

# 米散射激光雷达重叠因子及全程回波信号 标定技术研究\*

狄慧鸽<sup>†</sup> 华灯鑫 王玉峰 闫庆

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

(2012年8月3日收到; 2012年11月27日收到修改稿)

由于激光雷达光轴夹角的存在和光束质量分布的非均匀性, 导致理论回波信号与实际回波信号有较大差别, 需要对其进行校正. 基于数学推导和软件仿真, 给出了激光雷达重叠因子的数学表达式, 分析了光轴夹角导致的系统重叠因子在全程探测空间的变化情况; 分析了光束分布为高斯分布和均匀分布时的重叠因子变化情况; 对激光雷达的距离校正信号和 Klett 算法公式进行了重叠因子修正, 最后在对激光雷达系统参数标定的基础上, 在重叠区域利用修正的 Klett 公式对其所测得到的回波信号进行了修正, 在探测盲区利用斜率法修正距离校正信号, 进而得到了符合理论与实际情况的激光雷达在全程上校正的消光系数曲线.

**关键词:** 激光雷达, 标定, 重叠因子, 消光系数

**PACS:** 42.68.Wt, 42.79.Qx, 92.30.Ef

**DOI:** 10.7498/aps.62.094215

## 1 引言

激光雷达的大气探测为全程探测, 理论上只要激光发射光束完全处于激光接收视场内, 其理论探测距离为 0 到几千米, 甚至几十千米. 但实际上由于激光雷达系统的发射光束与接收系统视场不完全重合, 导致在一定的距离处探测器视场不能完全覆盖散射信号. 特别是对于近地面部分, 光束夹角导致发射视场与接收视场的不完全交迭更明显, 这种情况会导致在不完全交迭区域, 探测回波信号低于实际的大气回波信号, 再加上激光光束分布不均匀, 这就导致最终反演的消光系数和散射系数反演数据与实际大气情况不符.

为寻找有效的解决方法, Sasano<sup>[1]</sup> 提出了一种基于激光雷达方程和扫描场测量的统计平均来确定激光雷达的结构重叠因子, 但该方法难以获得良好的近场回波信息; 文献 [2] 在理论上分析了光束

品质因子对非同轴激光雷达探测性能的影响; 王治华<sup>[3]</sup> 和刘巧君<sup>[4]</sup> 等在考虑了激光光束分布的情况下, 给出了几何结构因子的解析表达式, 利用表达式得出几何重叠因子并对近场信号进行了修正. 上述方法基本上都是采用理论解析和后期数据分析的办法来对近场信号进行修正, 但是直接利用回波信号进行定标, 不仅容易受到外部天气条件的影响, 并且通常都是假定光斑在远距离处完全重合, 此种假定存在有很大的不确定性, 与实际情况存在较大差别.

本文推导出了激光雷达重叠因子的数学表达式, 并对重叠因子存在的几种情况进行了分析; 同时在数学理论与软件仿真的基础上给出了光束分布为均匀分布和高斯分布时重叠因子的变化情况; 对激光雷达的全程探测区域进行了信号校正, 对本实验室的米散射激光雷达光束模态和重叠因子进行了实验标定, 最后在标定结果的基础上根据修正后的 Klett 公式和盲区斜率法对所测回波信号进行

\* 国家自然科学基金(批准号: 41027004, 61275185)、教育部高等学校博士学科点基金(批准号: 20106118120005)和陕西省自然科学基金(批准号: 2012JQ5002)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: dihuige@163.com

了计算, 最终得到了符合实际情况的消光系数曲线.

## 2 激光雷达系统重叠因子

激光雷达分共轴和旁轴两种系统, 为不失一般性, 以旁轴系统为例进行分析 (当光轴间距变为 0 时, 旁轴系统过渡到共轴系统). 激光雷达重叠因子  $G(L)$  定义为在一定距离处进入望远镜视场中的光束能量  $P(L)$  与该距离上光束总能量  $P_0(L)$  的比值<sup>[4]</sup> 为

$$G(L) = \frac{P(L)}{P_0(L)}, \quad (1)$$

式中

$$P(L) = \oint \int K(r, L) \cdot r \cdot dr d\theta,$$

$$P_0(L) = \oint \int K(r, L) \cdot r \cdot dr d\theta,$$

其中,  $K(r, L)$  为距离  $L$  处发射激光光束质量分布, 即

$$K(r, L) = \begin{cases} C, & \text{均匀分布,} \\ \frac{I_0 \omega_0^2}{\omega^2(L)} \exp\left[-\frac{2r^2}{\omega^2(L)}\right], & \text{高斯分布,} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $C$  为常数,  $I_0$  为束腰处激光光轴上的光强,  $\omega_0$  为高斯光束束腰,  $r$  为到光轴的距离,  $\omega(L)$  为在距离为  $L$  的平面上高斯光束的束宽.

$S_{\text{lap}}(L)$  为发射激光与接收视场在距离  $L$  处重叠的面积,  $S_0(L)$  为发射激光在距离  $L$  处的光斑面积. 若不考虑激光发射光束能量分布或认为激光光束能量分布均匀, 则系统重叠因子就演变为几何重叠因子, 几何重叠因子  $G_0(L)$  为

$$G_0(L) = \frac{S_{\text{lap}}(L)}{S_0(L)}. \quad (3)$$

图 1 为激光雷达发射光束与接收视场在空间相交的几种情况, 完全不重合, 部分重合和完全重合. 假设激光出射光斑半径为  $r_0$ , 半发散角为  $\alpha$ ; 接收望远镜半口径为  $R$ , 半视场角为  $\varphi$ ; 两光轴在出口处间距为  $D$ , 两光轴夹角为  $\delta$ . 则在不同的距离  $L$  处的目标上, 激光发射光束与接收望远镜视场的重叠面积  $S_{\text{lap}}(L)$  可由下式给出:

$$S_{\text{lap}}(L) = (R + \varphi L)^2 \arccos\left[\frac{(R + \varphi L)^2 + (D + \delta L)^2 - (r_0 + \alpha L)^2}{2(R + \varphi L)(D + \delta L)}\right]$$

$$+ (r_0 + \varphi L)^2 \arccos\left[\frac{(r_0 + \varphi L)^2 + (D + \delta L)^2 - (R + \alpha L)^2}{2(r_0 + \varphi L)(D + \delta L)}\right]$$

$$+ \frac{1}{2} L^2 \sqrt{(r_0 + D + R + \alpha L + \delta L + \varphi L)(D + R - r_0 + \delta L + \varphi L - \alpha L)}$$

$$\times \sqrt{(r_0 + D - R + \alpha L + \delta L - \varphi L)(r_0 + R - D + \alpha L + \varphi L - \delta L)}, \quad (4)$$

式中,  $\delta$  为正时表示激光发射光轴与接收光轴相交偏移,  $\delta$  为负时表示激光发射光轴与接收光轴分离偏移.

在距离  $L$  处, 发射激光的光斑面积  $S_0(L)$  为

$$S_0(L) = \pi(r + \alpha L)^2. \quad (5)$$

实验室内已有激光雷达出射光斑半径  $r_0$  为 25 mm, 接收望远镜半口径  $R$  为 100 mm, 光轴在出口处的间距  $D$  为 200 mm, 激光半发散角为 0.25 mrad, 接收半视场为 0.5 mrad. 则根据 (1), (2), (3), (4), (5) 式, 利用数学软件 mathcad 编程得出在不同的光轴偏移情况下, 光束为均匀分布和高斯分布时, 系统重叠因子随距离的变化关系如图 2 所示.

由图 2 和理论分析可以得出:

1) 光轴夹角对大气探测激光雷达光束在空间的重叠因子有很大的影响, 根据米散射公式, 回波信号与几何重叠因子成正比, 当重叠因子在空间起伏变化时, 会引起回波信号的起伏变化, 所以必须将其进行精确标定.

2) 当光轴为相交偏离并且夹角  $\delta \leq \varphi - \alpha$  时, 激光雷达重叠因子的影响最小, 这时不仅可以保证几何重叠因子在远距离处一直为 1, 并且可以最大程度的增加近程重叠区域, 并且当  $\delta = \varphi - \alpha$  时, 近程盲区 and 完全重叠距离达到最小. 如图 2 所示当夹角为 0.2 mrad 和 0 mrad 时的两条曲线, 完全重叠距离分别为 300 m 和 600 m, 而两者在远距离处的光

斑一直重合.

3) 比较高斯分布与均匀分布曲线易知, 当发射光束与接收视场完全重合时, 重叠区域面积内能量始终等于发射光束总能量, 即  $G(L) = G_0(L) = 1$ ;

当重叠面积与发射光束面积之比小于 0.5 时,  $G(L) < G_0(L)$ ; 当重叠面积与发射光束面积接近于 0.5 和大于 0.5 时,  $G(L) > G_0(L)$ , 但是总体变化趋势一致.

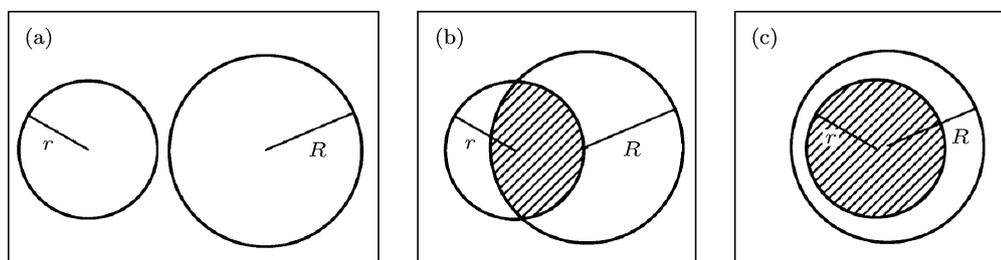


图 1 激光雷达发射激光与接收视场状态图 (a) 激光光斑未进入接收视场; (b) 激光光斑部分进入接收视场; (c) 激光光斑完全进入接收视场

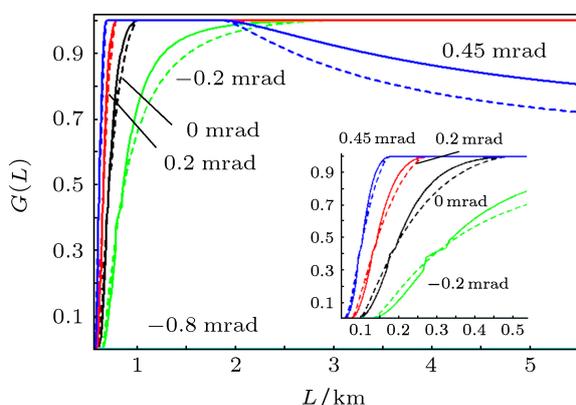


图 2 不同光轴偏移情况下, 重叠因子随距离的变化关系曲线 (实线是激光为高斯分布时的重叠因子, 虚线是激光为均匀分布时的重叠因子, 方框内图片是重叠因子在距离为 0—0.5 km 变化时的重叠因子变化曲线)

### 3 激光雷达重叠因子标定

目前在激光雷达大气探测中, 确定光束空间几何重叠因子的方法主要是通过水平大气实验方法确定. 实验的方法就是直接利用激光雷达水平回波信号确定近场几何重叠因子, 需要选取水平大气较为均匀、且能见度好的时候进行水平探测, 再用斜率法确定大气消光系数. 此种方法直接利用回波信号进行定标, 不仅容易受到外部天气条件的影响, 并且通常假定光斑在一定距离处完全重合, 此种假定存在有很大的不确定性. 例如图 1 中当光束夹角为 0.45 mrad 时, 光斑在一定距离处重合, 但是在 1.5 km 处又分开, 此种情况利用水平大气实验方法将无法得出真实的空间光束重叠因子.

根据 1 节所述, 双轴激光雷达系统在空间的重

叠因子与激光雷达收发光轴的夹角有直接联系, 并且与光束质量分布情况相关, 如果能将发射光轴与接收光轴的夹角和光束质量分布测出, 则利用 1 节所述公式和数据分析就可以较为容易的确定出在任何距离处的发射光束与接收光束的重叠因子.

利用文献 [5, 6] 所述双轴激光雷达系统对实验室的米散射激光雷达的光轴配准度进行测试, 并且测试了发射光束的质量分布情况. 测得其光轴夹角为 0.27 mrad, 且为分离偏移, 光束质量分布为类高斯分布, 如图 3 所示.

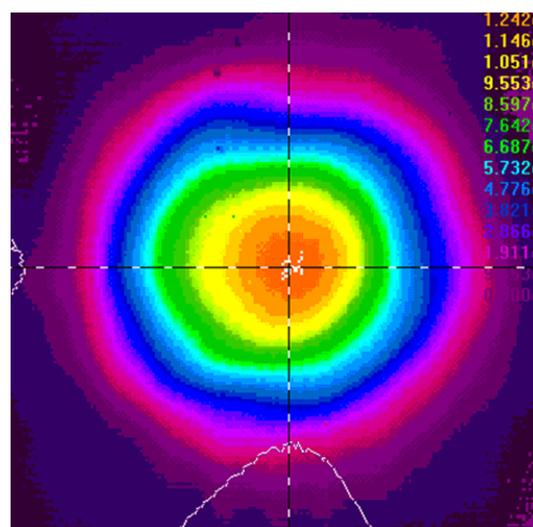


图 3 激光雷达发射光束质量分布图

根据 1 节所述, 该激光雷达在 160 m 以下为探测盲区, 之后发射光斑开始进入接收视场, 重叠因子一直增大, 但一直小于 1. 图 4 中实线为高斯分布

所对应的系统重叠因子, 虚线为系统几何重叠因子.

## 4 米散射回波信号的反演与校正

### 4.1 重叠区域信号校正

根据文献 [1, 4], 激光雷达方程如下所示:

$$P(L) = P_0 C G(L) \frac{\beta(L)}{L^2} \exp \left[ -2 \int_0^L \alpha(l) dl \right], \quad (6)$$

式中,  $P(L)$  为雷达接收到距离  $L$  处的回波功率,  $P_0$  为雷达发射功率,  $C$  为雷达系统常数,  $G(L)$  为系统重叠因子,  $\beta(L)$  为后向散射系数,  $\alpha(L)$  为消光系数.

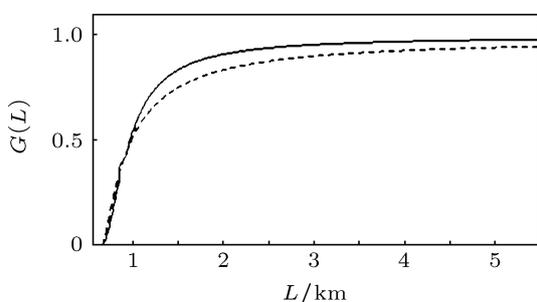


图4 光轴为分离偏移且夹角为 0.27 mrad 时激光雷达在空间的重叠因子

在消光系数的反演中 [7], 根据 Klett 反演方

法 [8], 在高度为  $L$  处的大气消光系数为

$$\alpha(L) = \frac{\exp \left[ \frac{S(L) - S(L_m)}{k} \right]}{\alpha(L_m)^{-1} + \frac{2}{k} \int_L^{L_m} \exp \left[ \frac{S(L) - S(L_m)}{k} \right] dl}, \quad (7)$$

式中

$$S(L) = \ln[P(L)L^2]. \quad (8)$$

(7) 式中, 没有考虑激光雷达系统的重叠因子对回波信号的影响, 假定系统重叠因子系数不变且为 1. 若考虑到重叠因子, 则在雷达重叠区域, 激光雷达理论预期的回波信号强度  $P'(L)$  与实际的回波信号有如下关系:

$$P'(L) = \frac{P(L)}{G(L)}. \quad (9)$$

将 (6) 式变化可以得到下式:

$$P'(L) = \frac{P(L)}{G(L)} = \frac{P_0 C \beta(L)}{L^2} \exp \left[ -2 \int_0^L \alpha(l) dl \right], \quad (10)$$

$P'(L)$  为激光雷达理论预期的回波信号强度. 令

$$S'(L) = \ln \frac{P'(L)L^2}{G(L)} = \ln[P(L)L^2] - \ln G(L), \quad (11)$$

则考虑了系统重叠因子后的大气消光系数为

$$\alpha(L) = \frac{\exp \left[ \frac{S(L) - S(L_m)}{k} - \frac{\ln G(L) - \ln G(L_m)}{k} \right]}{\alpha(L_m)^{-1} + \frac{2}{k} \int_L^{L_m} \exp \left[ \frac{S(L) - S(L_m)}{k} - \frac{\ln G(L) - \ln G(L_m)}{k} \right] dl}. \quad (12)$$

### 4.2 盲区信号校正

利用 (12) 式可以对发射光束与接收视场有重叠的探测区域进行修正, 然而激光雷达在工作时还有一段盲区, 在盲区内由于重叠因子为 0, 无法利用 (11), (12) 式对其进行修正, 而这段区域近地面, 是人类活动的主要区域. 为对此区域的信号进行修正, 先参考标准大气, 对于标准大气模型 [9], 气溶胶粒子引起的后向散射系数  $\beta_a(\lambda, L)$  和消光系数  $\alpha_a(\lambda, L)$  可以用实验公式表示如下:

$$\beta_a(\lambda, L) = \left\{ 2.47 \times 10^{-6} \exp \left( \frac{-L}{2000} \right) + 5.13 \times 10^{-9} \exp \left[ - \left( \frac{L - 20000}{6000} \right)^2 \right] \right\}$$

$$\cdot \left( \frac{532}{\lambda} \right)^{1.3}, \quad (13)$$

$$\alpha_a(\lambda, L) = 50 \cdot \beta_a(\lambda, L). \quad (14)$$

将 (13), (14) 式代入 (6), (8) 式可以得到激光雷达在标准大气下的距离校正信号  $S_C(L)$ , 如图 5 所示.

由图 5 可以看出, 标准大气的  $S_C(L)$  曲线为线性分布, 随着距离的增加而减小. 激光雷达的盲区一般较短, 在短距离内的距离校正信号可以认为是线性分布, 所以在对信号进行重叠因子修正的基础上, 利用斜率一致的原则可以对盲区的距离校正值  $S(L)$  进行修正, 进而利用 (7) 式可以得到盲区的消光系数.

### 5 实测数据反演与修正

利用实验室米散射激光雷达于 2011 年 5 月 2 日夜晚对西安城区上空大气进行了探测, 并根据上述修正后的 (11), (12) 式对探测信号和反演数据进行了修正, 所得到的距离校正回波信号和消光系数曲线如图 6 和图 7 所示.

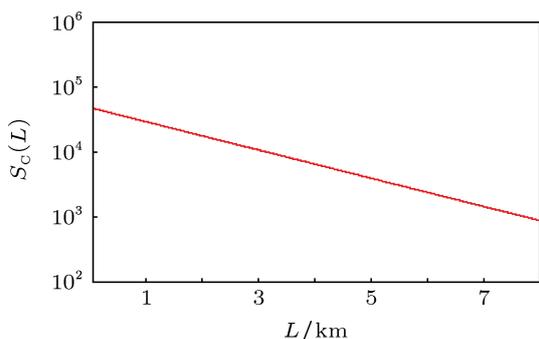


图 5 标准大气的距离校正信号  $S_c(L)$  随距离的变化曲线

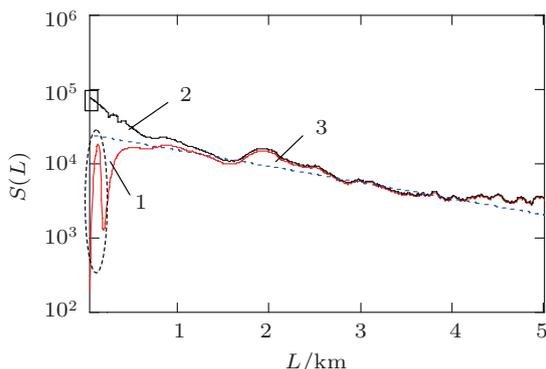


图 6 修正前后距离校正信号随距离的变化情况

图 6 中曲线 1 为原始回波信号的  $S(L)$  曲线, 曲线 2 为信号修正后的  $S'(L)$  曲线, 曲线 3 为美国 1976 年发布的标准大气的  $S_c(L)$  曲线. 图 7(a) 为利用 Klett 法<sup>[9]</sup> 对原始信号反演得到的消光系数随距离变化曲线, (b) 为经过修正后的消光系数曲线, (c) 为标准大气的消光系数曲线.

在图 6 和图 7 中, 虚线椭圆包围区域为盲区 (0—160 m), 此区域内曲线为近场伪信号, 在修正时将其去除. 在修正时根据标定的激光雷达光轴夹角 0.27 mrad 和 (1), (5), (11), (12) 式对距离为 160 m—5 km 的距离校正信号和消光系数进行修正, 之后根据斜率一致原则对盲区的距离校正信号修正, 盲区修正后的曲线如图 6 和图 7 中的矩形方框所示区域, 最终将两者结合可以得到整个探测区域的消光系数曲线.

比较图 6 中的三条曲线可以看出曲线 2 整体趋势与标准大气曲线相一致. 从图 7 中的曲线 (b) 可以看出, 在近地层区域 ( $L < 1$  km), 大气消光系数大于标准大气, 这主要是由于激光雷达所在地为西安闹市区, 所以在近地层处气溶胶浓度偏高, 这与实际情况相符. 随着高度的增加大气中的气溶胶浓度出现了起伏, 但总体趋势是随着高度增加而减小. 根据图 7 中的曲线 (b), 测试当天 2011 年 5 月 2 日至 5 月 3 日夜晚 (晴到多云) 近地层的消光系数约为 0.22, 由大气能见度  $L$  和消光系数  $\alpha$  的关系公式为

$$L = \frac{3.912}{\alpha} \tag{15}$$

可知当时的能见度为 17.78 km. 西安市气象局发布的 5 月 2 日白天能见度为 13 km (对应消光比为 0.3), 5 月 3 日白天能见度为 20 km (对应消光系数为 0.1956), 将两者结果相比较可知测试结果与当时的天气变化趋势相符合. 比较图 7 中的三条曲线, 可以看出修正后的曲线 (b) 与标准大气曲线 (c) 趋势更一致, 在变化处也反映了实际大气情况, 这些也都验证了修正方法的合理性.

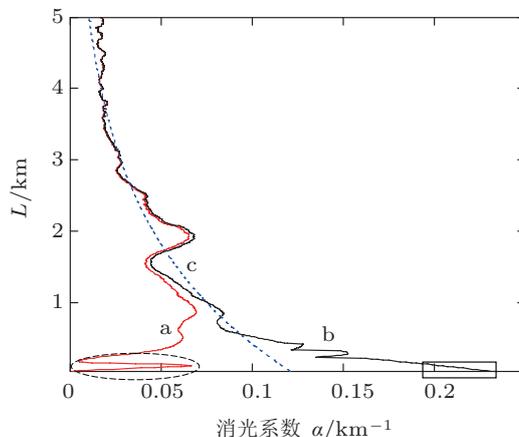


图 7 修正前后消光系数随距离的变化关系

### 6 结论

本文对激光雷达的重叠因子进行了全面的分析, 给出了发射激光为均匀分布和高斯分布时的系统重叠因子数学表达式, 并且分析比较了在不同激光分布情况下重叠因子在空间的变化情况. 当发射光束与接收视场完全重合时, 重叠区域面积内能量始终等于发射光束总能量, 高斯分布和均匀分布的重叠因子相等; 当重叠因子大于 0.5 时, 高斯分布的

重叠因子大于均匀分布的重叠因子;当重叠因子小于 0.5 时,高斯分布的重叠因子小于均匀分布的重叠因子.在分析和标定系统重叠因子的基础上提出了一种激光雷达回波信号校正的方法,将修正区间分为重叠区域和盲区,在重叠区域将重叠因子添加入了算法公式中,并且给出了经过重叠因子修正后的 Klett 算法公式.在盲区,则根据距离校正信号的线性分布特征,利用斜率法对盲区信号进行模拟获

取,并最终得到盲区的消光系数.对实验室内的一台米散射激光雷达进行了系统参数标定,利用标定后的参数对其所测得到的回波信号进行了修正,利用修正后的 Klett 公式和盲区斜率法最终得出了符合理论与实际情况的大气消光系数廓线,并且将其与标准大气的消光系数曲线和实际大气能见度数据进行了对比,验证了修正方法的合理性.

- 
- [1] Sasano Y 1979 *Appl. Opt.* **18** 3908
- [2] Gao F, Hua D X, Wu M, Mao J D, Zhou Y 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 1649 (in Chinese) [高飞, 华灯鑫, 吴敏, 毛建东, 周毅 2008 光学学报 **28** 1649]
- [3] Wang Z H, He Y H, Zuo H Y, Andrew Y S C, Yang J G 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3188 (in Chinese) [王治华, 贺应红, 左浩毅, 郑玉臣, 杨经国 2006 物理学报 **55** 3188]
- [4] Liu Q J, Yang L, Wang Y 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 7376 (in Chinese) [刘巧君, 杨林, 王予 2009 物理学报 **58** 7376]
- [5] Wei G, Fei Y M, Jun L 2011 *Optics Communications.* **284** 2966
- [6] Luis R I, V S S III, Stephen S, Jamie B, William M, Raymond T, John C, Roger M 2005 *Applied Optics* **44** 1748
- [7] Liu H T, Chen L F, Su L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 064204 (in Chinese) [刘厚通, 陈良富, 苏林 2011 物理学报 **60** 064204]
- [8] Klett J D 1981 *Applied Optics* **20** 211
- [9] Liu J 2008 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an University of Technology) (in Chinese) [刘君 2008 博士学位论文 (西安: 西安理工大学)]

# Investigation on the correction of the Mie scattering lidar's overlapping factor and echo signals over the total detection range<sup>\*</sup>

Di Hui-Ge<sup>†</sup> Hua Deng-Xin Wang Yu-Feng Yan Qing

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xian 710048, China)

(Received 3 August 2012; revised manuscript received 27 November 2012)

## Abstract

There has been great difference between the theoretical signals of the lidar's echo and its actual signals, due to the angles between the laser beam and its receiving optical axis, and the laser intensity distribution being asymmetrical. So the correction of the echo signal is necessary. According to the mathematical derivation and the software simulation, the mathematical expression of the lidar's overlap factor is given, and the overlap factor curves with detection range are drawn which express the characters over the total detection range, then the best angle between lidar's emitting axis and the receiving axis is obtained. The overlap factors are analyzed when the laser is Gaussian with a uniform intensity distribution. The lidar distance correction signal and Klett formula are corrected by the overlap factor, and the instrument parameters of the lidar are measured. In the range where the overlap factor is not zero, its correction echo signals and extinction coefficients can be obtained by using the corrected Klett formula. While in the range of the lidar's blind zone, the signals can be derived by a slope method. Finally, the total correction curve of the extinction coefficients is gained, and it is in accordance with the actual one correction curve.

**Keywords:** lidar, correction, overlap factor, extinction coefficients

**PACS:** 42.68.Wt, 42.79.Qx, 92.30.Ef

**DOI:** 10.7498/aps.62.094215

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41027004, 61275185), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20106118120005), and the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 2012JQ5002).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: dihuige@163.com