

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПУСКАНИЯ АТМОСФЕРЫ НА НАКЛОННОЙ ТРАССЕ ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ ДЛИН ВОЛН

© 2016 г. Л. Г. Евсикова, канд. техн. наук; Ю. А. Горемыкин

АО “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

E-mail: evsikowa.lyubov@yandex.ru

Представлен вывод формулы коэффициента пропускания атмосферы на наклонной трассе в зависимости от длины наклонной трассы, вертикального профиля аэрозольных коэффициентов рассеяния, прозрачности атмосферы (метеорологической дальности видимости) и длины волны лазерного излучения. Формула была применена при расчете плотности энергии излучения в плоскости входного зрачка лазерного дальномера (рабочая длина волны излучения 1,06 мкм), установленного на подвижном носителе на высоте полёта не менее 5 км.

Ключевые слова: коэффициент пропускания атмосферы, аэрозольный коэффициент рассеяния, длина волны лазерного излучения, длина наклонной трассы.

Коды OCIS: 010.1320, 010.3310.

Поступила в редакцию 29.03.2016.

Введение

При проведении инженерных расчетов, связанных, в частности, с оценкой плотности энергии излучения в плоскости входного зрачка лазерных дальнометров (ЛД), установленных на летательных аппаратах, требуется знание коэффициента пропускания атмосферы для лазерных длин волн. В известных нам источниках [1–3] этот вопрос проработан для нижнего слоя атмосферы высотой не более 5 км, в котором коэффициент аэрозольного рассеяния экспоненциально убывает с высотой. Для этого слоя атмосферы коэффициент пропускания среды (в одном направлении) на наклонной трассе для лазерного излучения определяется по формуле

$$T_{h<5}(D) = \exp\left\{-\frac{h_a \alpha_m(0) D}{H} \left(1 - e^{-\frac{H}{h_a}}\right)\right\}, \quad (1)$$

где D – длина наклонной трассы в км, H – высота полета носителя в км, h_a – эмпирический коэффициент распределения атмосферной дымки по высоте вычисляется из соотношения:

$$\alpha_m(h) = \alpha_m(0) \exp\left(-\frac{h}{h_a}\right), \quad (2)$$

где $\alpha_m(h)$ – коэффициент аэрозольного рассеяния для высоты h , $\alpha_m(0)$ – коэффициент аэро-

зольного рассеяния на земной поверхности рассчитывается по формуле:

$$\alpha_m(0) = \frac{3,912}{S_m} \left(\frac{\lambda}{0,55}\right)^{-0,585 \sqrt[3]{S_m}},$$

где S_m – метеорологическая дальность видимости в км, λ – длина волны излучения в мкм.

Формула (1) есть результат интегрирования соотношения (2) от 0 до D с заменой переменной l на h , т. к. $\alpha_m(h) = f(h)$ и для неоднородных сред в соответствии с интегральным законом Бугера коэффициент пропускания среды

$$T(D) = \exp\left(-\int_0^D \alpha(l) d(l)\right).$$

Для упрощения расчетов преобразуем формулу (1) с тем, чтобы коэффициент $\alpha_m(h)$ присутствовал в ней в явном виде.

Преобразование формулы

Для краткости обозначим $\alpha_m(h) = \alpha_h$, $\alpha_m(0) = \alpha_0$ и представим формулу (2) в виде

$$\alpha_h = \alpha_0 e^{-\frac{h}{h_a}}, \text{ откуда следует}$$

$$e^{-\frac{h}{h_a}} = \frac{\alpha_h}{\alpha_0}, \quad (3)$$

$\frac{h}{e^{h_a}} = \frac{\alpha_0}{\alpha_h}$, прологарифмировав обе части этого выражения, получим:

$$\frac{h}{h_a} = \ln\left(\frac{\alpha_0}{\alpha_h}\right), \text{ откуда следует}$$

$$h_a = \frac{h}{\ln\left(\frac{\alpha_0}{\alpha_h}\right)}.$$

В работе [3] рекомендовано h_a вычислять из соотношения (2) при значении $h_1 = 5$ км, при котором $\alpha_m(h_1) = \alpha_{h1}$ берется из таблиц [3]. Таким образом,

$$h_a = \frac{h_1}{\ln\left(\frac{\alpha_0}{\alpha_{h1}}\right)}. \quad (4)$$

Подставив в (1) формулы (3) и (4), получим:

$$T_{h<5}(D) = \exp\left\{-\frac{h_1 \alpha_0 D}{\ln\left(\frac{\alpha_0}{\alpha_{h1}}\right) H} \left(1 - \frac{\alpha_H}{\alpha_0}\right)\right\} = \exp\left\{-\frac{h_1 (\alpha_0 - \alpha_H) D}{H \ln\left(\frac{\alpha_0}{\alpha_{h1}}\right)}\right\}. \quad (5)$$

Формула (5) применима для нижнего слоя атмосферы и высоты полёта носителя $H < 5$ км. Для $H = h_1$ формула (5) примет вид:

$$T_{h=5}(D) = \exp\left\{-\frac{(\alpha_0 - \alpha_{h1}) D}{\ln\left(\frac{\alpha_0}{\alpha_{h1}}\right)}\right\}. \quad (6)$$

Вывод формулы для высоты полета носителя от 5 до 20 км

В соответствии с моделью стратификации атмосферы [3] предполагается, что на высотах $h > 5$ км убывание коэффициента ослабления атмосферы уже не зависит от метеорологической дальности видимости S_M и в соответствии с рис. 1 атмосфера состоит из аэрозольных слоев высотой $t = 1$ км каждый, в пределах которого коэффициент аэрозольного рассеяния $\alpha_{hi} = \text{const}$. Таким образом, коэффициент пропускания каждого слоя в соответствии с зако-

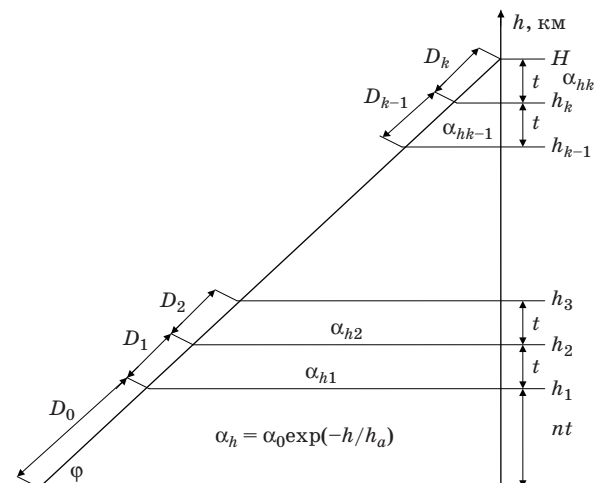


Рис. 1. К расчету коэффициента пропускания атмосферы на наклонной трассе при заданном угле визирования φ и высоте $h > 5$ км.

ном Бугера для однородной среды может быть рассчитан по формуле

$$T_{hi}(D_i) = \exp(-\alpha_{hi} D_i). \quad (7)$$

В работе [3] для отдельных лазерных длин волн приведены коэффициенты аэрозольного рассеяния α_{hi} для высот от 5 до 20 км через 1 км, что позволяет определить коэффициент пропускания среды (в одном направлении) $T_h(D)$ на наклонной трассе для лазерного излучения на этих высотах.

В этом случае, как следует из рис. 1, длина наклонной трассы

$$D = D_0 + D_1 + D_2 + \dots + D_{\kappa-1} + D_{\kappa},$$

где $D_0 = \frac{h_1}{\sin\varphi} = \frac{ntD}{H}$ – длина участка наклонной трассы в нижнем слое атмосферы высотой $h_1 = 5$ км; $n = h_1/t = 5$ для этого слоя атмосферы;

$D_1 = D_2 = \dots = D_{\kappa-1} = D_{\kappa} = \frac{Dt}{H}$ – длины участков наклонной трассы в слоях атмосферы высотой $t = 1$ км с коэффициентами аэрозольного рассеяния α_{hi} ; $\kappa = (H - h_1)/t$ – число слоев атмосферы высотой 1 км; $i = 1, 2, 3, \dots, \kappa$.

Таким образом, с учетом формул (6) и (7) коэффициент пропускания среды (в одном направлении) на наклонной трассе для лазерного излучения на высоте полета носителя H выше 5 (до 20) км

$$T_h(D) = T_{h=5}(D_0) T_{h1}(D_1) \dots T_{h\kappa-1}(D_{\kappa-1}) T_{h\kappa}(D_{\kappa}) = \exp\left[-\left(\frac{\alpha_0 - \alpha_{h1}}{\ln\left(\frac{\alpha_0}{\alpha_{h1}}\right)} D_0 + \alpha_{h1} D_1 + \dots\right)\right]$$

$$+ \alpha_{hk-1} D_{k-1} + \alpha_{hk} D_k \Bigg) =$$

$$= \exp \left[- \left(\frac{\alpha_0 - \alpha_{h1}}{\ln \left(\frac{\alpha_0}{\alpha_{h1}} \right)} \frac{ntD}{H} + \frac{Dt}{H} \sum_{i=1}^k \alpha_{hi} \right) \right],$$

и окончательно,

$$T_h(D) = \exp \left[- \frac{D}{H} t \left(n \frac{\alpha_0 - \alpha_{h1}}{\ln \left(\frac{\alpha_0}{\alpha_{h1}} \right)} + \sum_{i=1}^k \alpha_{hi} \right) \right], \quad (8)$$

где $t = 1$ км, $n = 5$, $\alpha_{h1} = 1,427 \times 10^{-3}$ для лазерной длины волны $\lambda = 1,06$ мкм [3].

Таким образом, принимая во внимание, что $\alpha_0 = f(\lambda, S_m)$, получена зависимость коэффициента пропускания атмосферы на наклонной трассе от длины наклонной трассы D , высоты полета носителя H , вертикального профиля аэрозольных коэффициентов рассеяния α_{hi} , метеорологической дальности видимости S_m и длины волны лазерного излучения λ .

Практическое применение формулы

Формула (8) была применена при расчёте плотности энергии излучения E_{ld} в плоскости входного зрачка ЛД, установленного на подвижном носителе на высоте полета $H \geq 5$ км, рабочая длина волны ЛД $\lambda = 1,06$ мкм. Расчёт проводился по формуле

$$E_{ld}(D, E_p) = \frac{E_p \rho T_h^2(D)}{\pi D^2}, \quad (9)$$

где E_p – энергия излучения ЛД, $\rho = 0,2$ – коэффициент отражения объекта, D – длина наклонной трассы (дальность до объекта).

Расчёт проводился по специально составленной программе для ЛД с энергией излучения лазера 50, 100 и 150 мДж, высота полета принималась равной 5, 10, 15 и 20 км, метеорологическая дальность видимости – 2, 6, 10 и 20 км.

По результатам расчёта, представленным в таблице, были построены графики зависимости плотности энергии излучения E_{ld} в плоскости входного зрачка ЛД от высоты полета носителя H при различных сочетаниях D_i , S_{mi} , E_{pi} .

Графики представлены на рис. 2–4, где $D_1 = 20$ и $D_2 = 30$ км, $S_{m1} = 10$ и $S_{m2} = 20$ км, $E_{p1} = 100$ и $E_{p2} = 150$ мДж.

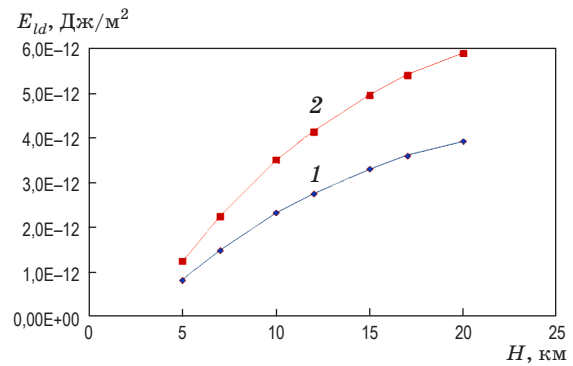


Рис. 2. Зависимости плотности энергии излучения E_{ld} в плоскости входного зрачка ЛД от высоты H при дальности до объекта D_2 , метеорологической дальности видимости S_{m1} и энергии излучения лазера E_{p1} (1) и E_{p2} (2).

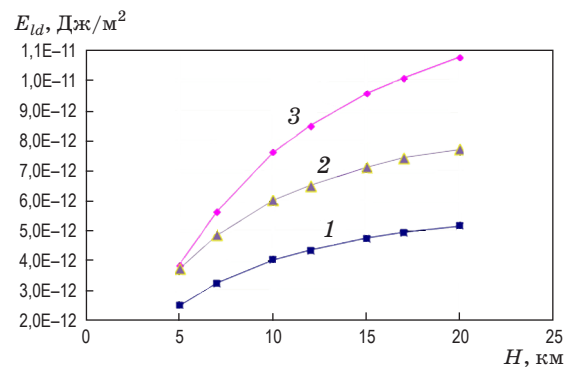


Рис. 3. Зависимости плотности энергии излучения E_{ld} в плоскости входного зрачка ЛД от высоты H при дальностях до объекта D_i , метеорологических дальностях видимости S_{mi} и энергий излучения лазера E_{pi} в следующих сочетаниях: D_2, S_{m2}, E_{p1} (1), D_2, S_{m2}, E_{p2} (2), D_1, S_{m1}, E_{p1} (3).

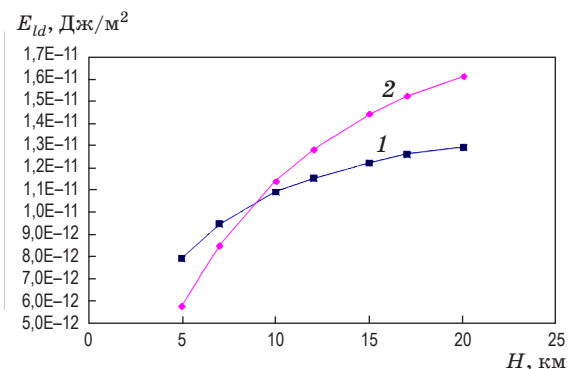


Рис. 4. Зависимости плотности энергии излучения E_{ld} в плоскости входного зрачка ЛД от высоты H при дальности до объекта D_1 , метеорологических дальностях видимости S_{mi} и энергий излучения лазера E_{pi} в следующих сочетаниях: D_1, S_{m2}, E_{p1} (1), D_1, S_{m1}, E_{p2} (2).

Зависимость плотности энергии излучения E_{ld} в плоскости входного зрачка ЛД от дальности до объекта D при визировании с высоты H при различных метеорологической дальности видимости S_m и энергии излучения лазера E_p

		Плотности энергии излучения E_{ld} , Дж/м ² , при энергии излучения лазера, мДж																			
S_m , км	D , км	при визировании с высоты H , км																			
		5					10					15					20				
		50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150		
2	10	8,92 E-13	1,78 E-12	2,68 E-12	5,26 E-12	1,05 E-11	1,58 E-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	11	5,16 E-13	1,03 E-12	1,55 E-12	3,63 E-12	7,25 E-12	1,09 E-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	12	3,03 E-13	6,06 E-13	9,09 E-13	2,55 E-12	5,09 E-12	7,64 E-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	13	1,81 E-13	3,61 E-13	5,42 E-13	1,81 E-12	3,62 E-12	5,43 E-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	14	1,09 E-13	2,18 E-13	3,27 E-13	1,30 E-12	2,61 E-12	3,91 E-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	10	9,67 E-12	1,93 E-11	2,90 E-11	1,73 E-11	3,46 E-11	5,19 E-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	15	2,37 E-12	4,74 E-12	7,11 E-12	5,67 E-12	1,13 E-11	1,70 E-11	7,61 E-12	1,52 E-11	2,28 E-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	20	7,35 E-13	1,47 E-12	2,21 E-12	2,35 E-12	4,70 E-12	7,06 E-12	3,48 E-12	6,96 E-12	1,04 E-11	4,23 E-12	8,46 E-12	1,27 E-11	-	-	-	-	-	-	-	
	25	2,59 E-13	5,19 E-13	7,78 E-13	1,11 E-12	2,22 E-12	3,33 E-12	1,81 E-12	3,63 E-12	5,44 E-12	2,31 E-12	4,62 E-12	6,93 E-12	-	-	-	-	-	-	-	
	30	9,88 E-14	1,99 E-13	2,98 E-13	5,65 E-13	1,14 E-12	1,71 E-12	1,02 E-12	2,05 E-12	3,07 E-12	4,62 E-12	6,93 E-12	1,27 E-11	-	-	-	-	-	-	-	
	20	1,93 E-12	3,85 E-12	5,78 E-12	3,81 E-12	7,62 E-12	1,14 E-11	4,80 E-12	9,60 E-12	1,44 E-11	5,38 E-12	1,08 E-11	1,61 E-11	-	-	-	-	-	-	-	
10	25	8,65 E-13	1,73 E-12	2,60 E-12	2,03 E-12	4,06 E-12	6,08 E-12	2,71 E-12	5,42 E-12	8,13 E-12	3,12 E-12	6,25 E-12	9,37 E-12	-	-	-	-	-	-	-	
	30	4,22 E-13	8,43 E-13	1,26 E-12	1,17 E-12	2,34 E-12	3,51 E-12	1,66 E-12	3,32 E-12	4,97 E-12	1,97 E-12	3,93 E-12	5,90 E-12	-	-	-	-	-	-	-	
	35	2,17 E-13	4,35 E-13	6,52 E-13	7,16 E-13	1,43 E-12	2,15 E-12	1,07 E-12	2,15 E-12	3,22 E-12	1,31 E-12	2,62 E-12	3,93 E-12	-	-	-	-	-	-	-	
	40	1,17 E-13	2,33 E-13	3,50 E-13	4,56 E-13	9,12 E-13	1,37 E-12	7,24 E-13	1,45 E-12	2,17 E-12	9,10 E-13	1,82 E-12	2,73 E-12	-	-	-	-	-	-	-	
	20	3,96 E-12	7,93 E-12	1,19 E-11	5,45 E-12	1,09 E-11	1,64 E-11	6,11 E-12	1,22 E-11	1,83 E-11	6,44 E-12	1,29 E-11	1,93 E-11	-	-	-	-	-	-	-	
20	30	1,24 E-12	2,49 E-12	3,73 E-12	2,01 E-12	4,02 E-12	6,03 E-12	2,38 E-12	4,75 E-12	7,13 E-12	2,58 E-12	5,16 E-12	7,73 E-12	-	-	-	-	-	-	-	
	40	4,94 E-13	9,87 E-13	1,48 E-12	9,38 E-13	1,88 E-12	2,81 E-12	1,17 E-12	2,34 E-12	3,51 E-12	1,30 E-12	2,61 E-12	3,91 E-12	-	-	-	-	-	-	-	
	50	2,23 E-13	4,46 E-13	6,69 E-13	4,97 E-13	9,94 E-13	1,49 E-12	6,57 E-13	1,31 E-12	1,97 E-12	7,52 E-13	1,50 E-12	2,25 E-12	-	-	-	-	-	-	-	
	60	1,09 E-13	2,19 E-13	3,28 E-13	2,86 E-13	5,72 E-13	8,58 E-13	4,00 E-13	7,99 E-13	1,20 E-12	4,70 E-13	1,41 E-12	2,25 E-12	-	-	-	-	-	-	-	

Как видно из рисунков, при всех сочетаниях D_i , S_{mi} , E_{pi} плотности энергии излучения E_{ld} в плоскости входного зрачка ЛД увеличиваются с ростом высоты полета носителя H и достигают максимальные значения E_{ldmax} на высоте 20 км, однако, на высотах 15–20 км этот рост замедляется. Этот, на первый взгляд, нетривиальный результат объясняется тем, что с увеличением высоты полета (при фиксированной длине наклонной трассы) увеличивается количество слоев атмосферы, через которые проходит трасса, коэффициент аэрозольного рассеяния которых меньше коэффициента аэрозольного рассеяния приземного слоя атмосферы, и главное – в этих слоях отсутствует влияние атмосферной дымки на коэффициенты аэрозольного рассеяния.

* * * * *

Заключение

Выведена формула расчета коэффициента пропускания атмосферы на наклонной трассе для лазерных длин волн в зависимости от длины наклонной трассы D , вертикального профиля аэрозольных коэффициентов рассеяния $\alpha_m(h)$ на высотах до 20 км, прозрачности атмосферы (метеорологической дальности видимости S_m). Формула позволяет рассчитывать плотности энергии излучения в плоскости входного зрачка лазерного дальномера (ЛД), установленного на подвижном носителе на высоте полета от 5 до 20 км, рабочая длина волны ЛД $\lambda = 1,06$ мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 255 с.
2. Иванов В.П. К вопросу о разработке инженерной методики оценки пропускания атмосферы // Оптика атмосферы. 1990. № 11. С. 1165–1168.
3. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). М.: Советское радио, 1977. 367 с.