

doi: 10.3788/gzxb20124109.1053

基于非球面透镜的空间光场光纤耦合系统研究

李仕春, 华灯鑫, 宋跃辉, 田小雨

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

摘 要:针对全光纤激光雷达中空间光场与单模光纤的耦合问题,设计了基于非球面透镜的望远镜光纤耦合系统.利用 ZEMAX 软件以单模光纤耦合效率为优化目标对其结构参量进行优化设计,然后分别用 LED 和激光器作为光源进行初步实验,比较直接耦合和非球面透镜耦合效果.实验结果表明,采用非球面透镜耦合可使多模光源的耦合效率比直接耦合增加约 47%,与仿真结果 45% 非常接近,且不同芯径耦合光功率之比大略等于芯径比平方;而该耦合方式可使单模光源的耦合效率增加约 20%,且耦合进不同小芯径光纤的耦合效率之比约为其芯径比平方的 2.4 倍,这对构建全光纤转动喇曼激光雷达系统具有重要意义.

关键词:大气光学;全光纤激光雷达;光纤耦合系统;非球面透镜;单模光纤

中图分类号: TN958.98; TP722.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2012)09-1053-6

0 引言

将空间光场高效耦合进较小芯径光纤特别是单模光纤的技术已广泛用于光纤激光器^[1-2]、空间激光通信^[3-4]和天文观测^[5-6]等研究领域.当前本文研究组提出的全光纤转动喇曼激光雷达研究课题将采用光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)作为分光系统的核心器件,而由多模光纤制成的布喇格光栅由于其光谱特性的多峰性,不能满足大气分子纯转动喇曼信号精细光谱分离的要求,故系统中将采用单模光纤作为连接传输器件^[7-8].因此激光雷达的空间回波光场耦合进单模光纤的耦合效率将是该系统信噪比的关键因素,耦合效率越高信噪比将越好.

当前将空间光场耦合进小芯径光纤的耦合器主要有球透镜^[9-10]、格林透镜和非球面透镜^[11]等,球透镜一般耦合效率略低,而格林透镜主要用于光场前向传输的空间激光通信领域,在激光雷达领域的应用研究表明需要定制特种参量器件,成本较高^[12],此外目前现有产品主要用于近红外的通信波段,而正在研究的全光纤激光雷达系统则工作在可见光波段.另外,Chiou, A. 等人曾利用互泵浦相位共轭技术设计了光致折变空间模式转换器提高多模光场耦合进单模光纤的效率,使耦合效率突破了纤芯直径

比或模式数量比的限制^[13],但是该方法需要选择合适的晶体,且对空间结构稳定性要求较高,不适用于正在研究的全光纤激光雷达系统.非球面透镜以其灵活的光场分布调整能力已应用于激光光束整形^[14],另外非球面透镜具有很强的集光能力,这或许可提高空间光场耦合进单模光纤的效率.

本文以设计用于全光纤喇曼激光雷达的单模光纤耦合系统为研究目标,采用成本较低的非球面透镜作为核心耦合器件,结合现有卡塞格林望远镜,通过 ZEMAX 光学软件搭建望远镜与单模光纤的耦合系统;由于激光雷达系统是一种能量探测系统,不同于成像系统的高像质要求,为充分利用非球面透镜较强的集光能力,以将空间光场耦合进单模光纤的效率为优化目标对系统结构参量进行优化分析;直接与通常多模光纤(如芯径 0.1~0.4 mm)进行耦合效率比较,会因绝对耦合效率值低而弱化对比效果,此处构建初步实验系统进行耦合实验,采用不同型号单模光纤(芯径约为 3~10 μm)的耦合效果进行相对耦合效率对比分析,测试和分析非球面透镜对耦合效率的改善作用,得到了构建全光纤喇曼激光雷达系统的有益结论.

1 非球面透镜的单模光纤耦合系统及优化设计

喇曼激光雷达系统的发射激光束进入大气,经

基金项目:国家自然科学基金(No. 60878050, No. 41027004)和陕西省教育厅科研计划项目(No. 2010JK710)资助

第一作者:李仕春(1979-),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为激光雷达遥感大气温度技术. Email: lsczqz@xaut.edu.cn

责任作者/导师(通讯作者):华灯鑫(1964-),男,教授,博士,主要研究方向为激光雷达大气遥感探测技术及光电测试技术.

Email: dengxinhua@xaut.edu.cn

收稿日期:2012-03-01; **修回日期:**2012-05-17

与大气分子相互作用产生携带大气状态信息的后向喇曼散射信号,由于信号较弱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,故通常假设发射激光束是高斯分布,而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,其耦合理论分析已较为成熟^[10].其次由于大气分子散射在各个方向具有随机性,故通过望远镜耦合进单模光纤相对于多模光纤的总耦合效率 η_T 可表示为

$$\eta_T = \eta_M \cdot \eta_S \quad (1)$$

式中, η_M 是横向模式数导致的耦合效率,如果耦合进多模光纤的模式数为 M 且假设各模式能量相同,则该参量为 $1/M$, η_S 为单横模空间光场入射时的耦合效率,也是文献资料讨论最多的耦合参量^[3,13],其在广泛采用的 ZEMAX 光学软件中可表示为单模光纤的总耦合效率,故

$$\eta_S = S \cdot T \quad (2)$$

式中, S 为系统耦合效率或结构耦合效率,主要反映望远镜入瞳孔径及中央遮挡引起的光能损失,还包括光学元件吸收和光学薄膜的影响,在该耦合系统中主要体现中央遮挡对耦合效率的影响,可表示为^[10]

$$S = \frac{(\iint_E t(x,y) \cdot F_S(x,y) dx dy)^2}{(\iint F_S(x,y) dx dy)^2} \quad (3)$$

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 表示入瞳平面;而 T 可称为接收耦合效率,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,是通过光学器件可改善的主要参量,其定义式为^[10]

$$T = \frac{|\iint F_r(x,y) W^*(x,y) dx dy|^2}{\iint F_r(x,y) \cdot F_r^*(x,y) dx dy \iint W(x,y) W^*(x,y) dx dy} \quad (4)$$

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 ZEMAX 软件可对单横模空间光场耦合进单模光纤的耦合效率进行较好的仿真分析.

结合通用多模光纤耦合的喇曼激光雷达系统的经验,以实验室现有的日本 TAKAHASHI 公司 Mewlon-250 型卡塞格林望远镜为基础进行望远镜单模光纤耦合器结构设计,其三维结构如图 1.该望远镜属于 Dall-Kirkham 结构,其主镜 M_1 为直径 260 mm 且锥度系数-0.692 5 的椭球面,副镜 M_2 为直径 72 mm 的球面,反射镜表面镀多层铝膜以提高回波光场信号的收集效率, P_1 为入瞳, B_1 为中央遮挡.望远镜有效焦距为 3 m,且主镜与副镜之间距离可通过电机控制进行调节,使焦距可在 2.74 m 到 3.25 m 间变化.由于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,同时为尽量与单模光纤的数值孔径 0.13 进行匹配,通常在望远镜底部增加一片附加正透镜 L_1 (图 1 右下局部放大图)以缩短光路^[10],减少其合成焦距,提高系统机械稳定性.由于单模光纤传输条件依赖于光纤芯径与数值孔径,结合市场调研情况选择美国 Nufern 公司 460-HP 单模光纤作为目标光纤.

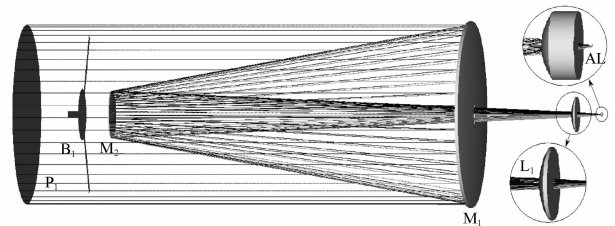


图 1 非球面透镜单模光纤耦合系统三维结构图
Fig. 1 3D layout of single-mode fiber coupler with aspheric lens

望远镜与单模光纤耦合系统的效率依赖于望远镜焦距、附加正透镜型号及位置、非球面透镜 AL 型号及位置等,且因激光雷达遥感技术是一种能量探测而不是成像系统,故理论上需要以单模光纤耦合效率为优化目标对上述结构参量进行优化设计.但 ZEMAX 软件很难对附加正透镜型号和非球面透镜型号等离散数据进行全局优化设计,由于附加透镜和非球面透镜对耦合效率影响最大的参量是焦距,而将望远镜接收耦合系统的组合焦距设计在 900 mm 左右可使激光雷达探测效果更佳^[12],通过 ZEMAX 仿真选择美国 CVI 公司 PLCX-50.0-51.5UV 平凸透镜作为附加透镜,由于非球面透镜加工及检测较为复杂^[15],通过调研选择美国 Thorlabs 公司多种焦距且反映集光能力参量数值孔径(NA)较大的非球面透镜(如 355 390, 355 660, 352 330, A414, 352 340, A230, A390, A110, A240)分别进行优化设计和仿真分析,最终确定由 1 个偶次非球面和 1 个球面组成的 A390 非球面透镜(图 1 右上局部放大图右侧面)作为耦合系统核心器件.该非球面透镜的有效焦距为 4.60 mm, NA 为 0.53,其偶次非球面(图 1 局部放大图左侧面)为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} - 8.49 \times 10^{-4} r^4 - 4.777 \times 10^{-5} r^6 - 4.959 \times 10^{-6} r^8 + 3.374 \times 10^{-9} r^{10} \quad (5)$$

式中, c 为曲面的曲率,其数值为半径 3.50 mm 的倒数,锥度系数 k 为-0.336 600 0, r 为横向坐标;球面(图 1 右上局部放大图右侧面)的曲率半径为-42.19 mm.然后以耦合进单模光纤的耦合效率为优化目标函数对各光学器件间相对位置进行优化设计,通过 POPD(物理光学传输)等运算符进行优化表明,当未采用非球面透镜时,附加正透镜距望远

镜副镜 672.7 mm,像面距附加正透镜 51 mm,系统效率 S 为 76.4%,接收效率 T 为 46.1%,单模光场总耦合效率 η_s 为 35.2%;当采用非球面透镜时,附加正透镜距副镜 704.5 mm,非球面透镜距附加正透镜 35.39 mm,光纤端面距非球面透镜 1.268 mm,单模光纤的接收效率 T 可改善为 67.6%,单模光场总耦合效率 η_s 可提高至 51.7%,耦合效率比未采用非球面透镜耦合时提高约 45%。故非球面透镜将改变望远镜接收会聚光场的能量分布,提高其与单模光纤导模分布的匹配效率,进而提高望远镜与单模光纤的耦合效率。

为说明非球面透镜对焦平面上爱里斑能量集中程度的改变,图 2 给出了软件仿真得到的采用非球面透镜前后的包围圆能量变化情况,可看出通过增加非球面透镜可使半径为 $1.6 \mu\text{m}$ 的圆内的能量由 40% 增加到约 68%,且在 $2 \mu\text{m}$ 附近出现平坦区,这可减少光纤对准时横向偏移的准确度要求,而通常光纤对准误差中影响最大就是横向偏移误差^[10,12]。对不同视场角情况进一步仿真分析表明,在 0.004° 内其包围圆能量分布曲线变化不大。

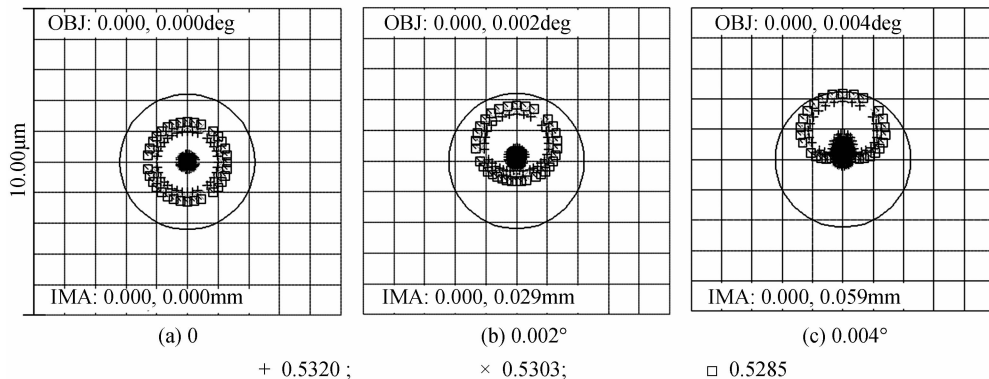


图 3 不同视场的点列图

Fig. 3 Spot diagrams for different fields with different incident angle

般具有 0.1 mrad 的发散角,而激光雷达中接收视场角一般要求略大于发射系统发散角,取 0.12 mrad ,故可认为接收回波信号将大略位于 0.004° 范围内,图 3 仿真结果表明在半径 $59 \mu\text{m}$ 的范围内放置单模耦合光纤,都将获得较好的耦合效率。另外,由于激光雷达系统利用发射光束的回波信号,而不是空间激光通信系统中的前向传输信号,回波信号将在耦合平面上形成一个面积较大的弥散斑,故在此系统中可通过在光纤耦合平面放置多芯光纤束来提高系统总耦合能量。

2 耦合实验系统及数据分析

2.1 耦合实验系统

为验证上述耦合系统的效果,搭建图 4 实验系

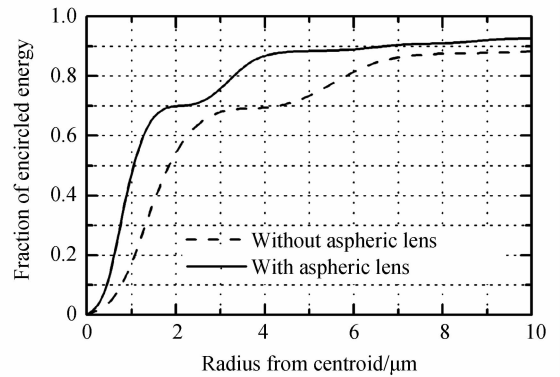


图 2 不同耦合方式包围圆能量

Fig. 2 Encircled energy for different coupling way

为进一步分析视场角对爱里斑耦合能量分布的影响,图 3(a)~(c) 给出了所设计耦合系统入射角度分别为 0° 、 0.002° 和 0.004° 的点列图,可看出当视场角不为 0 时,存在较为明显的彗差,但其能量基本处于黑色实线圆(直径为 $4.41 \mu\text{m}$)所表示的衍射极限范围内。由于通常激光雷达系统进行的是能量探测,不同于天文领域的成像光学系统,一般不考虑光学系统的成像质量,这就使我们可将提高耦合能量作为设计和优化的唯一目标。激光雷达发射系统一

统进行初步实验,图中光源发出的光,经正透镜会聚后,分别进入直接耦合 a 和非球面透镜耦合 b 两个子系统,输出光进入色散型光谱仪(OA),利用该实验系统可进行三方面耦合效果分析。首先可验证非球面透镜对耦合效率的改善作用,由于实验中直接耦合进单模光纤因其芯径太小导致对安装误差要求较高,故此处未采用单模光纤直接耦合作为耦合效率提高程度比较的基础,而是将入射光先耦合进大芯径多模光纤(0.2 mm)后,再经 FC 接头直接耦合进入单模或小芯径光纤(芯径约为 $3\sim 10 \mu\text{m}$),虽 FC 接头同型光纤互联时插入损耗典型值为 0.2 dB (95.5%),但其主要原因是光纤对准误差,此处因大芯径光纤 NA 为 0.22 ,其芯径为小芯径光纤几十倍,故对准误差对插入损耗影响很小,可用于该实验

测试;而非球面透镜耦合子系统 b 利用非球面耦合透镜直接将入射光耦合进入单模或小芯径光纤,这两种子系统方案足以说明非球面透镜对耦合效率的改善作用.

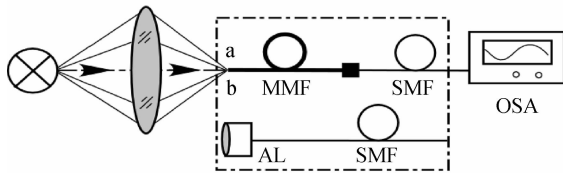


图4 耦合实验系统结构
Fig. 4 Experimental layout of coupling

其次,利用不同芯径光纤的耦合效率比可粗略分析相同入射光场的耦合效果,实验中单模光纤位置需要测试几种不同的小芯径光纤的耦合效果,如美国 Nufern 公司的 460-HP 光纤、1550B-HP 光纤和英国 Fibercore 公司的 SM980-5.8-125 光纤(表1),但实际上只有 460-HP 光纤能够实现 532 nm 波段的单横模传输,其目的在于为非球面透镜改善单模光纤相对耦合效率提供更可靠的数据,并分析耦合效率比与芯径比平方之间关系.最后可分析入射光场横向模场分布对耦合进单模光纤效率的影响,将光源分别采用波长位于 532 nm 附近 LED 灯和激光器,以分别模拟多横模和单横模光源的耦合效果,实验分析入射光场横模分布对耦合进单模光纤的影响,实验中 LED 灯型号为 LED 525E,其发散角为 15° ,中心波长为 525 nm,3 dB 带宽为 5 nm,功率为 15 mW;而激光器将使用 Nd:YAG 激光器的二倍频激光.另外,实验中不同芯径单模光纤长度为 2 m,且需要采用两个半径为 10 mm 圆环进行扰模处理,而对于多模光纤因其主要作用是减少不同小芯径耦合光纤的安装误差,故未对其进行扰模.

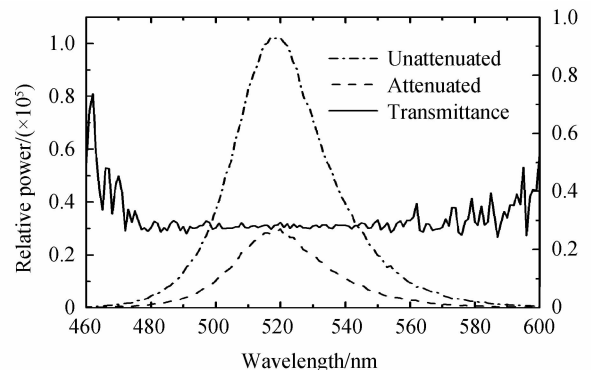
表1 耦合实验中光纤参量

Table 1 Parameters of fibers in coupling experiments

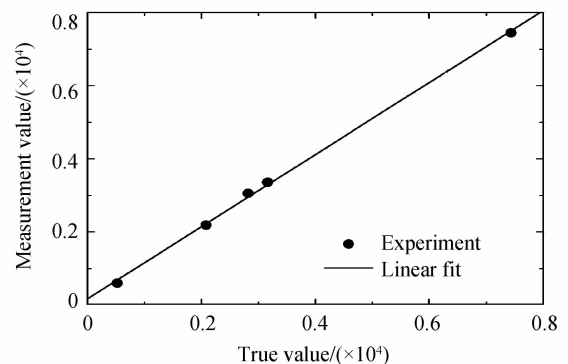
Type	Cutoff wavelength/nm	Mode field diameter	NA
460-HP	430 ± 20	$3.5 \mu\text{m}@515 \text{ nm}$	0.13
SM980-5.8-125	920 ± 50	$5.8 \mu\text{m}@980 \text{ nm}$	0.14
1550B-HP	$1\ 400 \pm 50$	$9.5 \mu\text{m}@1\ 550 \text{ nm}$	0.13

实验中将采用 Princeton Instruments 公司的 SP2500 光谱仪作为耦合系统的光电探测系统,它采用精密的光栅镀膜技术,可将光能损失降至最低,其扫描光谱给出了不同波长的功率相对值.为尽量减弱光电转换中非线性效应对测量结果的影响,评价光谱仪相对光强参量的线性度是非常必要的,将是该实验系统有效性的重要保障.首先采用一组滤光片对光谱仪相对强度值进行测量,为减少不同滤光片厚度对耦合光路的影响,构造实验系统时首先使 LED 灯发出的光通过一个透镜进行准直,经滤光片

后再利用正透镜使光线汇聚并耦合进多模光纤.为减少实验中系统误差,未采用标称透过率,而是首先利用实验系统对各滤光片进行测试,然后计算每个滤光片的透过率,图 5(a)给出了其中 1 组实测数据,点划线表示未加滤光片衰减时 LED 灯的光谱分布,虚线为增加某滤光片时的光谱分布,而实线是由这两组数据计算得到的透过率曲线,可看出透过率曲线在 490~560 nm 基本比较稳定,说明滤光片对不同波长光信号的衰减率基本是一致的,而在该范围之外则由于光功率较低而导致透过率起伏较大,故实验数据处理时宜采用 490~560 nm 的透过率平均值作为该滤光片透过率值.然后将上步中测得的透过率作为真值,计算 2 个及以上的滤光片组成滤光片组的理论真值,并利用光谱仪测试通过该滤光片组的透过光功率,并将理论值与测得值进行比较以评价光谱仪相对光强参量的线性度.图 5(b)给出了测量点与其拟合直线,其斜率为 0.985,截距为 173.7,相关度为 0.999 4,可说明光谱仪相对强度与入射光强之间具有很好的线性.



(a) Certain spectrograms



(b) Linearity evaluation

图5 光谱仪线性测试

Fig. 5 Linearity test of optical spectrum analyzer

2.2 实验数据分析

当采用 LED 灯作为光源时,可评价多横模光源的耦合性能.图 6(a)给出了耦合进光纤 460-HP 的功率谱特性,其中点划线是直接耦合时光功率谱的相对强度,实线表示非球面透镜耦合时的相对强度,

非球面透镜耦合比直接耦合时耦合效率增加约 48%;图 6(b)给出了耦合进光纤 1550B-HP 的功率谱特性,点划线是直接耦合时光功率谱的相对强度,实线表示非球面透镜耦合时的相对强度,非球面透镜耦合比直接耦合的效率增加约 47%,耦合效率的增加量大略与仿真结果 45%相当,这可说明利用图 4 中子系统 a 和 b 耦合效率的比值可反映非球面透镜对耦合效率的改善作用.另外,直接耦合和非球面透镜耦合分别耦合进 460-HP 与 1550BHP 光纤的耦合效率比约为 13%和 12%,这大略等于通常采用的光纤芯径比平方 12%^[13].

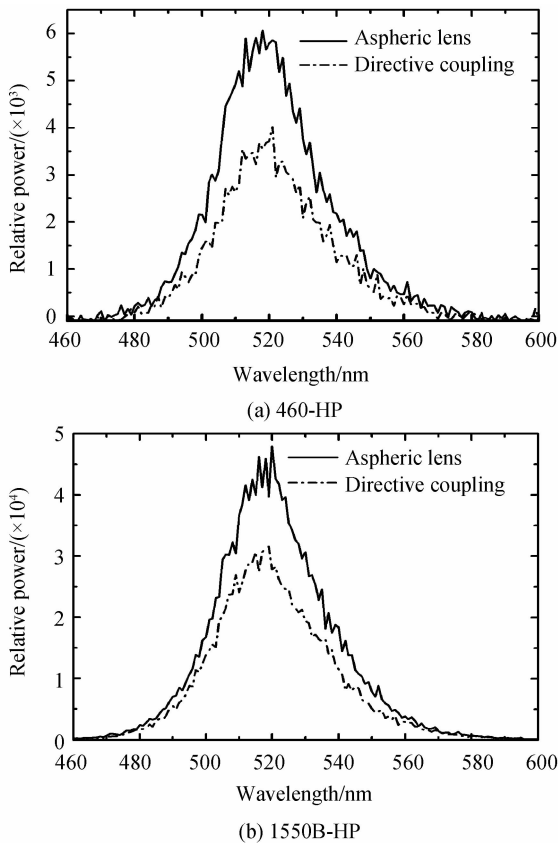


图 6 LED 光源的耦合光功率

Fig. 6 Coupling optical power of LED source into different fiber

当采用激光作为光源时,可评价单横模光源的耦合性能.图 7(a)给出了耦合进光纤 460-HP 的功率谱特性,点划线表示直接耦合时光功率谱的相对强度,实线为非球面透镜耦合时的相对强度,非球面透镜耦合比直接耦合时耦合效率增加约 31%;图 7(b)给出了耦合进光纤 SM980-5.8-125 的功率谱特性,点划线为直接耦合时光功率谱的相对强度,实线表示非球面透镜耦合时的相对强度,非球面透镜耦合比直接耦合时耦合效率增加约 20%,耦合效率的增加量与仿真耦合的 45%偏离较大,这或可归因于单模激光耦合时耦合效率对位置的调整极为敏感.另外,直接耦合和非球面透镜耦合方式耦合进 460-

HP 光纤与 SM980-5.8-125 光纤的耦合效率之比分别约为 88%和 86%,这偏离光纤模场芯径之比平方 36%较大,其耦合效率之比约为模场芯径比平方的 2.4 倍,这可能是由于高斯分布的单模激光模场与光纤模场匹配效率较高,且其能量大部分位于纤芯中心导致的,该结论对全光纤激光雷达系统具有重要意义.

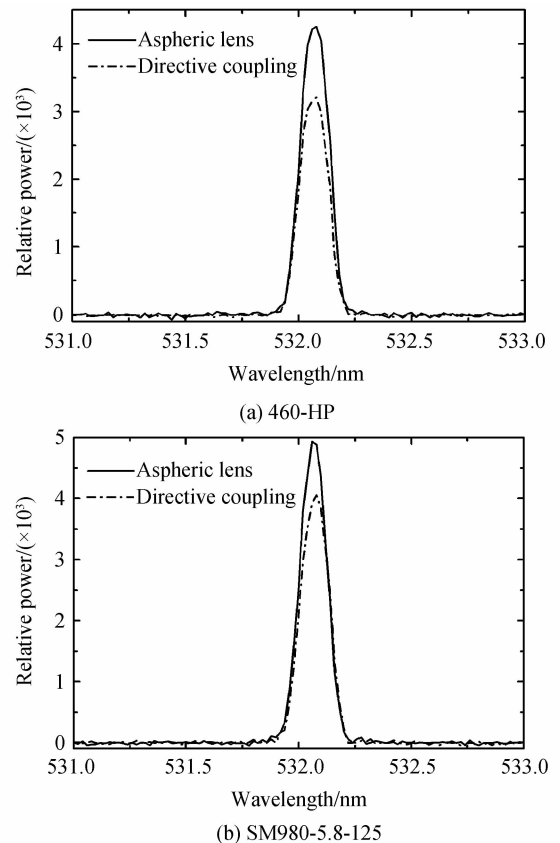


图 7 激光耦合光功率

Fig. 7 Coupling optical power of laser source into different fiber

另外多横模特性光源(LED 灯)与单横模特性光源(激光)的耦合效果对比,不仅说明非球面透镜对望远镜与单模光纤的耦合效率具有明显改善,而且对高斯分布的激光耦合进小芯径光纤不宜采用芯径比平方估算耦合效率,这对于搭建采用该激光器的全光纤喇曼激光雷达系统具有积极意义.

3 结论

利用非球面透镜数值孔径较大的特点,构建用于全光纤激光雷达系统的望远镜耦合系统,将激光雷达的回波光信号耦合进单模光纤,采用 ZEMAX 软件创建并仿真了耦合系统的结构模型,并以单模光纤 460-HP 的耦合效率为优化目标进行优化分析,采用 LED 和激光作为光源进行了初步耦合实验,结果表明非球面耦合透镜可明显改善空间光场耦合进单模光纤的效率,且对多横模 LED 光源,耦

合进小芯径光纤的功率比大略正比于芯径比的平方,而对单横模激光光源,其耦合效率比远大于芯径比平方,这对搭建全光纤喇曼激光雷达系统具有积极意义。

参考文献

- [1] GAO Xin, BO Bao-xue, QIAO Zhong-liang, *et al.* Single fiber coupling of multi-linear-array-diode-lasers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1229-1234.
高欣, 薄报学, 乔忠良, 等. 多线阵半导体激光器的单光纤耦合输出[J]. 光子学报, 2010, **39**(7): 1229-1234.
- [2] YAN Chang-ling, LU Ping, LIU De-ming, *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.
阎嫦玲, 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.
- [3] YAMAC D, FREDERIC M D. Fiber-coupling efficiency for free-space optical communication through atmospheric turbulence[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(23): 4946-4952.
- [4] XIANG Jing-song, 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.
- [5] SIMON T, JEAN L. Advanced fiber coupling technologies for space and astronomical applications[C]. *SPIE*, 2004, **5578**: 40-51.
- [6] CORBETT J C W, ALLINGTON-SMITH J R. Coupling starlight into single-mode photonic crystal fiber using a field lens[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(17): 6527-6540.
- [7] MAO J, HU L, HUA D, *et al.* Pure rotational Raman lidar with fiber Bragg grating for temperature profiling of the atmospheric boundary layer[J]. *Optica Applicata*, 2008, **38**(4): 715-726.
- [8] MAO Jian-dong, HUA Deng-xin, HU Liao-lin, *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. 全光纤喇曼测温激光雷达分光系统设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 7-13.
- [9] OU Xiang, XIONG Ling-ling, ZHANG Pu, *et al.* Design of high-brightness fiber-coupled diode laser system based on astigmatism and ideal imaging theories [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1718-1722.
欧翔, 熊玲玲, 张普, 等. 基于像散与理想光源成像原理的高亮度半导体激光器光纤耦合设计方法[J]. 光子学报, 2011, **40**(11): 1718-1722.
- [10] LI Shi-chun, HUA Deng-xin, SONG Yue-hui, *et al.* Research on micro-lens coupling system of all-fiber Raman lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0601001.
李仕春, 华灯鑫, 宋跃辉, 等. 全光纤喇曼激光雷达的微透镜耦合系统研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(6): 0601001.
- [11] WEN Wu-qi, KANG Jian-yi, DING Xin, *et al.* Fiber spatial coupler of about 1:1 ratio constituted by aspherical lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(3): 294-298.
温午麒, 康建翔, 丁欣, 等. 用非球面透镜制作光纤约 1:1 空间耦合器[J]. 光子学报, 2012, **41**(3): 294-298.
- [12] LI S, HUA D, WANG Y, *et al.* Analysis of telescope coupling efficiency for all-fiber spectroscopic Raman lidar[C]. *SPIE*, 2010, **7544**: 75444P.
- [13] CHIOU A, YEY P, YANG C, *et al.* Photorefractive spatial mode converter for multimode-to-single-mode fiber-optic coupling[J]. *Optics Letters*, 1995, **20**(10): 1125-1127.
- [14] SHANG Jian-li, ZHU Xiao, CHEN Peng, *et al.* Refractive optical reshaper that converts a laser Gaussian beam to a flat-top beam[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(10): 2543-2549.
尚建力, 朱晓, 陈鹏, 等. 一种折射式激光高斯光束平顶整形器[J]. 中国激光, 2010, **37**(10): 2543-2549.
- [15] WANG Xiao-kun. Measurement of Aspherical surface by laser tracker[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 379-383.
王孝坤. 激光跟踪仪检测非球面面形的方法[J]. 光子学报, 2012, **41**(4): 379-383.

Fiber Coupling System of Space Optical Field Based on Aspheric Lens

LI Shi-chun, HUA Deng-xin, SONG Yue-hui, TIAN Xiao-yu

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710072, China)

Abstract: A telescope fiber coupling system using aspheric lens for coupling free-space optical field into single-mode fiber in all-fiber lidar is devised. Its layout is designed and optimized for coupling efficiency into single-mode fiber through ZEMAX software. Moreover, the preliminary experiments are carried out using the LED and laser as optical source, and then the coupling efficiencies of directive coupling and aspheric lens coupling are compared. Experimental results show that the coupling efficiency using aspheric lens for multi-mode optical source may be increased by 47% than that of directive coupling, which is close to simulating result of 45%, and that the ratio of coupling optical power for different fibers is roughly close to the square of the core-diameter ratio. Furthermore, it is shown that the coupling efficiency of this way for single-mode optical source may be raised by 20%, and that the ratio of coupling optical power is approximately 2.4 times more than the square of its core-diameter ratio, which is significant to establish the all-fiber rotational Raman lidar.

Key words: Atmospheric optics; All-fiber lidar; Fiber coupling system; Aspheric lens; Single mode fiber