

文章编号:1004-4213(2011)09-1317-5

# 傅里叶望远镜外场实验与结果分析

董磊,刘欣悦,陈宝刚,林旭东,卫沛峰

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033)

**摘 要:**为了分析外场环境因素对傅里叶望远镜成像质量的影响和验证成像过程不受下行链路大气扰动影响的特点,开展了傅里叶望远镜外场实验研究.外场实验在室内实验的发射光学系统的基础上增加了主镜、次镜和会聚透镜组对目标散射光进行 3 次会聚仿真实际系统的成像过程,同时将目标与主镜、主镜与次镜分别拉开 100 m 距离验证成像系统不受下行链路大气扰动影响的特点.实验利用胶片打印的 2 种不同的卫星图片作为目标,获得了 Strehl 值分别为 0.44、0.39 的无大气扰动的外场重构图像和 Strehl 值分别为 0.43、0.38 的含大气扰动的外场重构图像.通过比较外场重构图像与室内重构图像的 Strehl 值,得出发射光学系统中光束的振动对成像有较大影响.分析发现无大气扰动外场重构图像与含大气扰动外场重构图像的 Strehl 值相近,从而验证傅里叶望远镜成像过程不受下行链路大气扰动的影响.

**关键词:**傅里叶望远镜;外场实验;主动成像;大气扰动;图像重构

**中图分类号:**TH743

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20114009.1317

## 0 引言

傅里叶望远镜成像技术具有主动成像、合成孔径、相位闭合等优势可以对暗弱、微小目标成像,并且能够克服低阶大气扰动的影响,是未来优异的高分辨率成像技术之一<sup>[1-2]</sup>.国际上对傅里叶望远镜的实验研究的直接推动力来源于美国的 GLINT (GEO Light Imaging National Testbed)<sup>[3-4]</sup> 和 SAINT (Satellite Active imaging National Testbed) 计划<sup>[5-6]</sup>,他们对傅里叶望远镜的室内和外场成像特性开展了初步研究并获得一定的成果<sup>[7-8]</sup>.然而他们对外场实验的研究也只是局部的,有一些外场特性比如振动对成像的影响等没有涉及.在国内只有少数的室内实验报道<sup>[9-10]</sup>,没有对外场环境特性对成像结果影响的实验报道.本文主要介绍傅里叶望远镜外场成像系统的构成、成像过程,研究振动对成像结果的影响并验证傅里叶望远镜能克服下行链路大气扰动的特点.

## 1 原理概述

傅里叶望远镜利用三束频率稍有差别相干激光同时照射远距离目标,在目标表面形成不同间距和

方向的移动条纹.经目标漫反射的光信号包含了与目标本身光强反射率的傅里叶变换成正比的信息.由大面积能量接收器获得的光信号经过时间解调算法可以获得与任意两束发射光束空间频率对应的目标傅里叶分量信息,三束发射光对应了三组不同空间频率的目标傅里叶分量信息,利用相位闭合技术可以去掉发射光路本身和低阶大气扰动诱发的光束相位变化,从而可以很大程度上克服大气对成像的影响.相位闭合后产生的数据通过图像重构算法可以重构出目标图像.具体成像原理的数学描述在原理分析文章中已有详述<sup>[1-2]</sup>.傅里叶望远镜的优点之一就是成像分辨率由发射光束的基线长度决定,只要增加基线长度就可以提高分辨率.其次成像信噪比的大小取决于接收光学面积,只要增加光学接收面积,不要求共相,就可以提高信噪比.

## 2 系统构成

傅里叶望远镜外场成像系统的发射光学部分和室内实验<sup>[10]</sup>基本相同,只是将光源换成大功率长相干绿光激光器.外场成像系统的接收光学部分不是直接接收目标散射光,而是散射光经过一段大气传输后被主镜会聚,进而被次镜会聚和会聚透镜组会

基金项目:国家高技术发展计划(No. 2010AAXXX250A)资助

第一作者:董磊(1982-),男,助理研究员,硕士,主要研究方向为激光技术与信息光学的应用研究. Email: postgradu@yahoo.com.cn

收稿日期:2011-03-15;修回日期:2011-05-13

聚最后进入光电倍增管. 这种接收方式是为了仿真真实系统的光学接收性能同时验证傅里叶望远镜克服下行链路中大气扰动的能力.

发射和接收光学系统的原理如图 1 和图 2, 实物如图 3~6. 发射光学系统中激光器选择波长 532 nm, 输出光功率 300 mW, 相干长度 >10 m 的单纵模固体激光器. 目标由胶片打印图片加漫散射体构成. 接收光学系统由主镜、次镜和会聚透镜组构成. 主镜由 61 块六边形子镜构成, 拼接后的主镜有效尺寸约为 5 m×5 m. 子镜对角线口径为 700 mm,

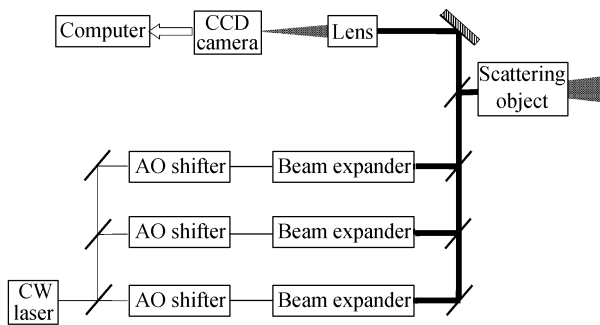


图 1 发射光学系统示意图  
Fig. 1 Sketch map of the transmitter

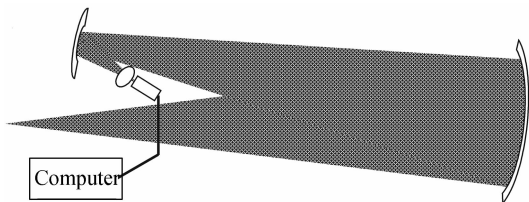


图 2 接收光学系统示意图  
Fig. 2 Sketch map of the receiver



图 3 发射光学系统  
Fig. 3 The transmitter



图 4 主镜  
Fig. 4 The primary mirror



图 5 次镜  
Fig. 5 The secondary mirror



图 6 会聚透镜组和探测器  
Fig. 6 The condense lens and detector

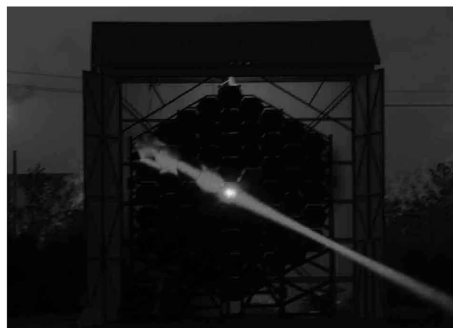
曲率半径为 100 m, 反射率大于 80%. 次镜有效口径约为 600 mm, 曲率半径为 3 m, 反射率大于 80%. 会聚透镜组由 3 块双凸透镜组成, 有效口径约为 150 mm.

### 3 外场成像实验

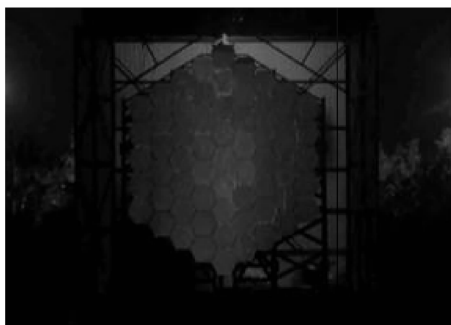
#### 3.1 系统调整与校准

由于外场昼夜温度变化剧烈并且受到周围振动的影响, 接收系统中的主镜和次镜等光学器件的光轴可能会偏离设计值, 故在进行成像实验前首先对整个系统进行校准. 校准采用 635 nm 的小功率半导体激光器. 校准的主要目的是: 让目标散射光的中心与主镜中心重合, 调节主镜中每个子镜的俯仰/倾斜使子镜反射光斑尽可能落在次镜中心, 改变会聚透镜组与次镜间的距离和会聚透镜组中各透镜间隔使入射到光电倍增管上光斑的主要部分位于倍增管的靶面内(直径为 25 mm).

目标散射光的校准图见图 7. 首先调整发射光



(a) Sub-mirrors



(b) All the primary mirror

图 7 目标散射光的校准

Fig. 7 Collimation of scattering light from object

路中最后一个分光棱镜的俯仰/倾斜使固定光束入射到主镜中心;然后放入漫射体,在背景较暗条件下可以看到经漫射体散射的光束中心基本与主镜中心重合并且能完全覆盖主镜.

子镜俯仰/倾斜的校准是系统校准工作中工作量最大的环节.首先将激光扩束刚好覆盖某个子镜(如图 7(a)),然后调节该子镜的俯仰/倾斜使反射光斑中心位于次镜中心附近(如图 8).按照一定的顺序将所有子镜的俯仰/倾斜调整完毕后在次镜的像面附近放置一个白纸板,可以看到主镜完整的像(如图 9).如果像中所有子镜的位置和实际一致并且亮度基本相等,则主镜的调整是良好的.

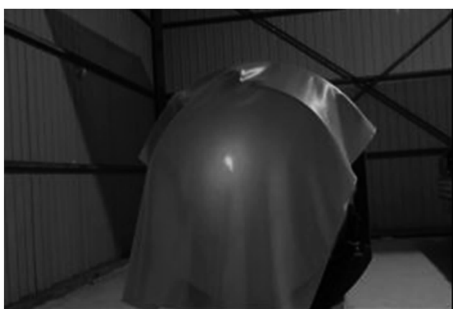


图 8 子镜校准

Fig. 8 Collimation of segmented mirror

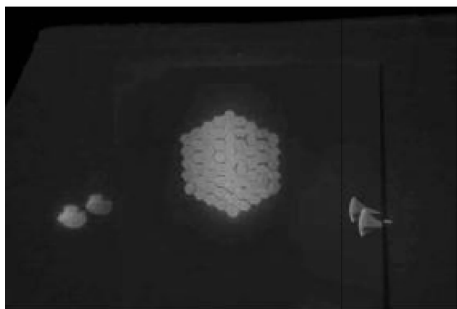


图 9 次镜对主镜成像

Fig. 9 Image of primary mirror

会聚透镜组可以对次镜会聚光束进行第三次会聚,调整各透镜的间距使得入射在光电倍增管靶面处光斑尺寸最小(如图 10).图中可以看到靶面会聚光斑的主要部分在直径 20 mm 的圆内,满足小于 25 mm 的要求.

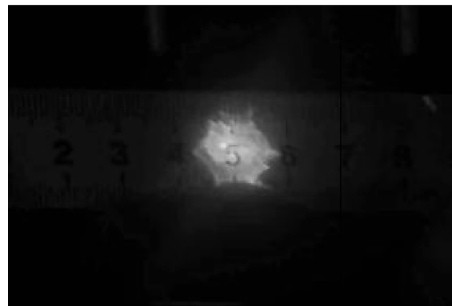


图 10 光电倍增管靶面处光斑

Fig. 10 Spot at the front face of photomultiplier

### 3.2 成像过程

外场实验选取目标的  $33 \times 33$  个空间频谱分量进行图像重构.根据傅里叶变换的性质,目标散射光强分布为实数,其傅里叶频谱的第一和第三象限互为复共轭,第二和第四象限互为复共轭.所以只需要获取第一和第二象限的傅里叶频谱即可重构图像.为了降低对 CCD 相机靶面尺寸的要求,实验选用 CCD 靶面刚好能覆盖一个象限.

外场实验对第一和第二象限的数据采集过程与室内实验类似,可参考室内实验相关步骤<sup>[10]</sup>.外场实验数据采集过程中应该避免光学平台的剧烈振动以及周围环境的振动,振动的影响将在实验分析部分具体阐明.为了避免大风引起成像系统中光学件的振动,实验最好在 3 级风以下进行.温度过高或者温差较大对激光器和声光移频器的正常工作不利,容易造成激光器的功率不稳定和声光移频器的移频漂移.背景光过强会降低采集数据的信噪比同时不利于校准过程中找准光斑中心.上面的几点限制决定了外场实验必须在夜间进行,最好选择远离公路的地点开展.

### 3.3 实验结果

首先选用“米”字形卫星的 2 mm、2.5 mm 和 3 mm 的不同大小的图片作为目标.图片打印在普通透明胶片上(见图 11),胶片后放置漫射体将目标透射的光散开,仿真实际目标光散射特性.从目标本身来看,不是太理想.因为打印机的分辨率最高只能设置到 1 200 dpi,并且在光滑的胶片表面激光喷墨很

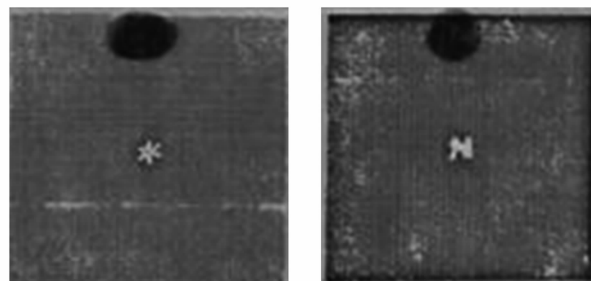


图 11 胶片目标

Fig. 11 Film objects

难保证墨粉的均匀分布,故目标的黑色背景部分会部分透光,对重构图像的像质有一定的影响.在后续实验中将研究接近真实物体的目标的制作.

卫星的外场重构图像如图 12. 每幅图像均重构多次,文中给出的是相应条件下成像质量最好的图, (所有图均是如此挑选). 当空间采样频率不足时, 重构图像会出现混叠现象, 见图 12(c). 当空间采样的最大频率低于目标的频谱宽度时, 只能对其低频部分成像, 结果丢失了目标的细节信息, 见图 12(a). 对于外场实验选定的采样间隔和最大采样频率, 2.5 mm 目标刚好能够满足既不发生混叠又能较好地体现细节信息的要求. 实验中选用  $33 \times 33$  个空间频率对目标进行采样, 成像时间约 1 h, 仅能获取较低频谱中的信息, 无法展现目标的细节, 故重构图像和衍射受限图像相比有一定的差距. 今后的实验中

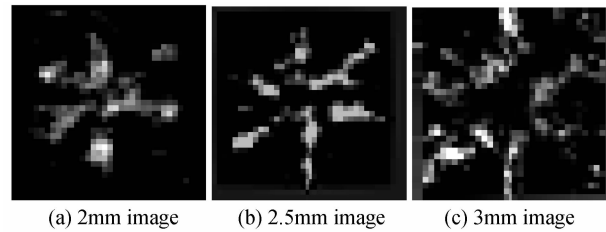


图 12 外场重构图片

Fig. 12 Outdoor reconstructed images

选取更大靶面的 CCD, 将采样空间频率数增加, 即可提高成像分辨率, 展示目标更细腻的层次.

根据上面的分析, 选用尺寸为 2.5 mm 的两种不同的卫星目标进行外场实验并与室内实验结果相比较(见图 13). (a) 是原始图像, (b) 是衍射受限图像, (c) 是室内重构图像, (d) 是外场重构图像(直接接收), (e) 是外场重构图像(利用主镜、次镜和会聚透镜组).

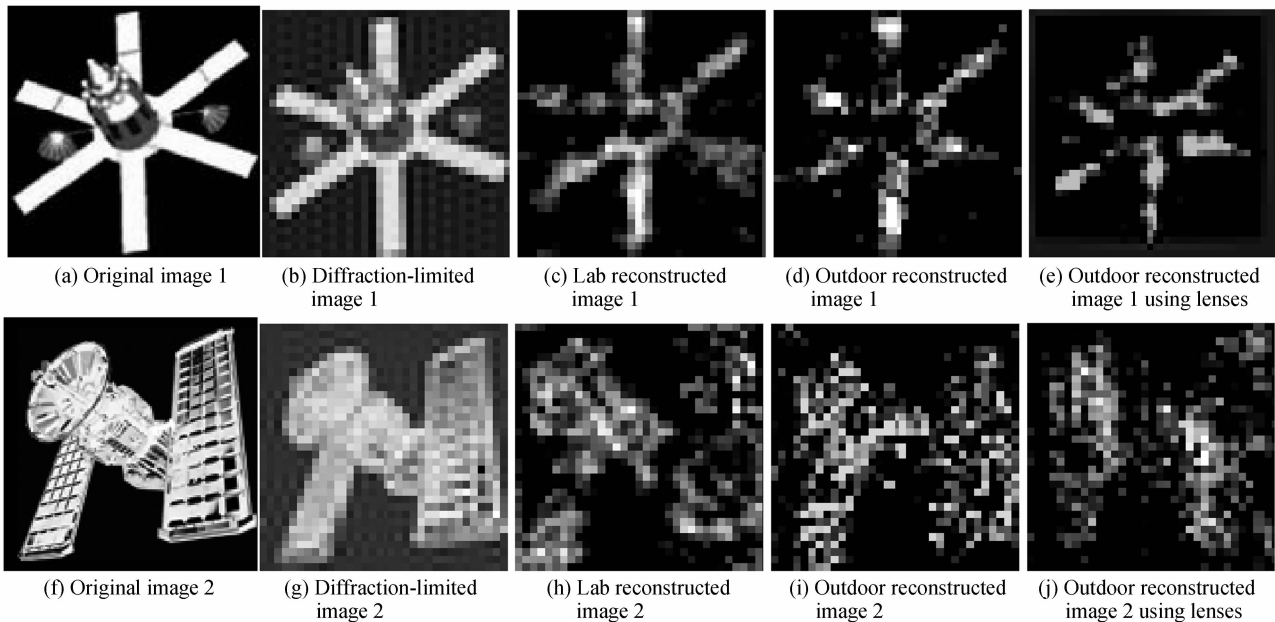


图 13 原始、衍射受限、室内重构和外场重构图像

Fig. 13 Original images, diffraction-limited images, lab reconstructed images and outdoor reconstructed images

## 4 分析

分别比较图 13 中目标 1 和目标 2 的无大气扰动外场重构图像(d)和(i)与含大气扰动外场重构图像(e)和(j). 图 13(d) Strehl ratio 为 0.44, (e) Strehl ratio 为 0.43, 数值相近; 图 13(i) Strehl ratio 为 0.39, (j) Strehl ratio 为 0.38, 也相近. 通过比较 Strehl ratio 可以发现无大气扰动重构图像和含大气扰动重构图像基本一致, 从而验证傅里叶望远镜能够克服下行链路中的大气扰动的影响.

依次比较图 13 中目标 1 和目标 2 的室内重构图像(c)和(h)与含大气扰动重构图像(e)和(j), 可

以发现室内重构图像的 Strehl 值明显大于含大气扰动重构图像. 这是因为外场发射光学系统直接建于水泥路面上, 虽然有光学平台减震, 但效果比室内减震效果差.

振动对实验的影响可以通过观察光电倍增管接收到的三组不同频率的信号的变化而得知(如图 14). 以频率为 50 KHz 的信号为例, 当振动很小时, 频谱图中最大值位于 50 KHz 处, 变化极小; 当振动剧烈时, 频谱图中最大值偏离 50 KHz, 并且可能出现多峰值, 使按照 50 KHz 解调后的信号变弱无法反应真实情况.

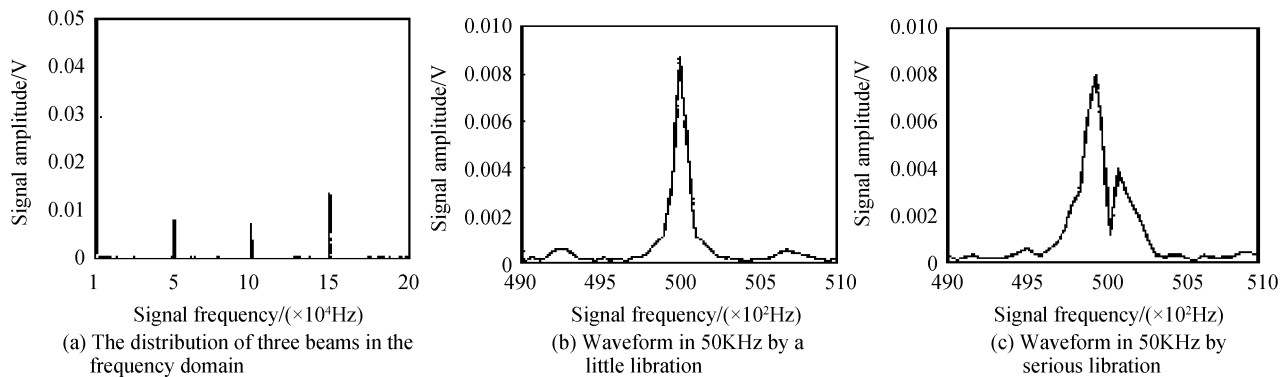


图 14 振动对解调信号的影响

Fig. 14 Effects of libration on demodulated signal

## 5 结论

傅里叶望远镜外场成像实验仿真了温度变化、振动等外场条件对成像过程的影响,通过与室内实验的比较可以看出一些外场条件对成像质量有较大的影响.本文重点分析了振动对成像结果的影响.振动过大可以造成解调信号的畸变,无法反映真实信息,从而难以重构真实的目标图像.通过比较无大气扰动的外场重构图像和含大气扰动的外场重构图像的 Strehl 值,得到大气扰动对成像质量的影响很小,从而验证傅里叶望远镜成像不受下行链路大气扰动影响的优点.

### 参考文献

- [1] HOLMES R B, MA S, BHOWMIK A, *et al.* Aperture-synthesis techniques that use very-low-power illumination[C]. *SPIE*, 1995, **2566**: 177-185.
- [2] HOLMES R B, MA S, BHOWMIK A, *et al.* Analysis and simulation of a synthetic-aperture technique for imaging through a turbulent medium[J]. *JOSA A*, 1996, **13**(2): 351-364.
- [3] FORD S D, VOELZ D G, VICTOR L. Geo light imaging national testbed (GLINT) past, present, and future [C].

*SPIE*, 1999, **3815**: 2-10.

- [4] GAMIZ V L, HOLMES R B, CZYZAK S R, *et al.* GLINT: program overview and potential science objectives[C]. *SPIE*, 2000, **4091**: 304-315.
- [5] STAPP J, SPIVEY B, CHEN L, *et al.* Simulation of a fourier telescope imaging system for objects in low earth orbit[C]. *SPIE*, 2006, **6307**: 630701-1-11.
- [6] SPIVEY B, STAPP J, SANDLER D. Phase closure and object reconstruction algorithm for fourier telescope applied to fast-moving targets[C]. *SPIE*, 2006, **6307**: 630702-1-16.
- [7] THOMTON M, OLDENETTEL J, HULT D, *et al.* GEO Light imaging national testbed (GLINT) heliostat design and testing status[C]. *SPIE*, 2002, **4489**: 48-59.
- [8] CUELLAR E L, STAPP J, COOPER J. Laboratory and field experimental demonstration of a fourier telescope imaging system[C]. *SPIE*, 2005, **5896**: 58960D-1-15.
- [9] PENG Ren-jun, WU Jian, YANG Chun-ping, *et al.* Imaging of scattering objects in interference field [J]. *Journal of Applied Optics*, 2001, **22**(5): 35-39.  
彭仁军, 吴健, 杨春平, 等. 干涉条纹场成像的目标重建[J]. *应用光学*, 2001, **22**(5): 35-39.
- [10] DONG Lei, LIU Xin-yue, WANG Jian-li. The realization of Fourier telescope technology in laboratory [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(6): 999-1002.  
董磊, 刘欣悦, 王建立. 实验室环境下傅里叶望远镜技术的实现[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(6): 999-1002.

## Field Experiment and Result Analysis of Fourier Telescope

DONG Lei, LIU Xin-yue, CHEN Bao-gang, LIN Xu-dong, WEI Pei-feng

(Changchun Institute of Optics, Fine Machines and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to study effects of outdoor factors to Fourier telescope imaging and validate properties of imaging immune to down-link atmospheric turbulence, outdoor experiments were developed. Under the ground of lab experiments, outdoor experiments added primary mirror, secondary mirror and condense lens to simulate the real system imaging. The distance between object and primary mirror and the distance between primary mirror and secondary mirror was put away 100m, separately, to validate the property of Fourier telescope imaging immune to atmospheric turbulence. Using 2 different satellite films as objects, the outdoor reconstructed images were gotten with the Strehl value 0.44 and 0.39 without turbulence, separately, and Strehl value 0.43 and 0.38 with turbulence, separately. Compared the reconstructed images of outdoor with lab, the conclusion was gained that libration had obvious effect on imaging. The result that the Strehl value of outdoor imaging was similar to lab imaging confirmed the fact that Fourier telescope imaging was immune to down-link atmospheric turbulence.

**Key words:** Fourier telescope; Outdoor experiment; Active imaging; Atmospheric turbulence; Image reconstruction