

РАССЕЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА В АТМОСФЕРЕ

О.Ф. Прилуцкий, М.Н. Фоменкова

Большая часть предлагаемых схем проверки ограничений на мощные лазеры основана на измерении интенсивности рассеянного в атмосфере лазерного излучения. Возможность проведения таких измерений определяется двумя физическими факторами:

а) интенсивностью рассеянного излучения, зависящей от таких факторов, как мощность лазера, его рабочая длина волны, геометрическое расположение проверяемого лазера и монитора, и физических свойств рассеивающей среды (атмосферы);

б) яркостью фонового излучения атмосферы на наблюдаемой длине волны, зависящей от атмосферных условий и от положения Солнца.

Эти факторы в основном и определяют отношение сигнала к шуму во время проведения верификационных измерений на мониторе. В этой короткой заметке приводится краткий набор формул и таблиц с данными, которые могут быть использованы для оценки уровня рассеянного излучения лазерного пучка, а также общая формула для оценки интенсивности фонового излучения в атмосфере.

Авторы статьи работают в Институте космических исследований Российской Академии Наук, г. Москва.

Распространяющийся в атмосфере пучок лазерного излучения может рассеиваться в результате действия двух механизмов: релеевского рассеяния на отдельных молекулах и рассеяния на аэрозолях (находящихся в атмосфере малых частицах). Мы предполагаем, что поток энергии в лазерном пучке не настолько велик, чтобы он мог изменять оптические свойства атмосферы, в которой он распространяется (иначе говоря, мы предполагаем линейный закон ослабления). При ослаблении по линейному закону интенсивность распространяющегося в среде пучка определяется выражением $I(x) = I_0 \exp(-\beta x)$, где I_0 - интенсивность пучка на входе в среду (при $x = 0$), $I(x)$ - интенсивность пучка, прошедшего в среде расстояние x и β - коэффициент экстинкции (ослабления) в результате действия различных процессов рассеяния и поглощения. Коэффициент экстинкции в принципе может зависеть от координаты x (например, при вертикальном или наклонном распространении пучка).

Релеевское рассеяние. Коэффициент экстинкции для релеевского рассеяния обратно пропорционален четвертой степени длины волны; он приблизительно аппроксимируется следующим выражением:¹

$$\beta_R(\lambda) = \frac{32\pi^3(n-1)^2}{3N\lambda^4} \quad (1)$$

где N - это концентрация молекул в атмо-

сфере (на уровне моря $N = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$), λ - длина волны излучения, и n - показатель преломления, который может зависеть от длины волны. Зависимость коэффициента экстинкции релеевского рассеяния от длины волны и высоты приведена в табл. 1. Он изменяется с высотой пропорционально плотности атмосферы.

Нормированное угловое распределение релеевского рассеянного излучения определяется стандартным выражением для углового распределения интенсивности дипольного излучения:¹

$$f(\theta) = \frac{3(1 + \cos^2\theta)}{4} \quad (2)$$

где θ - угол рассеяния (угол между направлением распространяющегося в атмосфере лазерного пучка и направлением от рассеивающего объема к детектору).

Поскольку интенсивность релеевского рассеяния очень быстро уменьшается с ростом длины волны, этот механизм доминирует над рассеянием на аэрозолях (см. ниже) только в области ближнего ультрафиолета и в голубой области видимого участка.

Рассеяние на аэрозолях. Этот механизм определяет рассеяние излучения в области более длинных волн²⁻⁵ и его угловое распределение является значительно более сложным. Интенсивность и угловое распределение рассеянного излучения при рассеянии на аэрозолях сильно зависят от локаль-

Таблица 1
Коэффициент экстинкции для релеевского рассеяния на уровне моря
в зависимости от длины волны

λ (мкм)	β_R (км ⁻¹)	λ (мкм)	β_R (км ⁻¹)
0,30	$1,4 \cdot 10^{-1}$	0,65	$5,9 \cdot 10^{-3}$
0,32	$1,1 \cdot 10^{-1}$	0,70	$4,0 \cdot 10^{-3}$
0,34	$8,5 \cdot 10^{-2}$	0,80	$2,5 \cdot 10^{-3}$
0,36	$6,7 \cdot 10^{-2}$	0,90	$1,6 \cdot 10^{-3}$
0,38	$5,2 \cdot 10^{-2}$	1,06	$8,5 \cdot 10^{-4}$
0,40	$4,3 \cdot 10^{-2}$	1,26	$4,1 \cdot 10^{-4}$
0,45	$2,6 \cdot 10^{-2}$	1,67	$1,3 \cdot 10^{-4}$
0,50	$1,7 \cdot 10^{-2}$	2,17	$4,6 \cdot 10^{-5}$
0,55	$1,2 \cdot 10^{-2}$	3,50	$6,8 \cdot 10^{-6}$
0,60	$8,2 \cdot 10^{-3}$	4,00	$4,0 \cdot 10^{-6}$

ных свойств аэрозольной составляющей атмосферы, которые, в свою очередь, сильно зависят от климатических условий, погоды и т.д. Поэтому простых выражений для характеристик рассеяния на аэрозолях не существует, и моделирование процесса рассеяния требует довольно сложных вычислений.

Моделирование аэрозольной составляющей атмосферы включает три этапа:

- 1.) Описание физических характеристик отдельных аэрозольных частиц.
- 2.) Описание оптических свойств на базе известных физических характеристик.
- 3.) Определение пространственного распределения концентрации аэрозольных частиц.

Для описания распределения аэрозольных частиц в атмосфере по радиусам пылинок или капель обычно используют модифицированно-нормированное гамма-распределение:³

$$g(a) = ca^{\alpha} \exp(-ba^{\gamma}) \quad (3)$$

где a - это радиус частицы, и c , α , b и γ - эмпирические параметры. В табл. 2 приведены значения этих эмпирических параметров для различных типов атмосферных аэрозолей.³

Оптические свойства аэрозолей могут быть рассчитаны, исходя из распределения их размеров, значения показателя и их геометрических характеристик. В результаты теоретических расчетов должны быть введены поправки на основе измерений, сделанных на месте установки монитора. В табл. 3 показана зависимость коэффициента экстинкции и углового распределения рассея-

ного излучения от длины волны для модели кучевых и слоистообразных облаков. Эмпирическое выражение для зависимости коэффициента экстинкции от длины волны имеет следующий вид (где $\nu_0 = 0,59$ мкм):⁶

$$\beta_a(\lambda) = \beta_a(\lambda_0)(k_0 + k_1 \lambda^{-k_2}) \quad (4)$$

В табл. 4 приведены значения эмпирических коэффициентов k_0 , k_1 и k_2 для различных атмосферных условий (очевидно, что эти условия определены не строго и, вообще говоря, эти определения не имеют прямого отношения к реальным условиям проведения измерений; однако, эти данные иллюстрируют очень сильную переменность характеристик рассеяния в зависимости от состояния атмосферы).

Распределение атмосферных аэрозолей по высоте аппроксимируется эмпирической формулой Эльтермана.⁷ На высоте ниже 5 километров приближенное выражение для зависимости коэффициента экстинкции от высоты имеет вид:

$$\beta_a(z, \lambda) = \beta_a(0, \lambda) \exp\left(-\frac{z}{z_a}\right) \quad (5)$$

где величина z_a определяется подгонкой к измеренному значению на высоте в 5 километров. На высоте более 5 километров коэффициент экстинкции аэрозолей не зависит от состояния атмосферы на уровне моря; сводка его значений на больших высотах приведена в табл. 5.

Фоновое излучение атмосферы. Оно

Таблица 2
Физические характеристики различных типов аэрозолей
(дымок, осадков и облаков)

Тип аэрозоля	$N, \text{см}^{-3}$	c	$a_m, \text{мкм}$	α	γ
Морской или прибрежный	100	$5,33 \cdot 10^4$	0,05	1	1/2
Континентальный	100	$4,98 \cdot 10^6$	0,07	2	1/2
Высотный и стратосферный	100	$4,00 \cdot 10^5$	0,10	2	1
Слабый и умеренный дождь	10^{-4}	$5,33 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^4$	1	1/2
Сильный дождь	10^{-3}	$4,98 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^4$	2	1/2
Град с мелкими частицами	10^{-5}	$4,00 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^6$	2	1
Кучевые облака, туманы	100	2,37	4,00	6	1
Облака, в которых образуются цветные кольца	100	$1,08 \cdot 10^{-2}$	4,00	8	3
Перламутровые облака	100	5,56	2,00	8	3
Облака, в которых образуются гало	100	5,56	4,00	8	3

складывается из нескольких составляющих:
- солнечного излучения, рассеянного на молекулах;
- солнечного излучения, рассеянного на аэрозолях;
- теплового излучения атмосферы;
- нетеплового излучения атмосферы.
Относительный вклад этих компонент зависит от длины волны, положения Солнца,

и характеристик состояния атмосферы (облачного покрова и т.д.). В безоблачную погоду для оценки интенсивности фонового излучения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне можно использовать формулу (6), в которой πS_λ - спектральная плотность солнечного излучения за пределами земной атмосферы; ν_R , ν_a и ν_0 - зависящие от длины волны оптические толщи атмосферы соо-

Таблица 3
Оптическая модель облака с параметрами микроструктуры, равными:
 $a_m = 4 \text{ мкм}$, $\alpha = 6$, $b = 1,5$, $\gamma = 1$, $N = 100 \text{ см}^{-3}$

$\nu, \text{мкм}$	$b, \text{км}^{-1}$	$f(\theta)/2$						
		0	30	60	90	120	150	180
0,45	16,3	617	0,36	0,045	0,0054	0,0073	0,0255	0,100
0,70	16,7	267	0,26	0,033	0,0054	0,0072	0,0258	0,101
1,19	17,3	96,5	0,36	0,050	0,0092	0,0081	0,0300	0,091
1,45	17,6	67,5	0,35	0,053	0,0106	0,0092	0,0316	0,105
1,61	17,6	53,9	0,35	0,055	0,0118	0,0104	0,0337	0,121
1,94	18,1	40,7	0,34	0,057	0,0127	0,0111	0,0303	0,089
2,25	18,4	29,3	0,38	0,058	0,0136	0,0145	0,0296	0,091
3,00	18,0	31,5	0,13	0,018	0,0077	0,0059	0,0056	0,006
3,90	20,6	10,6	0,42	0,073	0,0206	0,0147	0,0302	0,038
5,30	23,9	7,57	0,41	0,049	0,0135	0,0091	0,0126	0,009
6,05	19,9	8,27	0,34	0,032	0,0082	0,0042	0,0035	0,003
8,15	18,8	4,81	0,55	0,044	0,0106	0,0054	0,0052	0,005
10,0	11,2	3,70	0,68	0,045	0,0093	0,0045	0,0039	0,005
11,5	10,1	2,94	0,75	0,058	0,0113	0,0059	0,0052	0,005
16,6	17,0	1,58	0,72	0,130	0,0334	0,0174	0,0140	0,014

Таблица 4
Эмпирические параметры коэффициента экстинкции аэрозолей

Периоды	Тип аэрозоля	k_0	k_1	k_2
Зимний	"Ледяная" дымка	0,248	0,447	1,24
	Зимняя дымка	0,000	0,580	1,24
	Дымка со снегом	0,770	0,145	1,24
Весенне-осенний	Устойчивая дымка	0,040	0,585	1,02
	Туманная дымка	0,116	0,690	0,56
	Дымка с моросью	0,275	0,455	1,09
	Дымка с морозящим дождем	0,605	0,215	1,34
Летний	После сильного дождя	0,000	0,400	1,88
	Устойчивая дымка	0,060	0,360	1,88

Таблица 5
Зависимость коэффициента экстинкции на аэрозолях k (в км^{-1}) от высоты в интервале высот более 5 километров

Высота (в км)	Длина волны (в мкм)						
	0,40	0,55	0,70	1,06	1,26	1,67	2,17
5	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$
10	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
15	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
20	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$9,2 \cdot 10^{-4}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$
25	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$
35	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$
50	$7,6 \cdot 10^{-7}$	$6,0 \cdot 10^{-7}$	$5,1 \cdot 10^{-7}$	$4,3 \cdot 10^{-7}$	$4,1 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$

ответственно по релеевскому рассеянию, рассеянию на аэрозолях и молекулярному поглощению (на молекулах озона и некоторых других атмосферных составляющих); ω - угол между лучом зрения и Солнцем, ξ_0 - угол между Солнцем и зенитом, ξ - угол

между лучом зрения и зенитом; $c_H = 0,133 + 1,33q$ (q - альbedo подстилающей поверхности); $\sigma = 2,326(\nu_a + 0,062\nu_R)$.⁸

На длинах волн более 3 - 4 микрон становится заметным вклад теплового излучения атмосферы.⁹ Еще раз отметим, что вы

$$B_H = [\pi S_\lambda \frac{2,060\tau_R(1 + \cos^2\varphi) + \eta(\exp[-3\varphi] - 0,009)}{\tau_a + \tau_R}$$

$$\times \left(\frac{\exp(-\tau_a \sec \xi_0) + \exp(-\tau_a \sec \xi)}{\sec \xi - \sec \xi_0} \right) \sec \xi \quad (6)$$

$$+ \frac{c_H S_\lambda \exp(-\tau_a \sec \xi_0) \tau_a \sec \xi_0}{4} \times \left(\frac{1 - \exp(-\tau_a \sec \xi)}{1 - \exp(-\tau_a \sec \xi_0)} \right) \exp(-\tau_0 \sec \xi_0)$$

ражение (6) справедливо только для безоблачной погоды. Присутствие облаков изменяет яркость фона и создает мелкомасштабную структуру изменения яркости.

Рассеянное лазерное излучение. В общем случае относительная яркость рассеянного излучения лазерного пучка может быть рассчитана на основе приведенных выше данных по интенсивности рассеяния и яркости фонового излучения. Яркость рассеянного излучения лазера определяется выражением:

$$B(\theta) \propto \frac{P[\beta_R f_R(\theta) + \beta_a f_a(\theta)]}{d} \quad (7)$$

где P - мощность лазера, $\beta_R f_R$ и $\beta_a f_a$ - произведения коэффициентов экстинкции и нормированных угловых распределений для релеевского рассеяния и рассеяния на аэрозолях соответственно, а d - диаметр пучка.

Для лазера с параметрами, близкими к параметрам лазера MIRACL ($P = 1$ МВт, $\lambda = 4$ микрона),¹⁰ типичное значение яркости рассеянного излучения будет равно (для $\beta_R + \beta_a = 10^{-2}$ км⁻¹ и $f(\theta) = 10^{-2}$):

$$B = \frac{10^6 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-2}}{3 \cdot 10^2} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/см}^2 \text{ стер}$$

Эта величина сравнима с яркостью безоблачного неба при той же длине волны.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. J.D. Jackson, "Classical Electrodynamics", New York, John Wiley, 1975.
2. В.Е. Зуев, М.В. Кабанов, "Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех)", М., Советское радио, 1977.
3. Д. Дейрменджан, "Рассеяние электромагнитных волн сферическими полидисперсными частицами", М., Мир, 1971.
4. В.Е. Зуев, М.В. Кабанов, "Оптика атмосферного аэрозоля", Л., Гидрометеониздат, 1987.
5. В.Е. Зуев, М.В. Кабанов, "Оптические модели атмосферы", Л., Гидрометеониздат, 1987.
6. В.Л. Филиппов, С.О. Мирумянц, "Анализ среднестатистических спектральных зависимостей коэффициентов аэрозольного ослабления в области 0,59 - 10 мкм", Известия ВУЗов СССР, Физика, 1972, вып. 10.
7. I. Elterman. "Atmospheric Attenuation Model 1964 in the Ultraviolet, Visible and Infrared Regions for Altitudes to 50 km", Environmental Research Papers, v. 46, AFCRL Report, 1964.
8. Г.Ш. Лифшиц, И.А. Федулин, "Приближенная формула яркости безоблачного неба", Известия АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1971, вып. 9.
9. О.П. Кузнечик, Г.К. Афанасьев, "Пространственные частоты лучистости ясного неба в области 4,5 - 5,2 мкм", ДАН БССР, 1973, вып. 6.
10. "Report to the American Physical Society of the Study Group on Science and Technology of Directed Energy Weapons", Rev. Mod. Phys., v. 59, No. 3, Part II, 1987.