

斜程大气中的热晕效应研究

姬 妍

(榆林学院能源工程学院, 榆林 719000)

摘 要 引入了大气中的吸收系数、风速、大气压强、密度和温度模型,然后利用加权等效的方法对上述参数进行了等效处理,得到了等效热畸变参数,从而把斜程传输下的热晕问题转化为水平传输下的热晕问题,利用该模型进行了理论计算。结果表明,天顶角越大,等效热畸变参数越大,热晕效应越强。计算结果符合理论预期的结果。

关键词 热晕效应 热畸变参数 斜程大气

中图法分类号 RM011.3; **文献标志码** A

激光在实际大气中传输时,会受到大气分子、气溶胶粒子的吸收和散射,这会严重影响激光功率的传输。在斜程情况下,风速、吸收系数等均会随着高度的变化而不同,这是实际激光传输热晕效应问题中必须考虑的问题。

1 斜程大气中影响热晕效应的因素分析

热畸变参数的公式^[1]:

$$N_e = -\alpha(dn/dT)pz^2/(\pi\rho c_p v a^3) \quad (1)$$

式(1)中和大气直接相关的参量是 α 、 dn/dT 、 ρ 、 v 和 c_p ,分别对应大气的吸收系数、折射率梯度、密度、风速和等压热容量。 c_p 一般为常数,我们仅仅从其它四个参数进行分析。从式(1)可以看出, α 、 dn/dT (准确的说应该是 dn/dT 的绝对值,因为 dn/dT 一般为负值)越大,热畸变参数越大,热晕效应越强;反之, ρ 、 v 越大,热畸变参数越小,热晕效应越弱。由于大气是一种不均匀的分层介质,随着大气层厚度的增加,大气的吸收系数、折射率、气压、风速、密度、温度等均会发生变化,致使在斜程大气传输中,热畸变参数在不同的高度处会有不同的值。为了分析这

些参数随高度的变化情况,我们分别引入了下面的吸收系数模型、风速模型、大气压强模型、温度模型,并对根据这些模型对吸收系数、风速、压强、温度等随风速的变化进行了讨论。同时,我们假定以下的讨论仅限于激光在对流层中的传输,从而大气层厚度基本满足 $0 \leq h < 10 \text{ km}$ 。

1.1 吸收系数模型

由于没有找到国内的相关资料,我们利用了美国标准大气光学模式,大气气体吸收系数随大气厚度的变化关系近似满足^[2]:

$$\alpha(h) = \alpha_0 \exp(-\alpha_1 h); 0 \leq h < 12 \text{ km} \quad (2)$$

$$\alpha(h) = \alpha'_0; 12 \leq h < 80 \text{ km} \quad (3)$$

$$\alpha(h) = 0; h > 80 \text{ km} \quad (4)$$

式中, h 为大气厚度, α_0 为地面吸收系数; α_1 为吸收系数衰减率; $\alpha'_0 = \alpha_0 \exp(-12\alpha_1)$ 。我们取 $\alpha_0 = 6.5 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$, $\alpha_1 = 5.0 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$,图1给出了对流层大气中,吸收系数随高度的变化情况。从图中可以看出,在大气厚度处于0—3 km时,吸收系数下降很快,当大气厚度进一步增加时,吸收系数的下降幅度变慢,当大气厚度达到9 km时,^[1]吸收系数已经很小,趋向于零。

2011年3月10日收到

作者简介:姬妍(1978—),女,陕西榆林人,讲师,硕士,研究方向:无线电物理、雷达信号处理。

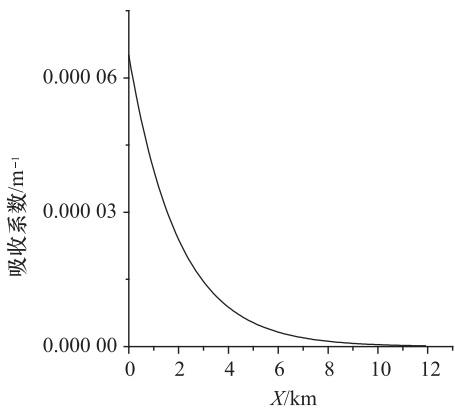


图 1 吸收系数随高度的变化

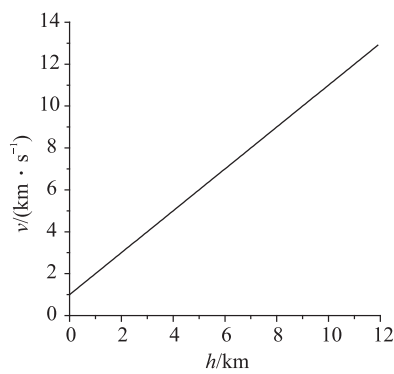


图 2 风速随高度的

1.2 风速模型

仍采用美国标准大气模式, 大气中的平均风速为:

$$v_{x1} = 1.0 + h; 0 \leq h < 12 \text{ km} \quad (5)$$

$$v_{x1} = 19.0 - 0.5h; 12 \leq h < 27 \text{ km} \quad (6)$$

$$v_{x1} = 1.0 + (4.5/73)(100.0 - h); 27 \leq h < 100 \text{ km} \quad (7)$$

式中, $v_{x1} = v_x/v_{x0}$, v_{x0} 为地面平均风速; h 为大气厚度。图 2 给出了对流层大气中, 风速随大气厚度的变化情况。从图中可以看出, 在对流层大气中, 风速随着大气厚度的增加而线性增加。^[2]

1.3 大气压强模型

根据文献[3] 的结果,

$$P = P_0 \left[\frac{T_0 - \frac{\gamma - 1}{\gamma R} \xi g h}{T_0} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (8)$$

式(8) 中, h 是大气厚度, P_0 是 $h = 0$ 处, 即地面附近的大气压, $\xi = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 为空气的摩尔质量, g 是重力加速度, $R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ 是普适气体常数, T_0 是地面附近的大气温度。图 3 给出了大气压强随大气厚度的变化情况, 从图中可以看出, 随着大气厚度的增加, 大气压强缓慢减小, 当大气厚度到达 10 km 的地方时, 大气压强减小到地面附近压强的 1/3 左右。

1.4 温度模型

大气温度随高度的变化公式为:

$$T(h) = T_0 - 6.0h/1\,000 \quad (9)$$

h 为大气厚度, 单位是 m。图 4 给出了温度随大气厚度的变化情况。从图 4 中可以看出, 随着大气厚度的增加, 温度呈线性递减, 当大气厚度到达 10 km 的地方时, 温度已经降得很低, 与地面温度相差 60 K 左右。

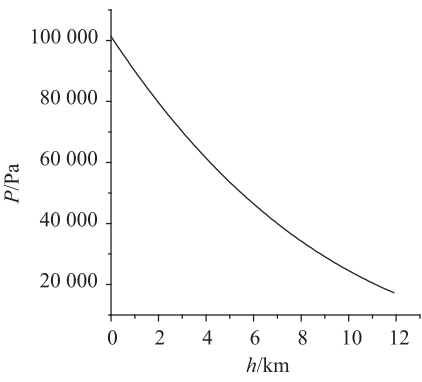


图 3 压强随高度的变化

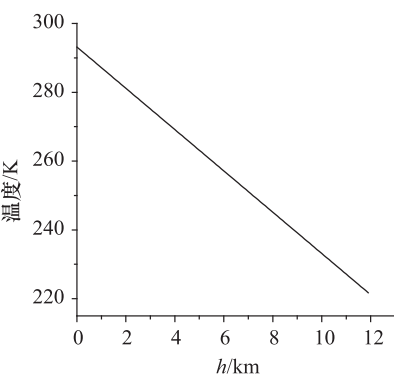


图 4 温度随高度的变化

2 斜程情况热晕效应的处理

2.1 折射率梯度

图 5 给出了激光波束的斜程传输示意图, OA 表示光传输方向, ox 为水平地面, θ 为天顶角。由于斜程情况下, 吸收系数 α 、折射率梯度 dn/dT 、大气密度 ρ 、风速 v 会随着大气厚度发生变化, 式(1)所示的热畸变参数也会随着大气厚度发生变化。我们的基本思想是: 用一个等效热畸变参数 N_{eff} , 来描述斜程情况下的热晕效应。

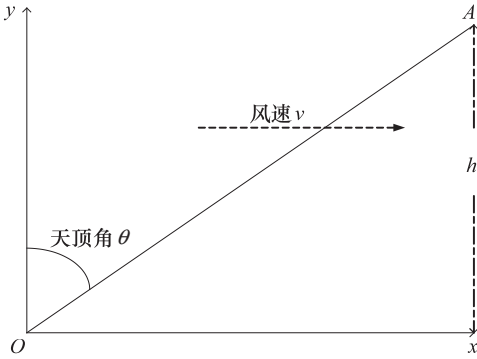


图 5 斜程传输示意图

对流层中的地球大气折射率模型可以表示为:

$$n - 1 = 77.6(1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) \left(\frac{P}{T} \right) 10^{-8} \quad (10)$$

式(1)中, λ 是以 μm 为单位的光波波长, T 是大气温度(K), P 是大气压强(Pa)。将式(8)代入式(10)得到:

$$n - 1 = 77.6(1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) \times \left[P_0 \left[\frac{T_0 - \frac{\gamma-1}{\gamma R} \mu g h}{T_0} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} / T \right] 10^{-8} \quad (11)$$

式(1)两边同时对 T 求导可以得出:

$$\frac{dn}{dT} = -77.6(1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) \times \left[P_0 \left(\frac{T_0 - \frac{\gamma-1}{\gamma R} \mu g h}{T_0} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} / T^2 \right] 10^{-8} \quad (12)$$

把式(9)代入式(12)有:

$$\frac{dn}{dT} = -77.6(1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) \times P_0 \left(\frac{T_0 - \frac{\gamma-1}{\gamma R} \mu g h}{T_0} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} / (T_0 - 6.0h/1000)^2 \cdot 10^{-8} \quad (13)$$

这就是折射率梯度的最终修订公式。

2.2 加权平均等效处理

把传输路径所经过的大气厚度 h 分为等份, 每份长度为 Δh , 即:

$$\Delta h = h/M \quad (14)$$

用每一层处的对应参数值 ζ_i 乘以该层厚度 Δh , 把得到的值 M 个值相加后, 除以总的大气厚度 h , 就

$$\text{是该参数的加权平均值, 即: } \zeta = \frac{\sum_{i=1}^M \zeta_i \Delta h}{h} \quad (15)$$

2.3.1 吸收系数的等效

利用式(15)的加权平均公式, 斜程传输情况下的吸收系数可以等效为:

$$\alpha_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^M \alpha(i\Delta h) \Delta h}{h} \quad (16)$$

把式(2)代入式(16)有:

$$\alpha_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^M \alpha_0 \exp(-\alpha_1 i\Delta h) \Delta h}{h} \quad (17)$$

2.2.2 风速的等效

把风速分解为垂直传输方向和平行传输方向两个分量, 其中, 平行传输方向的风速对光斑质量影响很小, 因此我们仅仅考虑垂直传输方向的风速。根据式(15), 斜程传输下的等效风速为:

$$v_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^M v_i \Delta h}{h} \sin(\theta) \quad (18)$$

把式(9)代入式(18), 可以得到:

$$v_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^N (1.0 + i\Delta h/1000) \Delta h}{h} \sin(\theta) \quad (19)$$

2.2.3 折射率梯度的等效

根据式(15),斜程传输下的等效折射率梯度为:

$$\left(\frac{dn}{dT}\right)_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^M -77.6(1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) \times$$
$$\left\{ \left[P_0 \left(\frac{T_0 - \frac{\gamma-1}{\gamma R} \mu g_i \Delta h}{T_0} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} / (T_0 - 6.0 \Delta h / 1000)^2 \right] \times \right.$$
$$\left. 10^{-8} \right\} \Delta h / h \quad (20)$$

根据式(1)、式(17)、式(19)、式(20),等效热畸变参数可以写成:

$$N_{\text{eff}} = -\alpha_{\text{eff}} \left(\frac{dn}{dT} \right)_{\text{eff}} \cdot p z^2 / (\pi \rho c_p v_{\text{eff}} a^3) \quad (21)$$

则束沿 *oz* 轴传播光强分布表达式^[4] 成为:

$$I_p(x, y, z) = I_0 e^{-\alpha_{\text{eff}} z} \exp[-(x^2 + y^2)/a^2] \exp \times$$
$$(\varepsilon_c z^2 a^{-2} \Phi_0(x, y) g_1(\alpha_{\text{eff}} z)) =$$
$$I_0 e^{-\alpha_{\text{eff}} z} \exp[-(x^2 + y^2)/a^2] \times$$
$$\exp[-N_{\text{eff}} \Phi_0(x, y) g_1(\alpha_{\text{eff}} z)] \quad (22)$$

这就是计算斜程情况下热晕效应的表达式。

3 计算分析

为了研究热畸变参数随天顶角的变化关系,我们利用关系式 $z = h/\cos\theta$,则式(21) 成为:

$$N_{\text{eff}} = -\alpha_{\text{eff}} \left(\frac{dn}{dT} \right)_{\text{eff}} \cdot p h^2 / (\pi \rho c_p v_{\text{eff}} a^3 \cos^2 \theta) \quad (23)$$

利用式(23) 计算了功率分别为 20 kw、50 kw 情况下,畸变参数随天顶角的变化规律,如图6(a)(b) 所示。从图6 中可以看出,随着天顶角的增大,畸变参数亦随之增大;在其它条件相同情况下,大的发射功率对应大的畸变参数;这和理论预期是相吻合的,由此验证了我们上面对斜程情况下的处理方法是适当的。

利用式(22) 来计算斜程情况下的热晕问题。图7(a)、(b)、(c)、(d) 分别给出了功率, $p = 20 \text{ kW}$ 传输高度 $h = 5 \text{ km}$,天顶角 θ 分别等于 $0, \pi/6, \pi/4, \pi/3$ 时,激光在大气中斜程传输的热晕效应的计算结果。从图中可以看出,当天顶角为零时(上行传

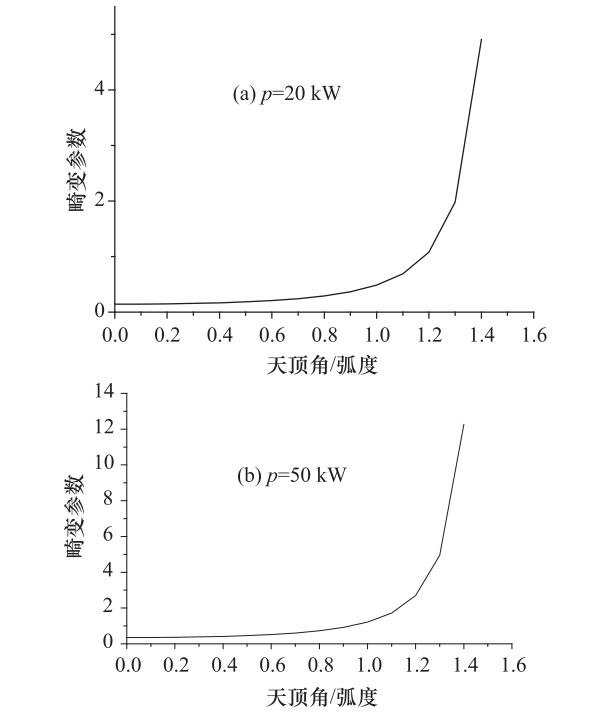


图6 畸变参数随功率的变化

输),热晕效应很弱,随着天顶角的增大,光斑的畸变增大,热晕效应变强。这是因为在大气厚度一定时,随着天顶角的增大,传输距离增加,而风速的加权值在减小,这两种情况均有利于热畸变参数的增大,使得热晕效应增强。

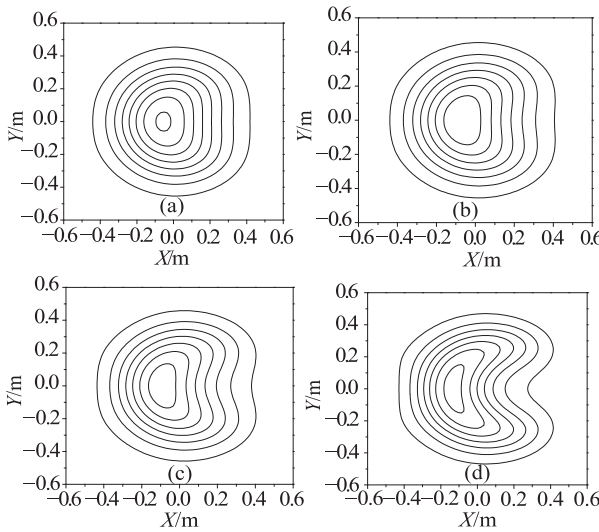


图7 功率为 20 kW 时斜程传输热晕效应的变化规律

图8(a)、(b)、(c)、(d) 中给出了功率 $p =$

50 kW, 传输高度 $h = 5$ km, 天顶角 θ 分别等于 0 、 $\pi/6$ 、 $\pi/4$ 、 $\pi/3$ 时的计算结果。从图 8 中可以得出和图 7 同样的结论, 只是, 由于功率的增大而导致热畸变参数的增大, 热晕效应更强而已。

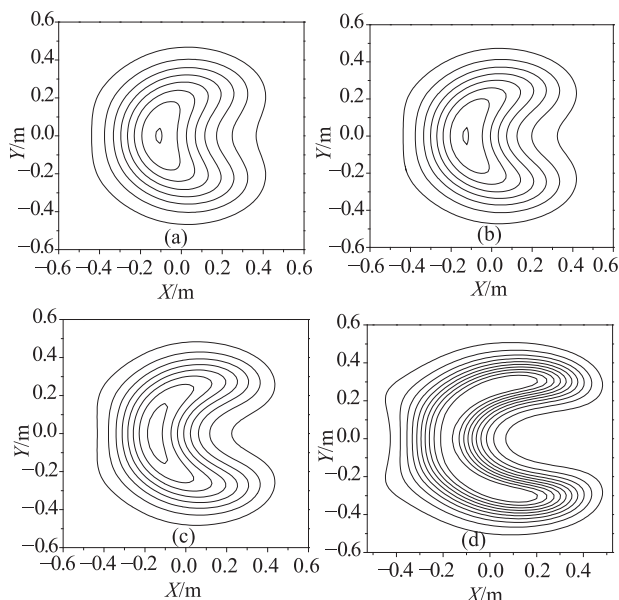


图 8 功率为 50 kW 时斜程传输热晕效应的变化规律

4 结束语

本文首先介绍了大气中的吸收系数、风速、大气压强、密度和温度模型, 然后利用加权等效的方法对上述参数进行了等效处理。把等效处理后的参数代入热畸变参数公式, 得到了等效热畸变参数。最终把斜程情况下的热晕问题转化为水平情况下的热晕问题, 最后进行了理论计算, 计算结果表明: 当天顶角为零时(上行传输), 热晕效应很弱。随着天顶角的增大, 光斑的畸变变大, 热晕效应变强。这符合理论预期的结果。

参 考 文 献

- 1 王新宽. 强激光大气传输稳态热晕效应的研究. 西安: 西安电子科技大学, 2009, 15—16
- 2 柳福提. 大气温度随高度变化率的推导. 河南科技学院学报, 2007; 35(2): 45
- 3 王宏明, 杜彩霞. 大气压强与高度的关系. 松辽学刊, 1997; (2): 73
- 4 Hillion P, Quinnez S. Thermal blooming calculation with analytical diffraction approximated expressions. J Math Phys, 1981; 22(4): 897—907

Study of the Thermal Blooming Effect on Slant Path Atmosphere

Jl Yan

(School of Energy Engineering, Yulin University, Yulin 719000, P. R. China)

[Abstract] The model of absorption coefficient, wind speed, pressure and temperature of atmosphere were introduced, the weighted equivalent method was adopted to deal with the above mentioned parameters, so that the thermal blooming effect on slant path transmission was transfered to horizon transfer problem. With this equivalent model, theoretical calculations are carried out, the results show that the larger that of zenith angle, the greater that of equivalent thermal distortion parameter, which lead to stronger thermal blooming effect. In accordance with the theoretical results it is expected.

[Key words] thermal blooming thermal distortion parameter slant path atmosphere