

大口径菲涅耳透镜远距离宽光谱聚光系统设计

文雅¹, 汪书勤¹, 李浩然¹, 徐绍伟³, 陶宇亮³, 赵星^{1,2*}, 刘伟伟^{1,2}¹南开大学现代光学研究所, 天津 300350;²天津市微尺度光学信息技术科学重点实验室, 天津 300350;³北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 针对使用光纤光谱仪探测远距离宽光谱弱信号的应用需求,基于成像光学与非成像光学的混合设计方法,设计了大口径菲涅耳透镜聚光系统。系统由直径为 1.1 m 的菲涅耳透镜、匀光棒、全反射准直器和中继透镜组组成,接收端为直径为 2 mm、数值孔径为 0.22 的光纤束。大口径菲涅耳透镜具有质轻体小的优点,解决了传统大口径透镜体积大质量大的问题。由匀光棒和全反射准直器组成的非成像光学元件后组可减小由菲涅耳透镜口径增大引起的球差和宽光谱色差,使光信号能量分布更加均匀且出射角度减小;中继透镜组进一步控制光束发散角和光斑尺寸,使光信号在光纤束端面高效率耦合,提高系统的光能利用率。仿真和实验结果均表明,所设计的后组系统能够减小像差影响,有效控制光束发散角度和光斑尺寸,提高光能利用率,满足光纤光谱仪对远距离宽光谱弱信号进行光谱探测的需要。

关键词 遥感; 光学设计; 聚光系统; 大口径菲涅耳透镜; 非成像光学理论; 光能利用率

中图分类号 TH74

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221554

1 引言

随着光谱遥感技术的快速发展,如何高效率收集光信号成为使用光纤光谱系统对远距离宽光谱弱信号进行光谱遥感探测时急需解决的关键问题。对于远距离弱信号的收集,为满足光纤光谱仪的探测灵敏度和光谱分辨率要求,需要尽可能多地收集光谱能量,减小聚光系统的会聚光斑,合理控制会聚光束角度,实现会聚光束与光谱仪输入光纤束的高效率耦合。使用传统的大口径折射或反射光学透镜可以对远距离弱光信号进行收集,但口径增大不仅会使系统的体积质量增加,还会引起光学像差的显著增大,影响光谱信号能量的收集效率。若在透镜后面引入复杂的光学后组系统来补偿像差,系统的体积和质量将进一步增大,最终影响整体系统的应用性能。另一种解决方案是采用小口径透镜阵列的聚光系统^[1],透镜口径减小,降低了每个透镜单元后组系统的设计难度,有利于系统体积质量的减小和能量收集率的提高,但透镜阵列聚光系统的加工成本高且装调难度大。相比于普通透镜,菲涅耳透镜在保留聚光能力的同时,具有质量轻、效率高、成本低的特点,作为大口径聚光透镜被广泛应用于光伏聚光系统中。然而,大口径菲涅耳透镜由于其独特的结构和工作原理,产生比普通透镜更大的球差和宽光谱

色差,难以在光纤光谱遥感系统中实现光束与光纤光谱仪的高效耦合。

为减小大口径菲涅耳透镜像差对光能量耦合的不利影响,提高光能利用率,可采用成像光学的方式开展普通后组透镜设计进行补偿,但像差补偿量过大,将导致设计结果复杂、硬件成本高。由于光谱遥感应注重光谱信号能量收集,非成像光学方法为大口径菲涅耳透镜聚光系统的设计提供了新的思路^[2]。从非成像光学理论的角度分析,成像系统中的像差问题可看作是光能量空间分布不均匀,光束发散角的改变可看作是边缘光线的控制。因此,使用光束整形器件,如匀光棒和全反射准直器,能够改善能量分布特性^[3],有效减小光束发散角^[4],改善光束特性,提升系统的光能利用率。

基于以上分析,本文提出了成像光学与非成像光学混合的聚光系统设计方法,设计了基于大口径菲涅耳透镜的远距离宽光谱聚光系统,系统由直径为 1.1 m 的菲涅耳透镜、匀光棒、全反射准直器和中继透镜组组成。由匀光棒和全反射准直器组成的非成像光学元件后组可减小大口径菲涅耳透镜像差对光束收集的不利影响,并控制光束发散角度,使中继透镜组会聚的光斑能量能够有效地与光纤束耦合。仿真和实验结果表明,聚光系统设计能够有效减小菲涅耳透镜的像差影

收稿日期: 2022-12-21; 修回日期: 2023-02-19; 录用日期: 2023-02-27; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504400)、国家自然科学基金(62075106)

通信作者: *zhaoxingtink@nankai.edu.cn

响,缩小光斑尺寸和会聚角度,提高光纤耦合效率,满足光纤光谱仪对远距离宽光谱弱信号的遥感探测需要。

2 大口径菲涅耳聚光系统的仿真优化设计

2.1 菲涅耳透镜聚光系统的设计指标

根据光丝激光雷达的技术应用需求,若要探测距离为 km 级、质量分数为 10^{-6} 级的污染物的激发光谱信号,光谱分辨率须达到 2 nm。污染物浓度低,光谱信号弱,探测距离远,且光谱范围宽(380~760 nm),因此聚光系统面对的是典型的远距离宽光谱弱信号收集问题。

综合考虑光谱信号强度和光谱仪的灵敏度,为了满足探测需求,至少需要使用 1 m 大口径菲涅耳透镜。口径增大引起的像差使得会聚光斑尺寸达到厘米级别,当其与光纤端面耦合时将会造成光能量的损失,所以光纤束端面直径不能太小,光纤数量应满足一定量的要求。同时,根据光谱仪的工作原理可知,光谱仪分辨率与狭缝宽度有关,狭缝越窄,分辨率越高,而狭缝由光纤排列而成,光纤的数量过多将会导致狭缝的宽度增大,从而引起光谱仪分辨率下降。综合考虑以上情况,聚光系统设计必须在大口径菲涅耳透镜会聚光斑尺寸和光谱仪光谱分辨率间取得平衡,最终确定采用由 37 根直径为 300 μm 的光纤合成的光纤束对光谱信号进行采集,光纤束输入端直径为 2 mm,数值孔径为 0.22。

针对研究任务技术需求,根据探测距离和目标物浓度,综合考虑光丝激发效率、菲涅耳透镜的孔径、光谱仪的光效率及光谱仪探测器的信噪比,经分析计算,菲涅耳透镜聚光系统的理论光能利用率,即耦合进入光纤束的光能量与入射至菲涅耳透镜表面光能量的比值应不低于 5.2%。

2.2 菲涅耳透镜聚光系统结构方案

菲涅耳透镜表面是由多个同心球面、非球面环带或者相互平行的棱镜面组合构成的非连续曲面,如图 1 所示。每个环带的焦距相同但彼此独立不连续,这种设计使得菲涅耳透镜在减少质量的同时,保留了聚光的特点^[5]。根据聚光系统的设计指标,并且考虑市场上大口径菲涅耳透镜的加工精度和技术成熟度,可将直径为 1.1 m、焦距为 1.3 m、数值孔径为 0.39、光束会聚角为 23° 的菲涅耳透镜货架产品作为仿真设计目标,根据其光束会聚特性进一步开展后组系统设计。

在 ZEMAX 软件中采用序列与非序列混合模式对菲涅耳透镜结构进行建模,光源为可见光波段的平行光光源,对照商品化透镜的口径和焦距参数,优化设计透镜的环距和环带面形参数,优化后的菲涅耳透镜的环距、齿半径和齿圆锥系数分别为 0.05 cm、63.79 cm



图 1 菲涅耳透镜结构图

Fig. 1 Structural diagram of Fresnel lens

和 -1.663。菲涅耳透镜会聚光斑的截面能量分布如图 2 所示,结果表明,99% 的能量会聚在半径为 1.7 cm 的范围内,说明透镜的像差较大。通过光线追迹计算光斑直接耦合进入直径为 2 mm、数值孔径为 0.22 的光纤束时的光能利用率,得到系统的光能利用率为 1.3%,无法满足 5.2% 的设计指标要求。

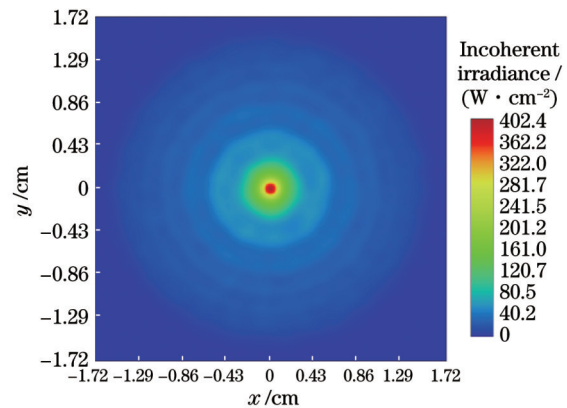


图 2 会聚光斑的截面能量分布

Fig. 2 Cross section energy distribution of focus spot

为了减小大口径菲涅耳透镜像差的影响,控制光斑尺寸和光束会聚角度,提高系统能量利用率,采用成像与非成像^[6]混合的设计方法,在菲涅耳透镜后引入了后组系统。后组系统由非成像光学器件匀光棒和全反射准直器以及成像中继透镜组构成,聚光系统整体结构如图 3 所示。

基于非成像光学理论设计的匀光棒利用光线在内部的多次反射实现光束能量均匀分布和光束整形。它能够减小大口径菲涅耳透镜会聚宽光谱光束时像差的影响,将多波长光束在入射端不规则的光斑形状转变为确定尺寸的光斑,并使光束在出射端面以不变的发散角度均匀出射^[3]。光束在匀光棒中的反射次数越多,光斑均匀性越好,但同时也出现能量衰减,研究表明,当反射次数 $N=3$ 时,效果最佳^[7]。由图 4 可得,匀光棒尺寸与反射次数的关系式为

$$N = \frac{L \tan U}{\sqrt{H^2 + W^2}}, \quad (1)$$

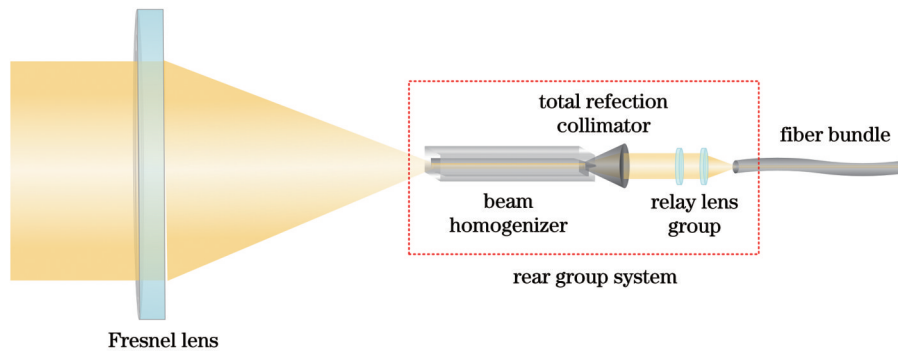


图 3 菲涅耳透镜聚光系统的结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of Fresnel lens concentrating system

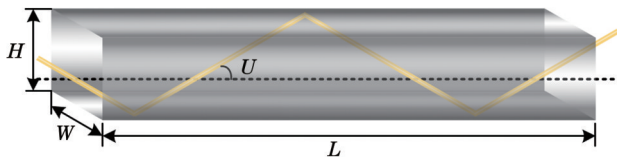


图 4 匀光棒结构图

Fig. 4 Structural diagram of beam homogenizer

式中： L 为匀光棒的长度； H 和 W 分别为匀光棒截面的长和宽； U 为光束在匀光棒内的最大入射角。

全反射准直器由全反射面和折射面构成，通过设计自由曲面^[8-9]面形结构可达到准直和配光的目的，其结构如图5所示。作为非成像光学的典型器件，由于全反射准直器的出射面积大于入射面积，根据光学扩展量守恒定律^[10]，它可在获得较高光能利用率的同时，使大角度入射光束出射后具有较小的发散角度。因此，匀光棒出射光束经过全反射准直器后光束发射角减小，经中继透镜组会聚整形，与光纤数值孔径匹配，提高了光纤耦合效率^[11]。

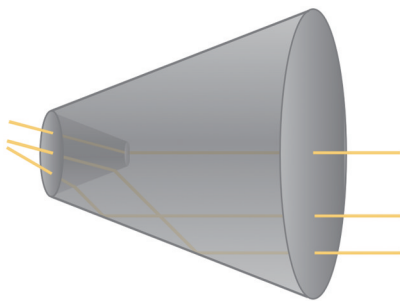


图 5 全反射准直器结构图

Fig. 5 Structural diagram of total reflection collimator

中继透镜组能借助适当的系统光焦度和放大率，进一步调控从全反射准直器出射的光束发散角以及光斑尺寸，使光束能量高效率耦合进光纤束。因此，中继透镜组可根据成像光学中的物像共轭关系进行参数设计。为保证系统结构尽可能简单，中继透镜组由两片式透镜组构成。

2.3 菲涅耳透镜聚光系统的参数设计

远距离弱信号的收集要求聚光系统的光能利用率

尽可能高，因此各个器件本身须具有较高的光能利用率，并且器件之间须形成高效率的耦合。考虑到匀光棒为中空方棒，内壁镀有高反射率膜，设计合适的长度将使光束传输时的能量损失很少。全反射准直器的出射面积和发散角度与光纤束端面面积和数值孔径只要满足物像共轭关系，优化设计后的中继透镜组也将具有较高的能量利用率。因此，全反射准直器参数的设计极其关键，要求准直器本身有较高的光能利用率，并且从准直器出射的光束发散角应尽可能小，这样才能使出射光束经中继透镜组会聚后与光纤束高效率耦合。同时，准直器设计还要兼顾出射端口径，避免中继透镜组口径过大引起体积质量增加。

事实上，上述要求对于全反射准直器的非成像光学设计和加工是极具挑战的。鉴于此，采用市场上适合的LED光束准直器^[12]货架产品作为此关键光学器件，从而有效控制成本，进行聚光系统设计方案的验证。针对前述菲涅耳透镜货架产品的会聚光束特性，测试市面上不同规格参数的全反射准直器的准直效果以及光能利用率，并且考虑系统的体积因素，最终确定全反射准直器入射端口径为6 mm，出射端口径为20 mm，从准直器出射的光束发散角为 9° ，光能利用率为36.4%。根据商品化全反射准直器的结构参数以及准直性能，在ZEMAX软件中对准直器进行建模和仿真优化，并以此作为基础，对聚光系统其他器件参数进行设计。

因为无法直接获得全反射准直器的面形参数进行建模，为简化设计过程，在ZEMAX软件中采用与全反射准直器工作原理和功能类似的复合抛物面聚光器(CPC)进行器件功能的建模仿真。与全反射准直器相比，CPC具有旋转对称的反射抛物面，结构简单，且对入射光束具有等效的边缘光线控制效果。将CPC入射和出射口径参数的初始值设置为与商品化全反射准直器一致，并根据菲涅耳透镜的光束会聚特性设置物方视场角为 23° ，以所确定的全反射准直器出射光束角度为优化目标，在ZEMAX软件序列模式下对CPC面形结构参数进行优化，最终获得具有光束准直功能的CPC器件，优化后的CPC入射端口径为6 mm，出射端

口径为 26 mm, 开口半角为 12° , 长度为 39 mm, 通过光线追迹得到光束经过 CPC 出射后的发散角减小为 11° , 基本达到了所确定的全反射准直器货架产品的准直效果, 光线模拟图如图 6 所示。尽管 CPC 优化后的结构参数与商品化的全反射准直器有所区别, 但这里主要是准直器功能的仿真, 而不是器件参数的仿真, 因此可以认为优化结果是合理的。

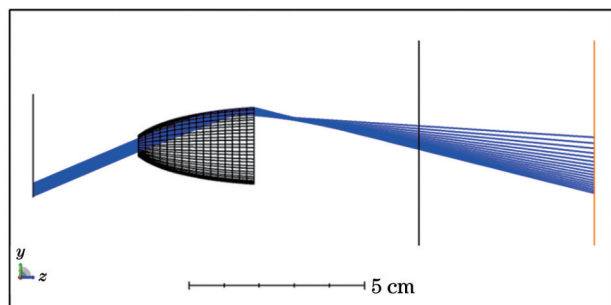


图 6 CPC 光线模拟图

Fig. 6 Light simulation diagram of CPC

对匀光棒进行结构参数设计时, 由于匀光棒出射端和 CPC 入射端直接相连, 即 $L_2=0$ mm, 为了实现器件间能量高效率的耦合, 匀光棒的截面尺寸必须与 CPC 入射端口径匹配。同时根据图 2 所示的大口径菲涅耳透镜会聚光斑的尺寸及空间能量分布, 可知其大部分能量集中在光斑中心区域。因此确定匀光棒截面尺寸为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$, 将菲涅耳透镜光束的会聚角度

表 1 菲涅耳透镜聚光系统的参数

Table 1 Parameters of Fresnel lens concentrating system

Device	Parameter	Value	Distance
Fresnel lens	Diameter	1100 mm	
	Focal length	1300 mm	
Beam homogenizer	Cross-section dimension	$4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$	$L_1=1300\text{ mm}$
	Length	40 mm	
CPC	Diameter of incident surface	6 mm	$L_2=0\text{ mm}$
	Diameter of outlet surface	26 mm	
	Length	39 mm	$L_3=13\text{ mm}$
Relay lens group	Diameter of lens 1	9 mm	
	Focal length of lens 1	12 mm	
	Diameter of lens 2	9 mm	$L_4=5\text{ mm}$
	Focal length of lens 2	20 mm	
Fiber bundle	Diameter of receiving surface	2 mm	$L_5=3\text{ mm}$
	Numerical aperture	0.22	

为验证菲涅耳透镜聚光系统的聚光效果, 在 ZEMAX 软件中建立光学系统模型, 远距离光谱信号设置为可见光波段的平行光, 系统的光线追迹仿真效果如图 8 所示。经过软件光线追迹, 得到聚光系统光能利用率为 6.5%, 能够满足 5.2% 光能利用率的设计

代入式(1), 计算得到匀光棒长度为 40 mm。

中继透镜组的设计如前所述, 可根据 CPC 出射端口径、光束发散角度以及光纤束端面直径和数值孔径, 利用成像光学的物像共轭关系进行优化。考虑到准直器出射光束中心区域能量较为集中, 综合考虑体积质量及器件的可获得性, 使用两片口径为 9 mm、焦距分别为 12 mm 和 20 mm 的单透镜货架产品作为参数设计选型, 重点对各器件间距进行优化。优化后的透镜组光线模拟如图 7 所示, 优化后两透镜表面顶点间距离为 5 mm, 第二透镜与光纤束端面之间的距离为 3 mm。

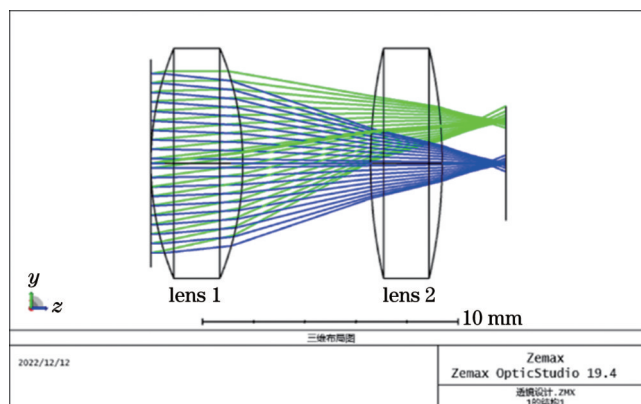


图 7 中继透镜组光线模拟图

Fig. 7 Light simulation diagram of relay lens group

2.4 菲涅耳透镜聚光系统的设计结果与仿真

根据图 3 设计的聚光系统结构参数如表 1 所示。

指标要求, 并且有后组的聚光系统的光能利用率是无后组系统的 5 倍。仿真结果表明, 基于成像光学与非成像光学混合设计方法的后组系统, 能有效减小 1.1 m 大口径菲涅耳透镜会聚宽光谱信号时像差的影响, 有效控制光束发散角和光斑尺寸, 提高了光能利用率。该仿

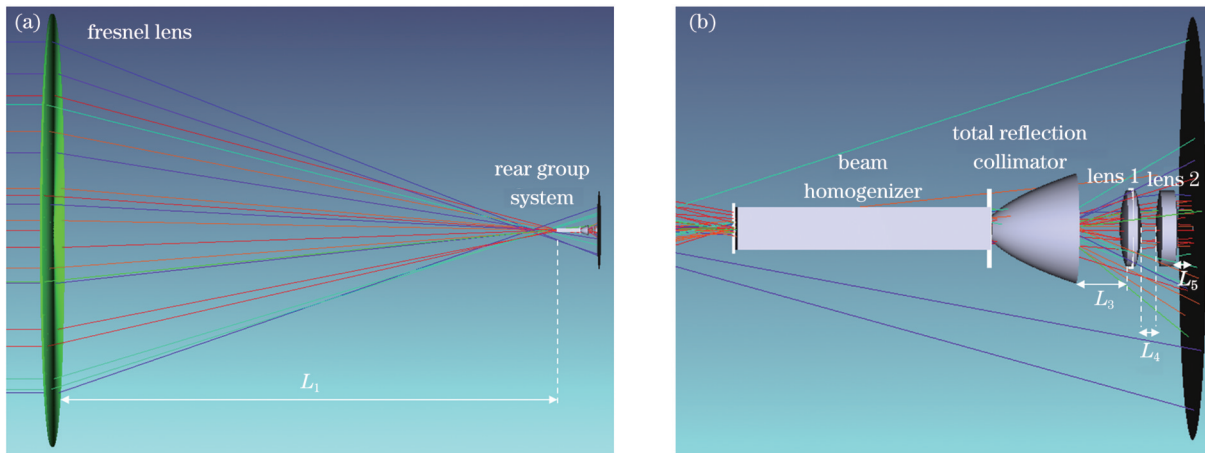


图 8 菲涅耳透镜聚光系统的光线仿真模拟图。(a)整体系统;(b)后组系统

Fig. 8 Light simulation diagrams of Fresnel lens concentrating system. (a) Overall system; (b) rear group system

真设计结果在理论上验证了所提方案在远距离宽光谱弱信号收集方面的可行性。另外,设计方案充分考虑了系统搭建的可实现性,为后续实验验证提供了可能。

3 大口径菲涅耳聚光系统原理实验

系统由两部分构成,如图 9 所示:前组系统为大口径菲涅耳透镜,考虑到加工成本以及加工工艺的可实现性,直接采购了市面上直径为 1.1 m、焦距为 1.3 m 的商品化菲涅耳透镜;后组系统由匀光棒、全反射准直

器和中继透镜组成,其中,匀光棒为根据设计参数订制的器件,全反射准直器为前述经性能测试确定的货架产品,中继透镜组由 LB1494 和 LB1212 单透镜组合而成,其直径为 9 mm,焦距分别为 12 mm 和 20 mm。采用 3D 打印方式加工了后组系统装调结构,从而将匀光棒、全反射准直器以及中继透镜组装为一个整体。实验光源为由卤素灯与可见光波段滤光片构成的可见光光源,接收端为直径为 2 mm、数值孔径为 0.22、长度为 2 m 的光纤束。

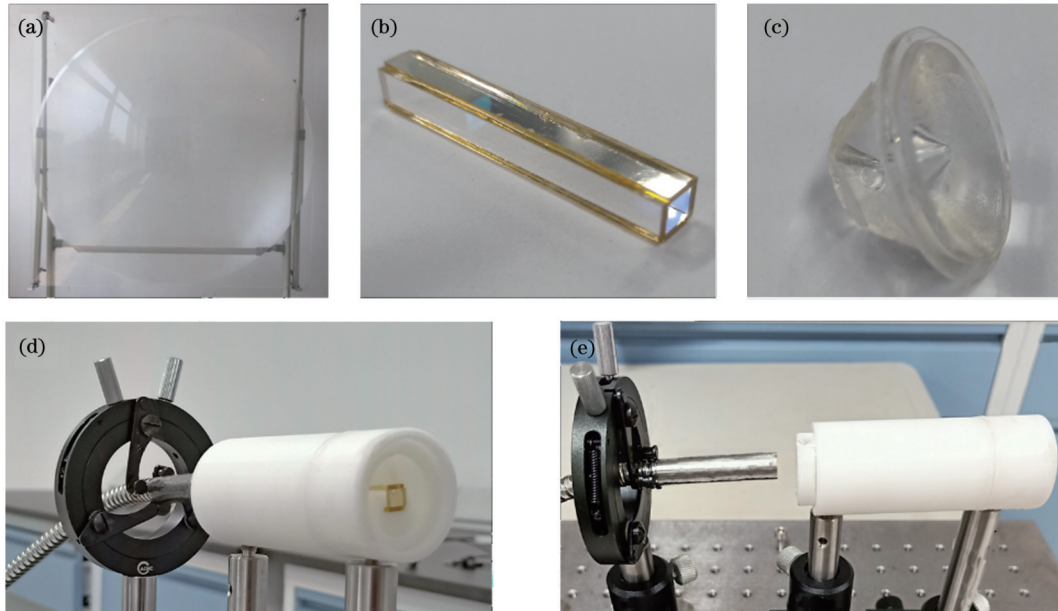


图 9 菲涅耳透镜聚光系统原理实验的器件图。(a)菲涅耳透镜;(b)匀光棒;(c)全反射准直器;(d)(e)采用 3D 打印镜筒固定的后组系统

Fig. 9 Devices of Fresnel lens concentrating system principle experiment. (a) Fresnel lens; (b) beam homogenizer; (c) total reflection collimator; (d)(e) rear group system fixed with 3D printed lens tube

3.1 菲涅耳透镜的光学特性分析

为评估商品化菲涅耳透镜能否作为选型结果搭建实验系统,需要对菲涅耳透镜的光学特性进行分析。首先测量菲涅耳透镜透过率,将光源沿光轴置于菲涅

耳透镜前方,用功率计测量入射到透镜表面的总能量和透射的总能量,即可算出菲涅耳透镜的透过率。由于透镜孔径较大,无法直接对全口径进行测量,故以菲涅耳透镜 0.5 孔径(R)位置为界,将菲涅耳透镜分成

图 10 所示的圆形和环形两部分。在水平和垂直方向上的 0.25 孔径和 0.75 孔径位置处,依次测量图 10 中各点的能量透过率,将 0.25 孔径和 0.75 孔径位置处的平均透过率分别视作圆形区域和环形区域的能量透过

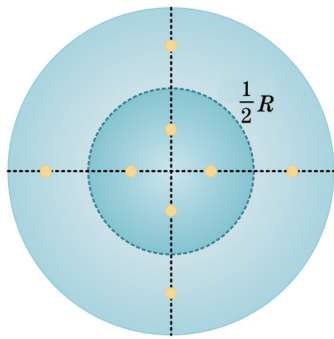


图 10 大口径菲涅耳透镜光能利用率的测量方法示意图
Fig. 10 Schematic of measurement method of light energy utilization efficiency of large aperture Fresnel lens

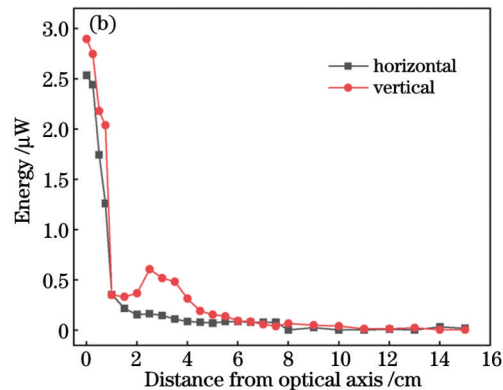
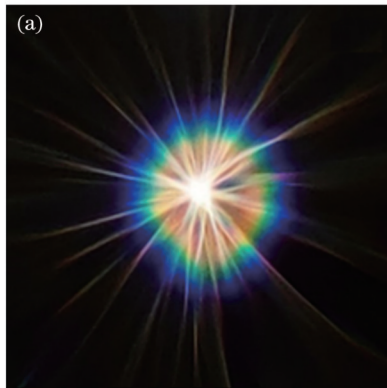


图 11 菲涅耳透镜会聚光斑以及相应的光斑能量分布。(a)距离菲涅耳透镜 131.5 cm 处的会聚光斑;(b)会聚光斑能量分布
Fig. 11 Focal spot of Fresnel lens and corresponding spot energy distribution. (a) Focal spot at 131.5 cm from Fresnel lens; (b) focal spot energy distribution

综合以上分析,商品化菲涅耳透镜的光学特性与理论设计的菲涅耳透镜接近,可以作为器件选型结果搭建原理实验系统。

3.2 聚光系统的光能利用率

为方便测量聚光系统收集光信号的效率,将系统光能利用率分解为菲涅耳透镜光能利用率和后组光能利用率。菲涅耳透镜光能利用率定义为菲涅耳透镜表面透射总能量与入射到菲涅耳表面总能量之比,即菲涅耳透镜透过率。根据 3.1 节中菲涅耳透镜透过率测量结果,得到菲涅耳透镜光能利用率为 94%。

后组光能利用率为光纤束出射端总能量与菲涅耳透镜会聚光斑总能量之比。将后组系统作为一个整体安装在距离菲涅耳透镜 131.5 cm 处,考虑到实验中使用的全反射准直器和建模仿真使用的 CPC 不完全一致,在系统仿真参数的基础上,将全反射准直器、透镜组以及光纤束之间的相对位置调整为 6、5、9 mm,使中继透镜组聚焦的光束会聚角满足光纤束数值孔径的要求,同时光斑尺寸尽可能小,便于获得最佳的光纤束能

率,再以两部分面积与总面积的比值作为权重,求得菲涅耳透镜的光能利用率。根据此方法实验测得菲涅耳透镜的透过率为 94.0%。

然后对菲涅耳透镜聚光特性进行分析。使用菲涅耳透镜对 100 m 远处的可见光光源进行光束收集,距离菲涅耳透镜 131.5 cm 处会聚光斑的直径最小且近似为圆形,如图 11(a) 所示,可见大口径引起的球差和色差影响显著,且由于透镜环带对光束的衍射作用,光斑周围出现放射状能量分布。在会聚光斑所在平面,沿水平以及竖直方向对光斑能量分布进行测量,得到的能量分布图如图 11(b) 所示,会聚光斑能量基本分布在距离光轴 1 cm 范围内,可以认为光斑能量分布较为集中。另外,测量了 400、532、633 nm 波长下商品化菲涅耳透镜会聚光斑的能量最大位置,实验测量结果与理论设计结果基本一致,最大误差不超过 0.5%。

量耦合收集效果。多次实验测得后组系统的平均光能利用率为 4.0%。

综上,实验测得的聚光系统整体光能利用率为 3.8%,与仿真系统 6.5% 的光能利用率相比,实验搭建的聚光系统的光能利用率较低。对实验结果进行分析可知:这主要是由于实验使用的光源特性与理论仿真不一致,实验中使用的光源能量分布不均匀,而仿真计算采用的是入射波长均匀分布的能量,可见光波段内实验光源的有效光能量约为理论仿真光源的 67%;其次,仿真软件不考虑器件的吸收和散射,菲涅耳透镜透过率为 100%,而商品化菲涅耳透镜实测透过率为 94%;另外,仿真中匀光棒反射率根据厂家提供的参数设置为 98%,而实验测得匀光棒反射率为 92.7%。综合考虑以上误差,聚光系统光能利用率的理论计算结果为 3.9%,加之实验中还存在准直器与仿真结构参数不一致的影响,可以认为实验测得的 3.8% 聚光系统光能利用率是合理的。

为验证菲涅耳聚光系统后组设计方案的可行性,

本文进行了无后组聚光系统的实验对比。当菲涅耳透镜会聚光斑直接耦合进光纤时,光能利用率仅为 1.8%。实验结果表明,使用大口径菲涅耳透镜聚光系统收集远距离宽光谱信号时,基于成像与非成像光学混合设计方法构建后组系统实现信号有效收集是可行有效的,这为后续样机系统研制提供了重要的理论支撑。

4 结 论

采用成像与非成像光学混合理论对大口径菲涅耳透镜聚光系统展开设计研究。基于成像方式设计的大口径菲涅耳透镜弥补了传统大口径透镜体积质量大的缺点,能够对远距离宽光谱弱信号进行收集。而基于成像与非成像光学混合理论设计的由匀光棒、全反射准直器以及中继透镜组成的后组系统,可以对菲涅耳透镜会聚的光束进行整形,减小大口径菲涅耳透镜收集会聚宽光谱信号时像差的不利影响,从而提高了聚光系统的光能利用率。在 ZEMAX 软件中对聚光系统进行了建模仿真,得到系统光能利用率为 6.5%。根据器件选型搭建了实验系统,测得含有后组系统的菲涅耳透镜聚光系统的光能利用率为 3.8%。由于加工成本以及加工工艺的限制,实验中器件参数以及光源特性分布与仿真不一致,因此实验结果未能完全达到预期技术指标。但通过对实验误差进行分析,可认为实验结果基本合理。后续将在样机系统研制过程中,通过定制加工相关器件和完善实验条件来减小实验误差。

综上所述,大口径菲涅耳透镜聚光系统的理论设计和实验测试证明了基于成像与非成像光学混合理论的菲涅耳聚光系统设计方案的可行性。设计的后组系统能够有效控制会聚光束的发散角和光斑尺寸,实现光纤束端面的高效率耦合,提高了光丝激光雷达远距激发宽光谱荧光信号的光能收集效率。

参 考 文 献

- [1] 薛丹,涂洁磊,白红艳,等. 模块化多焦点式和环面聚焦式菲涅耳透镜的设计及光学性能分析[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2015, 35(5): 8-11.

- Xue D, Tu J L, Bai H Y, et al. Design and optical performance analysis of the modularity multi focus type Fresnel lens and ring surface focusing type Fresnel lens[J]. Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition), 2015, 35(5): 8-11.
- [2] 缪莹莹. 基于 LED 照明的 DLP 投影显示系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- Miao Y Y. Research on DLP projection display system based on LED lighting[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [3] 吕勇, 郑臻荣. 方棒照明系统的光学扩展量传递分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(6): 569-571.
- Lü Y, Zheng Z R. Analysis for optical extend in light-pipe illumination system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(6): 569-571.
- [4] 刘国强. 基于自由曲面的 LED 光源二次光学设计研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- Liu G Q. Research on second optical design of LED light source based on free form surface[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [5] 周海波. 多焦点菲涅耳透镜阵列的设计与性能分析[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- Zhou H B. Design and performance analysis of multi-focus Fresnel lens array[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015.
- [6] Gimenez-Benitez P, Minano J C, Blen J, et al. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions[J]. Optical Engineering, 2004, 43(7): 1489-1502.
- [7] 董辉, 张运方, 李慧, 等. 新型激光投影显示方棒照明系统的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1): 012202.
- Dong H, Zhang Y F, Li H, et al. Light pipe illumination system design for new laser projection display[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(1): 012202.
- [8] Feng Z X, Cheng D W, Wang Y T. Iterative freeform lens design for optical field control[J]. Photonics Research, 2021, 9(9): 1775-1783.
- [9] Cheng D W, Chen H L, Yang T, et al. Optical design of a compact and high-transmittance compressive sensing imaging system enabled by freeform optics[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(11): 112202.
- [10] 郝翔. 基于自由曲面的 LED 照明系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- Hao X. Study on the design of LED illumination system based on freeform surface[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [11] 李敏. 基于 LED 扩展光源的自由曲面透镜设计研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2015.
- Li M. Study on freeform lens design for LED extended sources[D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2015.
- [12] Huang C H, Cheng Y T, Tsao Y C, et al. Micro-LED backlight module by deep reinforcement learning and micro-macro-hybrid environment control agent[J]. Photonics Research, 2022, 10(2): 269-279.

Design of Long-Distance Wide-Spectrum Condensing System with Large Aperture Fresnel Lens

Wen Ya¹, Wang Shuqin¹, Li Haoran¹, Xu Shaowei³, Tao Yuliang³, Zhao Xing^{1,2*}, Liu Weiwei^{1,2}

¹Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China;

²Tianjin Key Laboratory of Micro-scale Optical Information Science and Technology, Tianjin 300350, China;

³Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China

Abstract

Objective To meet the requirements for using an optical fiber spectrometer to detect weak signals over long distances and across a wide spectrum, and considering the sensitivity of the spectrometer, a large aperture optical system is needed so that sufficient optical

signals can be obtained. In addition, the aperture of the receiving surface of the optical fiber bundle is small, making it difficult for the lens to match the numerical aperture of the optical fiber bundle. Therefore, the focal spot size and convergence angle should be as small as possible to efficiently couple optical signals into the optical fiber bundle and improve energy utilization efficiency. The traditional design of an optical system based on imaging optics increases the weight and volume of the system, ultimately affecting the overall performance of system. Therefore, determining the size of the spot and angle of beam convergence is crucial for improving the system's light energy utilization efficiency.

Methods A large aperture Fresnel lens condensing system is designed based on a hybrid design method of imaging and non-imaging optics. The system consists of a 1.1-m-diameter Fresnel lens, a beam homogenizer, a total reflection collimator, and a relay lens group. The receiving surface is a fiber bundle with a diameter of 2 mm and a numerical aperture of 0.22. The problem of traditional large aperture lenses' large volume and weight is solved using large aperture Fresnel lenses. To achieve uniform energy distribution and reduce the convergence angle of the light bundle, the rear group of non-imaging optical elements, composed of a beam homogenizer and a total reflection collimator, are designed to reduce the spherical and chromatic aberrations of large aperture Fresnel lenses. The relay lens group also controls the beam divergence angle and spot size, allowing the optical signal to be efficiently coupled into the optical fiber and improving the light energy utilization efficiency of the system.

Results and Discussions First, a large aperture Fresnel lens condensing system based on imaging and non-imaging optics is designed (Fig. 2). Subsequently, the optical device is modeled and designed using the ZEMAX software, and the overall parameters of the condensing system are achieved (Table 1). The optical system model is established in ZEMAX software to verify the focusing performance of the Fresnel lens condensing system, and simulation results are obtained (Fig. 8). The light energy utilization efficiency of the condensing system is 6.5% according to ray tracing, and the light energy utilization efficiency of the condensing system with a rear group is five times that of the system without a rear group. In addition, the experimental system is built based on the condensing system's design results (Fig. 9). The experimental light energy utilization efficiency of the condensing system is 3.8%, which is lower than the simulation results. This is because the experimental device parameters and spectral power distribution of the light source are inconsistent with the theoretical simulation. In contrast, the light energy utilization efficiency of the Fresnel lens condensing system without the rear group is only 1.8%. The simulation and experimental results indicate that the rear group system based on the hybrid design method of imaging and non-imaging optics can effectively improve the light energy utilization efficiency of the Fresnel lens condensing system.

Conclusions In this study, based on the hybrid theory of imaging and non-imaging optics, the large aperture Fresnel lens condensing system is examined, and the design scheme of the rear group system composed of a beam homogenizer, total reflection collimator, and relay lens group is devised. Through the simulation and optimization by ZEMAX software, a theoretical light energy utilization efficiency of 6.5% is obtained for the system. The experimental system is built based on the design results. The light energy utilization efficiency of the Fresnel lens condensing system with the rear group is 3.8%, which is 2.1 times that of the system without the rear group. Given that the experimental device parameters are not completely consistent with the theoretical simulation parameters, the experimental result is essentially reasonable. The theoretical simulation and experimental test prove that the rear group can reduce the influence of aberration, and control the spot size and the convergence angle. The hybrid design method efficiently couples the optical signal into the optical fiber bundle, allowing for the detection of weak signals over long distances and across a wide spectrum.

Key words remote sensing; optical design; concentrating system; large aperture Fresnel lens; non-imaging optical theory; light energy utilization efficiency