

文章编号: 0253-2239(2008)09-1649-06

光束品质因子 M^2 对非同轴激光雷达探测性能的影响

高 飞 华灯鑫 吴 敏 毛建东 周 毅

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要 光束品质因子 M^2 直接影响高斯光束传播特性, 光纤口径主要约束激光雷达接收系统的视场角。几何重叠因子是影响激光雷达探测性能的重要参量, 其主要受激光束的发射特性、接收系统的结构等影响。通过探讨光束品质因子 M^2 及耦合光纤口径对几何重叠因子的影响, 为设计激光雷达发射接收系统, 改善激光雷达的探测性能提供了优化方案。数值计算及初步实验表明, 光纤的耦合效率与光纤的放置位置及光纤口径有很大的关系; 几何重叠因子小于 1 的探测距离受到 M^2 因子的较大影响且随着 M^2 因子的增大而增大。

关键词 大气光学; 几何重叠因子; 光束品质因子; 光纤耦合

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082809.1649

Effect of M^2 Factor of Laser Beam for a Non-Coaxial Lidar System

Gao Fei Hua Dengxin Wu Min Mao Jiandong Zhou Yi

(School of Mechanical & Instrument Engineering, Xian University of Technology, Xian, Shaanxi 710048, China)

Abstract The propagation properties of Gaussian beam are directly influenced by beam quality factor M^2 and the field of view of the receiver of lidar is limited mainly by the fiber core. The geometrical form factor which influences the measurement performance of the lidar system is related strictly with the transmission properties of laser beam and the configuration of the receiving system combined with the coupling fiber and the receiving telescope. This paper discusses mainly the properties of the geometrical form factor due to the beam quality factor M^2 and the coupling fiber core, in order to optimize the design of the transmitter and receiver of the lidar and to improve the detection capability of the lidar. The numerical calculation shows that the coupling efficiency of the fiber is largely related with location position of fiber from the focus of the telescope and its core; and the range in which the geometrical form factor is less than one is largely influenced by M^2 factor and is increased with the enhance of the value of the M^2 . The preliminary experiment is used to support the analysis of the influence factors on the performance for a non-coaxial lidar system.

Key words atmospheric optics; geometrical form factor; beam quality factor; fiber coupling

1 引 言

激光雷达作为新颖大气剖面探测工具, 已经广泛应用于大气光学及物理特性研究的实时探测^[1~3]。近年快速发展的都市化和工业化进程使得大气环境问题成了热门话题, 例如城市低层大气的微粒物质(气溶胶)以及各种特定的分子污染物(SO₂, NO_x等)的浓度急剧增加, 加剧了城市大气污染及城市热岛现象, 研发实时高效剖面探测激光雷达系统已经越来越得到社会关注。

激光雷达方程描述了激光雷达探测大气光学特性的基本原理^[4~7], 除了大气参量(消光及散射系数)以外, 激光雷达的系统常数, 发射及接收系统的匹配效率及几何重叠因子等都影响着激光雷达系统的探测性能。激光器发射的激光光束特性影响到激光大气回波信号特性, 利用激光雷达发射系统中的准直扩束器可优化发射光束的束腰高度和发散角, 改善激光雷达的大气探测性能, 贺应红等^[8]研究了基于高斯光束的米散射大气激光雷达回波信号的近

收稿日期: 2007-08-07; 收到修改稿日期: 2008-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(40675015)和教育部科学技术研究重点项目基金(207117)资助课题。

作者简介: 高飞(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事激光雷达大气遥感探测技术方面的研究。E-mail: gaofei_339@163.com

导师简介: 华灯鑫(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光雷达大气遥感探测技术和光电检测技术等方面的研究。

E-mail: xauthdx@163.com

场校正问题。另外,利用光纤传输望远镜收集到的大气回波信号时,需要考虑到接收系统的匹配以及接收效率。J. Jenness 等^[9]从几何角度出发,讨论了激光雷达系统中光纤与接收望远镜的最佳匹配以及光纤位置对回波信号光斑图像的接收情况,为求解光纤的接收效率提供理论依据。几何重叠因子是激光雷达方程中非常重要的因子,直接影响激光雷达的探测性能,在进行大气气象参量的数据反演过程时,必须利用几何重叠因子对大气回波信号进行修正,以归一到对大气回波信号进行全部接收的状况。胡克伟等^[10]从双轴激光雷达系统的发射和接收光轴的距离、夹角,激光发散角,接收视场角等方面对几何重叠因子的影响进行了论证。张改霞等^[11]也论述了平行轴和共轴激光雷达几何重叠因子的理论计算和实验法求解,并论证了几何重叠因子对气溶胶探测的影响。

本文从高斯光束的准直特性、发射与接收系统的匹配效率以及系统的几何重叠因子等三个方面来探讨影响非同轴激光雷达系统探测性能的因素,重点探讨接收光纤口径及激光束品质因子 M^2 对激光雷达探测性能的影响,为激光雷达系统的优化设计提供数值依据。

2 激光雷达系统构成

本文所探讨的典型的非同轴激光雷达系统的构成如图 1 所示。系统采用 Nd:YAG 脉冲激光器的三倍频输出 355 nm 作为光源,其脉冲宽度为 10 ns,脉冲重复频率 20 Hz,输出最大能量 100 mJ。激光光束直径 9 mm,发散角 0.5 mrad。激光发射光束经过 5×准直系统的扩束后射向大气。大气回波信号由口径为 250mm 的卡塞格林式望远镜的接收

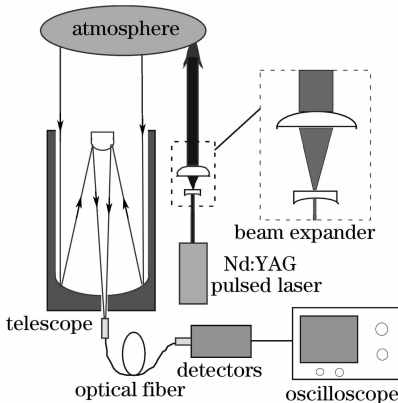


图 1 非同轴激光雷达系统结构图

Fig. 1 Schematic of the non-coaxial lidar system

后,聚焦到接收光纤。光纤输出信号直接送到光电探测器上,利用示波器对大气回波信号进行采样和数据存贮。

2.1 高斯光束的准直

激光雷达的准直发射系统,也被称为扩束系统,常做成望远镜的形式,有透射式,反射式或折-反式等。无论采用哪种结构形式,所用透镜组的镜间距一般都具有的微调功能,以期改善激光束的发散角,从而提高激光束的发射高度,增强回波信号,提高信噪比。

为了防止高能量激光束在空气中会聚而产生电离,激光雷达的准直发射系统采用由凹凸透镜组构成的倒置伽利略望远镜结构,图 1 中的目镜采用球面平凹透镜,焦距 $f_1 = -32.6$ mm,物镜采用球面平凸透镜,焦距 $f_2 = 162.4$ mm,保证整个系统所产生的像差最小。

激光发射光束穿过准直系统后,扩大了激光束的发射口径,同时压缩了高斯光束的发散角,改善了光束的方向性。而高斯光束通过透镜的变换法则并不严格地符合几何光学,在准直系统设计中,需考虑瑞利距离的影响,其成像公式为

$$\frac{1}{(s/f) + (Z_R/f)^2/(s/f - 1)} + \frac{1}{(s'/f)} = 1, \quad (1)$$

式中 Z_R 为瑞利距离, $Z_R = \pi\omega_0^2/\lambda$; s 为物距, s' 为像距, f 为透镜焦距。并且 (s'/f) 的最值公式为

$$(s'/f)_{\max} = 1 + 1/(2Z_R/f) \\ \text{at } (s/f) = 1 + (Z_R/f), \quad (2a)$$

$$(s'/f)_{\min} = 1 - 1/(2Z_R/f) \\ \text{at } (s/f) = 1 - (Z_R/f), \quad (2b)$$

由于准直系统中目镜为薄凹透镜,则激光束经过此凹透镜后腰斑在透镜后焦点附近成一虚像。而物镜为薄凸透镜,光束透射过此透镜后,腰斑在透镜前方成一实像。实验过程中可通过微量调整目镜的位置,即调整两透镜的中心距实现对发射光束束腰高度以及发散角的调整。

2.2 发射及接收系统的匹配效率

激光雷达的接收系统采用卡塞格林式望远镜,其有效口径 $D_0 = 250$ mm,焦距 $f = 1200$ mm。收集到的大气后向散射回波信号直接通过光纤耦合到激光雷达信号探测器中,采用光纤耦合可以消除回波信号的距离依存特性,使望远镜接收系统与后续系统物理分离。光纤采用对紫外波长衰减较小的熔融石英材料,本文讨论所选光纤口径分别为 0.1 mm, 0.2 mm, 0.8 mm 三种规格。

望远镜的焦距比数 F 定义为：

$$F = f/D_0, \quad (3)$$

其中 f 表示望远镜焦距, D_0 表示望远镜的直径。根据 J. Jenness 等^[9] 的计算, 光纤的数值孔径 NA 和望远镜的焦距比数 F 的最佳匹配为：

$$F = 0.5[(1/NA)^2 - 1]^{1/2}, \quad (4)$$

通过选取合适的光纤数值孔径 NA , 以及调整接收望远镜的焦距 f , 可将光纤与接收望远镜的匹配调整到最优化的状态。由于激光雷达采用非同轴的形式, 且发射系统和接收系统轴线相互平行, 则激光束光斑在望远镜焦平面处所形成的光斑图像不在接收系统的轴线上, 而是有一较小的偏移量, 如图 2(a) 所示。图 2(b) 表示光纤口径与光斑图像的位置关系, 其中 $s = f \times \Delta\theta$, 而 $\Delta\theta$ 是系统发射轴线与接收轴线的相对位移以及回波信号的高度的函数。

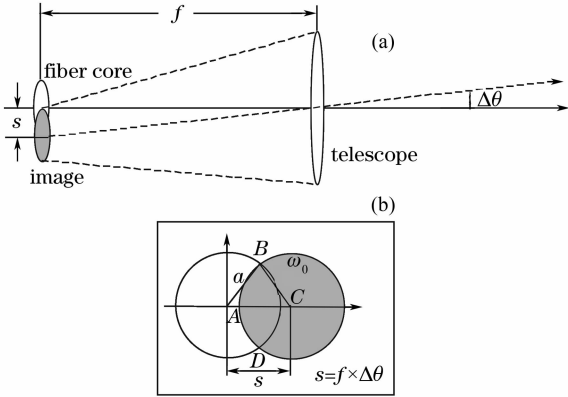


图 2 光纤接收大气回波信号示意图

Fig. 2 Schematic of return signals received by the fiber

发射激光束为 TEM_{00} 模式的高斯光束, 若不考虑大气湍流等的影响, 则接收到的大气回波信号能量分布也符合高斯分布的形式。按图 2 所示直角坐标系, 则光斑图像的高斯能量分布公式可表示为

$$I(x, y) = \frac{I_0}{2\pi\omega_0^2} \exp\left[-\frac{(x-s)^2 + y^2}{2\omega_0^2}\right], \quad (5)$$

而光纤所能接收到的光斑图像的总能量为

$$I(s) = \frac{I_0}{\pi\omega_0^2} \int_0^{y_2} dy \int_{x_1}^{x_3} \exp\left[-\frac{(x-s)^2 + y^2}{2\omega_0^2}\right] dx, \quad (6)$$

式中 x_1, x_3 分别表示弧 AB 、 BC 的曲线方程, y_2 表示 B 点的纵坐标。光纤的坐标方程为 $x^2 + y^2 = a^2$, 光斑图像坐标方程为 $(x-s)^2 + y^2 = \omega_0^2$ 。

光纤的接收效率是指光纤所能接收到的光斑能量占整个光斑能量的比率。假设光纤的数值孔径 NA 和望远镜的焦距比数 F 取得了最佳匹配, 光斑的图像大小不发生变化, 其直径为 $100 \mu\text{m}$, 而光纤

的口径分别采用 $0.1 \text{ mm}, 0.2 \text{ mm}, 0.8 \text{ mm}$, 则通过计算就可以得到各光纤随 s 变化的光纤接收效率, 如图 3 所示。

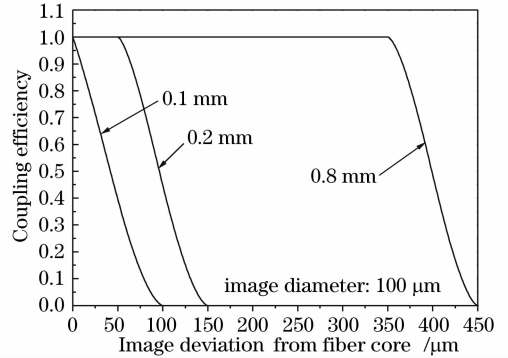


图 3 光纤的接收效率

Fig. 3 Coupling efficiency of the fiber

光束方向稳定性 (Beam point stability) 是激光器的重要参数之一, 激光束在空间发射方向上的漂移必然引起焦平面上光斑图像的移动, 影响光纤接收效率的稳定性。目前的灯抽运脉冲激光器的方向稳定性一般在 $\pm 50 \mu\text{rad}$ 左右, 由图 3 可知, 小口径的光纤耦合, 光束方向稳定性是引起接收效率不稳定的主要因素。

由于激光束在空间以高斯光束形式传播, 所以不同高度的回波信号在接收系统焦平面上的光斑 (弥散斑) 大小并不一致, 近距离信号光斑大, 远距离信号光斑小, 如图 4 所示。当光纤口径确定时, 光纤对不同高度的大气回波信号的接收效率具有明显的差异, 近距离回波信号接收效率低, 远距离接收效率高; 而对于同一高度的大气回波信号来说, 口径越大, 接收效率越高, 且光强也随接收面积的增大而增大, 即光强与光纤口径的平方成正比。

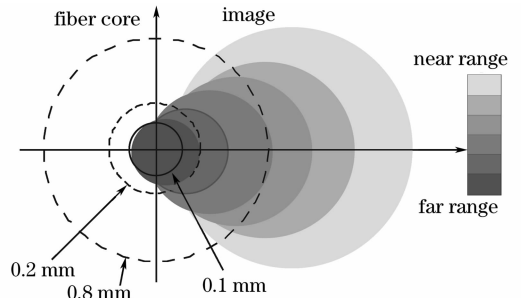


图 4 焦平面上的光强分布

Fig. 4 Spatial irradiance in the focal plane

2.3 系统的几何重叠因子

激光光束的品质因子 M^2 是评价激光束空域质量的重要参量, 它从光束的束宽和远场发散角两个方面来进行衡量。目前对激光雷达几何重叠因子的

研究普遍采用理想的高斯光束^[10,11],而在实际的激光雷达系统中,激光束并不是理想的高斯光束,两者之间存在着一定的差异。

激光束在任意高度上的光斑半径为

$$W(z) = W_0 + z \cdot \frac{\Theta_{\text{beam}}}{2} = M\omega_0 + z \cdot \frac{M\theta}{2}, \quad (7)$$

其中 W_0 和 ω_0 分别表示多模式和单模式 TEM_{00} 激光束的腰斑半径; Θ_{beam} 和 θ 分别表示多模式和单模式 TEM_{00} 激光束的发散角。

对于任意的高度 z , 望远镜所接收到光的范围为

$$D_{\text{tel}}(z) = D_0 + z \cdot \theta_{\text{FOV}}, \quad (8)$$

式中 θ_{FOV} 表示望远镜的视场角, 与接收光纤口径 d_r 成正比, 即 $\theta_{\text{FOV}} = d_r/f$ 。光纤口径越大, 望远镜的视场角越大。

几何重叠因子的计算不仅要考虑发射场与接收视场的重叠面积, 还要考虑激光束的强度分布, 其计算式如下:

$$Y(z) = \frac{P_{\text{rec}}(z)}{P_{\text{tran}}(z)} = \frac{\iint_{D_1(z)} h(x, y, z) dx dy}{\iint_{D(z)} h(x, y, z) dx dy}, \quad (9)$$

其中 $D_1(z)$ 为高度 z 处发射场与接收场的重叠面积, $D(z)$ 为高度 z 处的发射场面积, $h(x, y, z)$ 为激光束的强度分布函数。

激光发射光束经过 5 倍准直扩束, 激光束的腰斑半径扩大了 5 倍, 发散角压缩为原来的 1/5。而激光雷达探测所形成的盲区距离及交叉区距离主要受到 Θ_{beam} 和 θ_{FOV} 大小的影响。另外, 如果 $\theta_{\text{FOV}} > \Theta_{\text{beam}}/5$ 时, 当激光束到达一定的高度, 望远镜接收系统可以接收这个高度以上的全部回波信号, 即此时 $Y(z) = 1$; 而如果 $\theta_{\text{FOV}} \leq \Theta_{\text{beam}}/5$, 则无论激光束的发射高度达到多高, 望远镜接收系统都只能接收到部分回波信号, 即 $Y(z)$ 永远达不到 1。

假定接收望远镜的合成焦距为 1200 mm, 激光束中心和接收望远镜中心的距离为 240 mm, 激光器发出的激光束束腰直径为 9 mm, 发散角为 0.5 mrad。并且, 目前大功率灯抽运脉冲激光器的光束品质因子 M^2 都在 2~3 之间。图 5 分别表示光纤口径为 0.1 mm, 0.2 mm, 0.8 mm 时, M^2 因子分别取 1, 2, 2.5, 3 时的几何重叠因子随高度变化的规律。从图中可以看出由于系统采用非同轴接收, 都存在着一段探测盲区, 并且探测盲区距离随 M^2 因子的增大而减小, 同时随光纤口径的增大而减小。

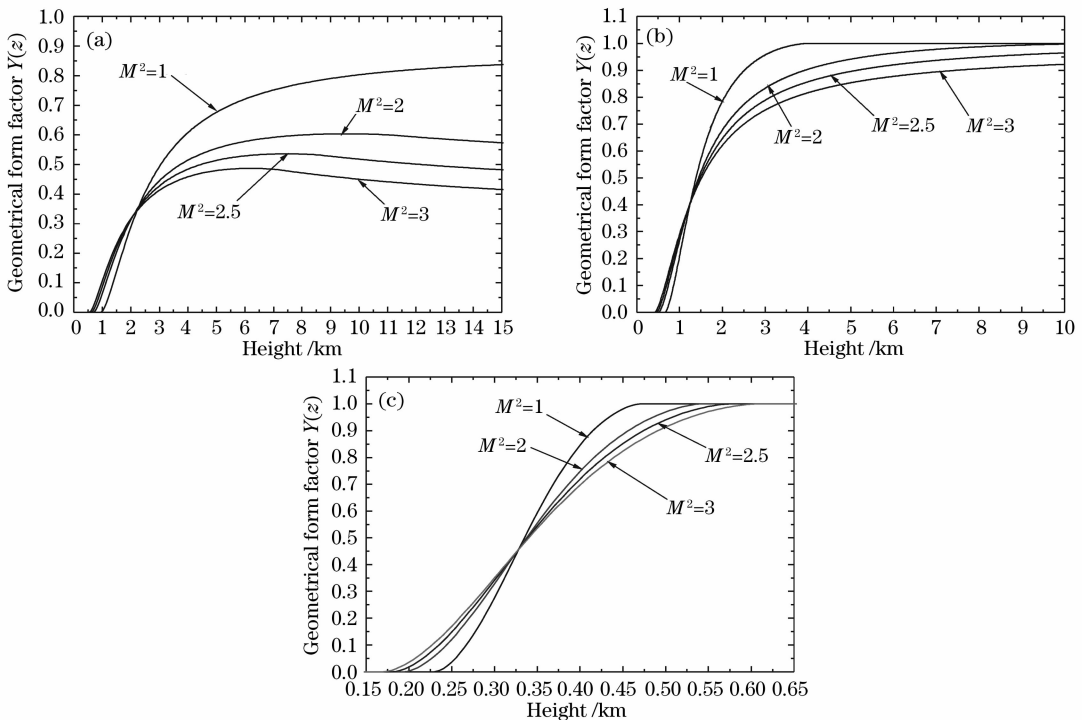


图 5 不同品质因子 M^2 下的几何重叠因子 $Y(z)$ 的高度分布

Fig. 5 Height distribution of the geometrical form factor with different M^2 factors

图 5(a) 光纤口径选取 0.1 mm 时, 接收系统的视场角小于激光束的发散角, 几何重叠因子永远小于 1, 且随着 M^2 因子的增大, $Y(z)$ 的最大值反而减少, 并且当 M^2 值为 2, 2.5, 3 时的几何重叠因子随着探测距离的增大先增大后减小。虽然小口径的光纤可以减少背景光对回波信号的干扰, 但是对于回波信号的 $Y(z)$ 的修正却较困难, 尤其是对探测高度的动态范围要求较大时, 回波信号的修正容易产生较大的不确定误差。

图 5(c) 光纤口径选取 0.8 mm 时, 不论 M^2 因子取何值, 接收系统的视场角都大于激光束的发散角, 系统可接收到全部的回波信号, 即 $Y(z)$ 等于 1。对于信号探测来说, 只需要对盲区距离内的大气回波信号进行距离修正, 使得数据的处理和分析将变得简便; 不过由于光纤口径较大, 较大探测范围内的背景光, 尤其是白天测量下太阳背景光对回波信号的动态影像较大, 导致信噪比降低。

图 5(b) 光纤口径选取 0.2 mm 时, 经过计算可知, 当 M^2 因子为 2.78 时, 接收系统的视场角和激光束的发散角相等。当 M^2 因子小于 2.78 时, $Y(z)$ 可达到 1, 反之, 则 $Y(z)$ 永远达不到 1。从图中可以看出, $M^2=1$ 时, 其修正距离较短, 4 km 以下。而当 $M^2=2$ 时, 其修正距离就达到了 10 km 以上, M^2 为 2.5 时, 由于和 2.78 比较接近, 需要对回波信号进行修正的距离更长。

因此, 对于具有固定 M^2 因子的激光雷达系统来说, 选择合适口径的光纤, 不仅可以达到压缩回波动态范围, 提高信噪比的目的, 而且可以实现对高空大气回波信号的完全接收。

3 初步实验

本文利用西安理工大学激光雷达站的非同轴激光雷达系统进行了大气探测初步实验, 其系统参量如前所述, 其中激光器的 M^2 因子约为 2.5。图 6 即为 2007 年 1 月 19 日 23:00~24:00 之间分别采用光纤口径 0.1 mm, 0.2 mm, 0.8 mm 所测得的激光大气回波信号距离修正曲线图。测量时激光器的发射能量为 50 mJ, 并以 1000 次脉冲累加平均所得的结果作为测量结果。

由图 6 可见, 光纤的口径越大, 探测盲区的距离越近。且在夜晚的情况下选择较大口径的光纤可以接收到更远距离的激光大气回波信号。由于光束的 M^2 因子为 2.5, 当光纤口径为 0.1 mm, 时, 系统的几何重叠因子最大约为 0.55, 远小于 1; 光纤口径为

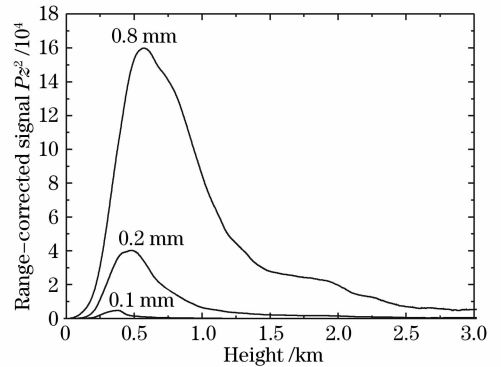


图 6 激光雷达回波信号距离修正图

Fig. 6 Lidar range-corrected return signals

0.2 mm 时, 虽然几何重叠因子可以达到 1, 不过在近距离范围内(图中 5 km 内)几何重叠因子却小于 1, 其最大值也不超过 0.9; 当光纤口径为 0.8 mm 时, 系统的几何重叠因子在 0.6 km 以上就可达到 1, 因此, 可接收到此高度上的全部回波信号。不过由于不同口径的光纤在同一高度上的几何重叠因子的大小不同, 导致光纤所接收到的回波信号的强度具有明显的差异, 口径越大, 同一高度上的几何重叠因子越大, 接收到的信号强度越大。

4 结 论

准直系统压缩激光束的发散角, 使得高斯光束能量集中以探测高空大气, 但高斯光束经薄透镜变换法则并不严格符合几何光学, 还受到瑞利距离的影响, 实验过程中通过调整两透镜中心间距来实现对激光雷达发射光束特性的调整。光纤传输大气回波信号, 光纤的数值孔径必须和接收望远镜的焦距比相互匹配。光纤在焦平面上的放置位置也严重影响着激光雷达的接收效率。小口径光纤, 光束方向稳定性也是接收效率不稳定的主要因素。

数值计算及初步实验表明, 当光纤口径为 0.1 mm 时, 几何重叠因子小于 1, 且 $Y(z)$ 随着探测距离的增大先增大后减少, 给高空回波信号的修正带来了不确定性。当光纤口径为 0.8 mm 时, 不管 M^2 因子取何值, 在高度 600 m 以上的几何重叠因子都将达到 1, 简化了数据处理和分析, 但背景噪音增加, 信噪比降低。口径 0.2 mm 的光纤的几何重叠因子与 M^2 因子的大小有关, M^2 决定了几何重叠因子到 1 的高度。

因此, 不同测量条件下, 选择合适口径的光纤, 有效预测系统的几何重叠因子, 实时对回波信号大小进行修正, 特别是对非差分测量激光雷达系统, 如

米散射激光雷达,高精度反演大气参数具有非常重要的现实意义。

参 考 文 献

- 1 Liu Jun, Hua Dengxin, Li Yan. Rotational Raman lidar for daytime-temperature profiling of the atmospheric boundary layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 755~759
刘 君, 华灯鑫, 李 言. 大气边界层白天温度测量用转动拉曼激光雷达[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 755~759
- 2 Wu Yonghua, Hu Huanling, Zhou Jun *et al.*. Measurements of stratosphere aerosol with L625 Lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 1012~1015
吴永华, 胡欢陵, 周 军 等. L625 激光雷达探测平流层气溶胶 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(8): 1012~1015
- 3 Dengxin Hua, Jun Liu, Kiyotaka Uchida *et al.*. Daytime temperature profiling of planetary boundary layer with ultraviolet rotational Raman lidar [J]. *Japanese J. Appl. Phys.*, 2007, **46**(9A): 5849~5852
- 4 R. M. Measures. *Laser Remote Sensing Fundamentals and Applications* [M]. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1992
- 5 Yan Jixiang, Gong Shunsheng, Liu Zhishen. *Lidar for Environment Monitoring* [M]. Beijing: Science Press, 2001. 135~172
阎吉祥, 龚顺生, 刘智深. 环境监测激光雷达[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 135~172
- 6 James D. Klett. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(2): 211~220
- 7 John A. Reagan, M. Patrick McCormick, James D. Spinhirne. Lidar sensing of aerosols and clouds in the troposphere and stratosphere[C]. *Proc. IEEE*, 1989, **77**(3): 433~448
- 8 He Yinghong, Zheng Yucheng, Cheng Juan *et al.*. The correction of short-range laser lidar return with fitting to lidar range adjusted power[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 289~292
贺应红, 郑玉臣, 程 娟 等. 米氏散射激光雷达近场距离校正函数曲线拟合法修正[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 289~292
- 9 James R. Jenness, Daniel B. Lysak, Russell Philbrick *et al.*. Design of a lidar receiver with fiber-optic output [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(18): 4278~4284
- 10 Hu Kewei, Li Song, Zhou Hui *et al.*. Calculating of the lidar overlap function[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(2): 164~167
胡克伟, 李 松, 周 辉 等. 激光大气雷达系统中重合系数的计算[J]. *红外与激光工程*, 2005, **25**(3): 289~292
- 11 Zhang Gaixia, Zhang Yinchao, Tao Zangming *et al.*. Lidar geometrical form factor and its effect on aerosol detection[J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2005, **22**(2): 299~304
张改霞, 张寅超, 陶宗明 等. 激光雷达几何重叠因子及其对气溶胶探测的影响[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(2): 299~304