

引用格式: GAO Long, LI Xianjie, AN Chao, et al. Synthetic Aperture Imaging Lidar Transceiver Optical System Based on Microlens Array[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(11):1111002

高龙,李显杰,安超,等.微透镜阵列的合成孔径成像激光雷达收发光学系统[J].光子学报,2023,52(11):1111002

微透镜阵列的合成孔径成像激光雷达 收发光学系统

高龙¹,李显杰¹,安超¹,欧宗耀¹,王佩斯²,宋子奇²,陶宇亮¹,吴谨²

(1 中国空间技术研究院北京空间机电研究所,北京 100094)

(2 中国科学院空天信息创新研究院,北京 100094)

摘要:为解决合成孔径成像激光雷达受制于相干天线定理的问题,扩大成像视场,提高相干收发光学系统效率,提出并研制了基于 4×4 尾纤式微透镜阵列接收的相干收发光学系统,建立了全视场光学系统耦合效率计算模型,完成了高精度的收发光学系统集成装调及系统光学效率测试。结果表明:发射链路与16路接收链路的光轴最优偏差优于 $4''$,中心视场光学系统效率优于73.1%,全视场光学系统效率优于65.5%,可满足激光雷达成像试验要求。

关键词:合成孔径成像激光雷达;收发光学系统;微透镜阵列;全视场;光轴偏差;耦合效率

中图分类号:TN256;TN249

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235211.1111002

0 引言

合成孔径成像激光雷达(Synthetic Aperture Imaging Lidar, SAIL)是激光技术和合成孔径技术的结合^[1-2]。与传统激光成像雷达相比,SAIL的分辨率在距离向上有很好的 consistency,分辨率不会由于作用距离的增大而变差^[3-6];与传统合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)相比,SAIL的工作波长更短,可以得到比SAR分辨率高得多的图像(分辨率可达毫米量级,甚至微米量级),该技术是目前能够在远距离获取厘米量级分辨率的唯一光学成像观测手段。因此,SAIL以其独有的优越性在战场环境、海上舰船、以及特殊目标活动等领域具有重要的应用价值^[7-8]。另外,由于合成孔径成像激光雷达具有全天时、高精度等特点,在土地资源普查、城市规划、地质和矿产研究、地形地貌测绘和研究、水灾和地震灾害的测定等领域也具有十分广阔的应用前景^[9-12]。

2011年,美国洛克希德-马丁公司报道了机载SAIL演示样机的飞行试验情况,对距离1.6 km的地面目标实现了幅宽1 m,分辨率优于3.3 cm的成像结果^[13],随后,合成孔径成像激光雷达即成为国内外研究的热点。相比国外,我国的逆合成孔径成像激光雷达(Inverse Synthetic Aperture Imaging Lidar, ISAIL)技术研究起步较晚,但经过十几年的不懈努力,我国ISAIL成像技术的研究取得了较大进展,并突破了ISAIL原理成像相关关键技术,主要的研究单位有中国科学院空天信息创新研究院(中国科学院电子学研究所)^[13]、西安电子科技大学等单位。其中,2019年,中国科学院电子学研究所开展空天目标ISAIL高分辨率成像与3D信息获取的理论研究与实验验证,并实现了2 km距离仿真卫星目标成像和3D重建^[14]。

由于光学外差探测天线定理的限制,基于单元探测的ISAIL技术本质上属于小视场成像,为突破相干光学天线定理制约,如何实现大视场宽测绘带成像是ISAIL技术应用和发展必须要突破的瓶颈问题。在传统方法中,一般采用线阵探测器进行宽视场成像,但这种方法存在成像像素间隔,无法实现100%占空比成像,对于小目标成像,像素间隔可造成ISAIL图像信息严重缺失。另外,中国科学院电子学研究所提出了两

基金项目:国家自然科学基金(No. 61705007)

第一作者:高龙,gaolongc508@163.com

收稿日期:2023-03-06;录用日期:2023-05-22

<http://www.photon.ac.cn>

种方式^[15]:1)在压缩接收光学系统中采用一维纳米光波导阵列与空间高阶相位形成器件的宽视场信号收入光纤的方式,实现宽视场成像^[16];2)在压缩接收光学系统中采用尾纤式的光纤准直器与空间高阶相位形成器件的宽视场信号收入光纤的方式,实现宽视场成像^[17]。上述两种方式均实现了宽视场接收成像,接收方案简单,但只实现了空间一维方向的接收,而且所采用的二元光学器件所对应的衍射效率不高,各级次效率分布不均匀。目前针对激光SAIL系统中扩大成像视场的问题,主要采用一维线阵探测器与二元光学元件相结合的方式来实现,另外还有通过视场分割与阵列探测器的方式进行。本文主要针对如何扩大成像问题,提出了基于波面分割的尾纤式微透镜阵列视场分割相干收发激光雷达光学系统,通过该光学系统实现远距离大视场分割激光雷达光学成像技术,提高系统成像效率,实现无缝覆盖成像。

1 激光雷达系统及微透镜模块

收发分置的波面分割激光雷达系统组成如图1所示,在图1(a)组成框图中,激光雷达系统包含了激光发射链路与激光接收链路,激光发射链路包括:光纤激光器、尾纤式准直镜头、分束棱镜、λ/4波片、发射镜头。激光接收链路包括:4×4尾纤式微透镜阵列、λ/4波片、接收镜头等。另外,在激光发射链路中,由分束镜反射的部分激光经由耦合镜头进行了光纤耦合,形成监测通道。激光雷达系统的成像距离为100 km,经由发射系统发射的激光波长为1 550 nm,出射激光发散角为100 μrad,接收链路的接收视场角为175 μrad,光纤微透镜阵列数为4×4。受相干天线定理限制,同时为保证收发视场严格匹配,激光雷达系统要求收发链路的光轴偏差为20 μrad,接收通道的全视场光学耦合效率优于70%。

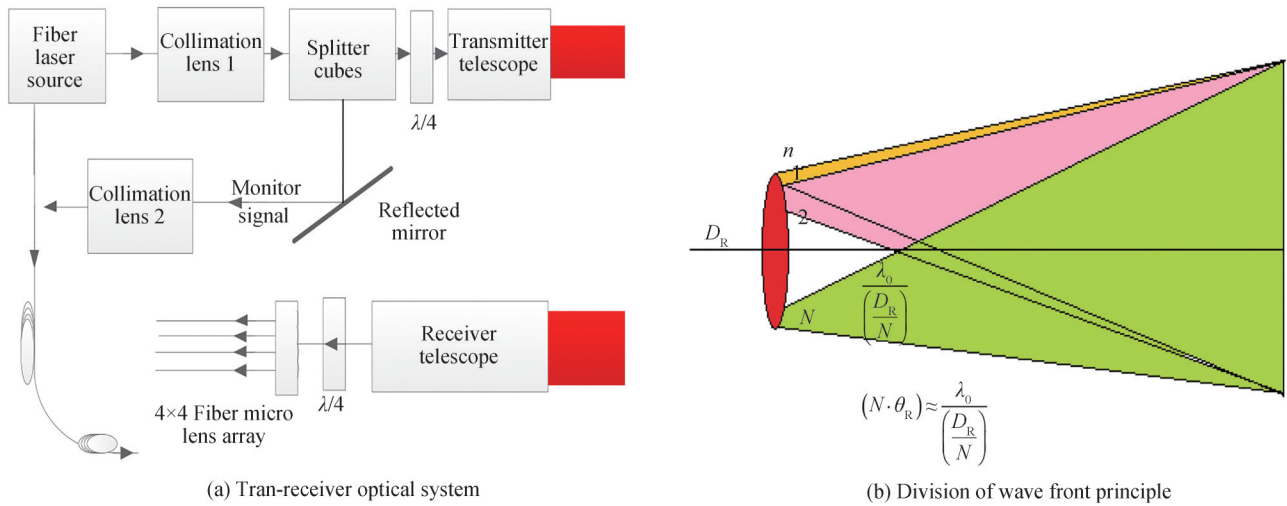


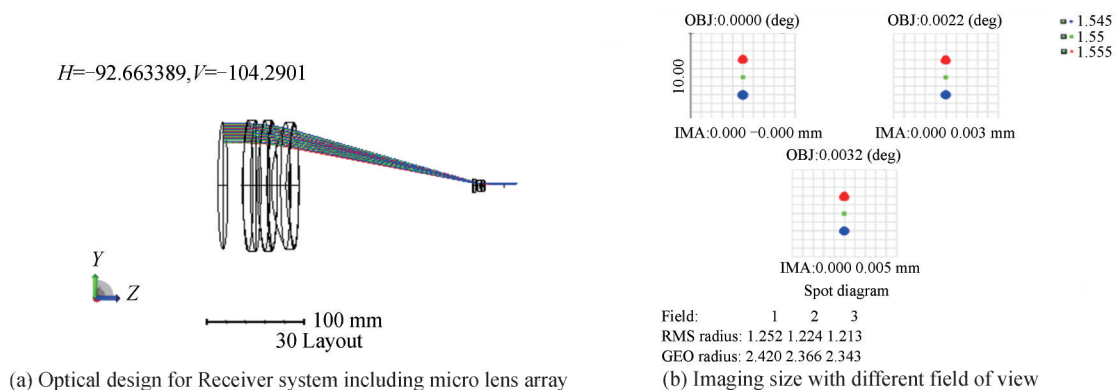
图1 收发分置激光雷达系统组成框图
Fig.1 Schematic of the bistatic lidar system

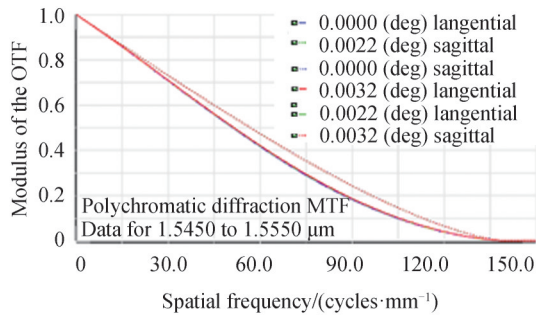
在图1(b)中的波面分割接收原理示意图中,接收镜头的口径 D_R 可以细分为 N 个子口径,每个子口径对应相同的接收视场。假设 θ_R 为系统接收视场角, $N \times N$ 为要求分割数(二维数),则每个细分子口径的 D_{sub} 的尺寸为 $D_{sub} = D_R / N = \lambda_0 / \theta_R$ 。设置激光雷达系统参数,接收镜头的口径 D_R 为90 mm, N 为4, θ_R 为100 μrad,采用4×4尾纤式微透镜阵列与接收镜头组合接收的方式,实现对成像目标散射的激光回波信号接收。4×4尾纤式微透镜阵列接收通道共包含16个通道,每个接收通道具有相同的接收视场角,在空间中呈现均匀分布,并且16个通道从不同视轴方向同时覆盖成像目标。4×4尾纤式微透镜阵列接收模块共用一个接收镜头,实现子孔径拼接,等效的接收子孔径口径为15.25 mm。受激光雷达系统链路指标约束条件,要求收发光轴偏差优于20 μrad,为保障光学装调可行性,同时保证接收视场完全覆盖发射视场,本系统的接收视场为发射视场的3.5倍。

表1为微透镜阵列的主要技术指标参数,微透镜阵列数为 4×4 ,每一个微透镜单元对应一个尾纤式光纤输出,即最后接收光纤数为16根,光纤类型为单模保偏光纤。所采用的微透镜材料为K-PG375,该型号玻璃是一种在超低温条件下精密模压的新型光学玻璃,589 nm黄光对应的折射率 n_d 为1.542 50,色散 v_d 为62.9,e光对应折射率 n_e 为1.544 55,色散 v_e 为62.5,变形点温度为343 °C,热膨胀系数为 1.69×10^{-17} ,模压制造各种复杂的光学零件,如非球面透镜、微透镜阵列、光纤阵列器件等。微透镜表面镀增透膜,实现对1 550 nm激光信号的99.5%透射。 4×4 尾纤式微透镜阵列与接收镜头系统的光学设计如图2(a)所示,图2(b)是在考虑到激光波长漂移情况下的三个不同视场下光学系统焦面光斑大小,由图2(b)可以看出,在波长为 $1\ 550\text{ nm}\pm 1\text{ nm}$ 的情况下,接收光学系统所形成的弥散斑较小,均在艾里斑以内,达到了衍射极限。图2(c)为系统调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF),系统传递函数良好,图2(d)为研制完成的尾纤式微透镜正视图。

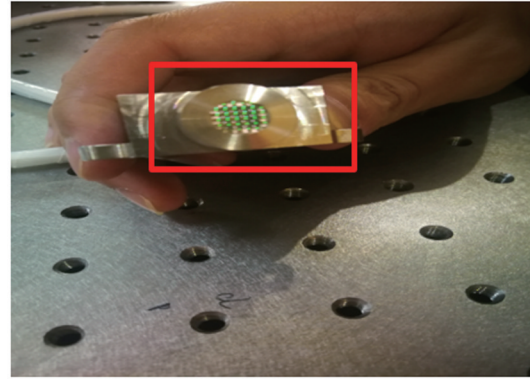
表1 光纤式微透镜阵列参数
Table 1 Parameters of the fiber micro-lens array

No.	Index name	Parameters
1	Array size	4×4
2	Wavelength	1 520~1 620 nm
3	Material	K-PG375
4	Transmittance ratio	$\geq 99.5\%$ (1 550 nm \pm 5 nm)
5	Micro-lens array size	7 mm \times 7 mm
6	Focal length	4.8 mm
7	Center thickness	1 mm
8	Curvature	2.53 mm
9	Conic coefficient	-0.57
10	Effective aperture	1.2 mm
11	Center space	1.24 mm \times 1.24 mm
12	Alignment accuracy	$\pm 0.001\text{ mm}$
13	Surface flatness	$\lambda/30$ (@632.8 nm)
14	Fiber type	PMF
15	Mode field diameter	10.5 μm
16	Number aperture	0.125
17	Coupled efficiency	$\geq 70\%$
18	Uniformity	$\pm 3^\circ$
19	Distribution accuracy	$\pm 0.001\text{ mm}$
20	Beam quality	Gaussian mode





(c) Modulation transmission function



(d) Front view of micro lens array

图2 微透镜设计结果与实物示意图
Fig.2 Design of micro-lens array and fabrication

2 全视场效率模型与仿真

总体任务要求全视场系统接收效率优于70%，当接收系统最终采用单模光纤耦合时，接收系统效率对应的就是耦合效率。当激光光束发散角为100 μrad，采用单模光纤(参数见表2)进行耦合接收，仿真计算了不同视场下的耦合效率。由表2可以看出，随着边缘视场逐渐偏离中心零视场，其系统耦合效率逐渐降低，并且中心零视场对应的耦合效率为0.813，当最大激光束发散角(半角)为50 μrad时，其对应的耦合效率为0.497。具体耦合效率随着视场角的变化关系如图3所示，可以看出耦合效率与视场角成反比关系，而且随着视场角变大，并且偏离中心零视场时，耦合效率从0.8急剧下降到0.5。

表2 不同视场下的耦合效率
Table 2 Coupling efficiency of the different field of view

No.	Half field of view/(°)	Efficiency
1	0	0.813 291 499
2	0.000 143 239	0.812 361 066
3	0.000 286 479	0.809 572 275
4	0.000 429 718	0.804 893 894
5	0.000 572 958	0.798 404 888
6	0.000 716 197	0.790 100 782
7	0.000 859 437	0.780 012 488
8	0.001 002 676	0.768 093 323
9	0.001 145 916	0.754 564 001
10	0.001 289 155	0.739 416 596
11	0.001 432 394	0.722 734 353
12	0.001 575 634	0.704 483 210
13	0.001 718 873	0.685 027 978
14	0.001 862 113	0.664 368 936
15	0.002 005 352	0.642 637 232
16	0.002 148 592	0.619 808 799
17	0.002 291 831	0.596 342 261
18	0.002 435 071	0.572 223 412
19	0.002 578 310	0.547 591 409
20	0.002 721 550	0.522 405 366
21	0.002 864 789	0.497 145 235

针对中心零视场的空间光-单模光纤耦合中，从远距离传来的平行光经由光学接收系统聚焦后形成一个艾里斑，单模光纤放置于艾里斑所在的焦面位置来耦合光束，根据巴塞阔尔定理，该耦合效率在焦平面处的耦合模型为

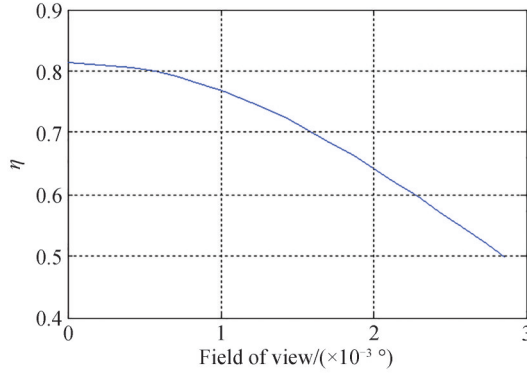


图3 不同视场角下的单模光纤耦合效率
Fig.3 Single mode fiber coupling efficiency for different field

$$\eta = \frac{\left| \iint E_{i,a}^* E_{f,a} ds \right|^2}{\iint |E_{i,a}|^2 ds \cdot \iint |E_{f,a}|^2 ds} \quad (1)$$

式中, $E_{i,a}^*$ 和 $E_{f,a}$ 分别为焦面处的入射光场和单模光纤的基模电场, S 为焦面处的面积。在理想平面波入射情形下,式(1)可简化为

$$\eta = \frac{2[1 - \exp(-\beta^2)]}{\beta^2} \quad (2)$$

式中, $\beta = \pi R_r \omega_0 / (\lambda f)$ 为耦合系数, R_r 为接收孔径半径, ω_0 为激光经由单模光纤传输过程中的光腰半径, λ 为入射光波波长, f 为接收光学系统的焦距。如图4所示,分别仿真计算了在中心视场(零视场)情况下,光纤

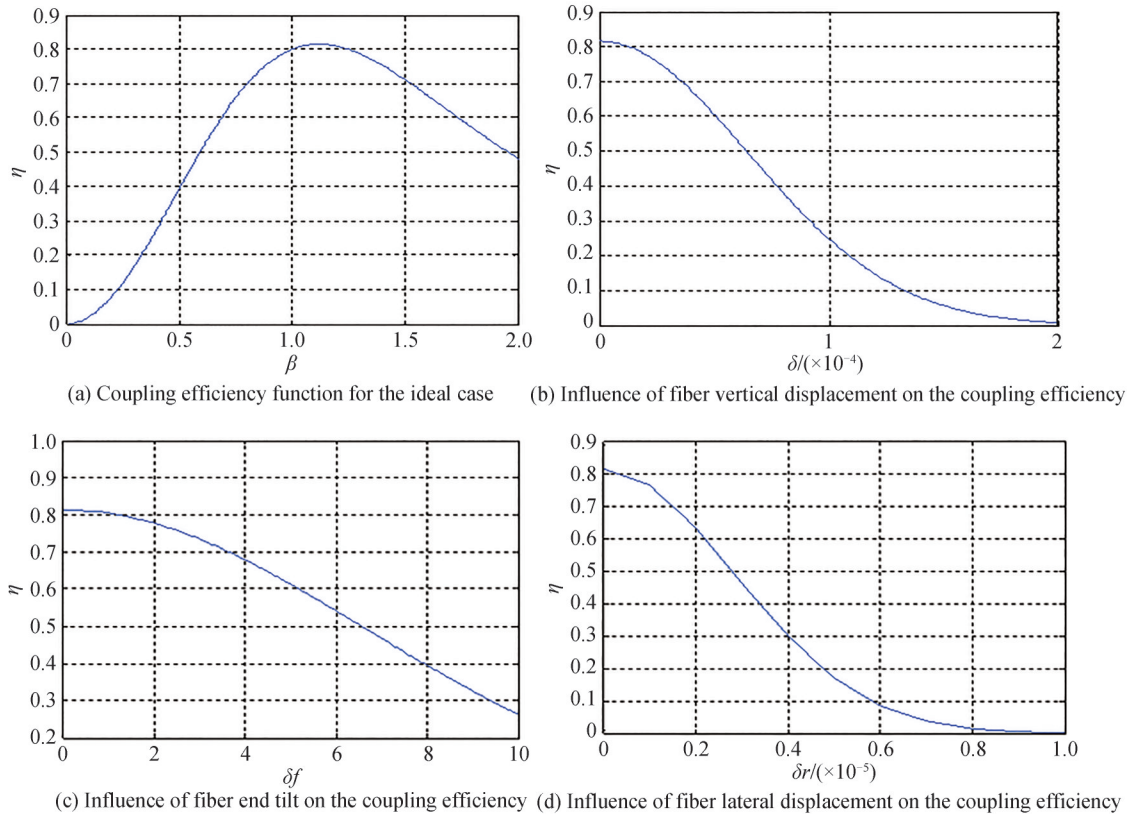


图4 不同因素对单模光纤耦合效率的影响
Fig.4 Effects of the single mode fiber coupling efficiency for different cases

轴向、光纤端面倾斜、光纤横向偏移等对光学耦合效率的影响。由图4(a)可看出,在理论情况下,中心视场的光学系统耦合效率的最优值为0.81,此时 β 值为1,从图4(b)~(d)可以看出,光纤轴向偏移、光纤端面倾斜与横向偏移对系统耦合效率的影响极其敏感,在不存在光纤轴向、光纤端面倾斜、光纤横向偏移影响情况下,系统最优的耦合效率峰值为0.81,随着这三种因素的共同干扰,系统最终的耦合效率会急剧降低。

为理论计算出100 μrad 视场内总的耦合效率,以视场所占像面面积加权的方式计算出全视场范围内光学系统耦合效率为

$$\eta_{\text{total}} = \sum \eta_i \cdot \frac{\pi(r_i + \Delta r)^2 - \pi r_i^2}{\pi r^2} \quad (3)$$

式中, i 为子视场编号, η_i 为第*i*个视场对应的光纤耦合效率, r_i 为归一化后的子视场半径, Δr 为子视场半径的步进值。

经过对100 μrad 内各个离散视场(如图5所示)的耦合效率计算并求和,最终计算出总的耦合效率为0.654 9,各子视场效率如表3所示。

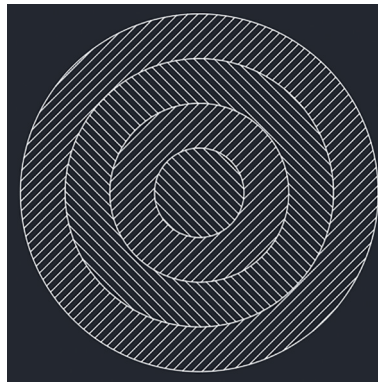


图5 分视场示意图
Fig.5 Sub-field diagram

表3 全视场耦合效率计算结果

Table 3 Calculation results of the coupling efficiency for the whole field of view

No.	Field of view/ μrad	Area	Weight ratio	Weight ratio \times efficiency
1	0	$1.963\ 5 \times 10^{-11}$	0.002 5	0.002 033 229
2	2.5×10^{-6}	$5.890\ 49 \times 10^{-11}$	0.007 5	0.006 092 708
3	5×10^{-6}	$9.817\ 48 \times 10^{-11}$	0.012 5	0.010 119 653
4	7.5×10^{-6}	$1.374\ 45 \times 10^{-10}$	0.017 5	0.014 085 643
5	1×10^{-5}	$1.767\ 15 \times 10^{-10}$	0.022 5	0.017 964 11
6	1.25×10^{-5}	$2.159\ 84 \times 10^{-10}$	0.027 5	0.021 727 771
7	1.5×10^{-5}	$2.552\ 54 \times 10^{-10}$	0.032 5	0.025 350 406
8	1.75×10^{-5}	$2.945\ 24 \times 10^{-10}$	0.037 5	0.028 803 5
9	2×10^{-5}	$3.337\ 94 \times 10^{-10}$	0.042 5	0.032 068 97
10	2.25×10^{-5}	$3.730\ 64 \times 10^{-10}$	0.047 5	0.0351 222 88
11	2.5×10^{-5}	$4.123\ 34 \times 10^{-10}$	0.052 5	0.037 943 554
12	2.75×10^{-5}	$4.516\ 04 \times 10^{-10}$	0.057 5	0.040 507 785
13	3×10^{-5}	$4.908\ 74 \times 10^{-10}$	0.062 5	0.042 814 249
14	3.25×10^{-5}	$5.301\ 44 \times 10^{-10}$	0.067 5	0.044 844 903
15	3.5×10^{-5}	$5.694\ 14 \times 10^{-10}$	0.072 5	0.046 591 199
16	3.75×10^{-5}	$6.086\ 84 \times 10^{-10}$	0.077 5	0.048 035 182
17	4×10^{-5}	$6.479\ 53 \times 10^{-10}$	0.082 5	0.049 198 237
18	4.25×10^{-5}	$6.872\ 23 \times 10^{-10}$	0.087 5	0.050 069 549
19	4.5×10^{-5}	$7.264\ 93 \times 10^{-10}$	0.092 5	0.050 652 205
20	4.75×10^{-5}	$7.657\ 63 \times 10^{-10}$	0.097 5	0.050 934 523

3 中心视场效率与微透镜阵列测试

通过直接耦合测试、光轴一致性测试与像质测量三种手段来进行全视场效率验证。直接耦合的测试采用发散角为2.261 mrad的准直光和1 550 nm功率计测量光纤阵列对空间光的耦合效率,针对16个通道的耦合效率测试,其对应的输入激光功率不变,均为1.56 mW,依次调节每一通道的六维调整架,测试输出激光的功率,测试结果优于70%为满足要求,测试现场及结果如图6所示,16个通道的耦合效率如表4所示,最低耦合效率为72%,平均耦合效率为73.1%,符合设计要求。图7为4×4阵列测试与输出激光模式测试图,其激光模式为高斯输出模式。



图6 4×4光纤式微透镜阵列光纤耦合效率测试

Fig.6 Measurement results of the coupling efficiency for the 4×4 fiber micro-lens array

表4 4×4光纤式微透镜阵列耦合效率测试结果

Table 4 Test results of the coupling efficiency for the 4×4 fiber micro-lens array

No.	Output/mW	Input/mW	Transmittance ratio	No.	Output/mW	Input/mW	Transmittance ratio	
1	1.128	1.56	72%	9	1.123	72%		
2	1.124		72%	10	1.14	73%		
3	1.145		73%	11	1.14	73%		
4	1.14		73%	12	1.141	73%		
5	1.126		72%	13	1.147	74%		
6	1.148		74%	14	1.147	74%		
7	1.157		74%	15	1.149	74%		
8	1.143		73%	16	1.163	75%		
Average transmittance				73.1%				



(a) Results for 4×4 micro lens array



(b) Output of the laser beam

图7 4×4微透镜阵列及激光输出模式

Fig.7 4×4 micro-lens array and output laser beam mode

4 装调测试与分析

收发光学系统的光学装调总体要求为:1) 收发光轴偏差优于 0.02 mrad ;2) 同轴监视系统与发射激光指向角误差 $\leq 0.02 \text{ mrad}$ 。针对激光发射系统链路和激光接收系统链路的光轴装调,主要采用 1550 nm 激光器、 12 m 平行光管、自准直仪、经纬仪、大口径角锥棱镜、 1550 nm 光束质量分析仪进行收发光轴测试标定,如表5所示,完成对16路接收通道与发射通道的光轴偏差测试,其光轴偏差最小为 $1.8''$ (约 $20 \mu\text{rad}$),最大为 $9.8''$ 。

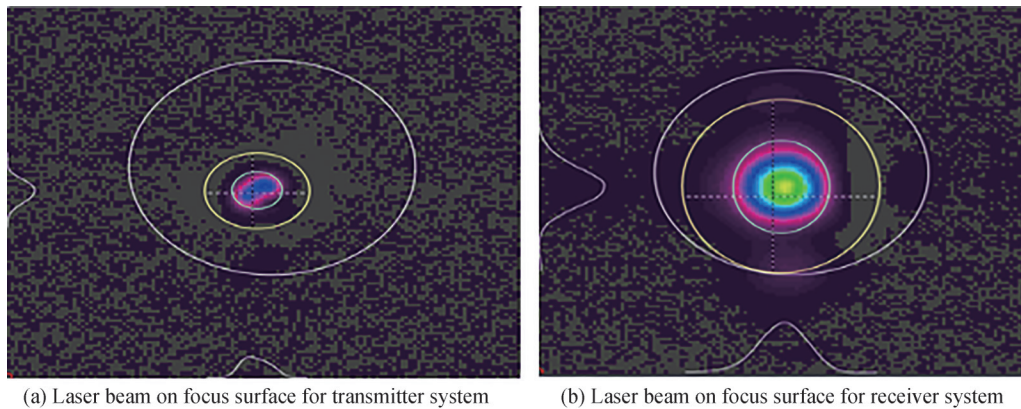


图8 发射链路和接收链路对应的焦面处光斑

Fig.8 Spot of the focus surface for the transmitter and receiver

表5 发射链路和16路接收链路的光轴偏差

Table 5 Axis misalignment between the transmitter and receiver

Item	X/mm	Y/mm	Misalignment/($''$)
Transmitter	6	6	0
Receiver channel 1	6.096	6.239	4.4
Receiver channel 2	6.148	6.076	2.9
Receiver channel 3	6.143	5.982	2.5
Receiver channel 4	6.302	5.832	5.9
Receiver channel 5	6.301	6.171	6.0
Receiver channel 6	6.348	5.922	6.1
Receiver channel 7	6.454	5.916	7.9
Receiver channel 8	6.547	5.841	9.8
Receiver channel 9	5.893	6.162	3.3
Receiver channel 10	6.189	5.91	3.6
Receiver channel 11	6.307	5.916	5.5
Receiver channel 12	6.374	5.78	7.5
Receiver channel 13	5.919	6.068	1.8
Receiver channel 14	6.001	5.846	2.6
Receiver channel 15	6.1	5.765	4.4
Receiver channel 16	5.949	5.687	5.5

收发平行度标定误差包括随机误差和系统误差两种。其中,随机误差包括激光发射系统的指向抖动误差和能量分布误差,对应 100 km 处的激光抖动为 0.484 m ,此项误差约为 $1''$ 。系统误差包括质心提取误差、定焦面误差、图像传感器(Charge Coupled Device, CCD)焦面倾斜引起的误差、平行光管波前误差、激光光斑不均匀性引起的误差、软件参数选取带来的误差、衰减片面型引起质心误差、衰减片热变形引起的误差、分光衰减系统共轭光路标定误差。其中,质心提取误差按照CCD像元为 $9 \mu\text{m}$ 、平行光管焦距为 12 m 计算,则光轴对准精度为 $0.015''$ 。平行光管的焦面误差为 5 mm ,激光发射系统与接收系统的间距为 315 mm ,激光

发射系统与监视相机的间距为 548 mm,此项对光轴对准带来的最大影响为 3.925"。CCD 的焦面倾斜是由多光轴标定系统焦面倾斜引起的,其整个焦面长度为 36 mm,在整个长度范围内因焦面倾斜引起的光轴偏差为 0.023"。平行光管波前引起的质心计算误差,经 Zemax 软件仿真分析,平行光管的波前均方根小于 0.1 λ 时,对质心的影响小于 0.2"。输出激光的光斑近似高斯分布,对质心计算的影响可忽略;软件质心计算误差方面,系统质心计算采用 Spiricon 公司的软件,测量精度优于一个像元,对应的偏差为 0.155";激光发射系统加入 10 dB 的衰减片,通过旋转衰减片可去除衰减片面型引起的质心位置偏差;另外,实测表明激光在衰减片上的热变形量会随时间增大,当到达 3 min 后保持平衡,最大变形量小于 0.05 λ ,通过旋转衰减片不能去除此项偏差。经 Zemax 仿真分析表明,此项误差为 0.1"。综合上述误差项,收发光学系统光轴间的随机误差为 4.06",可满足使用要求。

5 结论

本文针对远距离 ISAIL 成像视场小的问题,提出了基于尾纤式 4 \times 4 微透镜阵列接收的合成孔径激光雷达波面分割光学系统方案。研制了 4 \times 4 尾纤式微透镜阵列模块,通过实验验证了尾纤式微透镜阵列模块的光斑模式、阵列数、系统微透镜面型参数满足指标要求。针对于全视场效率指标仿真计算要求,提出了 175 μ rad 全视场系统光学效率的理论模型,仿真计算表明系统全视场光学效率为 65.5%,采用中心视场光学系统效率独立进行了 16 个通道的耦合效率测试,其系统光学效率优于 73.1%。最后,针对 ISAIL 收发光学系统光轴偏差的要求,完成了收发光轴偏差光学装调测试,其收发系统光轴偏差优于 20 μ rad (4"),满足激光雷达后续实际成像实验对收发光学系统光轴偏差的要求。

参考文献

- [1] YANG Xu, GENG Chao, LI Xiaoyang, et al. Review of microlens array optical phased array beam scanning technique[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(8): 081005.
杨旭,耿超,李小阳,等.微透镜阵列光学相控阵扫描技术研究进展[J].强激光与粒子束,2021,33(8):081005.
- [2] MENG Jiao, CAO Yinhua, QIN Wenbin, et al. Compensation of directivity deviation of laser diode based on the wedge-shaped microlens-array[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(6):760-765.
孟娇,曹银花,秦文斌,等.基于楔形微透镜补偿半导体激光阵列指向偏差[J].激光与红外,2021,51(6):760-765.
- [3] YANG Guang, DUAN Minghui, HUI Yue, et al. Divergence performance of reflective film enhanced by microlenses combined with non-standard pyramid structure[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(6): 0622004.
杨光,段明辉,惠越,等.微透镜联合非标准角锥结构增强反光膜发散性能[J].光子学报,2022,51(6):0622004.
- [4] LIU Penghui, LI Shiyao, WANG Wenwe, et al. Preparation and properties of flexible liquid crystal micro-lens arrays[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(3):0323001.
刘鹏辉,李诗尧,王文雯,等.柔性液晶微透镜阵列的制备与性能研究[J].光子学报,2021,50(3):0323001.
- [5] YU Guolei, HU Xiaobo, XU Xiangang. Study on coating method using micro lens optical fiber and its application[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2015, 44(12):3746-3754.
于果蕾,胡小波,徐现刚.光纤微透镜侧面镀膜方法和应用的研究[J].人工晶体学报,2015,44(12):3746-3754.
- [6] LI Daojing, HU Xuan. Optical system and detection range analysis of synthetic aperture radar[J]. Journal of Radars, 2018, 7(2):263-274.
李道京,胡焯.合成孔径激光雷达光学系统和作用距离分析[J].雷达学报,2018,7(2):263-274.
- [7] WANG Zhiyou. Study on the method of optical fiber microlens manufacture[J]. Mechanical Research & Application, 2007, 20(4):49-50.
- [8] PENG Cheng, ZHAO Changming, ZHANG Haiyang, et al. Simulation study of dual-balanced coherent detection lidar [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2015, 36(6): 55-63.
彭程,赵长明,张海洋,等.测风激光雷达的双平衡式相干探测技术仿真研究[J].航天返回与遥感,2015,36(6):55-63.
- [9] KONG Xiaojian, CAO Hualiang, HU Qingping, et al. Analysis of wedge-shaped cylindrical optical fiber micro-lens coupler based on ABCD matrix[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2012, 10(1):48-51.
孔小健,曹华梁,胡清平,等.基于ABCD矩阵的楔形柱面光纤微透镜的耦合技术分析[J].光学与光电技术,2012,10(1):48-51.
- [10] CHEN Haitao, YANG Huajun, LI Tuohui, et al. Influence of the fiber displacement on light beam into single-mode fiber [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(1):75-78.
陈海涛,杨华军,李拓辉,等.光纤偏移对空间光-单模光纤耦合效率的影响[J].激光与红外,2011,41(1):75-78.

- [11] FAN Xuebing, WANG Chao, TONG Shoufeng, et al. Study of the coupling efficiency of spatial light into single-mode multi-core fiber[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(12):2414-2422.
范雪冰, 王超, 佟首峰, 等. 空间光到单模多芯光纤耦合效率分析及影响因素研究[J]. *兵工学报*, 2017, 38(12):2414-2422.
- [12] WANG Xueyan, XU Haowen, XU Jiabin, et al. An improved imaging algorithm for synthetic aperture lidar[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 38(3):25-27.
王雪岩, 徐浩纹, 许佳斌, 等. 一种改进的合成孔径激光雷达成像算法[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 38(3):25-27.
- [13] ZHANG Xiaohong, YANG Min, GUO Liang. Research progress of synthetic aperture lidars[J]. *Laser Technology*, 2011, 35(2):255-259.
张小红, 杨敏, 郭亮. 合成孔径激光雷达研究进展[J]. *激光技术*, 2011, 35(2):255-259.
- [14] SANEYUKI S, HIROYUKI I, RYO K, et al. Doppler velocimeter and vibrometer FMCW lidar with si photonic crystal beam scanner[J]. *Optics Express*, 2021, 29(19):30727-30734.
- [15] STEVEN M B, JOSEPH R B, WALTER F B, et al. Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(35):7621-7629.
- [16] PAN Qiao, ZHU Jiacheng, YANG Zijiang, et al. Research progress of spaceborne hyperspectral optical payloads for carbon monitoring[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2021, 42(6):34-44.
潘俏, 朱嘉诚, 杨子江, 等. 星载高光谱碳监测光学载荷的研究进展[J]. *航天返回与遥感*, 2021, 42(6):34-44.
- [17] ZHANG Chenyang, WANG Chunhui, ZHAN Lan, et al. Theoretical analysis of fast steering mechanism on spaceborne photon detection lidar[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2019, 40(5):84-94.
张晨阳, 王春辉, 战蓝, 等. 星载光子探测激光雷达指向调整机构的理论分析[J]. *航天返回与遥感*, 2019, 40(5):84-94.

Synthetic Aperture Imaging Lidar Tran-receiver Optical System Based on Microlens Array

GAO Long¹, LI Xianjie¹, AN Chao¹, OU Zongyao¹, WANG Peisi², SONG Ziqi²,
TAO Yuliang¹, WU Jin²

(1 *Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China*)

(2 *Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

Abstract: Synthetic Aperture Imaging Lidar (SAIL) is limited by the optical heterodyne detection antenna theorem, the SAIL technology with the single detector is essentially a small field of view imaging. Breaking the limitations of the optical antenna theorem for wide field of view mapped band imaging is a bottleneck problem. In traditional methods, linear array detectors are generally used for wide-field imaging, but this method has imaging pixel spacing and cannot achieve 100% duty ratio imaging. For the application of small target imaging, the gap between pixels can cause serious loss of SAIL image information. Aiming at the above problems, this paper proposes the novel optical system of field division coherent receiving and transmitting lidar received by a 4×4 pigtail microlens array, which can realize the optical imaging technology of long distance and large field division lidar, improves the imaging efficiency of the system, and realizes seamless coverage imaging. The coherent receiving and transmitting lidar is a bistatic system with the wavelength of 1 550 nm with the advantage of eye-safety. The transmitter system is composed of beam splitter, half-wave plate, expand telescope, and the divergence angle of the laser beam equal to $105 \mu\text{rad}$, and the output laser beam is a circular polarization state. Meanwhile, there is a local laser beam act as the monitor system. The receiver system is composed of receiver telescope, quarter wave plate, 4×4 microlens array, and the field of view of the receiver system equal to $175 \mu\text{rad}$. Furthermore, there are the optical axis monitor module, which is composed of two cameras with a smaller field of view and a bigger field of view. It is verified by experiment that the light spot mode, array number and system microlens surface parameters of the pigtail microlens array also meet the index requirements. At the same time, the theoretical calculation model of the optical efficiency of the full field of view with $175 \mu\text{rad}$ is carried out. The simulation results show that the optical efficiency of the full field of view

system can reach 65.5%, which meets the requirements of the system index. Meanwhile, the coupling efficiency of the 16-channel central field of view of the 4×4 microlens array with the single mode fiber has also been tested. The test results show that the average optical coupling efficiency is 73.1%, the maximum value and the minimum value of the coupling efficiency are 75% and 72%, respectively. In addition, aiming at the requirements of the optical axis deviation of SAIL transceiver optical system, a 16-channel transceiver optical axis test system was built by using 12 m collimator, 1 550 nm beam quality analyzer and other equipments, such as, the cube mirror, 1 550 nm beam splitters. And the optical alignment test of the light-receiving axis deviation was completed. The light-receiving axis deviation is less than 4", and the maximum value and the minimum value of the axis deviation are 1.1" and 7.2", respectively. which can meet the requirements of lidar imaging experiment.

Key words: Synthetic aperture lidar; Tran-receiver optical system; Micro-lens array; Whole field of view; Axis misalignment; Coupling efficiency

OCIS Codes: 101.3640;280.3640;280.6730