

1. 06 μm 激光的斜程大气衰减

宋 正 方

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 大气光学重点实验室, 合肥, 230031)

摘要: 根据大气透过率计算软件——CIRTRAN 计算了乡村、城市、海洋和沙漠四类地区不同能见度条件下的 1. 06 μm 激光斜程大气透过率, 经过分析和归纳, 提出了一个直观而简便的计算公式。用三种不同的测量方法和 LOWTRAN 7 作比较, 证明该公式具有很好的准确度。

关键词: YAG 激光 大气衰减 计算机程序

Atmospheric attenuation of 1. 06 μm laser propagating in a slant path

Song Zhengfang

(Lab. of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Hefei, 230031)

Abstract Based on a computer program of atmospheric transmissivity——CIRTRAN (Chinese Infrared Radiation TRAN smissivity program), the atmospheric transmissivity of Nd YAG laser at $\lambda=1. 06\mu\text{m}$ propagating in a slant path is calculated for several various visibility and four regions of rural, urban, ocean, and desert. Analyzing and synthesizing the calculated results, one present a direct and simple expression. In comparison with three different measurement method and LOWTRAN7 a very well accuracy of the experssion is demonstrated.

Key words: Nd YAG laser atmospheric attenuation computer program

引 言

激光问世近 40 年的今天, Nd:YAG 激光 ($\lambda=1. 06\mu\text{m}$) 已成为当前各种中小型激光应用中最为常用的器件之一。有关激光工程的设计和应用人员理所当然地关注着这个波长的辐射通过大气传输的衰减, 尤其是斜程衰减的规律。迄今为止, 1. 06 μm 辐射的衰减机理已经比较清楚, 水平方向上的大气衰减特性已经有了详细的论述^[1], 而垂直或倾斜方向上的特性因测量手段限制仅依靠模式计算所提供的信息。当前已有高分辨率的 HITRAN, LASER 等和低分辨率的 LOWTRAN 7 等成熟的计算机程序可以应用。这些程序主要是依据理论和某些测量结果总结成一定的模式编制而成的, 程序庞大而复杂, 使用很不方便, 人们期望有一个直观而简便的计算公式。本文作为这样的—一个尝试, 通过自行编制的大气透过率计算软件——CIRTRAN^[2]对—不同地区、不同高度和各种能见度条件下的计算结果作了分析, 归纳出大气透过率随传输高度和地面能见度变化的规律, 提出了斜程大气透过率计算公式, 同三种测量方法和 LOWTRAN 7 作了比较, 证明我们的公式具有相当好的准确性。

二、大气透过率计算基础

激光通过倾斜大气光程传输的透过率可以表达为

$$T = \exp\left[-\int_{L_1}^{L_2} \mu(z) dz\right] \quad (1)$$

式中, μ 为衰减系数, z 为距离变量, L_1 和 L_2 分别为激光传播的起点和终点。

若光程倾斜的角度不太大, 则上式可改写为

$$T = \exp[-\sec\theta \int_{H_1}^{H_2} \mu(h) dh] \quad (2)$$

式中, θ 为天顶角, H_1 和 H_2 分别为光程的起点和终点高度。

理论和实验都表明, $1.06\mu\text{m}$ 辐射的衰减因子主要是大气气溶胶的吸收和散射, 诸如水汽、 CO_2 等分子的吸收和大气分子的散射在大多数的情况下仅占总衰减的 1% 左右, 完全可以忽略不计。因此知道了气溶胶的特征, 其衰减系数也就基本确定。为方便起见, 定义

$$W = \int_{H_1}^{H_2} E(h) dh \quad (3)$$

为气溶胶光学厚度, 则(2)式可改写为 $T = \exp(-\sec\theta \cdot \mu W)$ (4)

气溶胶光学厚度取决于气溶胶粒子的尺度分布、复折射指数和浓度及其高度分布等物理特征。由于这些特征具有明显的时空变化, 并且难于现场测量, 因而通常的做法是依据一些观测结果总结成一定的模型。常用的与地面有关的模型有如下几种: 1. 乡村气溶胶, 2. 城市气溶胶, 3. 海洋气溶胶, 4. 沙漠气溶胶。与上层大气有关的则有对流层、平流层、高层大气等气溶胶模型。在这些模型中考虑了相对湿度和季节的变化, 部分模型中还须考虑风速的影响。上面所述的一些计算程序中对相应的因素建立了不同的数据库, 并归结为主要以能见度为特征的气象条件。选定一些参数后即可得到计算结果。

由于国外的一些程序非常复杂, 非经专门训练很难使用。有鉴于此, 我们于 1992 年开始着手编制适合我国国情的以 CIRTRAN 命名的计算软件, 经过优化和提高, 现在包含的波段已与 LOWTRAN 7 一致, 两者的计算精度经与实验测量对比, 证明三者符合。除此之外, CIRTRAN 程序还具有两大特点: 一是具有汉化下拉式菜单, 操作非常方便; 二是含有我国二十余个典型地区的大气模式, 不必再动辙使用国外的模式。

三、结果和讨论

我们使用 CIRTRAN 程序计算了乡村、城市、海洋和沙漠四类地区中不同高度 H 和不同能见度 V_M 条件下的 $1.06\mu\text{m}$ 激光从地面起算的垂直传输大气透过率。作为例子, 我们在表 1 中列出了乡村地区的计算结果。经过对全部数据的仔细分析, 应用最佳拟合法, 发现这些结果均可由此计算公式表达: $T = \exp\{-\sec\theta \cdot (K/V_M)[1 - \exp(-0.835H)]\}$ (5)

Table 1 Vertical atmospheric transmissivity (%) ($\lambda = 1.06\mu\text{m}$)

H (km)	V (km)						
	23	15	10	8	5	2	1
10	88.7	82.5	74.3	69.4	56.7	25.7	6.7
5	89.3	83.1	75.0	70.1	57.3	25.7	6.7
3	90.3	84.1	76.3	71.7	59.3	27.6	7.7
2	92.0	86.1	78.6	74.0	61.9	30.2	9.3
1	95.2	91.0	85.2	82.2	72.7	44.3	19.8

式中, K 为一常数, 取决于气溶胶类型, 其具体数值见表 2。表 2 中同时给出了用公式(5)计算的透过率与 LOWTRAN7 结果相比的标准差(RMS)。其中除乡村一项比较了全部高度上的透过率以外, 其余三类仅比较了 10km 高度上的透过率。

(5)式适用于从地面传输到高度 H (或相反传输)的情况, 如果光源和接收点分别位于 H_1 和 H_2 , 其透过率则由下式给出:

$$T = \exp\{(K / V_M) \sec\theta [\exp(-0.835H_2) - \exp(-0.835H_1)]\} \quad (6)$$

Table 2 The value of K in four regions

region	rural	urban	ocean	desert
K (km)	2.828	3.132	4.543	2.496
RMS	0.0081	0.0028	0.0033	0.0031

计算还表明,气候和季节的不同,对常数 K 的影响不大。若仅要求所得透过率的误差在 5% 范围内的话,可以不用考虑。

吴际华等^[3]曾分别利用激光雷达的目标漫反射法和后向散射法以及利用阳光以求取大气光学厚度的“长法”在合肥市郊区测量了 1.06μm 波长的斜程大气透过率,我们在表 3 中列举了他们的结果(其中仅是有明确能见度距离的数据,按级而论的能见度,跨度很大,其测量结果无法比较),并同公式(5)和 LOWTRAN 7 的结果一起进行比较。可知我们的公式无论同实测结果相比,还是同计算软件相比,都相当符合,平均相对偏差对前者约 2%,后者在 1% 以下。

Table 3 The comparison between calculated and measured transmissivity(%)

V _M (km)	H(km)	BSM	DRM	LM	Eq. (5)	LOWTRAN7
10	2.6		80.2		78	77.3
15	2.06	87.4			86	86.1
15	∞*			82	83	82
21	∞*			90.2	87	87

四、小 结

我们用 CIRTTRAN 大气透过率计算软件包计算了乡村、城市、海洋和沙漠四类气溶胶模型下不同传输高度上 1.06μm 激光在不同能见度条件时的垂直大气透过率,通过最佳拟合提出了一个比较简捷的计算公式,只要选定地区类型、传输高度和地面能见度,使用普通的函数型计算器即能得到结果,而其所具有的精度已由和实际测量、不同的计算软件的对比所证明。我们相信这个公式对于 Nd:YAG 激光工程的设计与应用具有很大的实用价值。

最后应当指出,虽然公式(5)的精度与大气透过率计算软件相当,但软件本身的精度是受模型制约的,对于气溶胶衰减极为重要的参数——能见度的估计,目前尚无很好的客观标准,容易带来较大误差,因此只有在具备精确的能见度测量的条件下,并且当地气溶胶特征与某种模型符合,才能期望得到正确的透过率的计算值。根据我们在合肥、北京和沧州等地测量的经验,在能见度比较正确时对 Nd:YAG 激光的大气透过率期望我们的公式(或 LOWTRAN7 与 CIRTTRAN),具有 5~10% 的精度是合理的。

陈亦庆研究员对本文的形成提供了很好的意见,特此致谢。

参 考 文 献

- 1 宋正方. 激光杂志, 1988; 9(1): 1
- 2 魏合理, 宋正方. 红外与毫米波学报, 1995; 14(2): 159
- 3 吴际华, 龚知本, 谭 钊 *et al.* 应用激光, 1982; 2(5): 1

* * *

作者简介: 宋正方, 男, 1935 年 12 月出生。研究员。现从事大气光学、激光与红外辐射的传输与遥感研究, 在国内外发表论文近 100 篇。