文章编号:1002-2082(2012)03-0480-05

傅里叶望远镜光学系统装调及外场成像实验

陈宝刚,董 磊,刘欣悦,明 名,吴小霞

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘 要:提出傅里叶望远镜外场成像实验的光学系统组成,详细介绍光学系统的装调和检测过程,并对模拟目标进行成像实验。采用 3 束不同频率的激光照射模拟目标并在目标表面形成干涉条纹,利用拼接主镜接收散射回波能量,再经次镜汇聚,最后进入压缩透镜组被光电倍增管探测。实验结果表明:主镜支撑结构稳定性优于 0.075 mrad,子镜指向调整精度优于 0.05 mrad,对安装的 61 块子镜进行共焦试验,光斑质心重合精度小于 20 mm。最后,对 3 mm 的模拟目标进行外场成像实验,结果表明:室外环境下傅里叶望远镜的成像效果与实验室内成像效果及计算机仿真结果吻合较好,为后续反射模拟目标的成像提供了参考。

关键词:傅里叶望远镜;拼接主镜;光学系统装调;外场成像

中图分类号:TN202;TH754 **文献标志码**:A **doi**:10.5768/JAO201233.0301007

Optical alignment and field imaging experiment of Fourier telescope

CHEN Bao-gang, DONG Lei, LIU Xin-yue, MING Ming, WU Xiao-xia

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033, China)

Abstract: Optical system component of Fourier telescope field imaging experiment system was proposed, optical alignment and test progress were introduced particularly, and imaging experiments for simulation target were carried out. The simulation target was irradiated by laser beams with 3 different frequencies and interference fringes were formed on it. Then the scattering echo energy was received by the segmented primary mirror, and collected by the secondary mirror again, finally come into the compress lens group and was detected by photomultiplier. The experiment result indicates that the stability of support truss excels 0.075 mrad and the angle adjustment accuracy excels 0.05 mrad. The co-focus experiment for the assembled 61 segmented mirrors indicates that the superposition accuracy of the spots' centers of mass is less than 20 mm. The results of field imaging experiment for 3mm simulation target show that the field imaging effect is well consistent with the laboratory and PC emulations. The results provide references for the subsequent experiments of reflected simulation target.

Key words: Fourier telescope; segmented mirror; optical system alignment; field imaging

引言

随着空间安全战略的需求和科学技术的发展,各国对空间人造目标的地基高分辨率成像都提出了迫切的需求。近年来,基于相干激光成像的新型高分辨率成像探测技术——傅里叶望远镜(Fourier telescope),综合了主动成像与合成孔径等多项技术优点,采用激光照明主动成像,利用相对简单的硬件,具有探测深空目标的优势,因而成为目前对地球同步轨道目标高分辨率成像的首选技术。它与其他成像技术的最大不同是采用激光

收稿日期:2011-10-17; **修回日期**:2011-11-29

基金项目:国家 863 计划(2010AAXXX4250)

作者简介:陈宝刚(1982—),男,河北衡水人,硕士研究生,主要从事大型光学仪器结构设计方面的研究。
E-mail:cbg0813@163.com

照明的主动成像,发射器同时发射 3 束以上的激光,通过大气湍流传播,照射目标并在目标表面形成干涉条纹,然后被目标散射,可以利用大面积非共相接收器接收经时间调制的散射回波能量,经过傅里叶变换重构目标图像[1-2]。

傅里叶望远镜首先由 R. B Holmes 等人提出并进行了分析和模拟。基于傅里叶望远镜成像技术,美国空军实验室建立了地球同步轨道卫星激光成像国家实验基地(geo light imaging national test-bed, GLINT)用于实施和验证傅里叶望远镜的成像概念。在国内,长春光机所已在实验室环境验证了傅里叶望远镜的成像原理,并取得很好的研究成果[3]。

为了验证傅里叶望远镜成像原理的正确性,结合室内实验方案,本文提出简单的实验方案来验证傅里叶望远镜成像技术在室外环境下的可行性。

1　外场成像实验系统原理

傅里叶望远镜与其他成像技术的最大不同是采用激光照明的主动成像,激光发射系统同时发射 3 束以上的激光,通过大气湍流传播,照射目标并在目标表面形成干涉条纹,然后被目标散射,再利用大面积非共相接收器接收经时间调制的散射回波能量,经过傅里叶变换重构目标图像。

外场实验的目的是证实傅里叶望远镜系统的下行链路中的大气扰动和低光学质量反射镜是否影响重构图像的质量。外场成像实验系统方案如图 1 所示。激光发射部分和实验室方案相同,只不过发射的光束经过 100 m 的水平传输到达拼接主镜能量汇聚器,面积为 30 m^2 的拼接主镜收集部分散射信号并使其再次经过 100 m 的水平传输反射回发射器方向,经过次镜反射和压缩透镜组把散射信号聚焦在光电倍增管内。

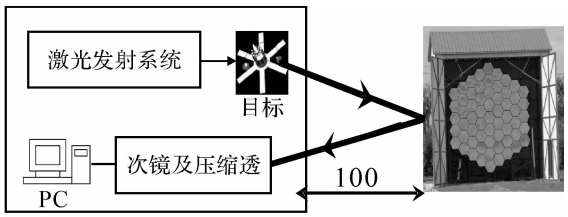


图 1　外场实验原理示意图

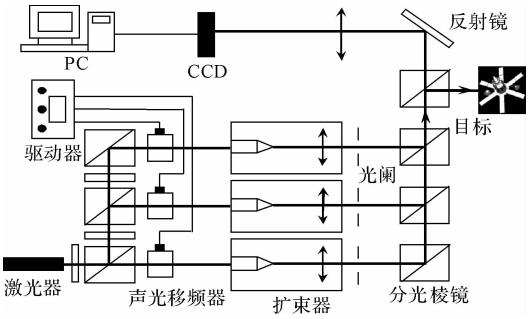
Fig. 1　Schematic of field experiment

2　系统主要组成

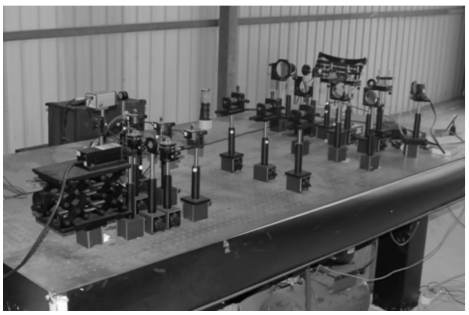
2.1　激光发射系统及模拟目标

傅里叶望远镜外场成像实验激光发射系统与室内实验相同,原理如图 2 所示。采用相干长度较长的线偏振单模 He-Ne 激光器作为光源,6 个偏振分光棱镜分别起到分束和合束的作用,在光路中加入 3 个半波片和 1 个偏振片,使 3 路光通过偏振片后最终的光强近似相等。声光移频器使激光产生布拉格衍射,取一级衍射光。这时 3 路光的频率产生微小频差,从而产生 3 组叠加的移动干涉条纹,实现条纹对目标的扫描。衍射光经过空间滤波器和扩束透镜后变为近似平面波,然后再经棱镜合成一束照射在透射模拟目标上。透射模拟目标为用硫酸纸打印的 3 mm 见方卫星图片,因硫酸纸有漫反射作用,故 3 束光通过模拟目标后向很宽的空间范围散开,只有部分散射光被拼接主镜接收汇聚,最终被光电倍增管探测。

CCD 探测器用于标定扫描条纹的粗细和取向(对应获取目标的空间频率)。3 路光经过分光棱镜后,一部分射向模拟目标方向,另一部分射向 CCD 方向。在 CCD 前放置焦距为 1 m 的会聚透镜,把 3 束平行光会聚成 CCD 靶面上的 3 个衍射斑。通过计算机软件编程,可以在 CCD 显示区域绘制出方形点阵,对应所要获取的目标的空间频率。



(a) 激光发射系统组成



(b) 激光发射系统实物照片

图 2　激光发射系统

Fig. 2　Laser transmitting system

2.2　拼接主镜

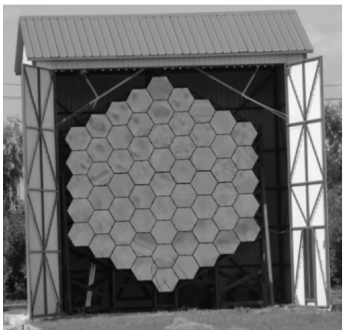
拼接主镜是用来接收汇聚目标散射回波能量的主要系统,也是傅里叶望远镜中的关键组成部分,如图 3(a)所示。该系统由 61 块正六边形子镜拼接而成,主镜高 6 m,宽 5.5 m,是我国目前用于望远镜系统中能量接收面积最大的拼接主镜。每块子镜对边长 610 mm,厚 19 mm,质量约 15 kg。它通过 3 点镜面支撑联接在子镜支撑板上,组成子镜室,再将子镜室定位安装在主镜支撑桁架上,通过精确调整 61 块子镜基板的空间位置,使 61 块子镜共焦,从而得到拼接面的主镜系统。该系统使用时各子镜工作状态固定不动,光轴基本平行于水平面,所以各子镜都处于竖直方向的受力状态[4]。

2.3　次镜

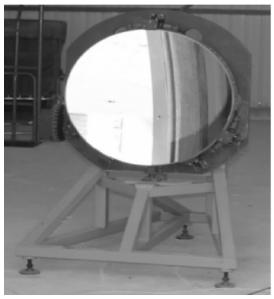
次镜用来接收主镜汇聚的能量,并反射给压缩透镜组,如图 3(b)所示。面型为凹球面,直径 700 mm,曲率半径 3 000 mm。次镜使用时固定不动,光轴基本平行于水平面,3 点底支撑主要起定位作用,侧支撑采用 3 处圆周均布的 A 型切向柔性杆机构。镜面具有 2 个自由度的调整能力。

3.4　压缩透镜组和探测器

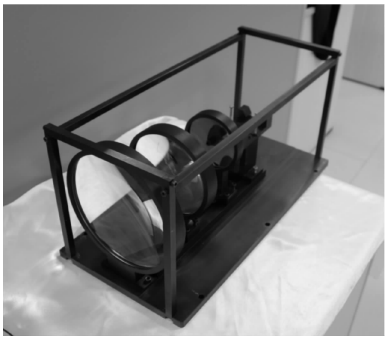
压缩透镜组由 3 片透镜组成,对次镜反射来的光束进行再次汇聚,透镜组靶面安装口径 25 mm 的光电倍增管接收汇聚光斑的能量,如图 3(c)所示。前面留有安装滤光片的接口,防止夜晚实验时环境杂散光对成像效果的影响。



(a) 拼接主镜



(b) 次镜



(c) 压缩透镜组和光电倍增管

图 3　能量接收系统实验装置

Fig. 3　Experiment setup of energy receiver system

3　光学系统装调及检测

3.1　子镜曲率半径检测

该系统对拼接主镜的面型要求不高,主要是共焦,汇聚的光斑要足够小,故每块子镜的曲率半径要一致,本文采用如图 4 所示的方案检测每块子镜的曲率半径,子镜曲率半径为 100 m,距离镜面 100 m 放置一个激光器和一个接收屏,激光束经扩束发散照射到镜面上,经镜面汇聚反射光束重新汇聚照射到接受屏上,测量光斑大小,使之满足一定公差要求,即能保证各子镜曲率半径的一致性。

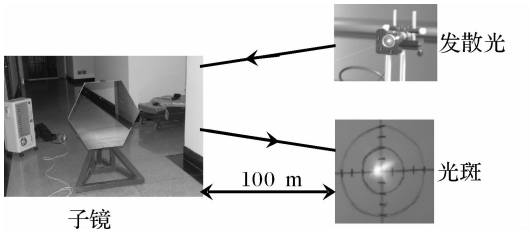


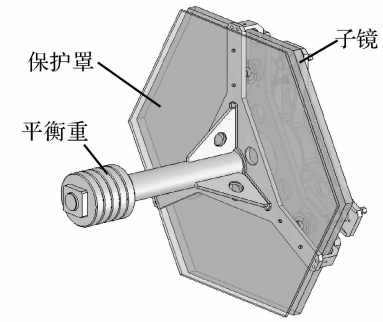
图 4　子镜曲率半径检测

Fig. 4　Curvature radius measurement of sub-mirror

3.2　子镜安装

拼接主镜外形结构较大,最高处距地面 6 m 多,单个子镜模块质量约 30 kg,安装时又都处于竖直状态,因此本文设计了专用的起吊装置,包括悬臂吊和起吊工装。悬臂吊旋转半径 3 m,由小车和电动葫芦组成,小车安装在工字钢悬臂上,实现径向运动,电动葫芦联接在小车上,实现竖直运动,悬臂吊基座安装在主镜支撑桁架的中间立柱上。子镜间距很小(20 mm),且子镜都基本处于同一竖直面内。为了实现对任一位置子镜的安全装卸,起吊时的受力点只能选择 3 个安全镜托的端面,本文设计了图 5(a)所示的起吊工装,它可以起到配平的作用。起吊工装上安装透明有机玻璃板,即保护镜面,又方便操

作,图 5(b)为子镜室吊装过程。



(a) 起吊工装

(b) 吊装过程

图 5　子镜室吊装

Fig. 5　Suspending of sub-mirror cell

3.3　拼接主镜共焦调整

对已安装好的 61 块子镜进行共焦实验[5-10],方法如图 6 所示。采用一大功率激光器,经透镜组扩束发散模拟点目标,光束经子镜汇聚到激光器附近的接收靶上,调整各子镜的倾斜角度,最终使所有光斑质心重合并落到接收靶的中心位置,经实测各光斑质心重合精度小于 20 mm。

通过测量接收靶上光斑质心的位移可以验证拼接主镜支撑结构的稳定性,经实测 8 h 内光斑质心漂移小于 15 mm(相当于支撑桁架晃动优于 0.075 mrad)。给单个子镜输入最小调整角度,接收靶上对应光斑质心移动小于 10 mm,故子镜指向调整精度优于 0.05 mrad。

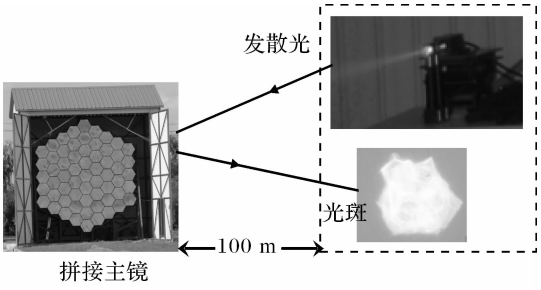
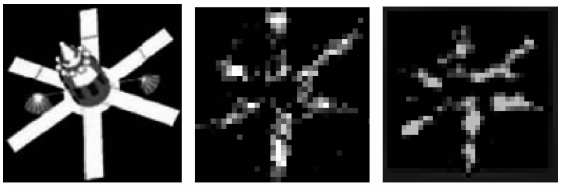


图 6　拼接主镜共焦实验示意图

Fig. 6　Schematic of segmented mirror co-focus experiment

4　外场成像实验

外场实验的发射部分和实验室验证方案相同,只不过发射的光束经过 100 m 的水平传输到达拼接主镜,面积为 30 m^2 的拼接主镜收集部分散射信号并使其再次经过 100 m 的水平传输反射回发射器方向,经过次镜反射把散射信号聚焦在光电倍增管内。外场实验的目的是证实傅里叶望远镜系统的下行链路中的大气扰动和低光学质量反射镜并不影响重构图像的质量。图 7 为外场实验的重构结果与实验室重构结果和理想模拟目标的比较。可以看出,100 m 的下行链路传输基本不影响图像的重构质量。分析认为,激光器的稳频精度和环境振动影响了重构图像的质量。



(a) 理想目标　(b) 实验室重构图像　(c) 外场重构图像

图 7　实验结果比较

Fig. 7　Experiment results

5　结论

介绍了傅里叶望远镜外场成像实验的光学系统组成,详细介绍了光学系统的装调和检测过程,最后对模拟目标进行了外场成像实验,外场实验结果与计算机仿真及实验室重构结果有较好的一致性,为后续反射模拟目标成像及实际工程系统设计提供了参考。

参考文献:

[1] CUELLAR E L, STAPP J, COOPER J. Laboratory and field experimental demonstration of a Fourier telescope imaging system [J]. SPIE, 2005, 5896: 58960D-1-58960D-15.

[2] MATHIS J, STAPP J, CUELLAR E L, et al. Field experiment performance of the receiver elements for a Fourier telescope imaging system [J]. SPIE, 2005, 5896: 58960F-1-58960F-12.

[3] 董磊, 刘欣悦, 王建立. 实验室环境内傅里叶望远镜技术的实现[J]. 光学精密工程, 2008, 16(6): 999-1002.
DONG Lei, LIU Xin-yue, WANG Jian-li. Realization of Fourier telescope technology in laboratory[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(6): 999-

1002.(in Chinese with an English abstract)

[4] 陈宝刚,张景旭,杨飞,等. 傅里叶望远镜外场实验聚光镜子镜支撑模块的设计[J]. 中国光学与应用光学,2009,2(4):329-333.
CHEN Bao-gang, ZHANG Jing-xu, YANG Fei, et al. Design of segment support module of collecting light mirror in Fourier telescope for field experiment [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(4): 329-333.(in Chinese with an English abstract)

[5] 陈宝刚,董磊,林旭东. 傅里叶望远镜外场实验系统拼接主镜[J]. 光子学报,2011,40(1):87-91.
CHEN Bao-gang,DONG Lei,LIN Xu-dong. Segmented mirror of Fourier telescope field experiment system[J]. Acta Photonica Sinica,2011, 40(1):87-91.(in Chinese with an English abstract)

[6] 庞振基,黄其圣. 精密机械设计[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
PANG Zhen-ji, HUANG Qi-sheng. Precision mechanics design[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.(in Chinese)

[7] 程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 北京:中国科学技术出版社,2003.
CHENG Jing-quan. Principles of astronomical telescope design[M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003.(in Chinese)

[8] 吴小霞,杨洪波,张景旭,等. 大口径球面镜支撑系统的优化设计[J]. 光子学报,2009,38(1):129-132.
WU Xiao-xia, YANG Hong-bo, ZHANG Jing-xu, et al. Optimal design of system for the large-aperture sphere mirror[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(1):129-132.(in Chinese with an English abstrast)

[9] 李宏壮,刘欣悦,王建立. 薄镜面面形主动校正技术研究[J]. 应用光学,2010,31(1):118-123.
LI Hong-zhuang, LIU Xin-yue, WANG Jian-li. Active correction technology for thin-mirror surface[J]. Journal of Applied Optics, 2010,31(1): 118-123.(in Chinese with an English abstract)

[10] 林旭东,陈涛,王建立,等. 拼接镜主动光学共焦实验[J]. 光学精密工程,2010,18(3):564-569.
LIN Xu-dong, CHEN Tao, WANG Jian-li, et al. Co-focus experiment of segmented-mirror active optics[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(3): 564-569.(in Chinese with an English abstract)