

一种周视激光回波接收光纤光学系统设计

谢洪波 李 勇* 姚丽娟 祝世民

(天津大学光电信息科学技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 提出了一种基于光纤束的激光回波接收光学系统,该系统仅需一个直径为 3 mm 的光电探测器即可实现 360°周视探测。系统由前置耦合光学系统、光纤传输束、后置聚焦光学系统三部分组成;8 套耦合子系统将各子扇区光线耦合进光纤束中;光纤传输束作为集光装置,将 8 个矩形视场的入射光线转化为 1 个圆形视场的出射光线,从而解决非对称视场和圆形探测器的匹配问题;后置聚焦光学系统将光纤束的出射光线会聚在圆形探测器上。模拟计算得到各视场能量接收效率均达 80% 以上,中心和边缘视场差异不超过 8%。结果表明:该系统探测距离长,各方向探测距离一致性好,而且仅需一个红外探测器实现无盲点周视探测,便于后续处理。

关键词 光学设计;周视探测;光纤束;单探测器

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s116001

Design of a Panoramic Fiber Optical System for Laser Echo Receiving

Xie Hongbo Li Yong Yao Lijuan Zhu Shimin

(Key Lab of Opto-Electronic Information Science & Technology, Ministry of Education,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A solution of optical system to receive laser echo light based on the configuration and transmission properties of fiber bundle is proposed. This system just needs a detector with diameter of 3 mm for realizing the panoramic detection. The system consists of three parts: front coupling system, fiber bundle and rear focusing optical system. 8 sets of coupling subsystem couple the eight sectors' laser echo lights into the fiber bundle. Then, fiber bundle as a device to collect light, converts the 8 rectangular fields of incident light into a circular field of emergent light matching the circular detector. The emergent light from the fiber bundle is converged on the detector by the rear focusing optical system. The energy receiving efficiency is more than 80% and the difference between each view is less than 8% through simulation. The result indicates that the system's detection range is far and consistent in each direction. Due to requiring only one infrared detector to realize no blind spot panoramic detection. It facilitates subsequent processing.

Key words optical design; panoramic detection; fiber bundle; single detector

OCIS codes 220.4830; 060.2400; 220.3620; 140.3510

1 引 言

主动激光探测技术由于其精度高、抗电磁干扰能力强等优点,被广泛应用于激光测距、通信、跟踪、制导、雷达等领域中^[1]。在主动激光探测系统中,接收光学系统的性能决定着探测系统的工作精度及作用距离等^[2]。接收光学系统除了应满足结构简单、体积小、成本低的要求外,还应该具有较大通光孔径以收集到足够多的回波光能量^[3],通常情况下是系统设计的重点和难点。另外,由于目标会以各种不同的情况

交会,因此许多场合还要求接收系统具有周视探测功能^[4],这会进一步加大接收系统的设计难度。

红外光电探测器的响应时间、等效噪声功率率和成本均会随着其光敏面积的增大而上升^[5],但目前国内周视激光回波接收光学系统大多采用多个矩形探测器以匹配各子扇区的非对称接收视场的设计方式,限制了应用范围,也增加了系统成本。针对此问题,利用光纤的特性,提出了一种仅需一个圆形光电探测器即可实现 360°周视探测的激光回波接收系

收稿日期: 2013-06-24; 收到修改稿日期: 2013-09-27

作者简介: 谢洪波(1969—),男,博士,副教授,主要从事光学成像与显示技术等方面的研究。E-mail: hbxie@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: tjuliyong@foxmail.com

统设计思路,并以采用直径为 3 mm 的探测器、等效口径为 4 mm 时能量接收率不低于 75% 的接收系统作为设计实例。该方法增加了系统灵活性,简化了后续信号处理过程,降低了系统成本。

2 系统设计思路

设计的光学系统以 8 个扇区接收激光回波实现周视探测,单路耦合子系统子午方向视场角即激光光束发散角为 $\pm 2^\circ$,弧矢方向视场角为 $\pm 23^\circ$,两者差异在 10 倍以上。若采用柱面镜来平衡两个方向的焦距,会产生很大像散,而且探测器靶面太小,光线难以收集。因此,引入一端为矩形端面另一端为圆形端面的光纤束作为集光装置,将矩形视场入射光线转化为圆形视场出射光线,从而解决非对称视场和圆形探测器的匹配问题。而且多通路结构的光纤束可以把不同方向不同区域的光线会聚在一起^[6],共用一个探测器。

依据上述分析,接收系统由 8 组耦合子系统、光纤传输束、聚焦系统三部分组成。8 组耦合子系统将各子扇区 $46^\circ \times 4^\circ$ 视场内的光线耦合进光纤束中,经过光纤束传输后,8 路光纤汇合成 1 路,最后由聚焦光学系统将光纤束的出射光线会聚在直径为 3 mm 的光电探测器的光敏面上,系统结构如图 1 所示。

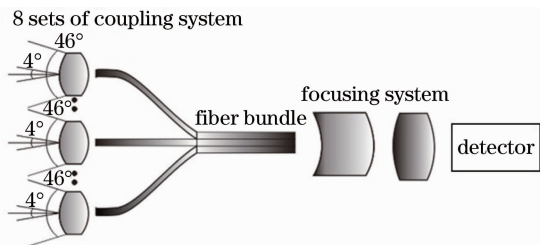


图 1 系统结构示意图

Fig.1 Schematic of the system structure

3 光学系统设计

3.1 光纤传输束设计

光纤束是整个光学系统的衔接部分,涉及耦合系统和聚焦系统的物像面参数选取、数值孔径匹配等问题^[7]。为提高系统能量接收率,本系统选择在近红外波段有较好透过率的 $200 \mu\text{m}$ 芯径石英光纤,其数值孔径 NA 值较小,仅为 0.34。

由于光纤端面损失、填充系数、传输损耗等影响^[8],石英光纤传输效率仅能达到 65% 左右,需要增大实际通光口径以满足系统对能量接收率的要求。

综合考虑系统各部分能量传输损耗,整体能量传输效率在 55% 左右。经过大量模拟实验分析,确定单路耦合系统通光口径为 5 mm 左右较为合理,从而满足等效通光口径为 4 mm 时能量接收率不低于 75% 的系统设计要求。

拉赫不变量是表征光学系统性能的一个重要参数,拉赫不变量公式为^[9]

$$J = ny \tan u = n'y' \tan u' \quad (1)$$

该式表明,光学系统在物像共轭面内,物高 y ,光束孔径角 u 和所在介质折射率 n 的乘积为一常数。

依据光纤光学系统数值孔径匹配原则,需要保证耦合系统像方数值孔径小于光纤 NA 值^[10],考虑实际使用过程中装调误差等影响,确定其 $u' = 19.5^\circ$, $\sin u' = 0.334 < 0.34$ 。代入通光口径 $y = 5 \text{ mm}$ 、弧矢方向视场角 $u = 23^\circ$,根据(1)式计算可得,弧矢方向像面高度即光纤端面弧矢方向长度 $y' = 6 \text{ mm}$ 。此时耦合系统焦距 $f' = y' / \tan \omega = 3 \text{ mm} / \tan 23^\circ = 7.07 \text{ mm}$,代入子午方向视场角 $\omega = 2^\circ$,计算得光纤端面子午方向长度为 0.495 mm 。

按照填充系数最高的六角形排布方式,耦合系统端需要排布三排 $30 + 29 + 30$ 共计 89 根光纤,如图 2 所示。光纤芯径为 $200 \mu\text{m}$,计算得其长为 $0.2 \text{ mm} \times 30 = 6 \text{ mm}$,宽为 $(1 + \sqrt{3}) \times 0.2 \text{ mm} = 0.546 \text{ mm}$,满足上述要求。

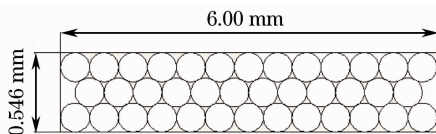


图 2 耦合系统端光纤束矩形端面

Fig.2 Rectangle surface of fiber bundle in coupling system end

在聚焦系统端,光纤端面设计为圆形,以减小后置聚焦系统设计难度。8 路合束后,依据相切圆排布公式:

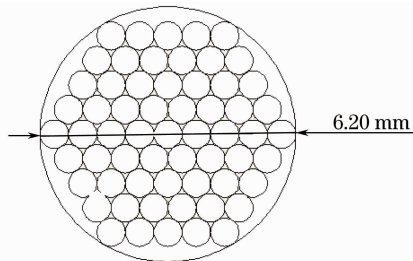


图 3 聚焦系统端光纤束圆形端面

Fig.3 Circular surface of fiber bundle in focusing system end

$$S = 1 + 3 \times (n - 1) + 3 \times (n - 1)^2, \quad (2)$$

式中 S 为排布光纤数, n 为排布层数, 计算可知 $n = 16$ 时, $S = 721$ 。故需排布 16 层方可排下 8×89 共计 712 根光纤, 端面直径为 6.2 mm, 如图 3 所示。

3.2 耦合光学系统设计

耦合效率直接关系到系统整体能量接收率, 为了提高耦合效率和均匀性, 需要满足系统的像方数值孔径小于光纤 NA 值。由于所选石英光纤 NA 值较小, 设计中采用以下两种方法避免边缘光线入射角过大, 无法耦合进光纤: 1) 近似像方远心光路设计, 使得大视场的主光线以近似 0° 入射到像面^[11]; 2) 采用椭圆形光阑, 适当缩小弧矢大角度方向通光口径, 平衡设计难度。将第一片透镜前表面设置为光阑, 设计结果如图 4、5 所示, 在 Code V 软件中追迹大角度边缘光线, 确定椭圆形光阑长轴为 5 mm, 短轴为 4.7 mm。

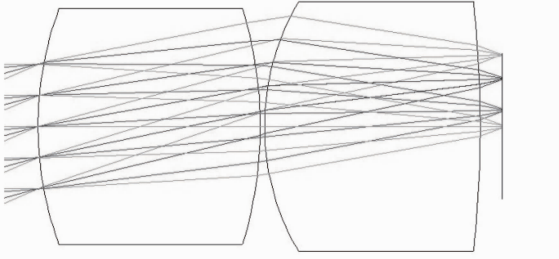


图 4 耦合系统弧矢面视图

Fig. 4 Sagittal view of the coupling system

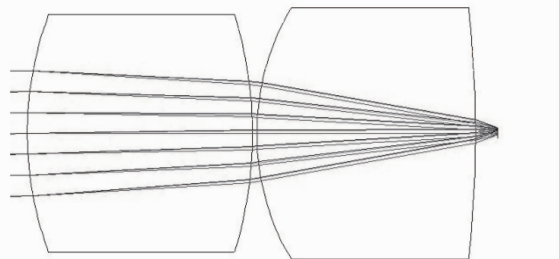


图 5 耦合系统子午面视图

Fig. 5 Meridional view of the coupling system

由图 4 可以看出, 大角度光线会聚效果优于中心光线。这样的设计结果主要出于以下两方面考虑: 一方面避免某些角度回波信号过于集中入射到光纤束空隙处, 从而无法探测; 另一方面避免边缘处聚焦效果过差, 使得探测视场外光线也能入射到光纤束中被探测器接收, 引入杂光干扰。

3.3 聚焦光学系统设计

在光纤成像系统中, 后置聚焦光学系统一般按物方远心中继系统设计, 实现点对点成像^[12], 光学系统多为复杂双高斯结构, 不符合接收系统结构简单、体

积小的要求。本文所设计的激光回波接收系统为非成像系统, 采用窗对瞳的目镜形式: 以光纤端面作为光学系统入瞳, 以光纤数值孔径角作为系统视场角来设计后置聚焦光学系统, 简化系统结构。

为满足系统重量轻、体积小的要求, 应尽量减小透镜的片数及厚度, 但由于系统 F 数较小, 仅为 0.66, 容易导致透镜表面曲率过大^[13]。这不仅不利于实际加工应用, 而且会造成透镜内表面的全反射, 从而降低能量接收率, 因此设计过程中选择高折射率材料以减小表面曲率。该系统虽为非成像系统, 但若像差太大很难将大部分光线会聚到直径为 3 mm 的探测器靶面上, 故在最靠近光阑的第一面引入非球面, 校正由于大孔径引起的球差和彗差^[14]。经过 Code V 软件里建模优化设计, 聚焦系统结构如图 6 所示, 仅需 4 片透镜(第 5 片为探测器保护玻璃), 图中第 2 片为窄带滤光片, 可有效滤除回波以外其他波长光线的干扰。该系统结构简单合理, 易于加工和装配。

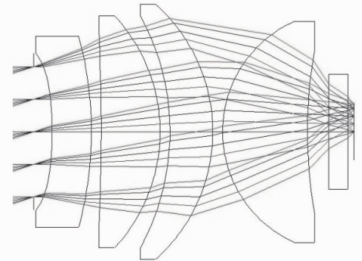


图 6 聚焦系统结构图

Fig. 6 Structure of the focusing system

4 结果分析

能量接收效率和均匀性是接收系统的重要参数, 直接决定着系统的探测距离和精度。系统的总体能量接收率是各部分能量接收率的乘积, 需分别计算耦合系统、光纤传输系统、聚焦系统能量接收率。

单根光纤在光纤传光束两端排布位置是随机的, 因此聚焦系统能量接收率需按如图 7 所示充满光纤圆端面出射光束的平均能量接收率进行模拟计

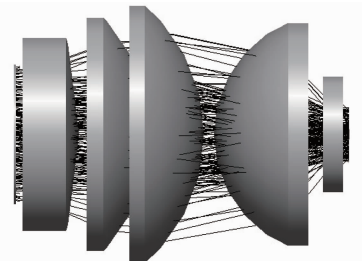


图 7 聚焦系统光线追迹图

Fig. 7 Ray tracing diagram of the focusing system

算。从图 7 中可以看出由直径为 6.2 mm 光纤束端面出射的光线均可被聚焦系统会聚到直径为 3 mm 的探测器上,模拟计算其能量接收效率为 94.8%。

综合考虑光纤端面损失、填充系数、传输损耗等,光纤传输效率约为 65%。将耦合系统导入 LightTools 软件,模拟其各视场能量接收效率。

表 1 等效通光孔径为 4 mm 时各视场系统总体能量接收效率

Table 1 Energy receiving efficiencies in various fields when the system equivalent aperture is 4 mm

Sagittal field / (°)	0	5	10	15	20	23
Efficiency in meridional 0° field / %	87.4	87.0	85.7	84.3	81.8	80.2
Efficiency in meridional 2° field / %	87.2	86.8	85.6	84.1	81.6	80.1

从表 1 中可以看出,各视场能量接收率均达到 80% 以上,超过设计目标,而且各视场能量接收率均匀,最大差异不超过 8%。该系统目前已加工装配完成,图 8 给出了系统实物图,能量接收效率测试结果与模拟分析基本一致。

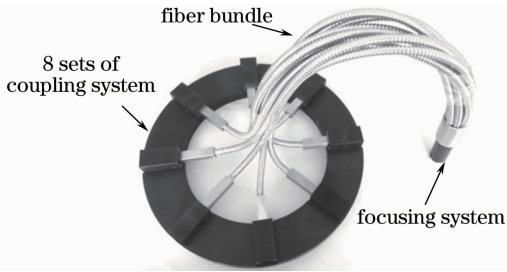


图 8 接收系统实物图

Fig. 8 Photo of the receiving system

4 结 论

引入光纤束作为集光装置,将矩形视场的入射光线转化为圆形视场的出射光线,解决了非对称视场和圆形探测器的匹配问题。基于成像光学和非成像光学相结合的方法,设计了一套仅需一个直径为 3 mm 的圆形光电探测器即可实现 360°周视探测的激光回波接收系统。软件模拟结果显示,等效通光孔径为 4 mm 时系统各视场能量接收效率不低于 80%,且最大差异不超过 8%。该系统体积小、重量轻、结构紧凑且可以折叠,符合接收系统的要求,有一定实用性。

参 考 文 献

1 Du Yongcheng, Yang Li. Attention characters of laser used for guide weapons in fine water sprays[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0402005.
 杜永成, 杨立. 制导武器激光在细水雾中的衰减特性[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402005.
 2 Chang Jun, Liu Liping, Wang Yongtian, et al.. Dual-band infrared optical system with large field-of-view and aperture[J]. Infrared Millim Waves, 2006, 25(3): 170-172.
 常军, 刘莉萍, 王涌天, 等. 大视场、大口径双波段红外非制冷

计算得到系统等效通光孔径为 4 mm 时各视场总体能量接收效率,如表 1 所示。

$$P_{total} = P_{co} \times P_{fib} \times P_{foc}, \quad (3)$$

式中 P_{co} 、 P_{fib} 、 P_{foc} 分别代表耦合系统, 光纤束及聚焦系统能量传输效率。

光学系统[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(3): 170-172.
 3 Fan Guangqiang, Liu Jianguo, Chen Zhengyi, et al.. A different absorption lidar system for tropospheric ozone monitoring[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1113001.
 范广强, 刘建国, 陈臻懿, 等. 一套测量对流层臭氧的差分吸收激光雷达系统[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1113001.
 4 Wang Tao. A novel optical system for laser panoramic fuse[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(5): 412-414.
 王涛. 一种新型激光周视引信光学系统[J]. 应用光学, 2006, 27(5): 412-414.
 5 Li Yuan, Cao Mingcui, Xu Jun, et al.. The experimental research of a novel optoelectronic detector array[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 1999, 10(1): 20-22.
 李源, 曹明翠, 徐军, 等. 新型光电探测器阵列的实验研究[J]. 光电子·激光, 1999, 10(1): 20-22.
 6 A R Hilton Sr, J McCord, W S Thompson, et al.. Infrared imaging with fiber optic bundles[C]. SPIE, 2003, 5074: 849-854.
 7 T Simon, L Jean. Advanced fiber coupling technologies for space and astronomical applications[C]. SPIE, 2004, 5578: 40-51.
 8 Zhou Dechun, Yu Fengxia, Tan Fang. Preparation and optical performance of high resolution optical fiber image bundle[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(3): 723-726.
 周德春, 于凤霞, 谭芳. 高分辨率光纤传像束的制备及其光学性能[J]. 中国激光, 2009, 36(3): 723-726.
 9 Zhou Chongxi, Liu Yinhui, Xie Weimin, et al.. Analysis and design of fiber coupled high-power laser diode array[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(11): 1296-1300.
 周崇喜, 刘银辉, 谢伟民, 等. 大功率半导体激光器阵列光束光纤耦合研究[J]. 中国激光, 2004, 31(11): 1296-1300.
 10 Zhu Hongbo, Hao Mingming, Peng Hangyu, et al.. Module of fiber coupled laser based on 808 nm single emitters combination [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502001.
 朱洪波, 郝明明, 彭航宇, 等. 基于 808 nm 半导体激光器单管合束技术的光纤耦合模块[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502001.
 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.
 12 Zhang Yimo. Applied Optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 549-554.
 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 549-554.
 13 Tan Zuojun, Chen Haiqing, Kang Jingran. Research and test of receiver module in laser fuze[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(11): 2742-2746.
 谭佐军, 陈海清, 康竟然. 激光引信接收光学组件的研究与测试[J]. 光子学报, 2009, 38(11): 2742-2746.
 14 Wei Xiaoxiao, Xu Feng, Yu Jianjun. Design of space coaxial field-bias three-mirror optical system with high resolution[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0416002.
 韦晓孝, 许峰, 俞建军. 高分辨率空间同轴偏视场三反光学系统设计[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0416002.

栏目编辑:张 腾