . . .	4
<b>Распространение оптического сигнала в атмосфере</b>	<b>7</b>
Влияние турбулентности . . . . .	7
Нелинейные эффекты распространения . . . . .	8
<b>Фоновые помехи от посторонних источников в атмосфере.</b>	<b>9</b>
Общая характеристика фоновых помех различной природы. . . . .	9
<b>Расчет атмосферного канала</b>	<b>11</b>
Введение упрощений . . . . .	11
Учет влияния погодных условий . . . . .	11
Учет фонового излучения. . . . .	12
Учет отклонения луча от нормали . . . . .	13
Оптическая система . . . . .	13
Пример расчета . . . . .	14
<b>Список использованных источников</b>	<b>16</b>

# Ослабление мощности оптического сигнала атмосферой

## Введение

Вопросами распространения оптического излучения в атмосфере, влияние атмосферы на оптический сигнал, влияние турбулентностей атмосферы на оптический сигнал в виду большой их важности занималось и занимается большое количество научных работников и институтов. Работы сделанные до 1970г. подробно рассмотрены в монографии В.Е.Зуева "Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере"[12].

Также большой интерес представляют работы [15, 14, 10, 9, 11, 16, 1, 6, 7].

В данной статье сделана попытка разработать методику инженерного расчета атмосферного канала для систем передачи информации по атмосферному каналу. Автор далек от мысли, что его работа безошибочна и надеется исправить в следующих выпусках все допущенные ошибки и неточности.

## Релеевское рассеяние оптического сигнала в атмосфере<sup>1</sup>.

Энергетические потери оптического сигнала из-за аэрозольного и молекулярного (релеевского) рассеяния являются одним из главных факторов, определяющих искажение сигнала. Из теории молекулярного (релеевского) рассеяния света следует следующее выражение для коэффициента рассеяния в газах:

$$\sigma_p(\lambda) = \frac{8\pi^3(n^2 - 1)}{3N\lambda^4} \cdot \frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta} \quad (1)$$

, где

N–число молекул в единице объема;

n–показатель преломления среды;

$\lambda$ –длина волны излучения;

$\delta$ –фактор деполяризации рассеянного излучения, равный 0,035<sup>2</sup>

В таблице 1 приводится значение коэффициентов  $\sigma_p(\lambda)$  оптических толщ вертикального слоя всей атмосферы  $\tau_p(\lambda)$  для различных длин волн, при температуре  $t = 15^\circ C$  и давлении  $p = 1.013 \cdot 10^5$  Па в приземном слое.

---

<sup>1</sup>характеристика молекулярного ослабления взята из работы [14]

<sup>2</sup>Elterman L. Atmospheric Attenuation Model 1964 in the Ultraviolet, Visible and Infrared Regions for Altitudes to 50 km. Environmental Research Papers, 46, Report AFCRL, 1964.

Таблица 1: Коэффициенты молекулярного рассеяния  $\sigma_p(\lambda)$  оптические толщ  $\tau_p(\lambda)$  вертикального слоя всей атмосферы

$\lambda$ , мкм	$\sigma_p(\lambda)$ , км <sup>-1</sup>	$\tau_p$	$\lambda$ , мкм	$\sigma_p(\lambda)$ , км <sup>-1</sup>	$\tau_p$
0.30	$1.446 \cdot 10^{-1}$	1.2237	0.65	$5.893 \cdot 10^{-3}$	0.0499
0.32	$1.098 \cdot 10^{-1}$	0.9290	0.70	$0.364 \cdot 10^{-3}$	0.0369
0.34	$8.494 \cdot 10^{-2}$	0.7188	0.80	$2.545 \cdot 10^{-3}$	0.0215
0.36	$6.680 \cdot 10^{-2}$	0.5653	0.90	$1.583 \cdot 10^{-3}$	0.0134
0.38	$5.237 \cdot 10^{-2}$	0.4508	1.06	$8.458 \cdot 10^{-4}$	0.0072
0.40	$4.303 \cdot 10^{-2}$	0.3641	1.26	$4.076 \cdot 10^{-4}$	0.0034
0.45	$0.644 \cdot 10^{-2}$	0.2238	1.67	$1.327 \cdot 10^{-4}$	0.0011
0.50	$1.716 \cdot 10^{-2}$	0.1452	2.17	$4.586 \cdot 10^{-5}$	0.0004
0.55	$0.162 \cdot 10^{-2}$	0.0984	3.50	$6.830 \cdot 10^{-6}$	0.0001
0.60	$8.157 \cdot 10^{-3}$	0.0690	4.00	$4.002 \cdot 10^{-6}$	0.0000

Как видно из приведенной таблицы, энергетические потери оптических сигналов, обусловленные молекулярным рассеянием, могут быть определены с большой точностью, если известно распределение плотности по высоте. Обычно принято считать, что до высот 30 км. достаточно хорошо выполняется условие стандартной модели атмосферы, поэтому проблема количественной оценки указанных потерь считается решенной. На больших высотах плотность атмосферы может существенно изменяться в зависимости от места и времени, соответственно будут изменяться и коэффициенты молекулярного рассеяния. Однако при любом изменении мы всегда можем быть уверенными в том, что энергетическими потерями за счет релеевского рассеяния в инфракрасной области можно пренебречь.

## Аэрозольное ослабление<sup>3</sup>.

Наиболее часто встречающиеся в атмосфере аэрозоли представляют собой капли воды в жидком и твердом состояниях, объединяемые общим понятием – гидрометеоры (дождь, туман, снег и т.д.).

Ослабление энергии волны видимого и ИК-диапазонов объясняется тем, что волна наводит в каплях токи смещения. Кроме того, токи смещения являются источниками вторичного и рассеянного излучения, что также создает эффект ослабления в направлении распространения волны, причем в видимом диапазоне основные потери энергии создаются за счет явления рассеяния.

Аэрозоли – это нормальная составляющая атмосферы; у поверхности Земли ее содержание меняется от нескольких мкг/м<sup>3</sup> в очень чистом воздухе, до величины более 100 мкг/м<sup>3</sup> в загрязненной атмосфере. К аэрозолям в атмосфере относятся переносимые ветром частицы пыли и морской соли, продукты сгорания (сажа, пепел), конденсированные органические остатки и вещества, образующиеся в результате химических реакций в атмосфере, включая такие соединения, как сульфаты, нитраты,  $H_2S$ ,  $NH_3$ , герпенты и т.п. Макрочастицы, в своем большинстве, удаляются из атмосферы вследствие гравитации, конденсации на частицах с последующим выпадением с дождем, а также за счет захвата выпадающими осадками.

Коэффициенты аэрозольного рассеяния очень сильно зависят от размеров, химического состава и концентрации частиц аэрозоля, которые подвержены большой изменчивости во времени и пространстве.

Несмотря на то, что размеры, концентрация, химический состав частиц атмосферных аэрозолей меняются в весьма широких пределах, можно выделить некоторые характерные типы аэрозолей (облака, туманы, дымки, осадки, пыль). С достаточной для инженерных расчетов точностью можно сказать, что концентрация аэрозоля с ростом высоты до 10 км уменьшается.

<sup>3</sup>характеристика аэрозольного ослабления взята из работ [12, 10, 18]

## Влияние молекулярного поглощения<sup>4</sup>.

Атмосфера состоит главным образом из азота, кислорода и аргона, процентное содержание которых приведено в таблице 2. Кроме того, в таблице приводятся данные о других компонентах атмосферы, за исключением водяного пара.

Таблица 2: Состав сухого воздуха

Составляющие атмосферы	Средняя объемная концентрация в тропосфере, %	Примечание
$N_2$	78.084	В верхней ионосфере диссоциирует; на более низких уровнях перемешан.
$O_2$	20.946	Диссоциирует выше 95 км; на более низких уровнях перемешан.
$Ar$	0.934	Перемешан до высоты 110 км; выше-диффузионное разделение.
$CO_2$	$3.3 \cdot 10^{-2}$	Испытывает незначительные изменения; перемешан до 100 км; выше-диссоциирует
$Ne$	$1.818 \cdot 10^{-3}$	Перемешан до 100км; выше-диффузионное разделение.
$He$	$5.24 \cdot 10^{-4}$	Перемешан до 110 км; выше-диффузионное разделение.
$CH_4$	$1.6 \cdot 10^{-4}$	В тропосфере перемешан; в стратосфере окисляется; в мезосфере диссоциирует.
$Kr$	$1.14 \cdot 10^{-4}$	Перемешан до 100 км; выше-диффузионное разделение.
$H_2$	$5 \cdot 10^{-5}$	В тропосфере и стратосфере перемешан, выше диссоциирует.
$N_2O$	$3.5 \cdot 10^{-5}$	У поверхности земли испытывает незначительные изменения; постепенно диссоциирует в стратосфере и мезосфере.
$CO$	$7 \cdot 10^{-6}$	Продукт окисления, содержание изменчиво.
$O_3$	$10^{-6}$	Испытывает сильные изменения, имеет фотохимическое происхождение.
$NO_2$ $NO$	от 0 до $2 \cdot 10^{-6}$	В тропосфере имеет промышленное происхождение; в мезосфере и ионосфере-фотохимической природы.

В атмосфере содержатся так же следы многих других газов, не оказывающих однако скольконибудь существенного влияния на поглощение видимых и инфракрасных волн. В отдельных локальных районах можно встретить газы, поглощающие видимые и инфракрасные излучения, но не приведенные в таблице 2. Такие районы должны быть исследованы дополнительно.

Уменьшение давление с высотой достаточно хорошо описывается экспоненциальным законом. Концентрация водяного пара чрезвычайно изменчива во времени и пространстве. Однако, с увеличением высоты (по крайней мере до 10 км) она убывает.

В первом приближении энергию изолированной молекулы можно представить в виде:

$$E = E_p + E_e + E_k + E_v \quad (2)$$

,где:

<sup>4</sup>характеристика молекулярного поглощения взята из работы [12]

$E_p$  – энергия поступательного движения, которая зависит от скорости движения и может принимать любые значения;

$E_e$  – энергия электронов;

$E_k, E_v$  – колебательная и вращательная энергии.

$E_e, E_k$  и  $E_v$  могут принимать только дискретные значения. Их изменение может происходить только скачком, сопровождающимся или поглощением или излучением кванта света определенной частоты.

Формула 2 справедлива только для случая, когда можно пренебречь взаимодействием различных видов движения молекулы. В общем случае, энергия молекулы записывается:

$$E = E_p + E_e + E_k + E_v + E_{ek} + E_{ev} + E_{kv} \quad (3)$$

, где последние три члена обязаны учету взаимодействия различных видов движения молекулы.

Величины электронной, колебательной и вращательной энергии молекулы имеют разные порядки. Так, энергия электронных переходов имеет порядок нескольких электрон-вольт, колебательная энергия измеряется десятками и сотыми долями электрон вольт и вращательная энергия – тысячными и десятитысячными долями электрон-вольт. Соответственно величине энергии электронного спектра молекул занимают ультрафиолетовую и видимую часть спектра, колебательные – близкую инфракрасную, вращательные – далекую инфракрасную и микроволновую.

Электронно-колебательно-вращательный спектр представляет собой набор полос. Каждой совокупности переходов молекулы между двумя электронными состояниями соответствует электронная полоса, состоящая из набора колебательно-вращательных полос. Каждая полоса имеет конечную ширину, контур спектральных линий определяется действием трех эффектов:

радиационным затуханием;

эффектом Доплера;

эффектами столкновения молекул.

Кратко рассмотрим спектр основных поглощающих газов.

### **Водяной пар.**

Анализ колебательно-вращательного спектра водяного пара показывает, что наиболее интенсивная и широкая полоса поглощения молекулы находится в диапазоне от 5.5 мкм до 7.5 мкм. Следующая сильная полоса поглощения от 2.6 до 3.3 мкм. В этих полосах полностью поглощается солнечное излучение в вертикальном столбе атмосферы. Другие колебательно-вращательные полосы поглощения с центрами около длин волн: 1.87; 1.38; 1.1; 0.94; 0.81; 0.72 мкм. Несколько слабых полос имеется в видимой области спектра.

Тонкая структура колебательно-вращательного спектра водяного пара чрезвычайно сложна и запутана. Каждая из этих полос состоит из сотен и даже тысяч отдельных линий, идентификация которых представляет собой весьма сложную задачу.

### **Углекислый газ.**

Одна из основных колебательно-вращательных полос с центром около длины волны 15 мкм вместе с 14 полосами верхних состояний занимает довольно широкий интервал спектра, примерно от 12 до 20 мкм. В районе центральной части этой полосы (13,5–16,5 мкм) вертикальный столб атмосферы полностью поглощает солнечное излучение. Вся эта совокупность полос часто в литературе называется полосой 15 мкм. Еще одна основная колебательно-вращательная полоса с центром в 4,3 мкм шириной от 4,2 до 4,4 мкм имеет такую высокую интенсивность, что полностью поглощает в этом диапазоне солнечное излучение уже на высоте 20 км.

Кроме основных полос, есть еще ряд небольших полос поглощения с центрами в: 10.4; 9.4; 5.2; 4.8; 2.7; 2.0; 1.6; 1.4 мкм и ряд слабых полос в районе от 1.24 мкм до 0.78 мкм.

### Озон.

Молекулы озона имеют полосы поглощения с центрами: 9.1; 9.6; 14.1 мкм. Обертоны и составные частоты колебаний молекулы озона создают колебательно-вращательные полосы этой молекулы в районах: 2.7; 3.27; 3.59; 4.75; 5.75 мкм, из которых наиболее интенсивной является полоса 4.75 мкм. Поглощение полосы  $O_3$  в 9.6 мкм находится в центре длинноволнового “окна” прозрачности атмосферы 8–13 мкм. Ее центральная часть шириной около 1.0 мкм в вертикальном столбе атмосферы поглощает примерно половину солнечного излучения.

### Кислород.

В ближней инфракрасной области молекула  $O_2^{16}$ . Имеет заметные полосы, центры которых располагаются около длин волн 1,2683 мкм и 1,0674 мкм. Молекула изотонической модификации кислорода  $O^{16}O^{18}$  имеет полосы, лежащие в красной области в районах около длин волн: 0.7620 мкм, 0.6901 и 0.6317 мкм.

### Закись азота.

Молекула  $N_2O$  имеет много полос обертонов, составных частот и верхних состояний. Большинство их этих полос очень слабы. В солнечном спектре проявляются следующие полосы: 2.11; 2.16; 2.27; 2.28; 2.87; 2.97; 3.57; 3.88; 3.90; 4.06; 4.50; 4.52; 7.78; 9.56; 17.0 мкм.

### Метан.

Молекула  $CH_4$  имеет следующие полосы поглощения с центрами: 1.67; 1.71; 1.73; 2.20; 2.32; 2.37; 2.43; 3.31; 3.55; 3.85; 7.66 мкм.

### Оксид углерода.

Основная колебательно-вращательная полоса молекулы  $CO$  находится около 4.67 мкм.

Учет всех линий поглощения молекул в атмосфере весьма сложная задача. Учесть молекулярное поглощение можно двумя путями: составить физическую модель атмосферы и снять экспериментальные данные и экстраполировать их. Проблемой составления физической модели атмосферы занимался в частности Томский Институт Оптики Атмосферы при РАН. За годы исследования проделана большая работа. Как результат этих работ появился веб-сайт [2], на котором можно рассчитать параметры атмосферы для заданных условий. На рисунке 1 показана зависимость пропускания атмосферы снятая экспериментально.

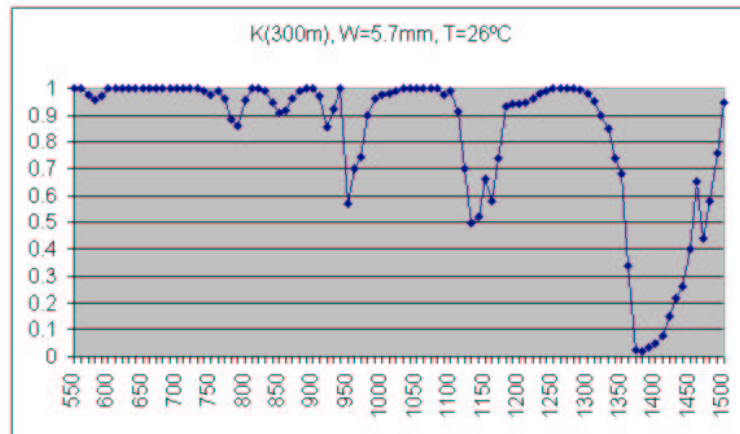


Рис. 1: Зависимость пропускания атмосферы от длины волны

При расчете оптических атмосферных линий связи выбирается так называемое “окно” прозрачности атмосферы, в котором будет работать оптико-электронный прибор. В случае использования в качестве передающих элементов лазеров, необходимо с большой точностью знать спектр излучения лазера, спектр поглощения атмосферы на выбранном участке и закон изменения спектра излучения лазера от воздействия внешних возмущений (изменение давления, нагрев рабочего тела).

## Распространение оптического сигнала в атмосфере

### Влияние турбулентности<sup>5</sup>.

Световая волна, распространяющаяся в земной атмосфере, кроме энергетических потерь, испытывает флуктуации амплитуды и фазы, обусловленные своим происхождением случайному пространственно-временному распределению показателя преломления воздуха. Последнее обусловлено турбулентными движениями в атмосфере, влекущими за собой случайное изменение температуры и связанного с ней показателя преломления.

Принципиальный физический результат теории распространения волн в турбулентной атмосфере состоит в том, что энергетические потери проходящего излучения оказываются незначительными по сравнению с потерями из-за молекулярного рассеяния, в то время как параметры оптической волны испытывают существенные случайные флуктуации.

Флуктуации амплитуды и фазы волны в оптическом пучке приводят к появлению помех, связанных с изменением структуры оптических пучков: расширению оптического пучка, флуктуациям направления его распространения и расщеплению оптического пучка.

Расширение пучка турбулентной атмосферой делает невозможной фокусировку оптического излучения на больших расстояниях. По мере увеличения диаметра источника дифракционное пятно в фокусе уменьшается в турбулентной атмосфере не в соответствии с известным в оптике однородных сред формулами, а до некоторого конечного размера, которое называют размером насыщения.

Флуктуации направления оптического пучка проявляются в смещении "центра тяжести" пучка относительно точки наблюдения. Различий в горизонтальной и вертикальной плоскостях не обнаружено. При проведении экспериментов максимальное отклонение луча лазера составило 1 мрад.

Расщепление оптического пучка на небольших расстояниях проявляется в виде сложной структуры наблюдаемого пятна (например на экране). С увеличением расстояния глубина пространственной модуляции возрастает. На больших расстояниях (в области сильных флуктуаций) оптический пучок оказывается расщепленным на тонкие нити, имеющие в сечении вид круглых и серповидных пятен. Форма пятен меняется от серповидной и круглой при боковом ветре до ячеистой при продольном.

Рассеяние оптических волн на случайных неоднородностях показателя преломления воздуха приводит к значительным по мощности флуктуациям интенсивности распространяющегося в атмосфере оптического излучения. Экспериментальное измерение флуктуации интенсивности оптического сигнала показало, что спектр флуктуации находится в диапазоне от 0 до 5000 Гц, увеличение диаметра приемника приводит к уменьшению высокочастотной составляющей. Уменьшение происходит за счет усреднения большего количества принятого излучения. При диаметра приемника 100 мм, основной спектр флуктуации лежит от 0 до 2800 Гц.

---

<sup>5</sup> характеристика турбулентности атмосферы взята из работы [14]

## Нелинейные эффекты распространения <sup>6</sup>.

При распространении в атмосфере оптического излучения гигантской мощности, возникает целая серия нелинейных эффектов. Рассмотрим некоторые, не требующие учета интерференционных явлений, многофотонные эффекты (многофотонная ионизация, диссоциация, приводящие к пробое слоя чистого воздуха), спектроскопический эффект насыщения, вызывающий частичное просветление поглощающего слоя газа, эффект самофокусировки луча, вызванный нелинейной зависимостью показателя преломления среды при ее облучении мощным потоком радиации, и эффект испарения частиц аэрозолей под действием импульсных и непрерывных источников излучения большой мощности.

Распространение мощного излучения ОКГ в среде может приводить к изменению величины показателя преломления в канале луча. Разница между значениями показателя преломления среды в канале луча и вне его может быть такой, при которой устраняется расходимость луча. Это явление получило название самофокусировки луча ОКГ.

Облучение частиц атмосферных аэрозолей мощным направленным излучением сопровождается рядом эффектов, приводящих к изменению условий распространения радиации в среде. Среди этих эффектов наибольший практический интерес представляет испарение частиц за счет поглощенной ими энергии поля. Изменение размеров частиц обуславливает соответствующее изменение объемных полидисперсных коэффициентов ослабления. Таким образом прозрачность слоя рассеивающей среды становится зависящей от интенсивности падающего излучения.

При воздействии на водный аэрозоль световых импульсов большой мощности и малой длительности частицы аэрозоля приобретают направленное движение, вызванное их неравномерным нагреванием. В результате такого направленного движения может происходить коагуляция частиц.

---

<sup>6</sup>характеристика нелинейных эффектов взята из работы [14]



## Фоновые помехи от посторонних источников в атмосфере<sup>7</sup>.

К фоновым помехам от посторонних источников в атмосфере будем относить те, которые не связаны с передачей оптического сигнала через атмосферу и существуют независимо от присутствия этого сигнала во внешнем (атмосферном) канале. Рассмотрим общую характеристику фоновых помех различной природы.

### Общая характеристика фоновых помех различной природы.

Среди естественных посторонних источников, взаимодействие оптического излучения которых с атмосферой приводит к появлению заметных фоновых помех, Солнце является наиболее мощным.

Не только прямое, прошедшее сквозь атмосферу, но и рассеянное и отраженное солнечное излучение во многих случаях является основным источником фоновых помех в атмосфере. Однако определяющим для уровня фонов при работе конкретных оптико-электронных систем является спектральный диапазон. Селективный спектральный состав приходящего излучения от источников (Солнце, Луна, молнии, метеоры и др.), требуют известной осторожности при оценке роли фоновых помех того или иного происхождения.

В инфракрасной области спектра становится заметный вклад энергии от теплового излучения атмосферы и земной поверхности. Соотношение вкладов теплового излучения и солнечного рассеянного или отраженного излучения в уровень фоновых помех в дневное время, зависит от многих факторов (от состояния атмосферы, условий наблюдения, положения солнца и др.). Тем не менее приближенно во всех случаях можно считать, что в области больше 4 мкм доминирует тепловое излучение атмосферы и земной поверхности с максимумом в спектре излучения области около 10 мкм. В спектральной области меньше 3 мкм преобладает роль фоновых помех, обусловленных солнечным излучением с максимумом видимой области спектра. В интервале длин волн 3–4 мкм имеет место минимум уровня помех, обусловленных двумя составляющими излучению, одна из которых (солнечное излучение) убывает, а другая (тепловое излучение атмосферы и земной поверхности) возрастает с ростом длины волны. В таблице 3 приведены данные по максимальной яркости фона для помех различной природы.

Таблица 3: Максимальная яркость фона для помех различной природы

Природа фоновых помех	Максимальная яркость фона Вт/см <sup>2</sup> ·ср·мкм	
	$\lambda = 1\text{мкм}$	$\lambda = 10\text{мкм}$
Отражение солнечного излучения водной поверхностью	$10^{-1}$	$10^{-5}$
Рассеяние солнечного излучения атмосферой (яркость безоблачного неба)	$10^{-2}$	$10^{-7}$
Рассеяние солнечного излучения облаками (яркость облачного неба)	$10^{-3}$	$10^{-7}$
Тепловое излучение атмосферы	$10^{-7}$	$10^{-3}$
<i>продолжение следует</i>		

<sup>7</sup> характеристика фоновых помех взята из работы [14]

(продолжение)		
Природа фоновых помех	Максимальная яркость фона Вт/см <sup>2</sup> ·ср·мкм	
	$\lambda = 1\text{мкм}$	$\lambda = 10\text{мкм}$
Свечение атмосферы	$10^{-10}$	$10^{-6}$

Кроме теплового равновесного излучения в атмосфере всегда присутствует неравновесное излучение, вызванное рядом физических и химических процессов, которое имеют место при взаимодействии оптической и жесткой солнечной радиации с атмосферой. Результатом этих процессов является слабая люминесценция атмосферы. Принято нетепловое оптическое излучение называть свечением атмосферы. Характерным для этого неравновесного излучения атмосферы является значительная спектральная селективность. В видимой области спектра свечение является линейчатым, в инфракрасной области эмиссионные линии имеют несколько большую спектральную ширину. При работе оптико-электронных систем в ночное время свечение атмосферы является существенной помехой.

## Расчет атмосферного канала

### Введение упрощений

Данная методика расчета разрабатывается применительно к малым и средним (до 1000м) расстояниям. Для больших дистанций может потребоваться учет большего числа факторов влияющих на распространение оптического сигнала в атмосфере.

Для упрощения расчетов введем ряд допущений:

Расчет ведется для систем передачи информации по атмосферному каналу на излучающих диодах;

Релеевским рассеянием можно пренебречь;

Нелинейными эффектами распространения можно пренебречь;

Мультипликативными помехами рассеяния вперед можно пренебречь;

Затухание сигнала на наклонной трассе для высот до 10 км всегда меньше, чем на горизонтальной трассе той же протяженности на высоте 0 км над уровнем земли;

Спектр флуктуаций интенсивности сигнала находится в диапазоне от 0 до 5000Гц;

Максимальное отклонение луча из-за турбулентности атмосферы—1 мрад;

В выбранном окне прозрачности отсутствуют сильные полосы молекулярного поглощения.

Исходя из данных о молекулярном поглощении можно выделить следующие "окна прозрачности" пригодные для передачи оптического сигнала, это:

400–1330 нм, исключая 1200нм;

1520–1560 нм;

1590–2200 нм;

3000–3300 нм;

4100–4700 нм.

Наибольший интерес представляет "окно" 400–1330 нм, это часть видимого и ближний инфракрасный диапазоны. На сегодняшний момент создано достаточно большое количество источников излучения, рабочая длина волны которого находится в указанном диапазоне. Если использовать в качестве излучающего элемента излучающий диод (СИД) на основе арсенид галлия с добавлением алюминия, спектр его излучения находится на  $870\text{нм}\pm 25\text{нм}$ , то он попадает в описанный выше диапазон. Далее все выкладки будем делать применительно к СИД работающим в ближнем ИК-диапазоне.

### Учет влияния погодных условий<sup>8</sup>.

Для оценки ослабления оптического сигнала в атмосфере, введено такое понятие, как видимость, это такое расстояние  $\nu$  (в км), на котором видимое излучение источника света уменьшается в 50

---

<sup>8</sup>характеристика влияния погодных условий взята из работы [7]

раз по отношению к первоначальной величине. С точностью достаточной для инженерных расчетов можно использовать формулу:

$$S = \frac{17}{\nu} \quad (4)$$

,где:

S–затухание дБ/км;

$\nu$ –дальность видимости.

В таблице 4 приведем типичные потери в зависимости от погодных условий для связи по атмосферному каналу в инфракрасном диапазоне 850нм<sup>9</sup>.

Таблица 4: Влияние погодных условий на затухание оптического сигнала

Погодные условия	Затухание, дБ/км
Ясная погода	0–3
Слабый дождь	3–6
Сильный дождь	6–17
Снег	6–26
Легкий туман	20–30
Густой туман	50–100
Облачность	300–400

Примем для расчета максимальное затухание–60 дБ/км, что соответствует густому туману концентрации меньше среднего.

## Учет фонового излучения<sup>10</sup>.

Шум, на фотоприемнике, состоит из 3-х составляющих:

атмосферные оптические помехи;

дробовые шумы;

собственные шумы фотоэлемента и усилителя.

Рассмотрим характеристики каждого из шумов.

По свойствам и физической природе атмосферные оптические помехи можно разделить на две группы:

постоянно присутствующие в атмосфере фоновые помехи, вызванные собственным излучением атмосферы и Земли или рассеянием оптического излучения от различных посторонних источников, в том числе Солнца, Луны, подстилающей поверхности и др.; помехи, за счет искажений оптического сигнала, вызванные взаимодействием сигнала с атмосферой.

Первая группа представляет собой в основном аддитивные помехи, которые суммируются с передаваемым сигналом и состоят из постоянной во времени (точнее медленно меняющейся, например, в течение суток) и случайной (быстро меняющейся) составляющих. Обе составляющие

<sup>9</sup>В общем случае дальность видимости зависит от длины волны

<sup>10</sup>характеристика фонового излучения взята из работы [14]

уменьшают динамический диапазон приемника и тем самым снижают эффективность всей системы передачи информации.

Вторая группа помех представляет как аддитивные, так и мультипликативные атмосферные помехи, которые являются сомножителем в принимаемом сигнале. Другим сомножителем регистрируемого сигнала в этом случае является полезный сигнал. Этот вид помех снижает эффективность информационной системы, изменяя и величину и форму самого передаваемого сигнала. Причем увеличение мощности оптического сигнала не ведет к линейному росту отношения сигнал/шум. К мультипликативным помехам относится одно- и многократное рассеяние вперед оптического сигнала.

Дробовые шумы обусловлены изменением интенсивности из-за флуктуации количества принятых квантов оптического сигнала.

Собственные шумы фотоэлемента характеризуют шумовые свойства фотоэлемента и первого усилительного каскада входного усилителя. Собственные шумы зависят как от типа фотоэлемента, так и от его схемы включения, типа усилительного элемента входного усилителя и др.

Для расчета уровня оптических помех, примем, что для длин волн в диапазоне от 800 до 950 нм, фоновая помеха днем не более  $10^{-2}$  Вт/см<sup>2</sup>·ср·мкм, фоновая помеха ночью не более  $10^{-6}$  Вт/см<sup>2</sup>·ср·мкм. В данном случае основной шум будет вноситься фоновым излучением, всеми остальными шумами можно пренебречь.

$$P_n = 10^{-2} \cdot S_p \cdot \angle\alpha \cdot \Delta\lambda \quad (5)$$

,где

$S_p$ —площадь приемника (см<sup>2</sup>);

$\angle\alpha$ —угол зрения приемника (ср);

$\Delta\lambda$ —диапазон длин волн принимаемый фотоприемником (мкм).

В зависимости от используемого способа модуляции оптического сигнала, меняется и минимально допустимое отношение сигнал/шум, при которых информация будет принята правильно.

Таким образом минимальная мощность оптического сигнала будет:

$$P_s = N_{min} \cdot P_n \quad (6)$$

,где

$N_{min}$ —минимально возможное отношение сигнал/шум (в разгах) для выбранного вида модуляции оптического сигнала.

## Учет отклонения луча от нормали

Исходя из сделанного допущения, что максимальное отклонение луча от нормали не больше 1 мрад, примем минимальный угол расходимости луча—2.5 мрад, при нацеливании оптического передатчика точно на приемник, отклонение луча на 1 мрад в любую сторону, не будет вызывать пропадание сигнала в приемнике.

Наибольшее влияние на угол расхождения луча будет оказывать при расчете суточные колебания несущих конструкций, зданий, подвижка грунтов, давление ветра.

## Оптическая система

Величина полного светового потока [13] характеризует излучающий элемент, и ее нельзя увеличить никакими оптическими системами. Действие этих систем может лишь сводиться к перераспределению светового потока, например, большей концентрации его по некоторым направлениям.

Таким способом достигается увеличение силы света по данным направлениям при соответствующем уменьшении ее по другим направлениям. Таково, например, действие сигнальных аппаратов или прожекторов, позволяющих при помощи источников обладающих средней сферической силой света в несколько сто кандел, создавать на оси прожектора силу света в миллионы кандел.

Диаметр приемной антенны в данном случае меньше диаметра светового пятна создаваемого источником оптического сигнала. Для оценки потерь мощности можно использовать [7]:

$$P_{lost} = 10 \lg \left( \frac{\angle \lambda \cdot l}{D} \right)^2 \quad (7)$$

, где:

$\angle \lambda$  – угол расходимости луча, рад;

$l$  – расстояние до приемника, м;

$D$  – диаметр приемника, м.

Так же необходимо учесть, что оптическая система так же вносит затухание оптического сигнала, примем величину пропускания линз 0.95 (две линзы, одна в приемнике, другая в передатчике), тогда мощность оптического сигнала необходимо будет увеличить еще на 0.5 дБ.

## Пример расчета

### Задание для расчета

Длина волны — 870 нм;

Диапазон длин волн принимаемый фотоприемником — 850–900 нм;

Расходимость луча — 4 мрад;

Дальность действия — 150 м;

Радиус приемника — 4 см;

Площадь приемного элемента — 1 см<sup>2</sup>;

Угол зрения приемника — 0.17 рад;

Работа гарантирована при — густой туман, затухание не более 60 дБ/км;

Модуляция — АМ;

Минимально отношение сигнал/шум — 3 дБ.

Расчитаем мощность оптических шумов:

$$P_n = 10^{-2} \cdot S_p \cdot \angle \alpha \cdot \Delta \lambda \quad (8)$$

$$P_n = 10^{-2} \cdot 1 \cdot 0.17 \cdot 0.05 = 8.5 \cdot 10^{-5} \quad (9)$$

Мощность оптических шумов составляет 8.5 · 10<sup>-5</sup> Вт.

Расчитаем потери за счет погодных условий для заданной дальности:

$$P_{w_{150}} = P_{spr} \cdot 0.150 = 60 \cdot 0.150 = 9 \quad (10)$$

Потери при густом тумане на трассе 150 м составят 9 дБ.

Расчитаем потери оптического сигнала за счет расхождения луча:

$$P_{lost} = 10 \lg \left( \frac{\angle \lambda \cdot l}{D} \right)^2 = 10 \lg \left( \frac{0.004 \cdot 150}{0.08} \right)^2 = 17.5 \quad (11)$$

Потери за счет расхождения луча составили 17.5 дБ.

Найдем величину сигнал/шум (в дБ), учтя при этом все потери:

$$P_{s-n} = P_{s\_min} + P_{w\_150} + P_{lost} + P_{opt} = 3 + 9 + 17.5 + 0.5 = 30 \quad (12)$$

Величина минимального отношения сигнал/шум будет 30дБ.

Минимальная мощность оптического сигнала будет:

$$P_s = 10^{\frac{P_{s-n}}{10}} \cdot P_n = 10^{\frac{30}{10}} \cdot 8.5 \cdot 10^{-5} = 0.085 \quad (13)$$

Минимальная излучаемая мощность оптического сигнала составляет 85 мВт.

## Список использованных источников

- [1] *А.В. Миронов* Прецизионная фотометрия,  
<http://xray.sai.msu.ru/mystery/html/AlMir/lector/index.html>
- [2] Атмосферная спектроскопия, <http://spectra.iao.ru>
- [3] *Кулик Т. К., Прохоров Д.В.* Методика сравнительной оценки работоспособности лазерных линий связи. *Технология и средства связи*, 2000, № 6, с. 8-10.
- [4] *Клоков А.В.* Беспроводная оптическая связь - Мифы и реальность. *Технология и средства связи*, 2000. № 6. с. 12-13.
- [5] *Клоков А.В.* Беспроводные ИК-технологии, истинное качество "последней мили". *Технология и средства связи*, 1999, № 5, с. 40-44.
- [6] *Николаев А.Ю.* Расчет надежности работы атмосферной оптической линии связи. *Информост - Средства связи*, 2001, № 4(17), с. 26-27.
- [7] *Медвед Д.Б.* Влияние погодных условий на беспроводную оптическую связь. *Вестник связи*, 2001, № 4, с. 154-157.
- [8] *Якушенков Ю.Г.* Основы теории и расчета оптико-электронных приборов. Учебное пособие для вузов. Изд-во "Советское радио", 1971 г., 336 стр.
- [9] *Красюк Б.А., Корнеев Г.И.* Оптические системы связи и световодные датчики. *Вопросы технологии.* - М.: Радио и связь, 1985.-192 с., ил.
- [10] *Р.А. Казарян, А.В. Оганесян и др.* Оптические системы передачи информации по атмосферному каналу. Под. ред. Р.А. Казаряна. - Радио и связь, 1985 г.-208 с., ил.
- [11] *Гауер Дж.* Оптические системы связи: Пер. с англ.-М.: Радио и связь, 1989.-504 с.: ил.
- [12] *Зуев В.Е.* Распространение видимы и инфракрасных волн в атмосфере.-М.: Советское радио, 1970.
- [13] *Ландсберг Г.С.* Оптика. Изд. пятое перераб. и доп. М.: Наука, 1976.
- [14] *Зуев В.Е.* Перенос оптических сигналов в земной атмосфере в условиях помех.-М.: Советское радио, 1977.
- [15] *Зуев В.Е.* Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей.-М.: Советское радио, 1966.
- [16] *Шереметьев А.Г., Толпарев Р.Г.* Лазерная связь.-М.: Связь, 1974.
- [17] Оптическая связь: Пер, с япон.-М.: Радио и связь, 1984.-384 с., ил.
- [18] *У. Вольф, Б. Герман, Э. Ла Рокка, Г. Сьютс, Р. Тернер, Р. Хуфнагель* Справочник по инфракрасной технике./Ред. У. Вольфа, Г. Цисис. В 4-х тт. Т. 1. Физика ИК-излучения: Пер. с англ.-М.: Мир, 1995.-606 с., ил.