

激光大气散射离轴探测建模及仿真

姚梅¹, 张乐², 刘连伟¹, 陈洁¹, 郭豪¹

(1. 解放军63892部队, 河南洛阳471003; 2. 63891部队, 河南洛阳471003)

摘要:基于米氏散射理论,建立了波长1.064 μm 激光离轴散射探测模型。利用编程语言MATLAB设计了激光离轴散射探测仿真软件,该软件能够仿真计算多种大气传输条件下的散射辐射参量,并绘制相应的曲线。对激光告警散射截获半径评估和制导激光散射光特性进行了仿真计算,结果表明,该模型能够预测不同气象条件下的散射参量,为系统设计者和工程使用方提供了简便、快速的大气散射仿真工具。

关键词:大气散射;离轴探测;仿真计算

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.04.003

Model and simulation of off-axis detection of laser in atmospheric scattering

YAO Mei¹, ZHANG Le², LIU Lian-wei¹, CHEN Jie¹, GUO Hao¹

(1. 63892 Army Unit, the People's Liberation Army, Luoyang 471003, China;

2. 63891 Army Unit, the People's Liberation Army, Luoyang 471003, China)

Abstract: The atmospheric scattering off-axis detection model of 1.064 μm laser was established based on Mie scattering theory. The software of atmospheric scattering off-axis detection of 1.064 μm laser was developed by MATLAB. Using this software, scattering radiative parameters can be calculated and the corresponding curves can be drawn in various atmospheric propagation modes. Besides, the evaluation of scattering interceptive range for 1.064 μm laser warning and the scattering characteristic of guiding laser beams were simulated. The results show that scattering parameters in various atmospheric conditions can be predicted, which provides a convenient and fast tool for system designers and project users.

Key words: atmospheric scattering; off-axis detection; simulation and calculation

1 引言

在激光告警散射探测、激光制导对抗、非视线激光通信等方面,由于大气气溶胶的散射,散射激光会成为告警的威胁源或是误伤己方的“罪魁祸首”,因使用方式的不同,散射光也扮演不同的角色。文中通过建立波长1.064 μm 激光离轴散射探测模型,利用编程语言MATLAB对模型进行可视化仿真计算,解决了工程应用中因大气散射光的影响而面临的激光侦察告警设备主要战技指标考核与评估、激

光制导设备作战态势构建等问题。

2 离轴探测模型

激光告警威胁源和激光目标指示器中应用较多的是波长1.064 μm 的脉冲激光。1.064 μm 激光束在大气中传播时,大气分子对它的吸收和散射非常微弱,而大气气溶胶粒子对它的吸收和散射效应则

作者简介:姚梅(1979-),女,工程师,主要从事激光大气传输与光电检测等方面的研究。E-mail: eoyam900@126.com

收稿日期:2013-08-09

比较显著^[1]。大气气溶胶的散射可认为是均匀的球状粒子对电磁波的散射,当能见度大于 5 km 时,通常不考虑多散射效应^[2]。

大气气溶胶对激光的散射传输特性,决定了激光探测设备必须以离轴探测的方式进行工作。因此,建立离轴探测模型显得尤为重要。离轴探测示意图如图 1 所示。以被防护目标如坦克、桥梁、导弹发射架等为原点 O ,建立三维直角坐标系 $O-XYZ$ 。 XOY 坐标系位于地面, Z 轴垂直于面 XOY 指向天顶。光电探测设备部署在距目标一定距离处,如 D 点。激光照射器位于 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 、 D_2 点。 S 是激光传输路径上任意一点,该点在坐标系 XOY 上的投影点为 G_s ,散射光传输距离为 DS 。在坐标系 $O-XYZ$ 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) ;点 L 在地面的投影点为 G_L ,激光传输方向和 Z 轴的夹角为 γ ,散射角是 β 。

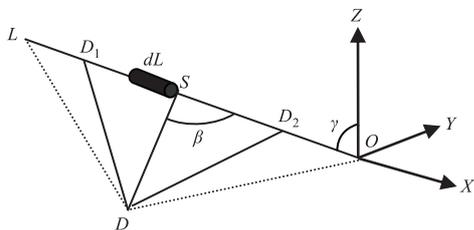


图 1 激光离轴探测示意

Fig. 1 Sketch map of laser off-axis detection

激光作用距离为:

$$LO = Z_L / \cos(\gamma) \tag{1}$$

从激光发射到激光到达探测器的时间 T_s 为:

$$T_s = (LS + DS) / V \tag{2}$$

在三角形 DSO 中,根据余弦定理有:

$$DS^2 = (LO - LS)^2 + DO^2 - 2 \times DO \times (LO - LS) \times \cos(\eta) \tag{3}$$

其中, η 为激光传输方向 LO 与离轴方向 DO 的夹角。将式(2)中 DS 代入式(3),得到散射介质 S 点处的激光传输距离:

$$LS = \frac{1}{2} \times \frac{(V \times T_s)^2 - LO^2 - DO^2 + 2 \times LO \times DO \times \cos(\eta)}{V \times T_s + DO \times \cos(\eta) - LO} \tag{4}$$

式中, V 为光束传播速度。

入射到散射介质点 S 处的激光辐射照度为:

$$I_s = \frac{4P_0 \tau_a \cos^2(\gamma)}{\pi(Z_f - SG_s)^2 \theta^2} \tag{5}$$

式中, Z_f 为飞行高度; 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^[3]。某一时刻, D 点接收的散射光是 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,各散射粒子所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:

$$dI_s = P_0 \tau_{LS} \tau_{DS} \times \frac{F(\beta, \phi) N_h(r) dL}{k^2 DS^2} \cos(\delta) \tag{6}$$

其中,散射函数 $F(\beta, \phi)$ 的详细计算方法可参见文献[4]和[5]。

大多数研究者认为在 5 km 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^[6]。 N_h, N_0 分别表示在 h 高度上和地面上的粒子浓度,其关系可用式(8)表示; H_p 表示气溶胶标高,也称特征高度,取值在 1 km ~ 1.4 km 之间。Elterman^[7] 对测试数据进行归纳,得到了仅由气溶胶微粒而使能见度变短时的特征高度 H_p 值,如表 1 所示。当光电探测设备位于地面时, h 等于 0。

$$N_h = N_0 \exp(-h/H_p) \tag{7}$$

$$N_0 = \int_{r_1}^{r_2} n(r) dr \tag{8}$$

将式(7)、(8)代入式(6)并积分得到到达探测器视场内的散射光辐射照度:

$$I_s = P_0 \tau_{LS} \tau_{DS} \times \int_{r_1}^{r_2} \frac{F(\beta, \phi) n(r) \exp(-h/H_p) dr}{k^2 DS^2} dL \cos(\delta) \tag{9}$$

式中, δ 为散射光入射方向与探测器视场中心的夹角; $n(r)$ 为气溶胶粒子尺度谱分布; r_1, r_2 为气溶胶粒子半径的取值范围; τ_{LS} 为直射光的大气透过率; τ_{DS} 为散射光的大气透过率。

表 1 能见度与气溶胶标高

Tab. 1 Surface meteorological range R_m and aerosol scale height

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 离轴探测仿真软件

利用 MATLAB 软件对离轴探测模型进行可视

化编程,设计了 1.064 μm 激光大气散射离轴探测仿真软件,主界面如图 2(a)所示,其中图 2(b)、图 2(c)分别是水平和斜程探测的输入界面,图 2(d)、图 2(e)是相应输出结果。该软件通过输入想定或实际大气传输条件下的激光发射、探测等参数,可实现不同传输距离、不同探测方向、不同气溶胶模式、不同大气能见度条件下的散射光辐射参量仿真及绘制散射光脉冲时间曲线、离轴距离与散射光辐射照度曲线。

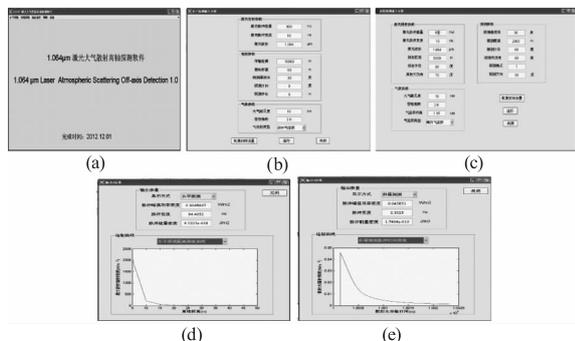


图 2 1.064 μm 激光大气散射离轴探测软件输入输出
Fig. 2 Input and output of 1.064 μm laser atmospheric scattering off-axis detection

4 仿真结果

通过设定典型传输条件下的激光发射参数和大气气象参数,对激光告警散射截获半径和制导激光大气后向散射进行仿真计算。气溶胶粒子尺度谱采用 Junge 谱分布,斜程大气透过率的计算选用通用大气辐射传输软件 CART^[8]。大气模式选取中纬度夏季,乡村气溶胶模式,取波数 9397 ~ 9398 cm⁻¹ 范围内的平均透过率作为波长 1.064 μm 激光大气透过率。

4.1 激光告警散射截获能力评估

激光告警散射截获半径又称警戒离轴距离,其最大值可用散射截获能力描述。假定威胁激光源波长为 1.064 μm,发射能量 100 mJ,脉冲宽度 10 ns,传输距离 10 km,对不同能见度条件下的激光告警散射截获能力评估结果如图 3 所示。从图 3(a)中可以看出,大气能见度小于 15 km 时,散射截获半径近似呈线性增加;当能见度从 15 km 变化到 20 km 时,会出现最大值。图 3(b)是散射截获距离达到最大值时的局部放大,当能见度大于 20 km 时,散射截获边界和其最大值相比下降得比较缓慢。这一现象表明,散射截获边界与能见度之间不是单一的线性变化关系;工程应用中,如需检验激光告警设备的最大散射截获边界,最好选择能见度为 15 km 到 20 km 的天气。

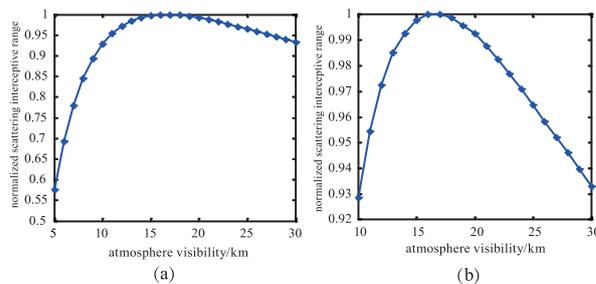


图 3 散射截获能力与能见度关系
Fig. 3 Relationship between atmospheric visibility and the maximum scattering interception range

4.2 制导激光大气后向散射仿真

如图 1 所示,导引头探测器视场中心瞄准被照射目标 O,距离目标 2 km,视场为 30°,探测方位 100°。地面照射器发射激光脉冲能量 100 mJ,脉冲宽度 10 ns,束散角 1 mrad,照射距离 3 km,照射方位 80°,照射方向的天顶角 90°。大气能见度 20 km,乡村气溶胶模式,气溶胶标高 1.41 km。改变探测方向即视场法线与垂直方向的夹角 γ,散射光能量密度与功率密度变化如图 4 所示。

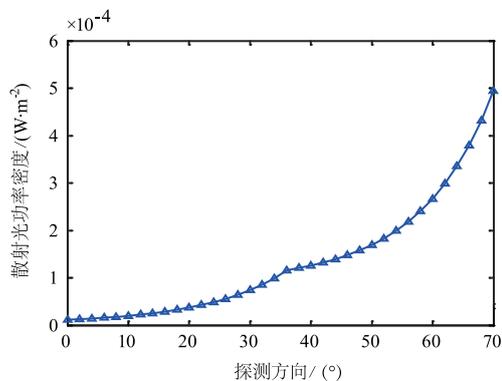


图 4 散射光功率密度随探测方向变化曲线
Fig. 4 Scattering intensity versus detective orientation

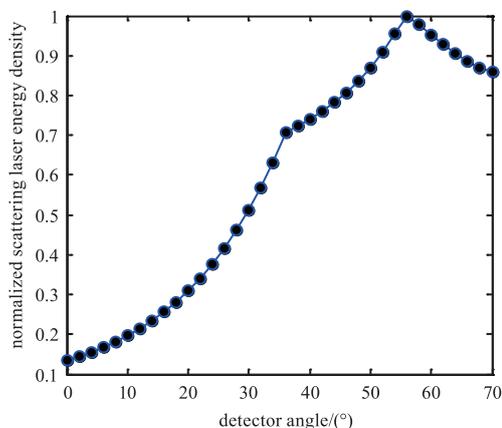


图 5 散射光能量密度随探测方向变化曲线
Fig. 5 Scattering energy density versus detective orientation

图 4 显示,散射光功率密度随着探测角度的增大而增加,导引头越靠近激光照射器,散射光功率密度越大,对己方的误伤概率就会增加。

图5显示,散射光能量密度随探测角度的增大先逐渐变大,在天顶角为 $55^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 时,达到最大值,探测角度继续增加,散射光能量密度开始下降。综合图4和图5,若导引头探测器的灵敏度为 $N \text{ fJ/cm}^2$,以目标为顶点,弹目连线与指示方向的夹角应大于 35° ,激光制导导弹不会因大气散射光的干扰而使制导方向偏离攻击目标。

5 结束语

建立了基于米氏散射的激光离轴散射探测模型,设计了激光大气散射离轴探测软件。该软件具有较强的实用价值,适用于概略型激光告警探测、激光半主动制导过程中散射光分析、机载激光指示器系统战术训练、地面激光探测等领域。

参考文献:

- [1] SHI Wan. Propagation and scattering of wave in random medium[M]. Beijing: Science Press, 1978; 203 - 205. (in Chinese)
石丸. 随机介质中波的传播和散射[M]. 北京: 科学出版社, 1978; 203 - 205.
- [2] D H Pollock. Countermeasure Systems[M]. Washington: SPIE Optical Press, 1993, 110.
- [3] CHENG Yubao, SUN Xiaoquan, ZHAO Minghui, etc. Analysis of the signal detection of laser scattering in the air[J]. Laser Technology, 2006, 30(3): 277 - 279. (in Chinese)
程玉宝, 孙晓泉, 赵明辉, 等. 激光信号大气散射探测分析[J]. 激光技术, 2006, 30(3): 277 - 279.
- [4] ZHANG Heyong, ZHAO Weijiang, REN Deming, et al. Improved algorithm of mie scattering parameters based on matlab[J]. The journal of Light Scattering, 2008, 20(2): 103 - 107. (in Chinese)
张合勇, 赵卫疆, 任德明, 等. 球形粒子 Mie 散射参量的 Matlab 改进算法[J]. 光散射学报, 2008, 20(2): 103 - 107.
- [5] WANG Lianfen, LIU Guangbin, ZHENG Zhong, et al. Onwards continued fraction algorithm for Mie scattering and numerical simulation[J]. Optical Technique, 2009, 35(4): 541 - 543. (in Chinese)
王莲芬, 刘光斌, 郑重, 等. Mie 散射向前递推连分式算法及其数值模拟[J]. 光学技术, 2009, 35(4): 541 - 543.
- [6] WU Jian, YANG C P, LIU Jianbing. Theory of light propagation in atmosphere[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications press, 2005; 39 - 42. (in Chinese)
吴健. 光在大气中的传输理论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005; 39 - 42.
- [7] Elterman L. Relationships between vertical attenuation and surface meteorological range[J]. Appl. Opt., 1970, 9: 1804 - 1810.
- [8] CHEN Xiuhong, WEI Heli, LÜ Weiyu, et al. Comparison of infrared atmospheric transmittance calculated by CART software with measured values[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(4): 403 - 405. (in Chinese)
陈秀红, 魏合理, 吕炜煜, 等. CART 软件计算的红外大气透过率和实测值比较[J]. 激光与红外, 2009, 39(4): 403 - 405.