

文章编号: 1001-3806(2012)03-0394-04

1. 064 μm 激光大气斜程散射建模及仿真

姚梅¹ 张乐² 徐成伟¹ 张海庄³ 赵琳锋¹

(1. 中国人民解放军 63892 部队, 洛阳 471003; 2. 中国人民解放军 63891 部队, 洛阳 471003; 3. 中国人民解放军 63889 部队, 孟州 454750)

摘要: 为了研究大气气溶胶对激光斜程传输的散射特性, 建立了基于米氏散射理论的 1.064 μm 激光大气斜程散射模型。利用 MATLAB 软件对模型进行仿真计算, 分析了斜程散射光辐射参量的分布特性。并结合地面探测分析了探测器的方位及探测方向对散射光辐射照度的影响。结果表明, 该模型为机载激光指示器系统的战术训练、地面激光探测提供了可靠的理论依据。

关键词: 激光技术; 散射; 斜程散射模型; 米氏散射; 空中照射器; 探测

中图分类号: O436.2 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.028

Modeling and simulation of slant path scattering of 1.064 μm laser in atmosphere

YAO Mei¹, ZHANG Le², XU Cheng-wei¹, ZHANG Hai-zhuang³, ZHAO Lin-feng¹

(1. 63892 Unit, Chinese People's Liberation Army, Luoyang 471003, China; 2. 63891 Unit, Chinese People's Liberation Army, Luoyang 471003, China; 3. 63889 Unit, Chinese People's Liberation Army, Mengzhou 454750, China)

Abstract: To study the slant path scattering characteristics of aerosols in atmosphere, the slant path scattering model of 1.064 μm laser was built based on Mie scattering theory. The distribution characteristics of radiative parameters were analyzed with the help of MATLAB. Combined with ground surface detection, the effect of detection azimuth and angle of a detector on the scattering intensity was discussed. As a result, the model is a credible method for the tactical training of airborne designator system and ground laser detection.

Key words: laser technique; scattering; slant path scattering model; Mie scattering; airborne designator; detection

引言

随着激光技术的迅速发展, 激光已成为通信、工业、科研、军事等诸多领域中不可缺少的一种应用工具。其中, 波长 1.064 μm 激光的应用最为广泛, 该波长激光辐射的衰减机理已被前人研究得非常透彻, 水平方向上的大气衰减特性也有学者进行过详细的论述, 斜程大气衰减可以用成熟的大气传输仿真计算软件(如 LOWTRAN、FASCODE 等)进行理论计算。虽然通过软件计算可以得到某一传输路径下气溶胶总的消光系数, 但工程应用中十分关注传输过程中斜程散射光辐射参量的分布特性。本文中基于经典的米氏散射理论, 推导出适于工程应用的斜程气溶胶散射模型, 这对激光告警、激光通信等领域都

具有一定的参考价值。

1 单粒子散射

大气气溶胶粒子米氏散射过程是一个有许多紧靠在一起的由复杂分子的气溶胶粒子组成的多极子阵, 它们受入射波的激发, 形成多极子。这些多极子向外辐射次生的电磁波在远场区叠加构成了散射波。米氏理论从 Maxwell 方程出发, 分析、计算因散射粒子存在所产生的散射场和透射场, 得到粒子对电磁波散射和吸收的严格解。

在对流层内尤其是近地面层, 只要激光波长不太短(不小于 0.5 μm), 分子散射一般可以忽略不计, 气溶胶粒子散射占重要地位^[1]。独立散射通常假设粒子之间的距离大于其直径的 3 倍。对于大气中的气体分子之间的距离以及大气中气溶胶粒子之间的距离来说, 都大大超过了 3 倍粒子直径^[2]。因此, 对大气中的光传播而言, 独立散射假设总是适用的。

入射光强为 I_0 的平行光, 散射光辐射照度 I_s 表示为:

作者简介: 姚梅(1979-), 女, 工程师, 主要从事光电检测与激光大气传输的研究。

E-mail: eoyam1900@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-09-01; 收到修改稿日期: 2011-09-23

$$I_s = \frac{I_0 F(\beta, \varphi)}{k^2 l^2} \quad (1)$$

式中 β 为散射角 φ 为极化角 k 为波数, 即 $2\pi/\lambda$, λ 为波长 l 为散射距离 $F(\beta, \varphi)$ 为散射函数。

散射函数 $F(\beta, \varphi)$ 的详细计算方法可参见参考文献 [3] ~ 参考文献 [5], 图 1 中给出了散射光强 I_s 的分布与粒子尺度参量 x 的关系。由图 1 可以看出, 粒子散射分布状态成规律性变化, 粒子尺度参量较小时, 散射强度分布接近瑞利散射^[6]; 随着粒子尺度参量的不断增大, 散射强度分布越来越接近米氏散射。

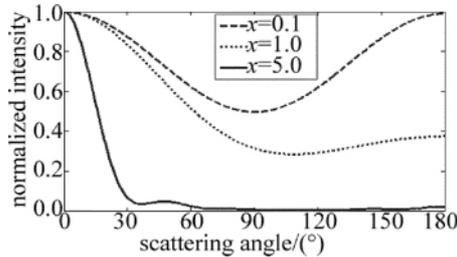


Fig. 1 Scattering curve of aerosol particles in various size

2 斜程散射探测模型

以地对空散射探测型的激光告警设备为例, 对斜程散射探测进行讨论。斜程激光散射探测示意图如图 2 所示, 图中以地面被防护目标为原点 O , 建立 3 维直角坐标系 $O-x-y-z$ 。 $x-O-y$ 坐标系位于地面, z 轴垂直于面 $x-O-y$ 指向天顶。激光告警接收机部署在距目标一定距离处, 如地面上某一 D 点。激光照射器位于空中 L 点, 接收机探测器视场的边缘与激光光束主轴分别交于 D_1 点和 D_2 点。 S 是激光传输路径上任意一点, 该点在坐标系 $x-O-y$ 上的投影点为 G_s , 散射距离为 DS 。在坐标系 $O-x-y-z$ 中, 探测器和激光照射器坐标分别为 (x_D, y_D, z_D) 、 (x_L, y_L, z_L) ; L 点在地面的投影点为 G 点, 激光传输方向和 z 轴的夹角为 γ 。

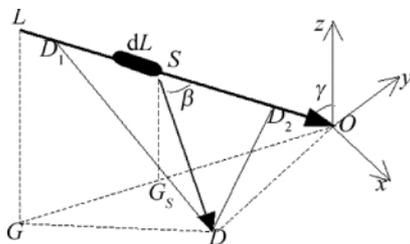


Fig. 2 Sketch map of scattering detection in slant path

激光作用距离为:

$$LO = \frac{z_L}{\cos\gamma} \quad (2)$$

式中 z_L 为飞行高度。从激光发射到激光到达探测器的时间 t 为:

$$t = (LS + DS) / v \quad (3)$$

式中 v 为光束传播速度。

在 $\triangle DSO$ 中, 根据余弦定理有:

$$DS^2 = (LO - LS)^2 + DO^2 - 2 \times DO \times (LO - LS) \times \cos\eta \quad (4)$$

式中 η 为激光传输方向 LO 与离轴方向 DO 的夹角。将 (3) 式中 DS 代入 (4) 式, 得到散射介质 S 点处的激光传输距离:

$$LS = \frac{1}{2} \times \frac{(vt)^2 - LO^2 - DO^2 + 2 \times LO \times DO \times \cos\eta}{vt + DO \times \cos\eta - LO} \quad (5)$$

入射到散射介质点 S 处的激光辐射照度为:

$$I_{s,S} = \frac{4P_0\tau_a \cos^2\gamma}{\pi(z_r - SG_s)^2 \theta^2} \quad (6)$$

式中 SG_s 为斜程上某一点的高度 θ 为光束发散角 τ_a 为大气透过率 P_0 为激光器发射功率。

激光束能量主要集中在激光束主轴上, 在此只需考虑轴上球形粒子的散射^[7]。某一时刻 D 点接收的散射光, 是主轴上 S 点处由激光光束截面以及间距为 dL 的光柱所构成的微圆柱体内, 各散射粒子产生散射光共同贡献的结果。因此, 激光光束主轴上 S 点附近, 间距为 dL 的光柱在观测方向 φ 散射到 D 点的辐射照度为:

$$dI_{s,S} = P_0\tau_{LS}\tau_{DS} \times \frac{F(\beta, \varphi) N_h(r) dL}{k^2 DS^2} \cos\delta \quad (7)$$

式中 δ 为散射光入射方向与探测器视场中心的夹角; τ_{LS} 为直射光的大气透过率; τ_{DS} 为散射光的大气透过率。大多数研究者认为, 在 5km 高度以下, 粒子浓度随高度的降低呈指数规律。粒径分布尽管也有变化, 但变化很小, 可认为不变^[8]。 N_h, N_0 分别表示在 h 高度上和地面上的粒子浓度, 其关系可表示为:

$$N_h = N_0 \exp(-h/H_p) \quad (8)$$

$$N_0 = \int_{r_1}^{r_2} n(r) dr \quad (9)$$

式中 H_p 表示气溶胶标高, 也称特征高度, 取值在 1km ~ 1.4km 之间。ELTERMAN^[9] 对测试数据进行归纳, 得到了仅由气溶胶微粒而使能见度 R_m 变短时的特征高度 H_p 值, 如表 1 所示。

将 (8) 式、(9) 式代入 (7) 式并积分得到到达探测器视场内的散射光辐射照度为:

$$I_{s,S} = P_0\tau_{LS}\tau_{DS} \times \frac{\int_{r_1}^{r_2} F(\beta, \varphi) n(r) \exp(-h/H_p) dr \int dL}{k^2 DS^2} \cos\delta \quad (10)$$

式中 $n(r)$ 为气溶胶粒子尺度谱分布; r_1 和 r_2 为气溶胶粒子半径的取值范围。

Table 1 Visible range R_m and aerosol scale height H_p

R_m /km	2	3	4	5	6	8	10	13
H_p /km	0.84	0.9	0.95	0.99	1.03	1.10	1.15	1.23

3 数值仿真结果与分析

对(10)式采用 MATLAB 编程进行仿真计算,气溶胶粒子尺度谱采用 Junge 谱分布,斜程大气透过率的计算调用通用大气辐射传输软件 CART^[10]。大气模式选取中纬度夏季,城市气溶胶模式,取波数 $9397\text{cm}^{-1} \sim 9398\text{cm}^{-1}$ 范围内的平均透过率作为波长 $1.064\mu\text{m}$ 激光大气透过率。

3.1 散射光辐射照度与照射方位的关系

假设激光入射能量 100mJ ,脉冲宽度 10ns ,光束发散角 1mrad ,大气能见度 $R_m = 20\text{km}$,照射距离 5km ,激光告警接收机的位置坐标 $(60\text{m}, -80\text{m}, 0)$,距离被保护目标 100m ,探测器的视场为 21° ,视场中心指向激光照射器。

图3是照射方向为 60° 、方位为 75° 时,照射激光传输透过率曲线。由于照射光传输路径的天顶角保持不变,传输距离逐渐变长,透过率会逐渐变小。图4是散射光传输透过率曲线,随着散射路径逐渐缩小,透过率会逐渐变大。

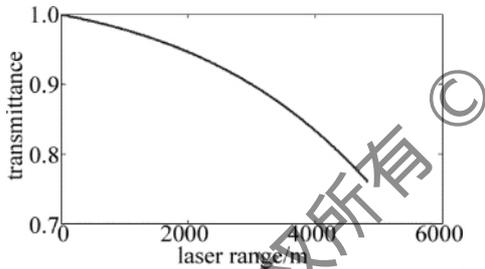


Fig. 3 Incident laser transmittance

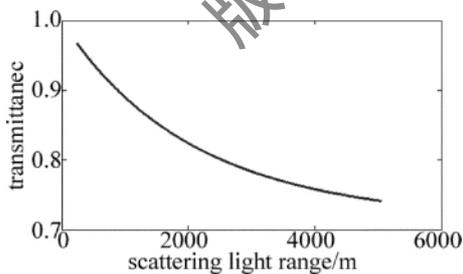


Fig. 4 Scattering transmittance

图5是散射光峰值功率密度随照射激光入射角的变化曲线。从图中可以看出,入射角增加,散射光峰值功率密度也随之增加。

图6是散射光能量密度随入射角的变化曲线。随着入射角的增加,被探测器视场覆盖的散射路径会逐渐变长,因此从图中可以看出,散射光能量密度也相应的增加。入射角为 90° 时,散射光能量密度达到最大,此时对应于照射光近地面传输。图5和图6说明照射

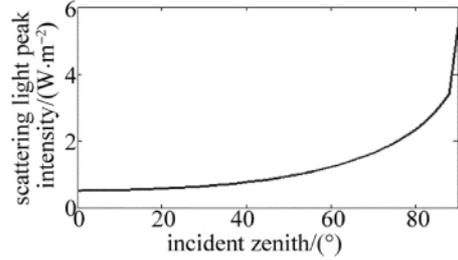


Fig. 5 Peak scattering intensity versus incident zenith

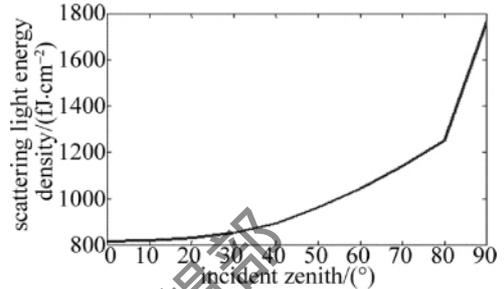


Fig. 6 Scattering energy density versus incident zenith

光近地面传输时,散射光辐射参量均能达到最大,这对于地面激光探测是非常有利的。

图7是照射距离不变、照射角 60° 时,改变照射方位后散射光峰值功率密度随方位角的变化曲线。图7a是直角坐标系中的变化曲线,图7b是将方位 $180^\circ \sim 360^\circ$ 之间的曲线左移 180° 之后的曲线。从图7b可以看出,方位角在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 和 $180^\circ \sim 360^\circ$ 两个区间内曲线的变化趋势是相同的,各出现一个峰值,且后一个峰值略小于前一个。

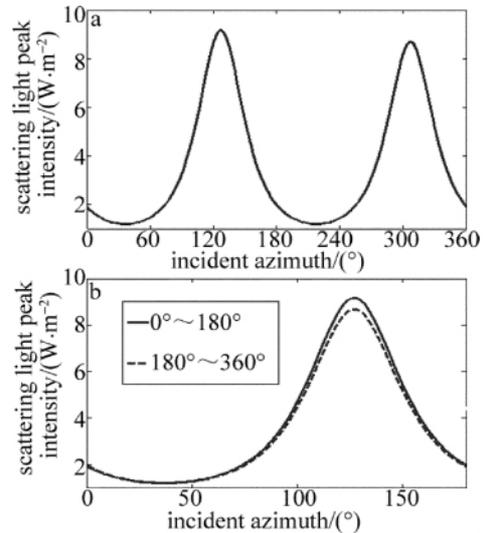


Fig. 7 Peak scattering intensity versus incident azimuth

3.2 散射光辐射照度与探测器接收方位的关系

激光器发射参量同图7,当照射角为 60° 时,照射方位 120° ,照射距离 5km ,探测器与目标的距离 100m 。探测器的方位从 0° 变化到 360° ,散射光峰值功率密度随方位的变化曲线以极坐标显示如图8所示。图7a与图8的变化趋势是相同的,前者的数值明显小于后者。进行地面探测时,改变探测器的位置能够接收到

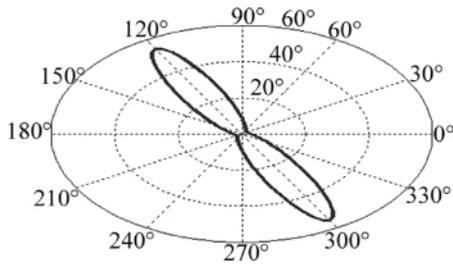


Fig. 8 Peak scattering intensity versus detective orientation

更强的散射光。

当改变接收探测器的探测方向时,通过仿真计算发现散射光峰值功率密度会随着探测角度的增加呈阶梯形变化,如图9所示。当探测角度小于某一数值时,散射光峰值功率密度最大并保持不变,随之下降的非常陡峭。在斜程激光散射探测时,光学系统瞄准方向不需要固定于某个特定的位置。

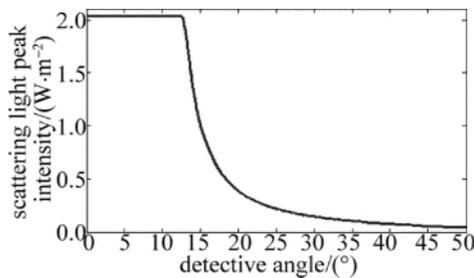


Fig. 9 Peak scattering intensity versus detective angle

4 结论

基于米氏散射理论,推导出斜程散射光探测模型。通过仿真计算,讨论了改变空中激光照射方向,散射光辐射照度随照射方位、入射角的变化关系。当照射光入射角为 90° 时,即近地面传输,最利于地面探测设备

进行离轴探测。从探测设备的角度出发,分析了探测方位与散射光辐射照度的变化关系,探测设备的光学系统瞄准方向在某一范围内改变,不影响探测结果。上述结论对激光侦察告警设备和机载激光照射系统战术训练均有一定的参考价值。

参考文献

- [1] PAN N X, MAO J T, WANG Y Sh. Optics of atmosphere [M]. Beijing: Science Press, 1988: 180-183 (in Chinese).
- [2] SHENG P X, MAO J T, LI J G, et al. Atmospheric physics [M]. Beijing: Beijing University Press, 2003: 26-29 (in Chinese).
- [3] LI J, JIANG H Y, MU X Y, et al. Improvement of algorithm for Mie scattering coefficient [J]. Journal of University of Ji'nan (Science & Technology Edition) 2009, 23(4): 348-350 (in Chinese).
- [4] ZHANG H Y, ZHAO W J, REN D M, et al. Improved algorithm of Mie scattering parameters based on matlab [J]. Journal of Light Scattering 2008, 20(2): 103-107 (in Chinese).
- [5] WANG L F, LIU G B, ZHENG Zh, et al. Onwards continued fraction algorithm for Mie scattering and numerical simulation [J]. Optical Technique 2009, 35(4): 541-543 (in Chinese).
- [6] WANG L F, LI ZH L, CHENG Y G, et al. Analysis of the signals feature corresponding to laser scattering of aerosol [J]. Journal of Light Scattering 2006, 18(4): 351-354 (in Chinese).
- [7] CHENG Y B, SUN X Q, ZHAO M H, et al. Analysis of the signal detection of laser scattering in the air [J]. Laser Technology 2006, 30(3): 277-279 (in Chinese).
- [8] WU J, YANG C P, LIU J B. Theory of light propagation in atmosphere [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005: 39 (in Chinese).
- [9] ELTERMAN L. Relationships between vertical attenuation and surface meteorological range [J]. Applied Optics, 1970, 9(8): 1804-1810.
- [10] CHEN X H, WEI H L, LÜ W W, et al. Comparison of infrared atmospheric transmittance calculated by CART software with measured values [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(4): 403-405 (in Chinese).
- [11] WERLE P. A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors [J]. Spectrochimica Acta, 1998, A54(2): 197-236.
- [12] SILVER J A. Frequency-modulation spectroscopy for trace species detection: theory and comparison among experimental methods [J]. Applied Optics, 1992, 31(6): 707-717.
- [13] WU Sh Q. Frequency modulation method of diode laser: China, 200810058640. 2 [P]. 2008-11-19 (in Chinese).
- [14] WU Sh Q, KIMISHIMA T, YOSHII Y, et al. Reduction of fringe noise in wavelength modulation spectroscopy using a one-dimensional focal plane array [J]. Optical Review, 2002, 9(5): 189-192.

(上接第393页)

- [9] WERLE P. A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors [J]. Spectrochimica Acta, 1998, A54(2): 197-236.
- [10] WU Sh Q, KIMISHIMA T, HIROAKI K, et al. Efficient reduction of fringe noise in trace gas detection with diode laser multipass absorption spectroscopy [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2000, 39(7): 4034-4040.
- [11] GILLEN J I, MCLNTYRE D H. Simultaneous line center and line-width measurement using dual frequency modulation spectroscopy [J]. Applied Optics, 2010, 49(29): 5528-5536.