

文章编号: 1001-3806(2006)03-0277-03

## 激光信号大气散射探测分析

程玉宝, 孙晓泉, 赵明辉, 孙晓军  
(电子工程学院, 合肥 230037)

**摘要:** 有些应用场合需要利用大气气溶胶对激光的散射来探测激光。在都市郊区大气模型条件下, 利用米氏散射理论, 对 1.06 $\mu\text{m}$  激光在低空大气中传输时散射辐照度的分布进行了理论分析和数值计算。得到激光大气散射辐照度随离轴距离的增大近似按反比规律缓慢下降、能见度仅影响散射强度的大小而不影响散射强度的分布等特征。这些特征在激光散射实验中得到了初步的验证, 可为激光信号的散射探测提供理论依据和参考。

**关键词:** 散射; 散射特征; 大气散射; 散射辐照度

**中图分类号:** O436.2      **文献标识码:** A

### Analysis of the signal detection of laser scattering in the air

CHENG Yu-bao, SUN Xiao-quan, ZHAO Ming-hui, SUN Xiao-jun  
(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** It is necessary to detect the atmospheric scattering laser in some situation. Based on the atmospheric model of cities and suburbs, the distribution of the scattering irradiance of 1.06 $\mu\text{m}$  laser in the low atmosphere is analyzed and calculated by using Mie's scattering theory. The characteristics of the scattering irradiance distribution are obtained, which are proved in part. That is, the maximum intensity of aerial scattering laser decreases slowly with the off-axis distance and is inversely proportional to the distance; visibility only affects scattering intensity, instead of the distribution of scattering intensity. The characteristics can provide the theoretical basis and reference for the signal detection of laser scattering.

**Key words:** scattering; scattering characteristic; atmospheric scattering; scattering irradiance

## 引 言

激光器的发散角比较小, 激光束的束宽比较窄, 因此, 在激光探测的典型情况下, 激光束不一定直接入射到激光探测装置上。在有些应用场合, 如激光警戒等, 需要利用大气对激光的散射来探测激光<sup>[1,2]</sup>。近几十年来, 由于气象、遥感、微粒测量等需要, 人们对光散射进行了大量的研究<sup>[3,4]</sup>, 这些研究为激光散射探测提供了理论基础。由现有的研究成果可知: 光散射主要是瑞利散射和米氏散射。瑞利散射在紫外光谱和高空中起主要作用; 而米氏散射则在较低的高度上起主要作用, 是优先的散射源, 可产生相对较大的可用信号, 为激光散射探测提供必要的能量<sup>[5]</sup>。

作者主要对 1.06 $\mu\text{m}$  所在的近红外波段的激光进行大气散射探测分析。通过分析激光与大气气溶胶粒子相互作用所产生的散射, 总结低空激光散射信号的分布特征, 为激光信号的散射探测提供理论依据。

作者简介: 程玉宝 (1966-), 男, 博士, 副教授, 现主要从事光电技术和光电对抗研究。

E-mail: ybcheng@163.com

收稿日期: 2005-04-04; 收到修改稿日期: 2005-11-16

## 1 低空激光散射的能量分布计算公式推导

为研究方便, 可认为低空气溶胶粒子的大小分布不随高度变化, 只与地理环境和气象条件有关。典型的陆地气溶胶粒子的大小分布密度函数为<sup>[6]</sup>:

$$N'(r) = 0.3129/r^4 \quad (1)$$

式中,  $N'(r)$  的单位为个数 / ( $\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}$ )。当相对湿度  $H > 70\%$  时, 对粒子大小进行如下修正, 即  $r' = rF$ ,  $F = 1 - 0.9 \ln[1 - H/100]$ 。

若激光器输出功率为  $w(t)$ , 输出光斑的直径为  $D$ , 发散角为  $\alpha$ , 且激光波长在大气传输窗口中, 大气分子对其传输影响很小, 可主要考虑大气气溶胶粒子的影响。当能见度大于 5km 时, 可不考虑多散射效应<sup>[7]</sup>。在如图 1 所示的气溶胶粒子散射模型中, 若不

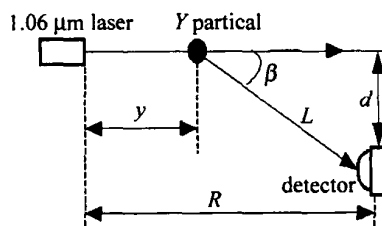


Fig 1 The model of laser scattering transmission in air

考虑衍射等能量损失,则在  $Y$  处的激光辐照度为:

$$E_s = \frac{4w(t)}{\pi(D + \alpha y)^2} \exp(-Q_e \cdot y) \quad (2)$$

式中,  $y$  为激光器到  $Y$  处的距离;  $Q_e$  为气溶胶的衰减系数,与能见度有关。对  $1.06\mu\text{m}$  激光,在工程上,大气衰减与能见度的关系<sup>[7,8]</sup>可表示成:  $Q_e = 2.7/V$ ,  $V$  是以  $\text{km}$  为单位的能见度。激光束能量主要集中在激光束轴上,在此只需考虑轴上球形粒子的散射。由米氏理论得到,在  $Y$  处单个气溶胶粒子向距离激光器为  $R$ 、离激光束轴距离为  $d$  的探测器散射的光强(即辐照度)为<sup>[9,10]</sup>:

$$E(d, y, r) = E_s \cdot \frac{S_1(\beta)^2 + S_2(\beta)^2 \cdot \lambda^2 \cdot \cos\beta}{8\pi^2 [(R - y)^2 + d^2]} \cdot \exp[-Q_e \cdot (R - y)^2 + d^2] \quad (3)$$

式中,  $\lambda$  为激光的波长,  $\beta$  为散射光束对探测器探测面的入射角,  $S_1(\beta)$  和  $S_2(\beta)$  为散射光振幅函数<sup>[9]</sup>。在  $Y$  处体积为  $\frac{\pi(D + \alpha y)^2}{4} \cdot dy$  的气溶胶粒子向探测器散射的光强近似为:

$$dE(d, y) = \int_{r_1}^{r_2} E(d, y, r) \cdot \frac{\pi(D + \alpha y)^2}{4} \cdot dy \cdot N'(r) \cdot dr \quad (4)$$

式中,  $r_1 \sim r_2$  是大气气溶胶粒子半径的分布范围。由于大气气溶胶的前向散射较强,在此只需考虑前向散射<sup>[10]</sup>。(4)式的  $dy$  积分区间可取为  $0 \sim R$ , 则探测器所接收的散射光强为:

$$E(d) = \int_0^R \int_{r_1}^{r_2} E(d, y, r) \cdot \frac{\pi(D + \alpha y)^2}{4} \cdot N'(r) \cdot dr \cdot dy \quad (5)$$

由图 1 中的几何关系:  $R - y = d \cdot \cot\beta$ , 可得:  $dy = d \cdot \csc^2\beta \cdot d\beta$ , 代入(5)式并简化得:

$$E(d) = \frac{0.3129\lambda^2 \cdot w(t)}{8\pi^2 d \cdot \exp(Q_e \cdot R)} \times \int_{\beta_0}^{\pi/2} \int_{r_1}^{r_2} \frac{(|S_1(\beta)|^2 + |S_2(\beta)|^2) \cdot \cos\beta}{(F \cdot r)^4 \exp[Q_e \cdot d \cdot (\csc\beta - \cot\beta)]} dr \cdot d\beta \quad (6)$$

式中,  $\beta_0 = \text{acot}(d/R)$ 。  $E(d)$  的计算是在理想情形下推导的,没有考虑大气湍流等因素的影响,所以,  $E(d)$  是离轴  $d$  处的大气散射光的最大辐照度 ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )。

## 2 低空激光散射计算及结果分析

在能见度为  $23\text{km}$ 、湿度为  $75\%$  的都市郊区低空中,大气气溶胶的分布函数  $N'(r) = 0.3129r^{-4}$ , 其中  $r = 1.0068r'$ , 大气气溶胶半径  $r$  的范围为  $0.1\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$ , 对于  $1.06\mu\text{m}$  激光而言,其复折射率为  $m = 1.56 - 0.089i$ 。以典型激光测距机为例,激光器出口

光斑直径  $D = 2\text{cm}$ , 发散角  $\alpha = 1.17\text{mrad}$ , 输出能量  $Q = 10\text{mJ}$ , 脉冲宽度  $\Delta t = 10\text{ns}$ 。

根据激光束是高斯光束的特点,可计算出在距离激光源  $10\text{km}$  处垂直于光轴的平面内,直射光束的离轴辐照度分布曲线如图 2 所示。在距离激光源  $10\text{km}$  处,运用(6)式,可得大气散射激光离轴最大辐照度分布曲线,如图 3 所示。

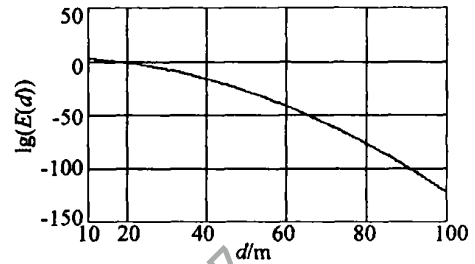


Fig 2 The distribution of straight-beam's irradiance varying with the off-axial distance

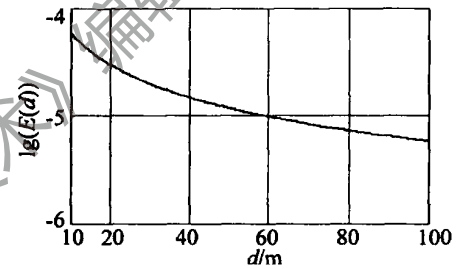


Fig 3 The distribution of scattering-laser's irradiance varying with the off-axial distance

由计算结果可知:直射光束的辐照度随离轴距离的增大按指数规律急剧减小,而大气散射激光的辐照度随离轴距离的增大近似按反比规律缓慢下降。在距离激光源  $10\text{km}$  处,在离轴  $26\text{m}$  以内,直射光束的辐照度 ( $\geq 10^{-4} \text{W}/\text{cm}^2$ ) 远远大于大气散射光的最大辐照度 ( $\leq 10^{-5} \text{W}/\text{cm}^2$ ); 在离轴超过  $30\text{m}$  以外,直射光束的辐照度远远小于  $10^{-6} \text{W}/\text{cm}^2$ , 而散射激光的辐照度在离轴  $100\text{m}$  以内均大于  $10^{-6} \text{W}/\text{cm}^2$ 。

利用上述参数,在离轴距离  $d$  分别为  $100\text{m}$ ,  $200\text{m}$ ,  $300\text{m}$  时,计算激光传输方向上散射辐照度的分布,并以离轴  $100\text{m}$  的传输方向上最大辐照度  $E_{\text{max}}$  进行归一化,归一化后的分布曲线如图 4 所示。再以能见

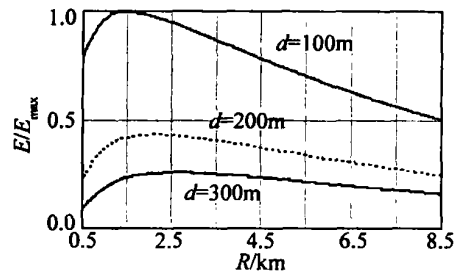


Fig 4 The normalized distaibution of the off-axial irradiance in laser transmitting direction

度分别为  $5\text{km}$ ,  $10\text{km}$  为条件,对辐照度的分布进行数值计算,得到激光传输方向上散射辐照度相对强度的

分布曲线,与能见度为 23km 时的分布曲线基本上吻合。这说明能见度的不同主要影响散射强度的大小,而不改变散射强度的分布。

### 3 散射探测离轴距离的理论计算

激光散射探测装置的探测器噪声主要是热噪声和散粒噪声,可表示为<sup>[11]</sup>:

$$I_n^2 = (4kT\Delta f/R_1)^{1/2} + \{2e[I_d + (I_b + P_o R_\lambda)M^2 F] \Delta f\}^{1/2} \quad (7)$$

式中,  $e$  是电子电荷;  $I_d$  为探测器表面电流;  $I_b$  是探测器体暗电流;  $R_\lambda$  为单位增益响应;  $M$  是雪崩光电管的内增益;  $F$  是附加噪声因子;  $\Delta f$  是放大器带宽;  $R_1$  是负载电阻;  $P_o = P_s + P_b$  为入射到探测器上总的光功率,  $P_s = E_s A_d \tau G$  为入射激光功率,  $E_s$  为激光散射辐照度,  $\tau$  为衰减系数,  $A_d$  为探测器面积,  $G = A_r / A_d$  为光学增益,  $A_r$  为探测器有效集光面积;  $P_b = E_\lambda G A_d \Delta \lambda \tau$  为背景光功率,  $E_\lambda$  为太阳的光谱辐照度;  $\Delta \lambda$  为光谱带宽。探测器的输出信号电流为:

$$I_s = P_s R_\lambda M \quad (8)$$

由文献 [11] 可知:激光散射探测装置要满足探测概率  $P_d \geq 98\%$  和平均虚警率为  $10^{-2}/h$  ( $h$  表示时间) 的技术指标,探测装置的探测信噪比最小为<sup>[11]</sup>:

$$I_s / I_n = 9.788 \quad (9)$$

若激光散射探测装置的技术参数为:光学增益  $G = 60$ , 衰减系数  $\tau = 1$ , 滤光片的光谱带宽  $\Delta \lambda = 10\text{nm}$ , 中心光谱为  $1.064\mu\text{m}$ ; 雪崩管的有效探测面积为  $0.2\text{mm}^2$ , 在  $1.06\mu\text{m}$  处,  $R_\lambda = 0.5\text{A/W}$ ,  $M = 100$ ; 放大器带宽  $100\text{MHz}$ ; 负载电阻  $1\text{k}\Omega$ 。

当  $\lambda = 1.06\mu\text{m}$  时,由文献 [9] 可知:太阳光谱辐照度  $E_\lambda = 644\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ 。根据 (7) 式、(8) 式、(9) 式的计算可得到:探测装置的最小可探测功率为  $P_{\min} = 6.126 \times 10^{-5}\text{W}/\text{cm}^2$ 。映射到图 3 计算的激光散射辐照度与离轴距离的关系,此探测装置最大离轴可探测距离为  $d_{\max} = 56\text{m}$ 。

### 4 实验结果

以上述技术参数研制激光散射探测装置 1 台,手持望远镜式脉冲激光测距机 1 部,其参数为:能量

Table 1 The experimental result of scattering laser detecting

off-axial distance/m	34	35	36	37	38
experiment number	20	20	20	20	20
detecting number	20	20	15	10	0
missing number	0	2	5	12	20

10mJ, 脉宽 10ns, 发散角 1mrad, 重复频率为单脉冲。在能见度约为 23km、相对湿度为 75% 的晴朗天气的下午,在市郊进行野外试验,激光测距机距离探测装置为 5.6km。散射探测的实验结果如表 1 所示。

实验结果表明:离轴距离增大,漏测概率增加,即激光散射能量随着离轴距离的增大而逐渐减小。虽然探测装置正确探测激光散射信号的离轴距离只有 34m,远小于理论计算的最大离轴可探测距离,但考虑到能见度、电路噪声和大气湍流等影响,可以推断:该离轴探测距离是符合理论计算的。

### 5 结论

通过激光大气散射能量分布的公式推导、数值计算和实验测试,得到了  $1.06\mu\text{m}$  激光在都市郊区大气传输时的散射信号分布特征,即:激光大气散射的辐照度随离轴距离的增大近似按反比规律缓慢下降;能见度的不同只影响散射强度的大小,而不影响散射强度的分布等。这些特征可为激光散射探测提供理论依据和参考,具有应用价值。

### 参考文献

- [1] SABOL B M, BALLARD J R. Basic development and testing of a short-range laser profiling model [J]. Proc SPIE, 2003, 5092: 268 ~ 275.
- [2] YANG Z F, QIAN H W, GAO G H. Development of laser warning technology [J]. Laser Technology, 2004, 28 (1): 98 ~ 102 (in Chinese).
- [3] CHEN J, YOU Zh, ZHOU Zh Y. Light scattering theory and its application in measurement [J]. Laser Technology, 1996, 20 (6): 359 ~ 365 (in Chinese).
- [4] YANG Y, ZHANG Zh X, JIANG D Z. Laser techniques of measuring particles size and their size distribution [J]. Laser Technology, 1997, 21 (2): 122 ~ 127 (in Chinese).
- [5] FU W. The theory of the signal detecting in laser warning [J]. Photoelectric Countmeasure and Passive Interference, 2001, 16 (1): 5 ~ 15 (in Chinese).
- [6] WANG Zh J. Optical technology handbook [M]. Beijing: China Machine Press, 1987. 660 ~ 670 (in Chinese).
- [7] ZHANG J Q, FAN X P. Infrared physics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004. 141 ~ 185 (in Chinese).
- [8] ACCETTA J S, SHUMKER D L. The infrared and electro-optical systems handbook [M]. 7th ed, Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993. 70 ~ 90.
- [9] YN H. The foundation of atmospheric radiology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993. 53 ~ 121 (in Chinese).
- [10] WANG L, ZHANG G J, ZOU J W. Analysis of the signal's feature corresponding to laser scattering in air [J]. Applied Laser, 2002, 22 (5): 487 ~ 490 (in Chinese).
- [11] SUN X Q. The principle and technology of laser countmeasures [M]. Beijing: People's Liberation Army Press, 2000. 24 ~ 56 (in Chinese).