

离轴三反光纤阵列激光三维成像发射系统

侯佳,何志平,舒嵘

(中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院空间主动光电技术重点实验室,上海 200083)

摘要: 离轴三反光纤阵列激光三维成像发射系统中,大功率激光器发出的激光经阵列光纤分束,由光纤的芯径和单元发散角计算离轴三反光学系统的焦距,由光纤的数值孔径确定系统的入瞳直径范围,光纤阵列的长度决定了光学系统的发射总视场。离轴三反光学系统采用正向设计、反向使用的思路,将光纤阵列置于离轴三反光学系统焦面位置,反向追迹光线,可以得到光纤阵列上各元激光经光学系统后的高斯光束发散角大小和相邻元之间的角度关系。文中的设计实例实现了 51 元激光,每一元以 $20\ \mu\text{rad}$ 的较小发散角出射,实例表明,该发射系统能实现多元激光微弧度量级的发散角出射,在目标面上形成间隔均匀、圆对称性良好的足印光斑。该发射系统在设计的发射总视场内,理论上不存在波束数的限制,这是区别于其他发射系统的另一优势。

关键词: 激光三维成像; 准直系统; 离轴三反; 光纤阵列

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0406001

Emitting system of fiber-array 3D laser imaging using off-axis three-mirror system

Hou Jia, He Zhiping, Shu Rong

(Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A novel emitting system of fiber-array 3D laser imaging using off-axis three-mirror system was proposed. High-power laser was split to certain number of beams by fiber splitting and output with fiber-array. The off-axis three-mirror was designed as normal telescope system, and its focus length was the divergence angle divided by the core diameter of the fiber, while the F number in image space was determined by the Numerical Aperture (NA) of the fiber. The total field of view was the focus length divided by the length of the fiber-array. The fiber-array was set on the focus plane of the off-axis three-mirror system, and rays were traced in the opposite way of design. The example system realized divergence angle as $20\ \mu\text{rad}$ of 51 fiber beams, and it showed that the divergence angle of every fiber beam satisfied the target value well and the footprint between the neighbouring beams has good uniformity on the target surface. Besides, this emitting system was suitable for any number of laser beams within the total design field of view.

Key words: 3D laser imaging; emitting system; off-axis three-mirror system; fiber-array

收稿日期:2015-08-05; 修订日期:2015-09-03

基金项目:国家自然科学基金(21105109)

作者简介:侯佳(1985-),女,助理研究员,博士,主要从事激光雷达方面的研究。Email:houlia@mail.sitp.ac.cn

0 引言

激光三维成像被广泛地用于各种军事和民用领域,例如:GIS数据采集、城市高分辨率三维地形图获取、灾害调查和评估、交通困难地区(海岸、滩涂、湿地)的地形测绘、森林树高和林木蓄积量测定、海洋测深和海图绘制、冰川调查、反潜、军事目标识别、多传感器制导、机场跑道破坏估计等领域^[1]。目前,绝大多数的激光三维成像系统均采用激光光束的扫描探测方式,通过平面转镜、平面摆镜、多面镜等的运动控制激光束有规律地对地扫描并探测激光回波^[2]。扫描式三维成像起步较早、技术比较成熟,主要有中国的ASLRIS系统^[3-4]、美国的SHOALS系统^[5]以及日本的Nakanihon系统。但是扫描式激光三维成像的重要缺陷在于:每次只能成像一个点,为了得到高的覆盖率,需要激光的重复频率至少在10 kHz的数量级以上^[1],为了达到与实际相符的刈宽,需要激光沿穿轨方向扫描,扫描时的机械磨损、震动会破坏波束指向精度,最终影响定位准确度;光机扫描要增加重量、体积和能耗,使得其技术发展难以在太空中得以运用。

随着激光探测技术尤其是阵列探测技术的发展,人们开始关注非扫描的机载激光成像工作模式,采用具有较高激光功率、脉冲重复频率不太高的激光器,仅仅利用飞行器的飞行作一维扫描,通过激光束的分束发射和阵列探测,实现一行多点的瞬时信息获取,达到推帚式激光三维成像的目的。推帚式成像技术只由飞机飞行带动激光束发射装置进行一维扫描,相对扫描成像而言减去了扫描工作方式时的机械磨损、震动,提高了定位准确度,同时还减轻了成像系统重量、体积、能耗^[6]。目前,激光扫描三维成像技术还处于起步阶段,推帚激光成像的前提条件是大功率激光的多波束分束并行发射。并行发射要求每一元激光以相同的发散角出射,在地面形成大小相等的光斑,并光斑与光斑之间的间距是相等的。中国的863推帚式激光三维成像雷达系统采用先扩束再分束的发射装置,激光器发射的激光经扩束至一定发散角以后照射至透射式的衍射光栅进行分束,通过设置衍射光栅的参数能实现不同波束以及不同夹角的分光;现有广泛使用的还有激光耦合进

入光纤,采用光纤阵列分束、非球面微透镜阵列准直扩束的方式^[7]。以上两种方法都存在压缩发散角和波束的限制,衍射光栅的方案小的发散角必然导致光栅面积的增大,多的波束导致光栅刻线稀疏;非球面微透镜方案小的发散角导致单透镜焦距的增长以及口径的增大,多的波束直接导致透镜阵列面积的增大,这都增大了实现的难度;而且衍射光栅和非球面微透镜阵列的制作工艺较繁琐,制作成本较高。文中提出了一种全新的基于离轴三反的光纤阵列激光三维成像发射系统,大功率激光器发出的激光经阵列光纤分束,由光纤的芯径和单元发散角计算离轴三反光学系统的焦距,由光纤的数值孔径确定系统的入瞳直径范围,光纤阵列的长度决定了光学系统的发射总视场。离轴三反光学系统采用正向设计、反向使用的思路,将光纤阵列置于离轴三反光学系统焦面位置,反向追迹光线,可以得到光纤阵列上各元激光经光学系统后的发散角大小和相邻元之间角度正切值的均匀性,该方法可以将激光的发散角压缩至微弧度的量级,在发射总视场内系统不受波束数的限制,并且离轴三反光学系统的加工、装调技术已经比较成熟,该发射系统在工艺上具有很好的可实现性。

1 系统参数确定

基于离轴三反的光纤阵列激光三维成像发射系统,发射用离轴三反光学系统采取正向设计、反向使用的思路。发射光纤阵列置于三反望远镜的焦面上,光纤阵列发出的激光依次经过离轴三反的三镜、次镜和主镜反射后以设定的发散角出射,每一元激光具有相同的出射发散角,相邻元之间夹角满足正切值相等,使其在目标面上形成大小相等、间距均匀的足印光斑分布。

设计上,离轴三反光学系统采取正向设计、反向使用的思路。根据发射光纤的芯径 d 和单元发散角 α ,计算出离轴三反系统的焦距 f ,如公式(1)所示。

$$f=d/\alpha \quad (1)$$

若光纤的数值孔径为 NA ,为了提高系统能量的利用率,对无穷远成像设计的离轴三反系统的像方数值孔径要大于光纤数值孔径,即 $\frac{1}{2F}>NA$,需要使系统的 F 数满足 $F<\frac{1}{2NA}$ 。进而确定离轴三反的光学口径 D 需要满足公式(2)。

$$D > 2NAf = 2NA \frac{d}{\alpha} \quad (2)$$

系统的总视场确定了光纤阵列的总长度,若系统的总视场为 θ ,那么光纤阵列的宽度为公式(3)所示。

$$L = 2f \tan(\theta/2) = 2 \frac{d}{\alpha} \tan(\theta/2) \quad (3)$$

根据以上所述的系统参数,可以设计出对无穷远成像的三反望远镜系统。为了激光能量的高效率利用,离轴三反望远镜设计时严格地实现像方远心(远心度小于 0.05°),并且为了使相邻元激光出射夹角正切值相等、光斑足印在目标面上实现均匀等间距的分布,离轴三反光学系统需严格控制畸变。尽可能地提高系统的成像质量,光学系统的波前误差达到衍射极限对于提高发射系统单元光束的质量、使每一元的发散角控制在设计指标理论值以内有非常重要的意义。

2 离轴三反设计

离轴三反光学系统因其无中心遮拦、无色差、调制传递函数(MTF)较高等优点被广泛地用于空间光学系统中。它是在对同轴三反射式光学系统初始结构的参数求解的基础上,将光学系统的光阑、视场离轴或者镜面倾斜,以避免镜面遮拦而得到的^[9]。所以,设计时首先要得出同轴三反射式光学系统的八个初始结构参数,即三个曲率半径、两个间隔和三个二次非球面系数。同轴三反光学系统的初始结构如图 1

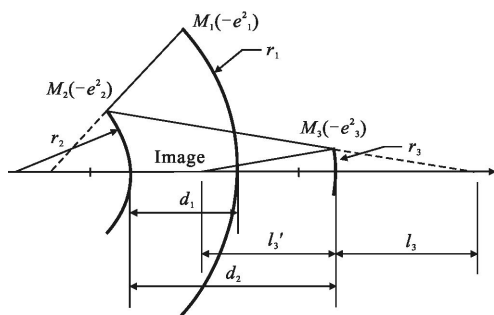


图 1 同轴三反初始结构

Fig.1 Initial configuration of the co-axial three-mirror system

所示, M_1, M_2, M_3 分别代表主镜、次镜和三镜,其顶点处的曲率半径分别为 r_1, r_2, r_3 , 主镜到次镜的距离 d_1 ,次镜到三镜的距离 d_2 ,三个反射面的二次非球面系数分别为 $-e_1^2, -e_2^2, -e_3^2$ 。设主、次、三镜的半口径分

别为 h_1, h_2, h_3 ,主镜的焦距为 f_1' ,次镜顶点到主镜焦点的距离为 l_2 ,次镜顶点到主、次两反射镜顶点的距离为 l_2' ,三镜顶点到主、次两反射镜顶点的距离 l_3 ,三镜顶点到三反镜系统焦点的距离为 l_3' 。根据近轴光学理论公式可求解出 r_1, r_2, r_3, d_1, d_2 , 利用系统初级像差球差 S_1 、彗差 S_{II} 、像散 S_{III} 公式,可求出系统三个反射面的非球面系数 $-e_1^2, -e_2^2, -e_3^2$ ^[9]。

离轴三反光学系统的设计通常是将计算好的同轴对称光学系统偏轴使用,一种方法是将光阑放在次镜上,通过视场倾斜来避免中心遮拦问题,光阑不离轴;第二种方法是将光阑置于主镜上,光阑离轴,经过优化以满足像质要求。设计时,为了实现系统较好的像方远心度,文中采用第二种方法,将同轴三反系统的主镜设为孔径光阑,光阑离轴,并且设置视场倾斜,再进行多次优化,直至完全消除中心遮拦,然后用软件优化设计至系统像质满足要求为止。

3 设计实例分析

根据上述的离轴三反光学系统设计以及发射系统参数确定方法,设计了一种用于光纤阵列激光三维成像阵列激光发射的光学系统,其具体参数如下表 1 所示。

表 1 发射系统参数

Tab.1 Parameters of the emitting system

Item	Fiber core diameter / μm	Fiber NA	Divergence angle/ μrad	Field of view/mrad	Fiber number
Value	20	0.08	20 ± 5	20	51

根据公式(1)可以计算出离轴三反系统的焦距为 $f=1\ 000\ \text{mm}$ 。光纤的数值孔径为 $NA=0.08$,为了提高系统能量的利用率,离轴三反系统的像方数值孔径要大于 0.08 ,即 $\frac{1}{2F} > 0.08$,需要 $F < 6.25$,即需要光学系统的入瞳口径 $D > 160\ \text{mm}$,现取 $F=5, D=200\ \text{mm}$ 。若系统的总视场为 $20\ \text{mrad}$,那么根据公式(3)可以计算光纤阵列的宽度为 $20\ \text{mm}$ 。根据以上的系统参数,最终设计的离轴三反发射系统如图 2 所示。图中,4、3、2、1 分别为主镜、次镜、三镜和光纤阵列,其中主镜为 8 次非球面,次镜和三镜皆为二次非球面。离轴三反系统在 $1\ 064\ \text{nm}$ 波段对无穷远成像的点列图、传递函数分别如图 3 和图 4 所示,其各

视场的远心度如表 2 所示。可见,正向设计的离轴三反系统的成像质量达到衍射极限,各个视场像方远心度优于 0.05° ,接近严格意义上的像方远心。

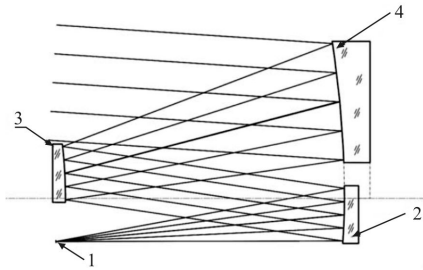


图 2 离轴三反发射系统示意图

Fig.2 Sketch of the off-axis three-mirror emitting system

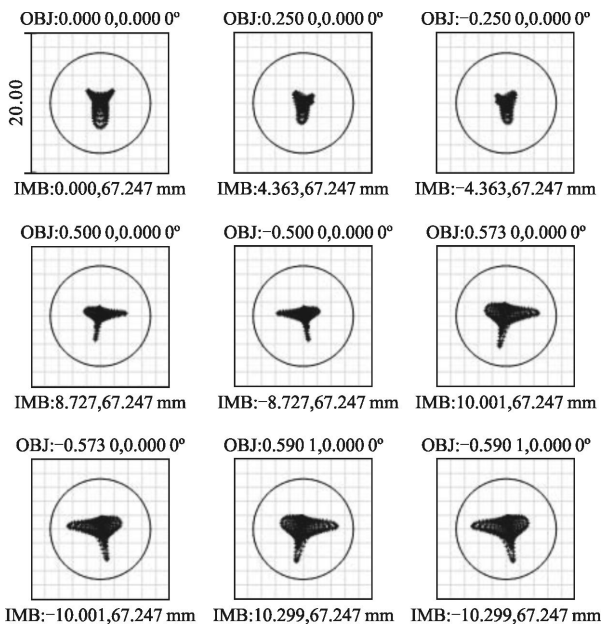


图 3 各视场点列图

Fig.3 Spot diagram of every field of view

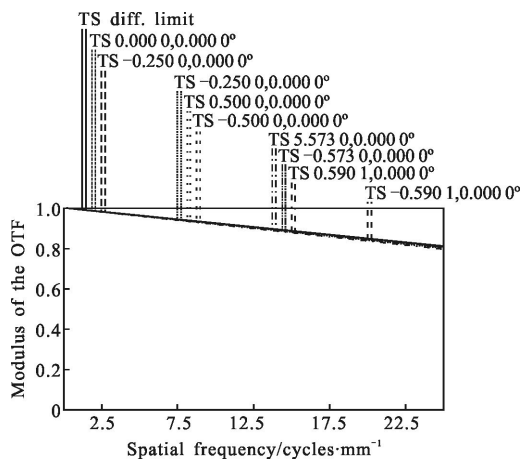


图 4 各视场的传递函数曲线

Fig.4 MTF curves of different field of view

表 2 各视场的远心度

Tab.2 Telecentric angle of different field of view

Normalized field of view	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Chief ray angle/(°)	0.002	0.009	0.017	0.026	0.034	0.043

对上述系统进行反向的光线追迹,即将光纤阵列置于离轴三反系统的焦面位置,并且保持光纤阵列与离轴三反系统之间的角度关系以保证出射光线的物方远心。对位于光纤阵列上不同视场位置出射的激光在离轴三反系统里进行反向地光线追迹,可以得到各归一化视场位置出射激光经主镜出射以后的发射角如图 5 所示。光纤阵列上各元激光经三反系统后发散角在 $20 \pm 0.4 \mu\text{rad}$,符合系统的设计指标。并且由表 3 可以看出,在 500 km 的轨道高度,各元激光在地面上

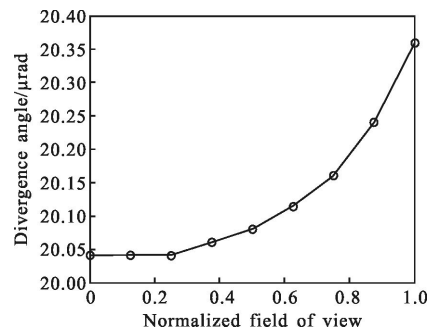


图 5 各视场的发散角

Fig.5 Divergence angle of different field of view

表 3 不同视场处的足印位置偏差

Tab.3 Position deviation of footprint of different field of view

Fiber height /mm	Ideal center of footprint/mm	Real center of footprint/mm	Deviation/mm
0	0	0	0
1.25	625 000	625 032	32
2.5	1 250 000	1 250 060	60
3.75	1 875 000	1 875 082	82
5	2 500 000	2 500 094	94
6.25	3 125 000	3 125 093	93
7.5	3 750 000	3 750 075	75
8.75	4 375 000	4 375 036	36
10	5 000 000	4 999 975	-25

的足印光斑的中心位置具有较好的均匀性,表中所有数据单位为毫米。以中心一元激光作为基准,各元激光光斑的中心位置与理论均匀间隔的最大偏差量为94 mm,仅为光斑直径的0.94%,可见该发射系统达到了各元激光以相同的小发散角出射、相邻元激光之间具有均匀的发射间隔的要求。

4 结论

文中提出了基于离轴三反的光纤阵列激光离轴三反发射系统的设计步骤,并且针对特定的应用实例进行了激光三维成像发射系统的设计和分析。最后的结果表明,基于离轴三反的光纤阵列激光三维成像发射系统能实现微弧度量级的阵列激光准直扩束发射,在目标面上形成圆对称性好、光斑大小一致性好、分布间隔均匀的足印光斑,并且与传统先扩束、后衍射光栅分束的方案和非球面微透镜阵列扩束的方案相比,此系统能达到更小的发散角、更好的光斑均匀性以及更好的能量均匀性,在发射的总视场内该发射系统不受波束数的限制,更能满足越来越高分辨率的星载激光三维成像系统的应用需求,具有更广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] Chen Yuwei. Analysis on airborne push-broom scanning laser ranging-imager sensor [J]. *Infrared*, 2003, 10: 1-5. (in Chinese)
陈育伟. 机载推帚式激光扫描成像系统的分析 [J]. 红外, 2003, 10: 1-5.
- [2] Shu Rong, Zhao Shuhua, Xue Yongqi. Study on multi-source data acquisition in airborne scanning laser ranging-imager sensor [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(2): 92-95. (in Chinese)
舒嵘, 赵淑华, 薛永祺. 激光测距-成像组合扫描仪多源数据收集技术的研究[J]. 遥感学报, 2002, 6(2): 92-95.
- [3] Shu Rong, Hu Yihua, Xue Yongqi. Scanning modes of an airborne scanning laser ranging-imager sensor [C]//SPIE, 2000, 4130: 760-767.
- [4] Hu Yihua, Shu Rong, Xue Yongqi. Improving the quantification of georeferenced images in the airborne scanning laser ranging-imaging sensor (ASLRIS) [C]//SPIE, 2000, 4130: 13-20.
- [5] Paul E LaRocque, John R Banic, A Grant Cunningham. Design description and field testing of the SHOALS-1000 Tairborne bathymeter[C]//SPIE, 2004, 5412: 162-184.
- [6] He Min, Hu Yihua, Zhao Nanxiang, et al. Application of airborne three-dimensional laser imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(3): 43-49. (in Chinese)
贺敏, 胡以华, 赵楠翔, 等. 机载激光三维成像技术应用现状[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(3): 43-49.
- [7] Zhou Chongxi, Du Chunlei. Optical design of collimating and focusing optical system for semiconductor laser diode array [J]. *Optical Instruments*, 2000, 22(6): 25-29.
周崇喜, 杜春雷. 半导体激光器阵列光束准直和聚焦系统设计[J]. 光学仪器, 2000, 22(6): 25-29.
- [8] Zhang Liang, An Yuan, Jin Guang. Optical design of uncoaxial three-mirror system with wide field of view and long focal length[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 278-280. (in Chinese)
张亮, 安源, 金光. 大视场、长焦距离轴三反射镜光学系统的设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 278-280.
- [9] Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surface [M]. Suzhou: Press of Suzhou University, 2004. (in Chinese)
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检测[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.