

文章编号: 1001-3806(2008)02-0147-04

对激光雷达几何因子的分析与测量

汪少林^{1,2}, 曹开法^{1,2}, 胡顺星^{1*}, 魏合理¹

(1 中国科学院 安徽光学精密机械研究所 大气光学实验室, 合肥 230031; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了实现激光雷达对近场的测量, 必须获得激光雷达系统几何因子。采用理论分析计算和实验测量两个步骤确定了几何因子性质及廓线。首先, 通过分析平行轴和共轴激光雷达接收、发射系统的结构, 引入了可完全聚焦填充系数, 从几何光学角度推导了两种填充系数的表达式, 从而界定了几何因子值的理论范围。其次, 介绍了采用对远场回波信号拟合的方法反演近场信号, 从而获得几何因子廓线。以中科院 AML-2 共轴激光雷达为例, 采用该方法测量了几何因子廓线, 结果验证了对几何因子的理论分析。

关键词: 激光技术; 激光雷达; 几何因子; 填充系数; 消光系数

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

Analysis and determination of lidar geometrical factor

WANG Shao-lin^{1,2}, CAO Kaifa^{1,2}, HU Shunxing¹, WEI He-li¹

(1. Key Laboratory of Atmospheric Optics Anhui Institutes of Optics and Fine Mechanics Chinese Academy of Sciences Hefei 230031, China 2. School of Graduate, Chinese Academy of Sciences Beijing 100039, China)

Abstract To employ lidar for short distance detecting the geometrical factor must be previously know. Theoretical analysis and experimental study are applied for determination of lidar geometrical factor. Firstly, the geometrical factors are analyzed for lidar with biaxial or coaxial transmitter receiver. A full focusing filling factor is introduced. Equations of two kinds of filling factors related to geometrical factor are deduced based on geometrical optics. The theoretical range of geometrical factor's value is reached based on these equations. Secondly, a method is introduced for determination of geometrical factor by fitting lidar's back signal of far distance for inverting the signal of short distance. As an example, the geometrical factor profile of AML-2 lidar made in Chinese Academy of Science is determined experimentally with this method. The experimental results are accordant with the theoretical analysis.

Key words laser technique; lidar; geometrical factor; filling factor; extinction coefficient

引 言

基于探测范围大、精度高、实时快速与高时空分辨率等优点^[1], 激光雷达近年来已成为环境监测、大气探测的重要手段。几何因子是制约激光雷达探测准确度提高的重要因素。为了修正几何因子的影响, 必须对几何因子进行深入分析和精确测量。目前, 已有利用气体分子喇曼散射^[2-3]和大气后向散射^[4]两种方法测量几何因子。本文中重点分析常用大气激光雷达的结构特点及相应的几何因子, 并通过对大气后向散射信号数据拟合以获得几何因子廓线。

1 激光雷达接收、发射系统结构及几何因子理论分析

激光雷达的几何因子主要由接收、发射系统的结构确定, 激光雷达常用的接收、发射系统有平行轴和共轴, 不同的激光雷达系统其几何因子及有关参数也有不同。

1.1 卡赛格伦接收望远镜

平行轴和共轴大气激光雷达中, 常用卡赛格伦望远镜^[5]接收后向散射光, 接收的散射光通过凹面镜聚焦到小孔光阑中, 并通过光纤、滤光片和衰减片进入光电倍增管转化为电信号。望远镜结构直接关系到几何因子的大小, 这里以一种卡赛格伦望远镜为例, 分析其对后向散射光的聚焦条件及特点, 其它类型望远镜聚焦条件与此类似。图 1 为一种常用卡赛格伦接收望远镜, 小孔光阑的直径为 d , 望远镜中主镜焦距为 f , 望远镜视场角为 θ 。

作者简介: 汪少林 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光探测大气研究。

* 通讯联系人。E-mail: sxhu@ainf. ac.cn

收稿日期: 2007-01-15; 收到修改稿日期: 2007-03-29

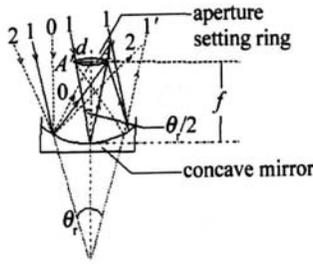


Fig 1 A cassegrain receiver telescope

平行光 1 沿与光轴夹角 $\theta_r/2$ 方向入射凹面镜, 聚焦于小孔光阑边界 A 点, 对称入射 1' 光聚焦于边界 A' 点。如果后向散射光入射方向与光轴夹角 $\alpha > \theta_r/2$ 如光路 2 所示, 虽然后向散射光入射在凹面镜上, 但不能聚焦到小孔光阑中, 所以, 激光雷达后向散射光被望远镜接收条件为: 散射光与光轴方向夹角满足 $\alpha < \theta_r/2$ 由几何光学可推导出视场角 θ_r 与小孔光阑直径关系:

$$\frac{\theta_r}{2} = \arctan\left(\frac{d}{2f}\right) \quad (1)$$

故可通过对小孔光阑直径 d 的调节控制接收望远镜视场角。

1.2 平行轴激光雷达中的几何因子

图 2a 中为平行轴激光雷达发射与接收系统, 接收

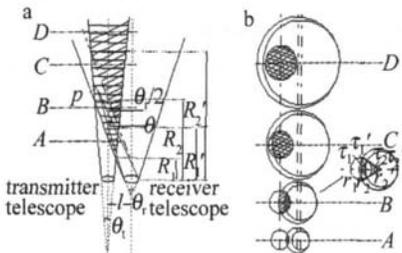


Fig 2 Biaxial lidar system

a- schematic diagram of biaxial transmitter/receiver lidar system b- sectional diagram of light beam and field range

视场角 θ_r 略大于激光发散角 θ_t , 当 $R \leq R_1$, 接收视场与激光光束不相交, 填充系数 $\eta(R) = 0$ 称为探测盲区。当 $R_1 < R < R_2$, 激光光束中部分进入接收视场, 此时 $0 < \eta(R) < 1$, 称为过渡区。当 $R \geq R_2$, 激光光束完全进入接收视场, 称为充满区, $\eta(R) = 1$ 。由几何光学可推得 R_1, R_2 [5]:

$$R_1 = \frac{2l - (D_r + D_t)}{\theta_r + \theta_t}, R_2 = \frac{2l - (D_r - D_t)}{\theta_r - \theta_t} \quad (2)$$

式中, D_r, D_t 分别为接收望远镜与发射光斑直径, l 为 biaxial lidar parameters

两镜之间距离。在激光光强均匀分布的假定下 $\eta(R)$ 的表达式 [6]:

$$\eta(R) = \frac{r_1^2(\tau_1 - \sin\tau_1) + r_2^2(\tau_2 - \sin\tau_2)}{2\pi r_1^2} \quad (3)$$

式中, $r_1 = \frac{D_t + \theta_t R}{2}, r_2 = \frac{D_r + \theta_r R}{2}$ 分别是激光束和接收视场的截面半径, τ_1, τ_2 分别是视场截面圆心和激光束截面圆心到其两圆交叉两端半径的夹角, 见图 2b。

在图 2a 中, 经 p 点入射到凹面镜中的后向散射光并不都满足上述 $\alpha < \theta_r/2$ 的望远镜接收条件, 如图 2a 所示, 在 $R \leq R_1$ 区间中的任何粒子, 它的入射到凹面镜上的散射光不能完全聚焦到小孔光阑中。激光束截面中, 粒子入射到凹面镜上的散射光可以完全聚焦到小孔光阑中所对应的区域截面面积与激光束截面面积比称为可完全聚焦填充系数 $\eta'(R)$, 所以此时 $\eta'(R) = 0$ 在 $R_1 < R < R_2$ 区间中的部分粒子, 它的入射到凹面镜上的散射光能完全聚焦到小孔光阑中, 这些粒子所在区域截面对应图 2b 中的交叉阴影部分, 此时 $0 < \eta'(R) < 1$ 。在 $R \geq R_2$ 区域中的任何粒子, 它入射到凹面镜上的光都能完全聚焦到小孔光阑中, 此时 $\eta'(R) = 1$ 。由几何光学可推得:

$$R_1' = \frac{2l + (D_r - D_t)}{\theta_r + \theta_t}, R_2' = \frac{2l + (D_r + D_t)}{\theta_r - \theta_t} \quad (4)$$

在激光光强均匀分布的假定下 $\eta'(R)$ 的表达式:

$$\eta'(R) = \frac{r_1'^2(\tau_1' - \sin\tau_1') + r_2'^2(\tau_2' - \sin\tau_2')}{2\pi r_1'^2} \quad (5)$$

式中, $r_1 = \frac{D_t + \theta_t R}{2}, r_2' = \frac{\theta_r R}{2}$ 分别是激光束和可完全聚焦视场区域截面圆半径。 τ_1', τ_2' 分别是可完全聚焦视场区域截面圆心和激光束截面圆心到其两圆交叉两端半径的夹角。

由以上分析可知: 平行轴激光雷达几何因子 $G(R)$ 应介于填充系数 $\eta(R)$ 和可完全聚焦填充系数 $\eta'(R)$ 之间, 即当 $R \leq R_1$ 时, $\eta'(R) = G(R) = \eta(R) = 0$ 当 $R_1 < R < R_2'$ 时, $\eta'(R) < G(R) < \eta(R)$; 当 $R \geq R_2'$ 时, $\eta'(R) = G(R) = \eta(R) = 1$ 。

图 3 是根据表 1 中的平行轴激光雷达参数计算的填充系数, 虚线为 $G(R)$ 示意图, 非实际准确值。

pulsed laser	wavelength	angle of beam divergence	field of view	diameter of em issive spot	diameter of telescope	distance of reflector and telescope
Nd YAG	1064nm	0.2m rad	0.7m rad	60mm	300mm	0.5m

1.3 共轴激光雷达中的几何因子

原则上讲, 对于共轴系统, 只要接收视场角大于激光束发散角, 由于导光镜遮光对填充系数影响较小, 总

可认为填充系数 $\eta(R) \approx 1$ [6]。图 4 为一常用共轴激光雷达发射、接收系统, 激光从侧面入射, 经导光镜反射沿光轴进入大气。导光镜下端放置小孔光阑, 导光

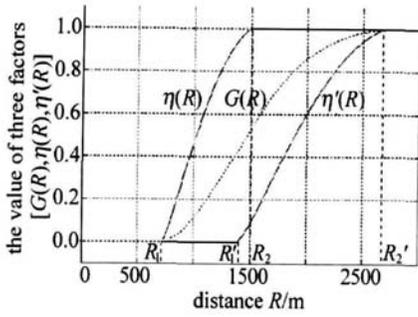


Fig 3 Filling factor of biaxial lidar

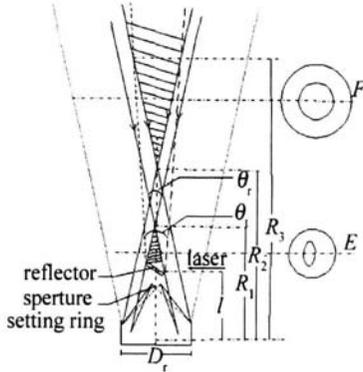


Fig 4 Schematic diagram of coaxial transmitter receiver lidar system

镜与凹面镜距离 l 导光镜形状可有多种选择, 造成激光雷达的几何因子各异, 本文中仅以圆形导光镜为例, 导光镜直径 D_r , 倾斜角 45° 。图 4 下方阴影部分中, 粒子散射光无法进入小孔光阑, 此部分称盲区作用区, 截面图如图 4 中 E 所示, 盲区截面为椭圆, 盲区作用距离 R_1 , 此时 $\eta'(R) = 0$ 当 $R_1 \leq R \leq R_2$, 盲区消失, 即整个视场内每个粒子入射到凹面镜上散射光有部分能进入小孔光阑, 但是并不都满足 $\alpha < \frac{\theta_r}{2}$ 的望远镜接收条件, 所以仍然有 $\eta'(R) = 0$ 当 $R_2 \leq R \leq R_3$, 如图 4 上方阴影部分中, 粒子入射到凹面镜中的所有散射光满足

$\alpha < \frac{\theta_r}{2}$, 而视场内其它区域粒子入射到凹面镜中的散射光并不能完全进入小孔光阑, 此时 $0 < \eta'(R) < 1$, 截面图如图 4 所示; 当 $R \geq R_3$, 视场内任何粒子入射在凹面镜中的所有散射光满足 $\alpha < \frac{\theta_r}{2}$, 此时 $\eta'(R) = 1$ 。由几何光学可推得:

$$R_1 = \frac{D_r \cos 45^\circ}{\theta_r} + l, R_2 = \frac{D_r}{\theta_r},$$

$$R_3 = \frac{D_r \cos 45^\circ + D_r - l \theta_r}{\theta_r - \theta} \quad (6)$$

$$\eta'(R) = \left[\frac{R \theta_r - D_r}{(R - l) \theta_r + D_r \cos 45^\circ} \right]^2 \quad (7)$$

式中, D_r 为凹面镜直径, θ_r, θ 分别为接收视场角和激光束发散角。由于导光镜的遮光作用, 当 $R \geq R_3$, 部分后向散射光仍然被导光镜遮挡, 所以实际几何因子 $G(R) < 1$ 。在远场由于激光束及视场面扩大而遮光面积不变, 遮光面积可忽略不计, 所以 $G(R) \approx 1$ 。当 $R < R_1$, 遮光作用占主导地位, 所以 $G(R) \approx 0$ 。

图 5 是共轴气溶胶探测激光雷达 AML-2 可完全

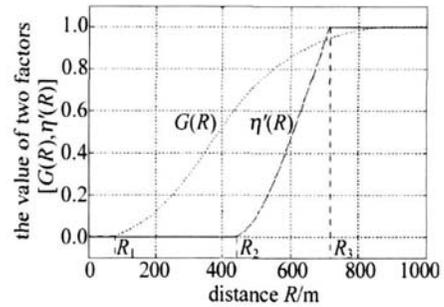


Fig 5 Filling factor of the biaxial lidar

聚焦填充系数 $\eta'(R)$ 曲线, 虚线为 $G(R)$ 示意图, 非实际准确值, 该雷达接收、发射系统相关参数见表 2。

对填充系数以及可完全聚焦填充系数的分析计算

Table 2 The biaxial lidar parameters

pulsed laser	wavelength	angle of beam divergence	field of view	diameter of reflector	diameter of telescope	distance of reflector and telescope
Nd:YAG	532nm	0.2m rad	0.7m rad	80mm	300mm	1m

可为几何因子的正确测量提供依据和参考范围。

2 数据拟合法求几何因子

波长 λ 的激光入射大气, 其回波信号^[7]:

$$P(\lambda R) = G(R) \cdot C \cdot \frac{\beta(\lambda R)}{R^2} \times \exp\left\{-2 \int_0^R \alpha(\lambda R) \cdot dR\right\} \quad (8)$$

式中, $G(R)$ 为几何因子, C 为激光雷达系统常数, $\beta(\lambda R), \alpha(\lambda R)$ 分别为大气后向散射系数和消光系

数。测量激光雷达几何因子常用 SANANO 提出的方法^[4]: 在晴朗的夜晚用激光雷达水平发射激光, 可以近似认为水平状态下大气均匀, 即 $\beta(\lambda R), \alpha(\lambda R)$ 为常数。(8)式可变为:

$$\ln G(R) = \ln [P(\lambda R) \cdot R^2] - [-2\alpha \cdot R + \ln(C \cdot \beta)] \quad (9)$$

$G(R)$ 可通过在远场选择基点 R_0 反演计算^[4, 6], 其中消光系数 α 可通过选择大气均匀区域两点的回波信号由 KLETT^[8] 斜率法计算得出。此方法的缺陷是: 实验过程中大气不可能绝对的均匀, 所以基点的选取以及计算消

光系数时的选点,有可能选择在非均匀区域或相对均匀区域中波动较大的点,所造成的随机误差较大。

以下介绍数据拟合的方法,避免直接计算消光系数和对基点的选取。可将(9)式右侧中括号中多项式看成直线方程 $y = a \cdot x + b$, x 对应于探测距离 R , a , b 分别对应于 -2α 和 $\ln(C \cdot \beta)$ 。通过远场大气均匀区域回波信号数据(远场时 $G(R) \approx 1$)线性拟合此项,并拓展到近场,进而可求得几何因子 $G(R)$ 。此方法同时适用于同轴和平行轴激光雷达。以下以 AM L-2 同轴激光雷达的几何因子测量为例。

图 6a 中实线为 2005-09-08 北京郊区、激光雷达水平发射波长 532nm 激光的回波信号,虚线为理论信号曲线,可看出近场(约 0m ~ 1000m)由于几何因子的影响,实际信号和理论信号明显偏差;图 6b 中实线为信

号变换曲线 $\ln[P(\lambda, R) \cdot R^2]$, 虚线为拟合直线 $[-2\alpha \times R + \ln(C \cdot \beta)]$; 图 6c 为求得的该激光雷达几何因子 $G(R)$; 图 6d 为多组数据拟合得出的几何因子廓线以及该激光雷达的可完全聚焦填充系数 $\eta'(R)$ 曲线,可看出,所得几何因子符合上述分析,盲区作用距离与通过(6)式计算 R_1 的基本重合。

几何因子廓线在近处重合性较好,在远处偏差,是因为近处几何因子的值较小,所以相对误差较小^[6]。几何因子廓线出现一定波动主要由于大气性质不均匀的影响。由不同时刻的数据拟合得到几何因子廓线存在一定偏差,是因为实际激光雷达几何因子不仅由接收、发射系统的结构决定,还与系统稳定性,激光束光斑性质,前、后续光路结构等有关,这些参数的变化都可能引起几何因子廓线的偏移。

3 小 结

通过分析激光雷达接收、发射系统结构,推导出填充系数及可完全聚焦填充系数的表达式,界定了几何因子理论取值范围,为测量几何因子提供参考;指出入射在凹面镜上的后向散射光仍然受望远镜接收条件的制约,数据拟合测量几何因子在一定程度上降低了大气非均匀性因素对几何因子测量造成的随机误差,对大气激光雷达近场数据的修正及探测精度的提高都有着重要意义。

参 考 文 献

- [1] HU Sh X, HU H L, ZHOU J *et al* Dial lidar measurement for tropospheric ozone [J]. Laser Technology, 2001, 25(6): 406-408 (in Chinese).
- [2] WANDINGER U, ANSMANN A. Experimental determination of the lidar overlap profile with Raman lidar [J]. Appl Opt, 2002, 41(3): 511-514.
- [3] HU Sh X, WANG X B, WU Y H, *et al* Geometrical form factor determination with Raman backscattering signals [J]. Opt Lett, 2005, 30(14): 1879-1881.
- [4] SANANO Y, SHIMIZU H, TAKEUCHI N, *et al* Geometrical form factor in the laser radar equation: an experimental determination [J]. Appl Opt, 1979, 18(23): 3908-3910.
- [5] SUN J Q. Atmosphere detecting by lidar [M]. Beijing: Science Press, 1986: 63-64 (in Chinese).
- [6] ZHANG G X, ZHANG Y Ch, TAO Z M, *et al* Lidar geometrical form factor and its effect on aerosol detection [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22(2): 299-304 (in Chinese).
- [7] ZHANG Y Ch, HU H L, TAN K, *et al* Development of a mobile lidar system for air pollution monitoring [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(8): 1025-1031 (in Chinese).
- [8] KLETT J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. Appl Opt, 1981, 20(2): 211-220.

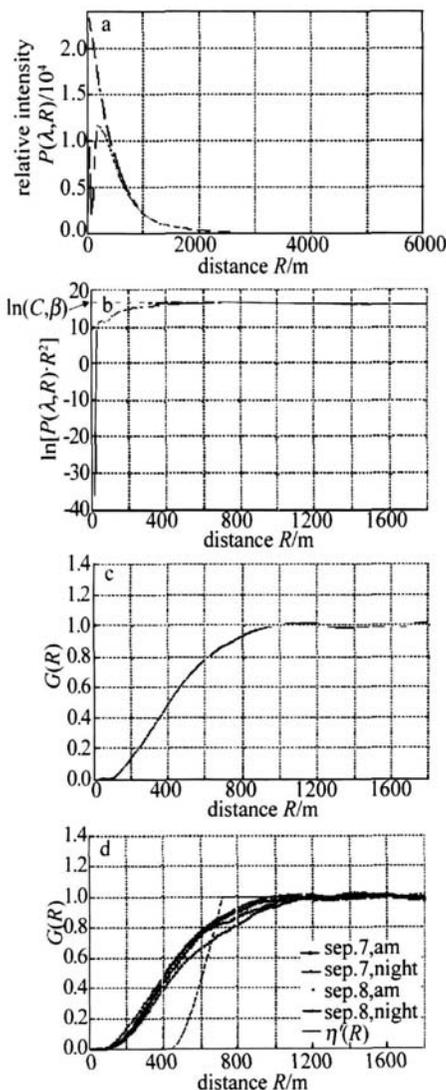


Fig 6 Case study of the determination of lidar geometrical factor