

傅里叶望远镜外场实验性能改进和结果分析

董磊 刘欣悦 林旭东 卫沛锋 于树海

(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 为了实现对傅里叶望远镜成像系统更接近实际的仿真, 改进了外场实验系统结构。采用反射式目标, 利用准直扩束镜替代空间滤波器和准直透镜, 使用大靶面电荷耦合器件作为监视器。在无大气和包含 200 m 水平大气两种情况下, 分别对 2.5 mm 的 4 种不同空间频谱分布目标进行实验。实验选用 9×9 , 17×17 , 33×33 和 65×65 傅里叶分量分别进行重构。最高成像角分辨率为 $3.5''$ 。结果表明含大气与无大气重构结果的 Strehl 比值相近, 从而证明傅里叶望远镜成像系统能够克服下行链路低阶大气扰动的影响。

关键词 成像系统; 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/AOS201232.0201004

Improvement of Performance and Analysis of Results of Field Experiments of Fourier Telescope

Dong Lei Liu Xinyue Lin Xudong Wei Peifeng Yu Shuhai

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

Abstract In order to make the simulation of the Fourier telescope imaging system close to reality, the structure of field experimental system is improved. Reflected objects are used, space filters and collimation lenses are replaced by collimation beam-expanders, and large sensitive area charge coupled device is used to monitor imaging. For different cases without atmosphere and with 200 m level atmosphere, 4 objects with different spatial spectra are researched. 9×9 , 17×17 , 33×33 and 65×65 Fourier components are used for reconstruction. The best angular resolution of imaging is $3.5''$. The results indicate that the Strehl ratios of reconstructed images with 200 m level atmosphere are close to those without atmosphere, and then prove that the Fourier telescope imaging system is immune to effects of low-order atmospheric turbulence.

Key words imaging systems; Fourier telescope; field experiment; active imaging; atmospheric turbulence; image reconstruction

OCIS codes 010.3640; 110.0115; 110.1758; 110.3175

1 引 言

随着科技的不断发展, 人们对人造卫星等空中探测器的依赖越来越强烈。空中卫星的增多, 就增加了彼此碰撞的几率, 同时加剧再次发射时的风险。为了对发射卫星实时监控, 需要观测其运动特性和姿态变化。为了预防别国卫星的非授权探测, 需要识别卫星的形状, 从而采取对应措施。所以, 发展对深空暗弱目标的探测技术成为迫切的需要。傅里叶

望远镜就是能够对远距离小目标高分辨率成像的新型技术之一^[1~6]。

傅里叶望远镜有以下突出优点: 主动成像, 通过发射准直激光可以在无日光和星光照射下对不发光目标成像; 发射合成孔径, 可以通过增加望远镜间的基线长度增加成像分辨率, 理论上基线长度可以无穷远, 所以分辨率可以很高; 相位闭合技术, 通过发射 3 束以上激光利用相位闭合技术消除低阶大气扰

收稿日期: 2011-07-29; 收到修改稿日期: 2011-10-09

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 董磊(1982—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事傅里叶光学和激光技术等方面的研究。

E-mail: nodepression@126.com

动的影响,从而不需要昂贵的自适应光学系统就可以极大地克服大气对成像质量的影响;非共相光学接收,傅里叶望远镜只需接收目标反射光的能量信息而不需相位信息,故不需要接收镜有很高的光学面形,也不需要多块子镜的共相拼接,只需采用低光学质量的子镜共焦拼接成大面积的能量接收阵列。由于傅里叶望远镜存在上述优点,所以对其研究成为近几年的热点^[7~12]。目前对傅里叶望远镜的研究已经开展到外场实验阶段^[13~15],但实验中采用的目标仍然是透射式目标^[6~8,13,15]。为了更好地仿真真实目标的情况,本文在实验中采用了反射式目标并部分修改了光路。实验采用扩束光学系统取代过去实验经常采用的空间滤波器加透镜的组合,在保证清晰干涉条纹的基础上极大地提高激光传输效率,降低对激光器功率的要求。实验将成像傅里叶分量数提高到 65×65 ,并比较 $9 \times 9, 17 \times 17, 33 \times 33$ 和 65×65 傅里叶分量重构结果,发现最终成像质量的提高除了与分辨率有关外还与信噪比有关。比较无大气扰动和有大气扰动的 33×33 傅里叶分量重构结果,验证了成像系统可以克服低阶大气扰动的推论。

2 实验原理简介

傅里叶望远镜成像原理在很多文献中已经有较为详细的论述^[1~4],在这里只给出结论性的公式和描述。傅里叶望远镜采用3束以上经过移频准直的激光束同时照射目标,通过改变不同光束的夹角达到改变空间频率的目的,这样目标散射光就包含了对应空间频率的目标空间傅里叶分量。光学能量接收系统将目标散射光经过时间解调和相位闭合处理后可以得到与发射激光空间频率相对应的目标傅里叶分量。在获得足够多目标傅里叶分量的基础上通过逆傅里叶变换即可重构目标图像。

光学接收系统接收到的光信号经过时间解调后的目标傅里叶分量的测量值可表示为

$$M(\Delta k_{px}, \Delta k_{py}, t) = c' NO(\Delta k_{px}, \Delta k_{py}) \exp[i(p\Delta\omega t - \Delta\varphi_p)], \quad (1)$$

式中 Δk_{px} 和 Δk_{py} 分别为所测空间频率的两个正交量; c' 为复常数因子; N 为光束数目; $\Delta\omega$ 为最小概率间隔; $\Delta\varphi_p$ 为包含各种噪声影响和初始相位的随机相位项; $O(\Delta k_{px}, \Delta k_{py})$ 为目标傅里叶分量。

可以按照一定的顺序发射多光束并计算傅里叶分量的比值:

$$R(m\Delta k_x) = \frac{M_{m,0}(m\Delta k_x)}{M_{1,0}(\Delta k_x)M_{m,1}[(m-1)\Delta k_x]} = \frac{O(m\Delta k_x)}{c'NO(\Delta k_x)O[(m-1)\Delta k_x]}. \quad (2)$$

根据傅里叶分量比值可以得到估计值:

$$O_e(m\Delta k_x + n\Delta k_y) = R(m\Delta k_x + n\Delta k_y) \cdots R(m\Delta k_x + \Delta k_y)R(m\Delta k_x) \cdots R(2\Delta k_x). \quad (3)$$

利用解调后的测量值计算出所有的目标傅里叶分量的估计值,然后进行二维逆傅里叶变换就可以重构目标图像。

3 系统构成

傅里叶望远镜外场实验的改进主要在原外场实验基础上针对发射光学系统进行改变,对发射光学系统的详细描述可以参考文献[6]。在这里简单描述一下整个成像系统的工作方式。激光器发出的光束经过分光镜和反射镜分成平行的3束,然后各自经过声光移频器(AOFS)改变光载波频率,该实验中选取移频频率分别为0,50,150 kHz。移频后光束经过扩束系统压缩发散角形成近似平面波,这样可以在目标表面形成较为理想的干涉直纹。3束光经过分光镜和反射镜合束后照射反射式目标,通过改变合束分光镜和反射镜的俯仰和旋转角度可以获取目标的不同空间频谱信息。目标散射光部分被主聚光镜接收,经过次镜和三镜的会聚作用,将主镜接收的80%以上的能量会聚在光电倍增管(PMT)的靶面内。通过时间解调和相位闭合程序获得不同空间频谱的比值。然后通过频谱估计算法和图像重构算法,重构出目标图像。下面介绍本文外场实验较之前实验改进的地方。

首先,将透射式目标换成反射式。透射式目标采用透明胶片打印目标外加漫散射体,用入射到目标的多束光漫散射仿真真实目标的漫散射;反射式目标则采用镜面反射目标外加漫散射体,入射多光束激光反射并漫散射,反射式目标的漫反射特性与真实的反射式物体更加接近。透射式和反射式光路原理比较如图1所示,反射式光路实物图如图2所示。

其次,将空间滤波器和准直透镜组合换成准直扩束镜。在获得对比度较高直纹的基础上大大提高激光透射能量,使信噪比提高3.5倍。

最后,采用靶面为25.4 mm的电荷耦合器件(CCD)相机 PiA1600-32gm 作为监视相机可以实现 65×65 傅里叶分量的数据采集监控,同时采用大恒公司产的电控平移台精确控制 CCD 相机的移动,可

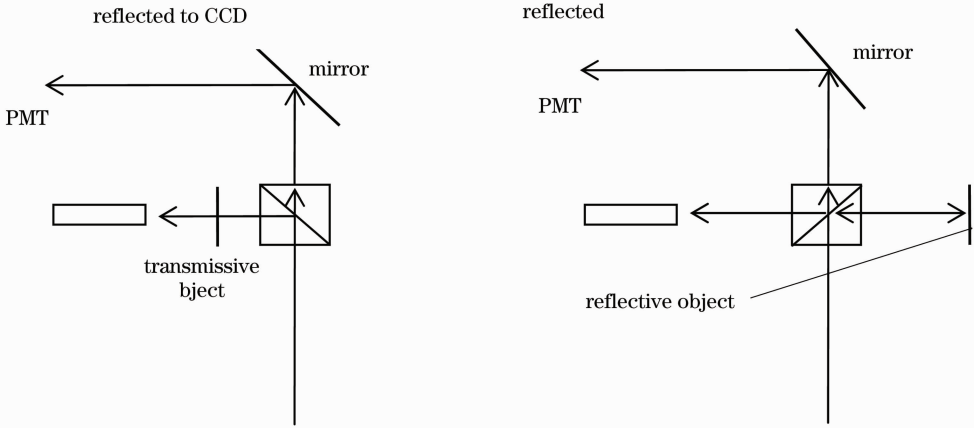


图 1 透射式和反射式光路原理图

Fig. 1 Principle sketch of transmission and reflection light paths

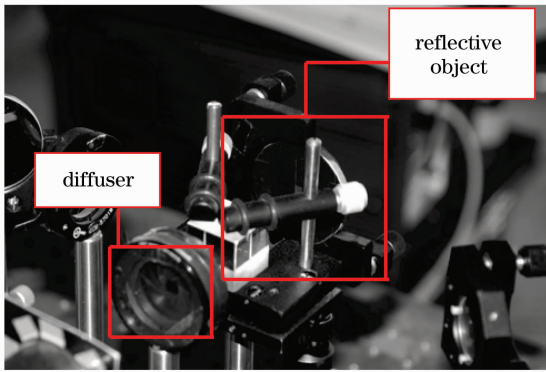


图 2 反射式目标光路实物图

Fig. 2 Picture of light path of reflective object

以达到像素级精度。

接收和发射光学系统的原理示意图如图 3 和图 4 所示。实物图如图 5~8 所示。发射光学系统中激光器选择波长 532 nm, 输出光功率 300 mW, 相干长度大于 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, 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。

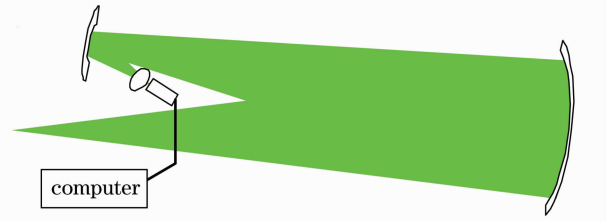


图 3 接收光学系统示意图

Fig. 3 Sketch of the receiver

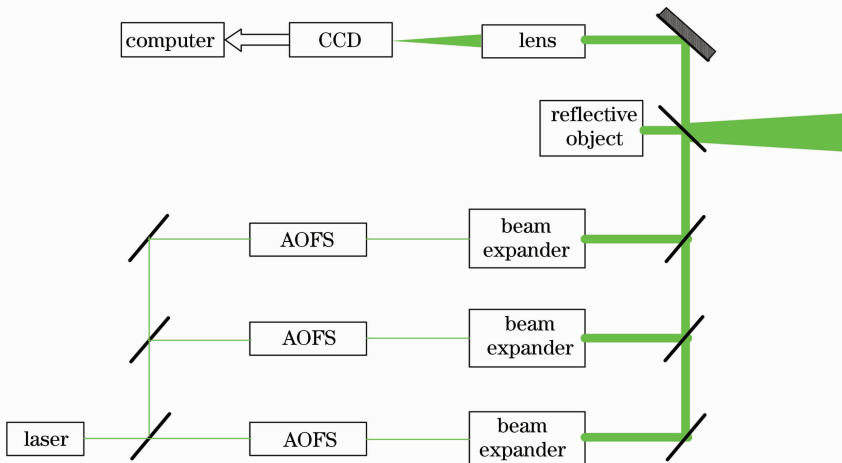


图 4 发射光学系统示意图

Fig. 4 Sketch of the transmitter

光电倍增管将接收光信号转换成模拟电信号，再通过模/数(A/D)采集卡转换成数字信号。数字信号通过时间解调算法转换为与目标某空间频谱成正比的测量信号。利用相位闭合算法消除低阶大气

扰动和光路本身的随机 piston 相差，产生 3 个空间频谱测量值的比值。利用傅里叶分量估计算法，得到目标傅里叶分量的估计值。最后利用图像重构算法，重构目标图像^[16]。信号获取和图像处理的流程图如图 9 所示。



图 5 发射光学系统
Fig. 5 Transmitter



图 7 次镜
Fig. 7 Secondary mirror

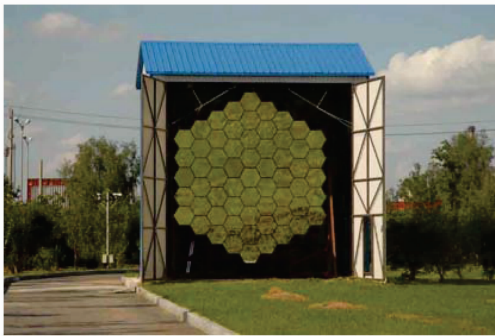


图 6 主镜
Fig. 6 Primary mirror



图 8 会聚透镜组和探测器
Fig. 8 Condensing lens and detector

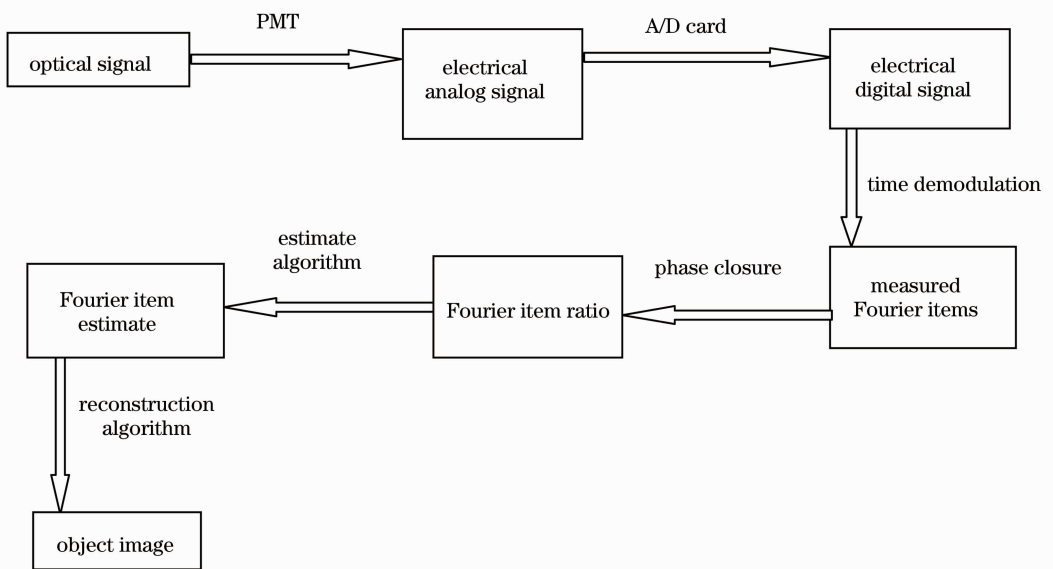


图 9 流程图
Fig. 9 Flow chart

4 外场成像实验

4.1 成像过程

外场实验选择目标与接收光学系统的水平距离为 100 m,验证水平方向大气扰动对系统成像的影响。由于光束水平传输,所以传播路径上的温度梯度近似为 0,传播方向的大气相干长度在 5~8 cm之间。外场实验分别选取目标的 9×9 , 17×17 , 33×33 和 65×65 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^[5]。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。

4.2 实验结果的比较与分析

实验采用 4 个直径为 2.5 mm、不同空间频谱分布的图像作为反射式目标。反射式目标的衍射受限图片、幅值频谱图(幅值压缩到 0~50 灰度值之间)和实物图分别如图 10 所示。

分别对 4 种目标采用 9×9 , 17×17 , 33×33 和 65×65 傅里叶分量重构图像(含大气扰动重构图像),结果如图 11 所示,其中 65×65 分量对应的角分辨率最高,约为 $3.5''$ 。

通过比较发现,第 1 个和第 2 个目标 33×33 傅里叶分量数重构图像最清晰;第 3 个和第 4 个目标的 65×65 傅里叶分量重构图像最清晰。这就证明了并非所有目标都是采样傅里叶分量数越多图像质量越好。

通过计算机仿真发现在相同噪声幅值影响下,空间频率越高的傅里叶分量信噪比越低,会造成重构图像的模糊,从而降低图像质量。而空间频率越高,成像分辨率越高,更容易分辨目标的细节。所以从上述两个因素的共同作用角度来看,并不是分辨

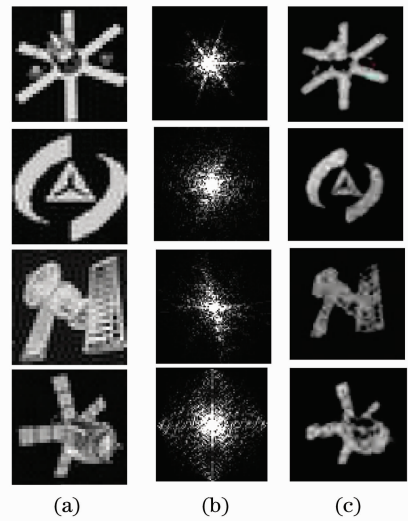


图 10 (a)原始目标;(b)幅值频谱图;(c)实物图
Fig. 10 (a) Original objects; (b) spectra of amplitudes; (c) real objects

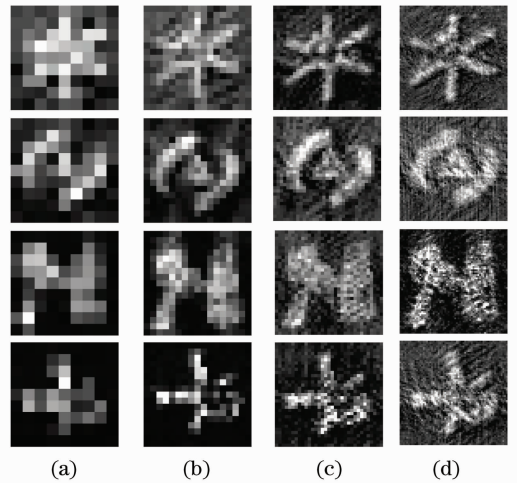


图 11 4 种目标(a) 9×9 , (b) 17×17 , (c) 33×33 和 (d) 65×65 傅里叶分量重构图像

Fig. 11 Constructed images with (a) 9×9 , (b) 17×17 , (c) 33×33 and (d) 65×65 Fourier components of 4 objects 率越高,成像质量越好。随着傅里叶频谱数的增多,成像质量有个最优值。最优值位于 33×33 还是 65×65 傅里叶频谱数处或者其他位置,主要取决于噪声幅值的大小和目标空间频谱的分布。外场实验结果也证实了上述观点。所以为了体现系统高分辨率成像的优点,必须采用更高的空间频率,同时为了提高图像质量还需要降低高频分量的噪声。

以 33×33 傅里叶分量为代表,比较无下行链路大气扰动和有大气扰动时目标的图像质量,计算对应 Strehl 比(计算公式参考文献[9]),如图 12 所示。可以看出大气扰动的影响较微弱,从而证明傅里叶望远镜可以克服下行链路低阶大气扰动的影响。

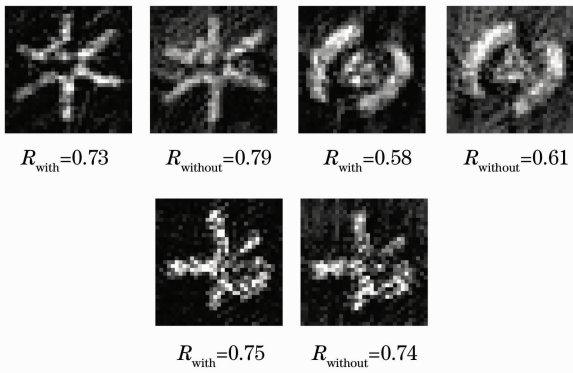


图 12 有大气扰动和无大气扰动时目标 Strehl 比的比较
Fig. 12 Comparison of Strehl ratios of objects with and without atmospheric turbulence

将 33×33 傅里叶分量的含大气扰动的外场重构结果与采用原系统结构得到的结果相比较^[17] (如图 13), 可以看出图像质量有明显提高。分析原因可能有以下几点: 首先, 更换了频率稳定性更高的声光移频器, 使相邻光束的差频更稳定, 解调信号信噪比很高。其次, 采用扩束镜代替空间滤波器增加发射激光光强进一步提高信噪比。

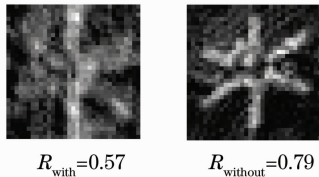


图 13 以往实验(左)和本文(右)重构图像 Strehl 比的比较
Fig. 13 Comparison of Strehl ratio of constructed images obtained in the previous experiment (left) and in this paper (right)

5 结 论

外场实验对验证傅里叶望远镜关键特性和发现影响成像质量的各因素是不可或缺的。通过采用反射式目标, 使整个外场实验系统更加接近真实情况。更换空间滤波器和准直透镜为准直扩束镜, 在不降低干涉条纹质量的前提下, 将激光传输效率提高 3.5 倍, 提高了成像信噪比。采用大靶面 CCD 相机实现 65×65 傅里叶分量之内的图像重构。这些改进大大提高了外场实验系统性能, 使实验系统更接近真实系统, 并且使成像质量比以往的外场结果^[17] 有了明显改善。通过比较含 200 m 水平大气和无大气情况下傅里叶望远镜外场实验结果, 再次验证了傅里叶望远镜能够克服下行链路低阶大气扰动的特性。采用 9×9 , 17×17 , 33×33 , 65×65 分量分别进行图像重构, 可以看出 9×9 分量对于大多数目标来

说已经可以得到大致轮廓, 这对于识别目标和观测目标运动和姿态特性已经足够, 所以对于观测快速运动目标的运动和姿态变化特性而不需要获得具体细节的应用, 完全可以采用较少傅里叶分量从而减少成像时间。

参 考 文 献

- 1 V. L. Gamiz, R. B. Holems, S. R. Czyzak *et al.*. GLINT: program overview and potential science objectives [C]. *SPIE*, 2000, **4091**: 304~315
- 2 David F. Olson, Steve M. Long, Laura J. Ulibarri. Comparison of complex exponential and least squares wavefront reconstructors for regular square and non-square grid arrays [C]. *SPIE*, 2000, **4091**: 323~332
- 3 Mikhail Belen'kii, Kevin Hughes, Tim Brinkley *et al.*. Residual turbulent scintillation effect and impact of turbulence on the Fourier telescope system [C]. *SPIE*, 2004, **5160**: 56~67
- 4 Cai Jing, Wang Yangui, Li Quan. Analysis and simulation on interferometric synthetic aperture method [J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(1): 42~43
蔡 静, 王雁桂, 黎 全. 相干编码成像分析及其仿真研究 [J]. *激光杂志*, 2009, **30**(1): 42~43
- 5 Ye Su, Liu Yi, Wu Jian. Effects of antenna array configurations on imaging quality in Fourier telescope [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(3): 611~616
叶 溯, 刘 艺, 吴 健. 傅里叶望远镜中天线阵列配置对成像质量的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(3): 611~616
- 6 Dong Lei, Liu Xinyue, Wang Jianli. 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. 实验室环境内傅里叶望远镜技术的实现 [J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(6): 999~1002
- 7 Zhang Yan, Yang Chunping, Guo Jing *et al.*. Spectrum extraction mode for Fourier telescope in laboratory [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(3): 571~576
张 炎, 杨春平, 郭 晶 等. 实验室中傅里叶望远镜频谱抽取方式 [J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(3): 571~576
- 8 Chen Wei, Li Quan, Wang Yangui. Experimental research of Fourier telescope imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0311001
陈 卫, 黎 全, 王雁桂. 傅里叶望远镜成像系统的实验研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0311001
- 9 Liu Xinyue, Dong Lei, Wang Jianli. Fourier telescope imaging via sparse sampling [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(3): 521~527
刘欣悦, 董 磊, 王建立. 稀疏采样傅里叶望远镜成像 [J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(3): 521~527
- 10 Yu Qianyang, Qu Hongsong. Realization of high resolution visible earth observation on geostationary earth orbit [J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2008, **1**(1): 1~12
于前洋, 曲宏松. 实现同步轨道(GEO)高分辨力对地观测的技术途径(上) [J]. *中国光学与应用光学*, 2008, **1**(1): 1~12
- 11 Wang Xiaowei, Li Quan, Wang Yangui *et al.*. Analysis and simulation on phase closure of Fourier telescope [J]. *J. National University of Defence Technology*, 2009, **31**(1): 38~42
王小伟, 黎 全, 王雁桂 等. 傅里叶望远镜中的相位闭合分析及仿真 [J]. *国防科技大学学报*, 2009, **31**(1): 38~42
- 12 Chen Wei, Li Quan, Wang Yangui. Object reconstruction of Fourier-telescope based on all-phase spectrum analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3441~3446
陈 卫, 黎 全, 王雁桂. 基于全相位谱分析的傅里叶望远镜目标重构 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3441~3446

- 13 E. Louis Cuellar, James Stapp, Justin Cooper. Laboratory and field experimental demonstration of a Fourier telescope imaging system[C]. *SPIE*, 2005, **5896**: 58960D
- 14 Chen Baogang, Dong Lei, Lin Xudong. Segmented mirror of Fourier telescope field experimental system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 87~91
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
- 15 Yu Qianyang, Qu Hongsong. Realization of high resolution visible earth observation on geostationary earth orbit[J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(1): 1~9
于前洋, 曲宏松. 实现同步轨道(GEO)高分辨力对地观测的技术途径(下)[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, **2**(1): 1~9
- 16 R. B. Holmes, S. Ma, A. Bhowmik *et al.*. Analysis and simulation of a synthetic-aperture technique for imaging through a turbulent medium[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(2): 351~364
- 17 Dong Lei, Liu Xinyue, Chen Baogang *et al.*. Field experiment and result analysis of Fourier telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1317~1321
董 磊, 刘欣悦, 陈宝刚 等. 傅里叶望远镜外场实验与结果分析[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9): 1317~1321

栏目编辑:李文喆