

威胁源参数对激光散射截获半径的影响

巨养锋,梁冬明,薛建国,王 东
(63891 部队,河南 洛阳 471003)

摘要:在利用 Mie 散射理论对 1.06 μm 脉冲激光在低空大气中传输时散射辐照度的分布进行了分析计算的基础上,以激光测距信号为例,讨论了激光威胁源参数(脉冲能量、脉冲宽度、威胁源距离等)变化对激光告警散射截获半径的影响,结果表明:威胁源参数变化会对激光散射截获半径产生明显影响。因此,在考核和使用激光告警设备时,必须考虑威胁源参数变化因素的影响。

关键词:激光技术;大气散射;散射辐照度;散射截获半径

中图分类号:TN977 **文献标识码:**A

Influence of threat source's parameters on laser scatter intercept radius

JU Yang-feng, LIANG Dong-ming, XUE Jian-guo, WANG Dong
(63891 Unit, Luoyang 471003, China)

Abstract: As the laser technology is developing in military applications, it becomes important to detect and warn the laser threat signal. The distribution of the scattering irradiance of 1.06 μm laser signal in atmosphere is calculated by using Mie scattering theory. Taking the laser range finder signal as an example, the influence of the laser threat source's parameters (such as pulse energy, pulse width, threat source distance, etc) on laser scatter intercept radius is discussed. The result shows that the changes of source parameters have evident impact on laser scatter intercept radius. It is necessary to take them into account in test and use of laser warning equipments.

Key words: laser technology; atmosphere scattering; laser irradiance; scatter intercept radius

1 引言

激光技术在军事领域的应用愈来愈广泛,激光测距信号、激光制导信号等激光信号对各种重要目标构成了严重威胁,在现代战争中,只要目标受到激光照射,就可能意味着目标将遭到敌方的打击。因此,必须对激光威胁源进行有效探测和告警,以便采取相应的对抗措施。

激光告警设备除了可对直射激光告警,还可能对经过大气散射的直射激光信号、激光器端口散射信号以及从目标自身或附近其他设备表面漫射(也称作溅射)信号告警。其中直接入射光束能量集中、密度大,但由于发散角小,光斑半径通常只有米级,如果只探测直射激光束,那么激光告警器的警戒范围很小;大气散射光辐照度虽然较弱,但如果其辐

照度大于激光告警系统的探测灵敏度阈值,将会被告警器探测而进行告警,从而扩大激光告警系统的警戒范围。

激光告警设备的技术指标除告警距离、探测概率、虚警率、角度分辨力等外,散射截获半径也是激光告警设备的一个重要战技指标。本文将对影响散射截获半径的一些因素进行分析讨论。

2 大气气溶胶散射

从可见光区到中红外光谱区,近地和低高度大气衰减的主要根源是气溶胶的散射作用,在该区域中衰减的光线并不是被吸收掉,而只是改变传播方

作者简介:巨养锋(1968-),男,副研究员,研究方向为光电技术应用。E-mail:juyangfeng@163.com

收稿日期:2010-12-09;修订日期:2010-12-20

向。光散射主要是瑞利散射和米氏散射。瑞利散射是相对各向同性的散射,在紫外光谱和高空中起主要作用;而米氏散射是指较大的气溶胶粒子产生的散射,在较低的高度起主要作用。大气气溶胶粒子对激光的吸收和散射,一方面导致直射光束受到衰减,另一方面使得大气散射辐照度增大。直射光束的辐照度随着离发射轴距离的增加按指数规律急剧下降,而大气散射激光随着离发射轴距离的增加按近似按反比规律缓慢下降^[1],因此在计算直射光束外的辐照度时可以不考虑直射光束的影响。对于大气散射光,在能见度大于 5 km 时,可以不考虑多散射效应。

2.1 气溶胶微粒分布

悬浮于大气中的各种固体和液体粒子统称为大气气溶胶粒子。气溶胶粒子的成分、形状和大小不一,其半径(或等效半径)范围一般为 0.01 ~ 100 μm。一般认为气溶胶粒子的大小分布不随高度变化,但其分布函数与地理环境和气象条件有关。气溶胶密度 $n(r)$ 与微粒半径 r 的关系为:

$$\frac{n(r)}{\Delta r} = \begin{cases} c_1 r^{-4} & (0.1 \mu\text{m} < r < 100 \mu\text{m}) \\ c_1 \times 10^4 & (0.02 \mu\text{m} < r < 0.1 \mu\text{m}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

此分布函数已被规划为标准值, $\Delta r = 1 \mu\text{m}$, $c_1 = 0.883 \times 10^{-3}$, 即全部尺寸范围的积分等于 1。使用时只需把标准分布函数乘以修正值 N , 即可得到任意大气高度的实际尺寸分布^[2]。

当气溶胶粒子半径为 $0.1 \mu\text{m} < r < 100 \mu\text{m}$, 大气能见度为 23 km 时, 近地面气溶胶分布修正系数 $N = 2.828$ 。则此时气溶胶密度 $n(r)$ 与微粒半径 r 的关系为 $\frac{n(r)}{\Delta r} = 2.49r^{-4}$ 。

当相对湿度 H 大于 70% 时, 对粒子大小进行如下修正: $r' = rF$ 。式中修正因子 $F = 1 - 0.9 \ln(1 - H/100)$ 。

2.2 单个气溶胶粒子对激光束的吸收和散射

根据 Mie 散射理论, 可以得到气溶胶粒子的散射强度和衰减效率因子^[3]:

$$I_{\text{sca}} = I_0 \frac{\lambda^2}{8\pi L^2} (|s_1(\theta)|^2 + |s_2(\theta)|^2)$$

$$Q_{\text{ext}} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n)$$

式中, L 为观测点到微粒球心的距离; λ 为激光波

长; θ 为散射角。幅值函数 $s_1(\theta)$ 和 $s_2(\theta)$ 、Mie 散射系数 a_n 和 b_n 、散射角函数 $\pi_n(\cos\theta)$ 和 $\tau_n(\cos\theta)$ 分别为:

$$s_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\cos\theta) + b_n \tau_n(\cos\theta)]$$

$$s_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n(\cos\theta) + b_n \pi_n(\cos\theta)]$$

$$\varphi(x) = xJ_n(x)$$

$$\xi_n = xJ_n(x) - ixH_n(x)$$

$$a_n = \frac{\varphi'_n(mx)\varphi_n(x) - m\varphi_n(mx)\varphi'_n(x)}{\varphi'_n(mx)\xi_n(x) - m\varphi_n(mx)\xi'_n(x)}$$

$$b_n = \frac{m\varphi'_n(mx)\varphi_n(x) - \varphi_n(mx)\varphi'_n(x)}{\varphi'_n(mx)\xi_n(x) - \varphi_n(mx)\xi'_n(x)}$$

$$\pi_n(\cos\theta) = \frac{p_n^1(\cos\theta)}{\sin\theta}$$

$$\tau_n(\cos\theta) = \frac{dp_n^1(\cos\theta)}{d\theta}$$

式中, $x = 2\pi r/\lambda$ 为散射粒子尺度参数; $J_n(x)$ 和 $H_n(x)$ 分别为第一阶和第二阶球贝塞尔函数; p_n^1 为一阶连带勒让德多项式^[4-7]。

3 威胁源参数变化对散射截获半径的影响

3.1 1.06 μm 激光大气传输计算

目前, 激光测距机和激光目标指示器大都工作在 1.06 μm 波长, 因此, 研究 1.06 μm 激光束在大气中的传播具有重要的意义。1.06 μm 激光在大气中传播时, 大气分子对它的吸收和散射非常微弱, 而大气气溶胶对它的吸收和散射效应则比较显著。大气气溶胶粒子的吸收和散射一方面导致直射光束受到衰减, 另一方面也使得远离直射光束的大气散射光显著增强。

当 1.06 μm 激光束在低空传输时, 设大气气溶胶粒子半径范围为 $r_1 - r_2$, 气溶胶粒子的大小分布函数为 $N'(r)$, 激光器输出脉冲能量为 E , 脉冲宽度为 τ , 光束束散角为 θ , 出射口径为 D , 沿 z 轴方向传播, 探测器法线方向与激光传输方向平行, 假设探测器视场为 30° , 那么 $\alpha = 15^\circ$, 根据几何关系, 可以得到在激光传输方向上, 探测器的盲区长度 $l = d/\tan\alpha$, 如图 1 所示。

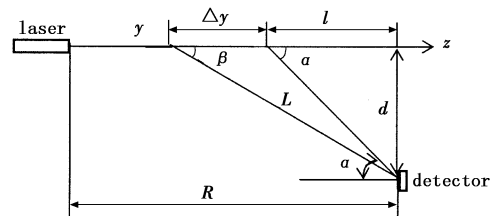


图 1 激光大气传输示意图

从直射光束 $z = y$ 处面积为 $S = \pi(D + \theta y)^2/4$ 、长度为 Δy 的圆柱内的气溶胶粒子向探测器散射的散射信号辐照度为:

$$I_s(d, y, r) = I_y \int_{r_1}^{r_2} \frac{\lambda^2 (|s_1(\beta)|^2 + |s_2(\beta)|^2) \cos\beta}{8\pi^2 [(R-y)^2 + d^2]} \cdot N'(r) dr \cdot \frac{\pi(D + \theta y)^2}{4} \cdot e^{-Q_e \sqrt{(R-y)^2 + d^2}} \cdot \Delta y$$

式中, $I_y = \frac{4E}{\tau\pi(D + \theta y)^2} e^{-Q_e y}$, $Q_e = \int_{r_1}^{r_2} Q_{ext} \pi r^2 N'(r) dr$.

沿光束传播方向进行积分,可以得到告警接收机处激光散射信号为:

$$I_s(d, r) = \int_0^{R-1} I_s(d, y, r) dz$$

3.2 威胁源参数对截获半径的影响

以 AN/GVS5 激光测距机测距信号为例,讨论激光威胁参数变化对散射截获半径的影响,其参数为:波长 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$,单脉冲能量 $E = 15 \text{ mJ}$,脉冲宽度 $\tau = 6 \text{ ns}$,束散角 $\theta = 1 \text{ mrad}$,测距机距离探测器

表4 威胁源距离变化时的散射截获半径

源距离/km	1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	7	8	9	10
散射截获半径/m	37.6	41.8	42.9	43	42.5	40.3	37.6	34.8	32.1	29.5	26.8	24.5

从表2~表4中的计算结果可以看出:当激光威胁源其他参数保持不变时,脉冲能量、脉冲宽度以及威胁源与告警接收器距离的变化对激光散射截获半径有明显影响分析:在某一固定参数激光照射下,辐照度随离轴距离增大近似线性下降,而散射截获半径与脉冲能量近似呈正比线性关系,与脉冲宽度呈反比关系;激光散射截获半径与威胁源距离关系如图2所示,从图中可以看出,在威胁源距离较近时,散射截获半径随威胁源距离增大而逐渐增大,随着威胁源距离增大,散射截获半径很快达到最大值(约2.5 km),然后随距离增大,散射截获半径逐渐减小,在威胁源距离大于一定距离(约3 km)后,散射截获半径随威胁源距离增加近似呈线性下降,这

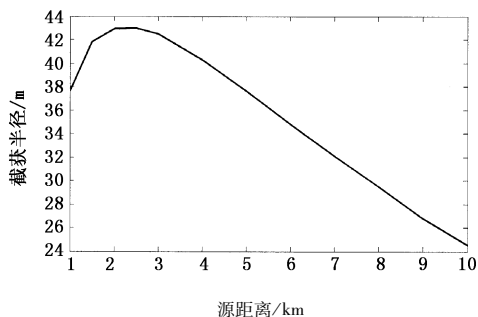


图2 激光散射截获半径与威胁源距离关系

5 km,大气相对湿度75%。通过计算可以得到不同离轴距离处的散射激光辐照度,结果如表1所示。

表1 不同离轴距离处散射激光辐照度

离轴距离/m	10	13	15	20	30	50	70	100
辐照功率密度/($10^{-5} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)	40.2	30.8	26.5	19.6	12.8	7.4	5.0	3.3

当其他参数保持不变,脉冲能量、脉冲宽度以及威胁源与告警接收器距离分别变化时,激光散射截获半径分别如表2~表4所示(假定激光告警灵敏度阈值为 0.1 mW/cm^2)。

表2 脉冲能量变化时的散射截获半径

脉冲能量/mJ	10	15	20	25
散射截获半径/m	25.4	37.6	49.5	60.2

表3 脉冲宽度变化时的散射截获半径

脉冲宽度/ns	6	8	10	12	14
散射截获半径/m	37.6	28.9	23.4	19.6	16.9

是由于随着威胁源距离增大大气对激光衰减越大;而在近距离时,由于探测器视场的限制使得参与散射的有效散射路径大为减小,所以散射截获半径随威胁源距离增大呈现出先逐渐增大,达到峰值后然后逐渐减小的过程。

4 结论

在分析大气气溶胶散射对激光传输影响的基础上,以激光测距信号为例,对激光威胁源参数变化与激光告警散射截获半径关系进行研究分析,结果表明:威胁源的参数变化对激光大气气溶胶散射信号强度有显著影响,从而影响激光告警设备的激光散射截获半径,使其随之发生较大变化,因此在使用和检验激光告警设备时,要分析考虑上述因素变化的影响。

参考文献:

[1] Cheng Yubao, Sun Xiaoquan, Zhao Minghui, et al. 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.

- [2] Li Jingzhen. Handbook of optical[M]. Xi'an: Shaanxi Science and technology press, 1986: 846 - 852. (in Chinese)
李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科技出版社, 1986: 846 - 852.
- [3] Wang Long, Zhang Guojun, Zou Jiwei, et al. Analysis of the signal's feature corresponding to laser scattering in the air[J]. Applied Laser, 2002, 22(5): 487 - 490. (in Chinese)
王龙, 张国俊, 邹继伟, 等. 大气中激光散射信号的特征分析[J]. 应用激光, 2002, 22(5): 487 - 490.
- [4] Xiang Jiansheng, He Junhua. Numerical calculation of the Mie theory[J]. Applied Optics, 2007, 28(3): 363 - 366. (in Chinese)
项建胜, 何俊华. Mie 光散射理论的数值计算方法[J]. 应用光学, 2007, 28(3): 363 - 366.
- [5] Wang Jun, He Junfa, Wang Lianfen, et al. The implementation of straightforward Mie scattering numerical calculation[J]. Applied Optics, 2005, 26(4): 13 - 16. (in Chinese)
王君, 何俊发, 王莲芬, 等. 简易 Mie 散射数值计算方法研究[J]. 应用光学, 2005, 26(4): 13 - 16.
- [6] Wiscombe W J. Improved Mie scattering algorithms[J]. Applied Optics, 1980, 19(5): 1505 - 1509.
- [7] Shen Jianqi, Liu Lei. An improved algorithm of classical Mie theory[J]. China Powder Science and Technology, 2005, 4(1): 1 - 5. (in Chinese)
沈建琪, 刘蕾. 经典 Mie 散射的数值计算方法改进[J]. 中国粉体技术, 2005, 4(1): 1 - 5.