

# 全光纤拉曼激光雷达的微透镜耦合系统研究

李仕春 华灯鑫 宋跃辉 王 鹏

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要** 望远镜接收的后向散射光场与单模光纤的耦合效率是影响全光纤拉曼测温激光雷达系统性能的重要参数之一。通过分析自由空间平面光场与单模光纤耦合的数学模型, 阐明了同轴激光雷达接收望远镜中心遮挡对最佳耦合效率的影响, 并对不同遮挡率时横向偏移、倾斜角度和离焦误差等安装误差对耦合效率的影响进行数值分析。然后以此为基础采用 Zemax 软件创建望远镜耦合系统优化设计的初始光学系统, 增加并选择合适的透镜和微透镜及优化系统结构参数, 使系统在遮挡率为 0.288 时总耦合效率从卡塞格林望远镜直接耦合的 17% 提高至 50%。最后提供了两种微透镜阵列与单模光纤阵列结构来提高光信号耦合能量。结果表明, 使用微透镜阵列与单模光纤阵列耦合的新型望远镜耦合系统可以提高拉曼激光雷达系统的耦合效率和能量。

**关键词** 大气光学; 望远镜耦合系统; 微透镜阵列; 单模光纤

**中图分类号** TN958.98; TP721.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0601001

## Research on Micro-Lens Coupling System of All-Fiber Raman Lidar

Li Shichun Hua Dengxin Song Yuehui Wang Peng

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

**Abstract** The coupling efficiency of the backscattering optical field received by the telescope into single-mode fiber is one of the significant parameters affecting all-fiber Raman lidar system. By analyzing the mathematical model of coupling the free space plane optical field into single-mode fiber, the influence of the telescope central obstacle in the coaxial lidar on the optimum coupling efficiency is clarified. And then it is numerically analyzed the change of the coupling efficiency with the variation of the alignment errors such as the lateral offset, tilt angle and defocus error with different obstacle ratios. Furthermore, based on these conclusions, an initial optical system is constructed for the telescope coupling system optimization. By adding and choosing suitable lenses and micro lenses and optimizing the configuration parameters, the total coupling efficiency of 17% with the Cassegrain telescope is enhanced to 50% when the obstacle ratio is 0.288. Two coupling configurations with micro lens arrays and fiber arrays are designed to improve the coupling energy of light signal. Simulation results show that the coupling efficiency and energy may be improved using the new telescope coupling system with micro lens array and single-mode fiber array.

**Key words** atmospheric optics; telescope coupling system; micro-lens array; single-mode fiber

**OCIS codes** 010.3640; 060.2430; 080.1510; 010.5620

## 1 引 言

自从 1972 年 J. Cooney<sup>[1]</sup> 提出采用大气分子转动拉曼谱线进行大气温度遥测的原理以来, 利用该技术遥测大气温度的激光雷达技术得到了快速发

展<sup>[2~5]</sup>。转动拉曼测温激光雷达系统中的分光系统是其关键部分之一。广大学者提出了衍射光栅单色仪<sup>[2,3]</sup>、窄带干涉滤光片<sup>[4,5]</sup>和宽带 CCD 单色仪<sup>[6]</sup>等分光系统, 但其体积较大、调整麻烦或计算复杂等不

**收稿日期**: 2010-11-19; **收到修改稿日期**: 2011-01-18

**基金项目**: 国家自然科学基金(60878050)和国家 973 计划(2009CB426302)资助课题。

**作者简介**: 李仕春(1979—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事激光雷达大气温度遥感技术方面的研究。

E-mail: lsczqz @ xaut. edu. cn

**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及光电测试技术等方面的研究。

E-mail: dengxinhua @ xaut. edu. cn(通信联系人)

足限制了转动拉曼激光雷达在星载和车载领域的应用。为解决这些问题,结合美国国家航空航天局(NASA)将光纤布拉格光栅(FBG)用于差分吸收激光雷达测量大气水汽的现有技术成果<sup>[7]</sup>,在充分研究 FBG 分光特性和拉曼激光雷达分光要求的基础上,开展了基于 FBG 分光的全光纤纯转动拉曼测温激光雷达系统的相关研究<sup>[8,9]</sup>。由于 FBG 分光技术主要以单模光纤(SMF)为基础,故将望远镜接收的后向散射信号耦合进单模光纤就成为该课题的关键技术之一。

当前光耦合进单模光纤技术主要应用于激光器到光纤或光纤间的耦合<sup>[10~12]</sup>和空间光通信领域<sup>[13~15]</sup>,而激光雷达领域主要采用多模光纤耦合方式,激光雷达望远镜耦合进单模光技术的研究仍处于理论阶段<sup>[16]</sup>。本文主要以实验室现有 250 mm 口径卡塞格林望远镜为研究对象,探讨同轴激光雷达望远镜中心遮挡存在时,横向偏移、离焦误差和倾斜角度等装配误差对耦合效率的影响。采用光学领域广泛使用的 Zemax 软件,构建基于微透镜耦合进单模光纤的光学系统模型,以单模光纤耦合效率为优化目标对选择光学元件参数及结构参数进行设

计。最后基于微透镜技术设计了具有较高耦合功率的光纤阵列望远镜耦合系统。

## 2 全光纤转动拉曼激光雷达系统

全光纤转动拉曼激光雷达是以 FBG 分光技术构造的遥测大气温度廓线的系统<sup>[9]</sup>,其结构如图 1 所示。系统采用窄带倍频脉冲 Nd:YAG 激光器作为激励光源,发射波长 532 nm 激光光束,激光单脉冲能量达 300 mJ,脉冲宽度为 8 ns。激光束经扩束准直后发射进入大气,大气中的气体分子会产生携带温度信息的转动拉曼散射信号。接收系统采用卡塞格林望远镜接收大气分子的后向散射信号,然后通过微透镜阵列耦合进单模光纤,传输到基于 FBG 的分光系统。该分光系统主要由 3 个 FBG 和 3 个光纤耦合器(FC)组成。光信号从 FC 的输入端口 PA 进入,从端口 PB 输出至 FBG,反射光经端口 PB 从端口 PC 输出,分光后的三路光信号通过光电倍增管(PMT)实现光电信号转换,再分别经 AD 采集和光子计数处理输入到计算机中,反演出大气温度廓线分布。

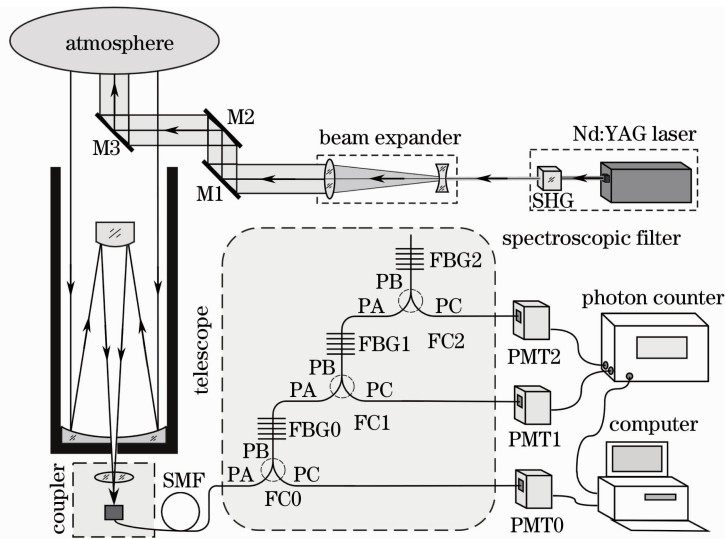


图 1 全光纤转动拉曼激光雷达系统

Fig. 1 All fiber rotational Raman lidar system

## 3 望远镜的单模光纤耦合模型

激光雷达进行大气参数遥感时,由于遥感过程中通常需要对一定时间的回波信号进行统计平均,故一般可忽略大气湍流对光场传输的影响,且可假设每个采样点对应的被测体积内大气是均匀分布的。由大气散射理论可知<sup>[17]</sup>,大气后向散射光强一

般与激励光强具有较好的线性关系,因此,若发射激光束是高斯分布,通常把望远镜接收的大气后向散射光看作是高斯分布的空间平面光场<sup>[18]</sup>。其与单模光纤的耦合模型是研究的理论基础,但与空间光通信领域的传输模型不同的是后向散射光在接收孔径角范围内均有光信号且望远镜口径一般较大。空

间光与 SMF 的耦合理论表明,把望远镜等效为单透镜(如图 2 所示)时,自由空间平面光场与 SMF 的耦合效率  $\eta_c$  定义为<sup>[16]</sup>

$$\eta_c = \frac{\left\langle \left| \int_B \mathbf{E}_B(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{F}_B^*(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \right|^2 \right\rangle}{\left\langle \int_A |\mathbf{E}_A(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r} \right\rangle} = \frac{\left\langle \left| \int_A \mathbf{E}_A(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{F}_A^*(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \right|^2 \right\rangle}{\left\langle \int_A |\mathbf{E}_A(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r} \right\rangle}, \quad (1)$$

式中  $\mathbf{E}_A(\mathbf{r})$  和  $\mathbf{E}_B(\mathbf{r})$  分别表示接收孔径  $A$  面和光纤端面  $B$  的入射光场矢量,而  $\mathbf{F}_A^*(\mathbf{r})$  和  $\mathbf{F}_B^*(\mathbf{r})$  分别是单模光纤在  $A$  平面的光纤传输模场和  $B$  平面的后向传播光纤模场矢量的共轭复数,  $\mathbf{r}$  是二维矢量横坐标。

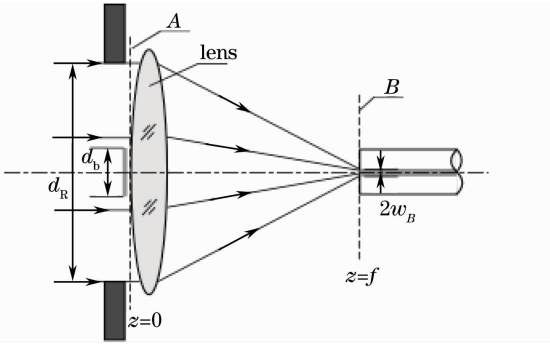


图 2 望远镜耦合等效光路

Fig. 2 Telescope coupling optical equivalent geometry

激光雷达系统的接收望远镜多采用反射式望远镜,虽然也有无中心遮挡的反射式望远镜系统,但在进行对流层大气参数遥感时为探测更低的高度通常采用同轴激光雷达结构,在望远镜中心通常具有用于发射激光束的反射镜(如图 1 的 M3 所示)。因此,深入探讨中心遮挡对其光学耦合特性的影响具有重要意义。中心遮挡会大大降低望远镜的接收效率,且可影响耦合焦平面中心艾里斑的能量分布。当接收理想高斯光场且忽略装配误差和大气湍流引起的相位扰动时,(1)式有如下解析解<sup>[19]</sup>:

$$\eta_c = 2 \times \frac{[\exp(-a^2) - \exp(-a^2 b^2)]^2}{a^2 - a^2 b^2}, \quad (2)$$

式中  $b$  为中心遮挡率,  $b = d_b/d_R$ ,  $d_b$  是中心遮挡的直径,  $d_R$  是望远镜接收光束的直径,它随探测高度变化而改变;  $a$  为光束直径与 SMF 反向传输模场直径之比(简称孔径比)

$$a = \frac{d_R}{2} \cdot \frac{\pi \omega_B}{\lambda f} = \frac{d_R}{2 \omega_A}, \quad (3)$$

式中  $\omega_B$  表示  $B$  平面的光纤传输模场半径,  $\lambda$  为工作波长,  $f$  为等效光学系统的焦距,  $\omega_A$  为  $A$  面内后向传输的光纤模场半径。不同中心遮挡率情况下的耦合效率随孔径比  $a$  的变化如图 3 所示。从图中可看出耦合效率随着中心遮挡率  $b$  的增加而减少,且开始时  $b$  的影响逐渐加剧,这是由于遮挡面积与  $b^2$  成正比,当  $b > 0.2$  时影响基本是线性的,其原因是此时被遮挡高斯光束功率的变化降低。而最佳耦合效率对应的孔径比  $a$  的数值随着遮挡率  $b$  的增加逐渐减小,如图 3 中“\*”所示,如当  $b = 0.2$  时,最佳的孔径比  $a$  为 1.074,对应的最佳耦合效率为 73.8%;当  $b = 0.3$  时,最佳的孔径比  $a$  为 1.028,对应的最佳耦合效率为 65.6%。

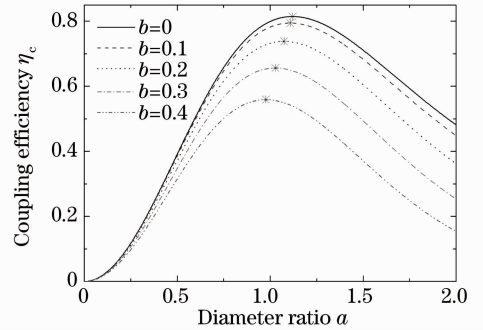


图 3 不同中心遮挡率  $b$  时孔径比  $a$  对耦合效率的影响

Fig. 3 Coupling efficiency  $\eta_c$  versus diameter ratio  $a$  with different central obstacle ratios  $b$

在单模光纤安装调整过程中,位置失配会降低耦合进 SMF 的光功率。由于耦合系统光路具有回转对称特性,装配误差主要分为横向偏移、离焦误差和倾斜角度<sup>[11,14]</sup>。横向偏移  $\Delta r$  是指望远镜光轴与 SMF 光轴的横向偏移量,离焦误差  $\Delta z$  是指 SMF 端面在光轴方向上与望远镜耦合系统理想焦面的偏移,倾斜角度  $\Delta \varphi$  是望远镜耦合系统光轴与 SMF 光轴的夹角。考虑中心遮挡率  $b$  时,各种误差对耦合效率的影响<sup>[15]</sup>可分别表示为

$$\eta_{\Delta r} = \frac{8a^2}{1-b^2} \left| \int_b^1 \exp(-a^2 \rho^2) J_0(2\gamma_{\Delta r} a \rho) \rho d\rho \right|^2, \quad (4)$$

$$\eta_{\Delta z} = \frac{8a^2}{1-b^2} \left| \int_b^1 \exp[-(a^2 - ia\gamma_{\Delta z}) \rho^2] \rho d\rho \right|^2, \quad (5)$$

$$\eta_{\Delta \varphi} = \frac{8a^2}{1-b^2} \exp(-2a^2 \gamma_{\Delta \varphi}^2) \times \left| \int_b^1 \exp(-a^2 \rho^2) I_0(2\gamma_{\Delta \varphi} a^2 \rho) \rho d\rho \right|^2, \quad (6)$$

式中  $\gamma_{\Delta r}$ ,  $\gamma_{\Delta\varphi}$ ,  $\gamma_{\Delta z}$  分别为归一化的各种装配误差,即

$$\gamma_{\Delta r} = \Delta r/w_B, \gamma_{\Delta\varphi} = 2f\Delta\varphi/d_R,$$

$$\gamma_{\Delta z} = d_R\Delta z/(f w_B).$$

在不同中心遮挡率时,耦合效率随各装配误差的变化如图 4 所示(孔径比  $a$  分别为最佳耦合效率时的

数值)。从图中可看出,耦合效率随遮挡率  $b$  的增加而减少,随误差的增大而减少,且影响程度相近;离焦误差对耦合效率影响较小,而另外两项误差的影响较大,具体横向误差和角向误差何者影响更大,则取决于不同的系统参数。

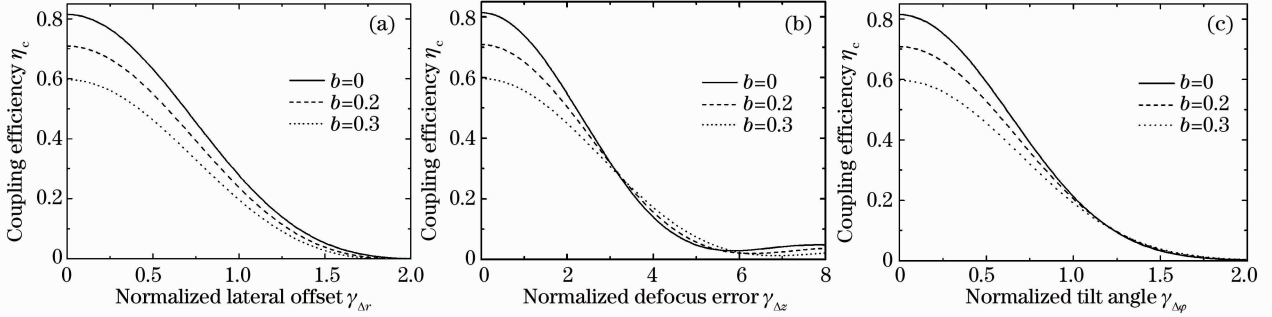


图 4 不同中心遮挡率  $b$  时装配误差对耦合效率的影响

Fig. 4 Coupling efficiency versus alignment errors with different central obstacle ratios  $b$

本文讨论的激光雷达系统中激光波长为 532 nm。若选择 Nufern 公司数值孔径  $NA=0.13$  的 460-HP 单模光纤,其 3 项误差的归一化当量分别为  $1.8 \mu\text{m}$ ,  $6.3^\circ$  和  $15.8 \mu\text{m}$ 。从图 4 可看出,系统为保证 40% 的耦合效率需要使横向误差小于  $0.9 \mu\text{m}$ ,角向误差小于  $3.8^\circ$ ,而纵向误差可限制在  $36 \mu\text{m}$ ,故安装误差中对耦合效率影响最大的是横向误差,要求控制在  $1 \mu\text{m}$  以下。

#### 4 望远镜耦合系统优化设计与分析

在光学设计领域中广泛应用的 Zemax 软件提供了单模光纤耦合效率的仿真功能,主要涉及到两个耦合效率:系统耦合效率和接收耦合效率。系统耦合效率定义为<sup>[20]</sup>

$$S = \frac{\left[ \iint_E t(x,y) F_s(x,y) dx dy \right]^2}{\left[ \iint F_s(x,y) dx dy \right]^2}, \quad (7)$$

式中  $F_s(x,y)$  为入射光场的幅值分布,  $t(x,y)$  为光学系统的幅值传递函数,  $E$  表示入瞳的平面。由定义可看出,该参数主要反映入瞳的孔径效应引起的光能损失,还包括光学元件的吸收和光学薄膜的影响。接收耦合效率为<sup>[20]</sup>

$$T = \frac{\left| \iint F_r(x,y) W^*(x,y) dx dy \right|^2}{\iint F_r(x,y) F_r^*(x,y) dx dy \iint W(x,y) W^*(x,y) dx dy}, \quad (8)$$

式中  $F_r(x,y)$  为光纤导模的模场分布,  $W^*(x,y)$  为

出瞳波前的复数共轭。故该参数主要反映由于光学系统像差引起的波前相位变化与光纤导模失配产生的损耗。该参数与(1)式的含义相近。系统的总耦合效率是上述两个耦合效率的乘积,综合考虑了光学材料的吸收、镀膜和相位等较多影响因素,故 Zemax 软件具有很好的仿真性能。

以实验室的日本高桥公司 Mewlon-250 卡塞格林望远镜为研究对象,其主反射镜面为椭球面,副反射镜面为球面,等效焦距约为 3 m,中心遮挡率为 0.288。根据产品性能结构参数构建该望远镜的 Zemax 光学模型,由仿真分析可知,利用望远镜直接耦合高斯光束进单模光纤的系统耦合效率为 76.39%,接收耦合效率为 22.22%,总耦合效率为 16.98%。

由于将光直接从望远镜耦合进光纤光路较长,对系统机械稳定性要求较高,故一般需要在望远镜底部加 1 块正透镜缩短光路。用于全光纤拉曼激光雷达的望远镜同样需要该透镜来调整耦合系统等效焦距、调整孔径比  $a$  的值,进而改善系统的耦合效率。结合上节得到的耦合效率与孔径比  $a$  和遮挡率  $b$  的关系,利用 Zemax 软件构建初始光学系统模型。通过修改优化目标函数优化系统参数,选择合适的透镜和材料,并优化系统结构参数,可改善系统的耦合效率。如选择 CVI 公司的 PLCX-50.0-51.5UV 平凸透镜,距像面 51.02 mm 时,可使系统耦合效率改善为 76.39%,接收耦合效率改善为 57.60%,系统总耦合效率改善为 44.01%。

微透镜在光纤耦合领域得到较多应用<sup>[10]</sup>,主要应用于平行光束的单模光纤耦合。为进一步提高耦

合效率,设计了基于微透镜的望远镜耦合系统对会聚光束进行耦合,并优化系统参数使系统耦合效率进一步提高。优化后的光学系统有光仿真结果如F图5所示。透镜为 CVI 公司的 PLCX-50.0-61.8UV,距微透

镜 56 mm;微透镜阵列选择德国 AUS 公司 APO-Q-P150-R1.60,距像面 0.31 mm。其系统耦合效率可提高至 76.39%,接收耦合效率提高至 66.29%,系统总耦合效率提高至 50.64%。

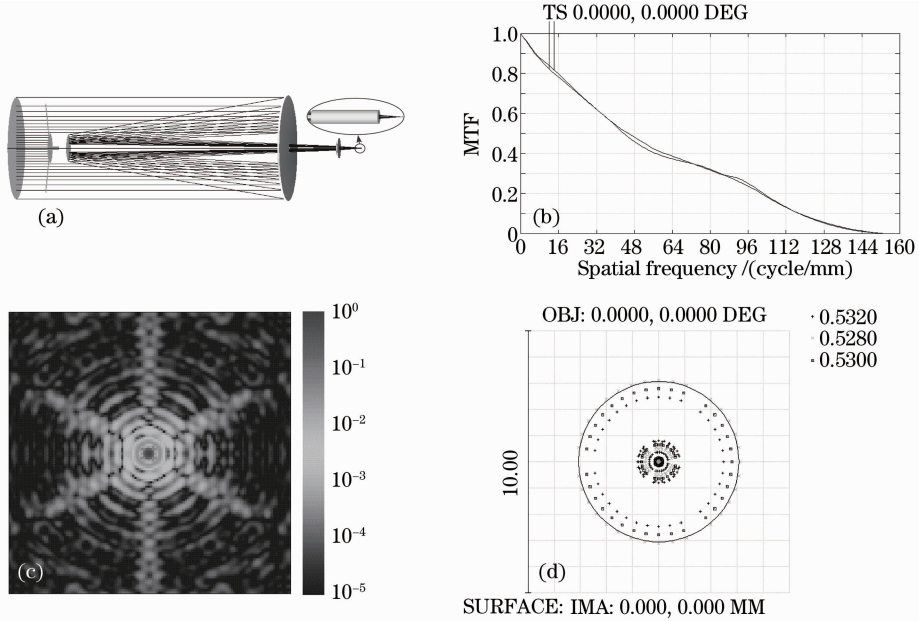


图 5 基于微透镜的望远镜耦合系统的性能

Fig. 5 Performance of telescope coupling system based on micro lens

图 5(a)是耦合系统的三维(3D)结构图,从中可看出入射光场在入瞳处是高斯分布的,经过带有 3 个支撑的星型中心遮挡进入望远镜;在像面附近为了观察微透镜给出了局部放大 3D 图。图 5(b)给出了系统的调制传递函数(MTF)图,在 528~532 nm 波长处具有较好的光学传输性能。图 5(c)是系统采用傅里叶变换(FFT)算法的点扩展函数,从中可看出像面光场的星型中心遮挡形成的衍射图样;图 5(d)所示点列图也给出了相同的结果,且像点位于直径为 3.1 μm 的衍射极限范围内(图中实线圆为衍射艾里斑)。

化以及阵列化等优点,因此可用微透镜阵列使光束聚焦到光纤阵列每根光纤纤芯端面上,以提高耦合进光纤的信号能量。图 6(a)是微透镜阵列与光纤阵列的耦合图,将多根单模光纤捆成光纤束与微透镜阵列耦合,其中光纤直径为  $(125 \pm 1.5) \mu\text{m}$ ,各光纤数值孔径  $NA=0.13$ 。微透镜阵列与单模光纤阵列可采用如图 6(b)和(c)所示的两种结构,其中图 6(b)所示结构已有商品化的微透镜阵列,而图 6(c)所示结构具有最佳性能。在保证激光雷达回波信号分布在焦面的角度误差不大时,耦合到单模光纤中的光信号能量理论上可增加数倍。该结构尤其适用于激光雷达这类以能量探测为主的遥感光学系统。

由于激光雷达的回波信号比空间光通信具有更大的视场,而微透镜具有体积小、重量轻、便于集成

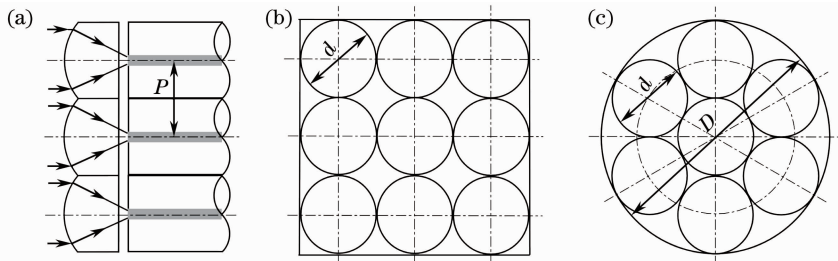


图 6 微透镜阵列结构

Fig. 6 Configuration of micro lens array

## 5 结 论

结合空间光通信领域已有的关于望远镜与单模光纤耦合效率的数学模型,探讨了卡塞格林望远镜中心遮挡对耦合效率的影响,并对不同遮挡率时最大耦合效率随横向偏移、离焦误差和倾斜角度等安装误差的变化规律进行数值分析。结果表明,随着遮挡率的增加,最大耦合效率对应的孔径比  $a$  会逐渐减少,故需要选择更短的焦距,而安装过程中对耦合效率影响较大的误差因素是横向偏移和角度倾斜。另外,以上述结论为基础搭建了 Zemax 优化设计的初始模型,通过增加透镜和微透镜提高耦合效率,并以耦合效率为目标对耦合系统参数进行优化,设计了两种阵列耦合结构来提高耦合光信号能量。仿真结果表明,利用本文设计的望远镜耦合系统,遮挡率为 0.288 的全光纤拉曼激光雷达系统可实现高达 50% 的耦合效率。

## 参 考 文 献

- 1 J. Cooney. Measurement of atmospheric temperature profiles by Raman backscatter [J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1972, **11**(1): 108~112
- 2 Yu F. Arshinov, S. M. Bobrovnikov, V. E. Zuev *et al.*. Atmospheric temperature measurements using a pure rotational Raman lidar[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(19): 2984~2990
- 3 Su Jia, Zhang Yinchao, Hu Shunxing *et al.*. Raman lidar measuring tropospheric temperature profiles with many rotational Raman lines [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(8): 1781~1785
- 苏 嘉, 张寅超, 胡顺星等. 多条转动拉曼谱线雷达测量对流层大气温度[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(8): 1781~1785
- 4 Dusan Nedeljkovic, Alain Hauchecorne, Marie-Lise Chanin. Rotational Raman lidar to measure the atmospheric temperature from the ground to 30 km [J]. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 1993, **31**(1): 90~101
- 5 Jiandong Mao, Dengxin Hua, Yufeng Wang *et al.*. Accurate temperature profiling of the atmospheric boundary layer using an ultraviolet rotational Raman lidar [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(15): 3113~3118
- 6 Emily G. Norton, Ian M. Povey, A. M. South *et al.*. Jones. Broadband CCD detection system for rotational Raman lidar studies of the troposphere [C]. *SPIE*, 2001, **4153**: 657~663
- 7 Lelia B. Vann, Russell J. DeYoung, Stephen J. Mihailov *et al.*. Narrowband fiber-optic phase-shifted Fabry-Perot Bragg grating filters for atmospheric water vapor lidar measurements [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(34): 7371~7377
- 8 Hua Dengxin, Mao Jiandong, Hu Liaolin *et al.*. All-fiber Raman lidar system based on wavelength division multiplexing technique [P]. China Patent: IL2007 10018406.2, 2009. 8. 19
- 华灯鑫, 毛建东, 胡辽林等. 基于波分复用技术分光的全光纤拉

- 曼散射激光雷达系统 [P]. 中国专利: IL2007 10018406.2, 2009. 8. 19
- 9 Mao Jiandong, Hua Dengxin, Hu Liaolin *et al.*. Design of spectroscopic filter of all-fiber rotational Raman lidar for temperature profiling [J]. *Acta Optica Sinica.*, 2010, **30**(1): 7~13
- 毛建东, 华灯鑫, 胡辽林等. 全光纤拉曼测温激光雷达分光系统设计 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 7~13
- 10 Wu Xiaoping, Tang Weizhong, Zhou Wen. Binary optical micro lenses for coupling of lasers to fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **24**(5): 406~410
- 吴小萍, 汤伟中, 周 文. 用于激光到光纤最佳耦合的二元光学微透镜 [J]. *中国激光*, 1997, **24**(5): 406~410
- 11 Yan Changling, Lu Ping, Liu Deming *et al.*. Design of micro lens arrays coupling with fiber arrays and analysis of the coupling loss [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(9): 1043~1047
- 阎端玲, 鲁 平, 刘德明等. 与光纤阵列耦合的微透镜阵列设计与损耗分析 [J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(9): 1043~1047
- 12 Zheng Jingjing, Zheng Kai, Peng Jian *et al.*. Analysis of splicing and splicing fusion coupling efficiency between single-core fiber and dual-core fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2529~2535
- 郑晶晶, 郑 凯, 彭 健等. 单芯光纤与双芯光纤的对接和熔接耦合效率分析 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2529~2535
- 13 Yamac Dikmelik, Frederic M. Davidson. Fiber-coupling efficiency for free-space optical communication through atmospheric turbulence [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(23): 4946~4952
- 14 Xiang Jingsong, Hu Yu. Study on characteristics of distributed array receiver for satellite-to-ground laser communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1297~1302
- 向劲松, 胡 渝. 星地激光通信中分布式接收阵列的特性研究 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1297~1302
- 15 Jingsong Xiang. Fiber Coupled and Optically Preamplified Satellite-to-Ground Bidirectional Laser Communication Systems and Its Key Technologies [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007. 22~26
- 向劲松. 采用光纤耦合及光放大接收的星地光通信系统及关键技术 [D]. 成都: 电子科技大学, 2007. 22~26
- 16 Peter J. Winzer, Walter R. Leeb. Fiber coupling efficiency for random light and its applications to lidar [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(13): 986~988
- 17 Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo *et al.*. Atmospheric Physics [M]. Beijing: Peking University Press, 2003. 416~437
- 盛裴轩, 毛节奏, 李建国等. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2003. 416~437
- 18 Jing Xu, Wu Yi, Hou Zaihong *et al.*. Study of irradiance fluctuations for laser beam propagation in atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3110~3116
- 靖 旭, 吴 毅, 侯再红等. 湍流大气中激光传输光强起伏特征研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3110~3116
- 19 C. Ruilier. A study of degraded light coupling into single-mode fibers [C]. *SPIE*, 1998, **3350**: 319~329
- 20 Focus software, Incorporated. Optical Design Program User's Guide [Z]. Ver. 2002. 145~147