

# 傅里叶望远镜成像系统的实验研究

陈 卫 黎 全 王 雁 桂

(国防科学技术大学物理系, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 傅里叶望远镜(FT)是一种主要针对远距离暗弱目标的高分辨率光学干涉成像技术。它利用多束空间距离不同、时间频率受调制的激光干涉照明目标,通过解调光强探测器接受反射的回波时序信号来提取目标的傅里叶频谱,并利用相位闭合技术消除光程差和大气湍流等造成的相位畸变。采用发散光干涉在实验室内实现了傅里叶望远镜对一维和二维目标的重构。实验方案较好地模拟了外场“T”型阵列发射结构,同时还保证了光斑的有效重合,最大程度地利用了光斑能量,有利于提高信号的信噪比,有利于光束对目标的瞄准,对进一步避免大气湍流的影响具有一定指导意义。

**关键词** 傅里叶光学;傅里叶望远镜;非常规成像;远距离成像;发射阵列

**中图分类号** TN348 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0311001

## Experimental Research of Fourier Telescopy Imaging System

Chen Wei Li Quan Wang Yangui

(Department of Physics, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Fourier telescopy (FT) is a high-resolution optical interference imaging method which is mainly used for distant and very dim objects. Being illuminated by several spatial diversified and frequency-encoded laser beams, object will reflect the light as a temporal series signal which contains the information of the target's spatial spectrum. After the signal is demodulated, the target's spectrum will be recovered with the help of the phase-closure algorithm by which the random atmospheric phase errors will be cancelled out, and then, the image can be reconstructed by inverse Fourier transform. An experimental scheme based on diverging light has been put forward to verify the feasibility of this imaging technology, and both of one- and two-dimensional objects have been reconstructed successfully in laboratory. Besides, several useful references for building field's FT system can be offered by this scheme. Firstly, it simulates the T-shape configuration properly, which is helpful to study the field transmitter array while the field's requirement is not mature. Secondly, the scheme is based on diverging light to illuminate the target, It not only approaches the practical situation, but also makes the laser faculae overlap together on target's surface all the time which is good at improving the signal-to-noise ratio of the reflected signal because the energy of the light is used at utmost. And it will be beneficial to aim the target and to avoid the atmospheric turbulence in system design.

**Key words** Fourier optics; Fourier telescopy(FT); unconventional imaging; distant imaging; transmitter array

**OCIS codes** 110.0113; 110.1650; 170.0110; 070.0070

## 1 引 言

傅里叶望远镜(FT)是一种主动式干涉成像技术。它利用多束激光照射目标,在目标处形成多幅干涉余弦条纹,利用余弦函数的傅里叶变换是 $\delta$ 函

数的性质,就可以抽取目标相应的傅里叶频率。通过改变发射光束的夹角实现条纹频率的变化,从而抽取目标不同的空间频率点,通过调制发射光束的频率差,实现条纹对目标的时间扫描,从而将目标频

**收稿日期**: 2010-07-05; **收到修改稿日期**: 2010-08-21

**基金项目**: 国家自然科学基金(10504043)、国家 863 计划(2009AAJ112)和国防科学技术大学优秀研究生创新资助(S090202)资助课题。

**作者简介**: 陈 卫(1985—),男,硕士研究生,主要从事光电成像与光电信息处理等方向的研究。

E-mail: chenweikeeping@163.com

**导师简介**: 黎 全(1976—),男,博士,副教授,主要从事激光成像技术方面的研究。E-mail: lq\_203@163.com

谱信息调制成了光强的时序信号。然后用强度探测器接收回波信号,对回波进行解调就可以得到目标的傅里叶频谱,再进行傅里叶反变换重构目标图像。影响远距离高分辨率成像的一个关键因素是大气湍流<sup>[1,2]</sup>,不同于采用自适应光学等方法的相位补偿技术<sup>[3,4]</sup>,FT技术采用多束激光照明的目的在于利用相位闭合技术消除大气湍流以及光程差等引起的相位畸变。

FT技术是目前国际上重点发展的主动式干涉成像技术,也是美国军方深空目标识别(SOI)计划中选取的少数几个高分辨率成像技术之一。20世纪末开始,美国以及俄罗斯等国就对FT技术进行了大量的理论和实验研究<sup>[5~8]</sup>。2000年左右在Trex公司承包下,美国空军研究实验室基于地球同步轨道目标照明成像国家实验基地(GLINT)已在新墨西哥州建成了一套傅里叶望远镜装置,用于对地球同步轨道的暗弱目标(同步卫星)成像,其基线长100 m,采用T型发射阵列,结果显示分辨率达8.4 nrad<sup>[8]</sup>。之后美国空军研究实验室又启动了SAINT项目,研究利用傅里叶望远镜技术实现对低轨目标的高分辨率成像探测<sup>[9,12]</sup>。至此,他们已经成功地将傅里叶望远镜应用到了对快速运动目标的成像上。国内在这一技术领域的研究相对滞后,仅有少量相关报道<sup>[13~15]</sup>。

傅里叶望远镜的理论研究在文献<sup>[14,15]</sup>中已有比较细致的阐述,本文在此理论基础上进行了FT技术的实验研究,以论证该技术的可行性,并为

以后的外场方案设计提供参考。

## 2 实验方案设计

图1是FT技术的原理示意图<sup>[5]</sup>。对静止目标成像,采用3束光同时干涉就可以了(这也是相位闭合技术要求的最少光束):固定其中一束作为参考光,其余两束分别在‘T’型阵列的x轴和y轴上等间距移动,或者在阵列各轴上已等间距排列好的发射孔之间切换。

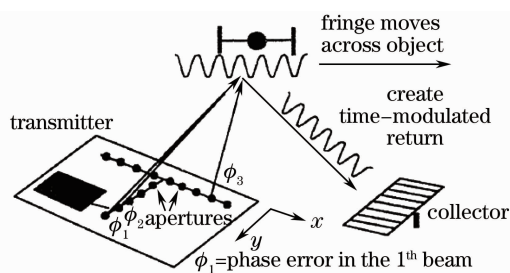


图1 FT原理示意图

Fig. 1 Schematic of FT 1 principle

在方案设计上有两点是需要考虑的:1)在室内实验阶段,排布阵列结构来抽取频谱点是比较困难的,所以我们只能通过其它等效的方法模拟阵列结构。2)在实际中,激光发射孔径一般只有数十厘米,如文献<sup>[9]</sup>中设计的实际发射孔径为10 cm,而目标物体达到几十米甚至上百米,因此光斑干涉时不是严格的平面波干涉,为此,实验设计时直接采用发散光照明目标,以接近实际情况。设计的实验方案以马赫-曾德尔干涉光路为基础,如图2所示。

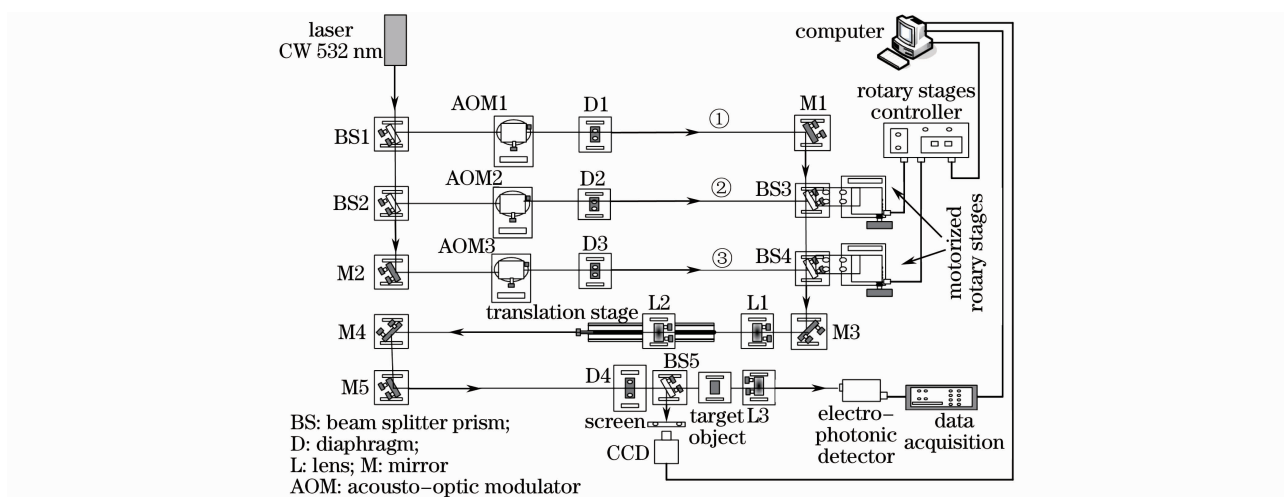


图2 FT实验方案示意图

Fig. 2 Scheme of FT experiment

激光从激光器出来后经分束镜BS1、BS2分成3路光,声光移频器(AOM)使这3路光彼此产生较小

的差频,实验中,3束光在移频85 MHz的基础上再分别移频了0,1,3 kHz,这样3个拍频信号就分别

为 1, 2, 3 kHz。当同时照明的光束很多的时候, 为了使光束间两两差频各不相同, 各自的移频量就难以直观的确定了, 这时可以通过数学上的 Golumb 法则<sup>[9]</sup>来实现。然后 3 束光经反射镜 M1 和分束镜 BS3、BS4 合束, 通过在正交方向旋转 BS3 和 BS4 来改变 3 路光的夹角, 继而改变条纹频率实现目标频谱的自动抽取。

图 2 中凸透镜 L1 的作用是将光束发散, 使得光束到达目标表面时光斑足以完全覆盖目标。同时, 3 束光在 L1 上形成了发射的阵列结构排布, 即模拟了图 1 中的“T”型阵列, 图 3 便是 L1 上 3 束光形成阵列的实物照片, 其中 ①, ②, ③ 分别对应图 2 中的 3 束光。

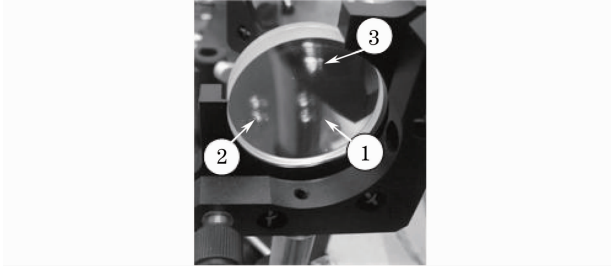


图 3 模拟的“T”型阵列

Fig. 3 Simulated T-shape array

L2 置于平移台上, 其作用是将 ①, ②, ③ 路光经 L1 发散后在目标表面重合, 使之产生干涉条纹。通过调节平移台适当改变 L1 和 L2 的间距就能调节 3 个光斑在目标处完全重合, 并且光斑尺寸仍然能覆盖目标, 图 4 给出了图 2 中经 BS3 后光束的传播示意图, 但为了简洁明了, 只绘出了 ①, ② 两束光的传播并且在 BS3 和 L1 之间忽略了对光束 ③ 起作用的 BS4 以及反射镜 M3。首先旋转 BS3 将两束光夹角调至最大, 然后根据目标的距离通过平移台调节 L2 与 L1 的间距, 待两光斑在目标处完全重合后, 固定平移台。当两束光夹角变小至 0 时, 两光斑仍然是重合的。因此可以看出在实验过程中, 不论光束夹角在最大与 0 之间如何改变, 都能保证在目标处 3 个光斑一直完全重合。光斑的有效重合面积不变有利于光束对目标的瞄准和跟踪, 使得目标在频率扫描时一直处于干涉场之中。而光斑的完全重合使得光斑能量得到最大程度的利用, 因为回波信号的振幅是与光强成正比的, 所以有利于提高回波信号的信噪比。如果采用平行光照明, 需要在图 2 的 ①, ②, ③ 位置处各放置一套准直系统<sup>[6]</sup>, 而且在目标处光斑的重合面积会随光束夹角的改变而改变, 因此, 采用发散系统使实验更加简单。

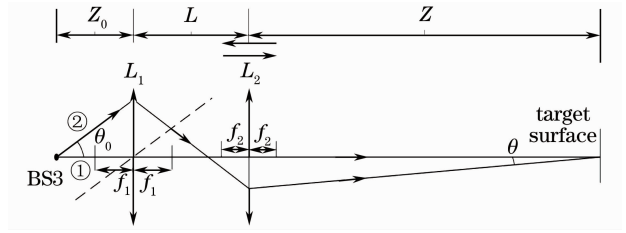


图 4 光束经 BS3 后的传播示意图

Fig. 4 Light path after BS3

需要指出的是, 即使是发散光干涉, 在发散角度不大的情况下, 其干涉效果与平面波干涉效果是一样的。这与在中心轴附近观察的杨氏干涉实验类似, 只考虑两束光, 如图 5 所示,  $S_1, S_2$  是 L2 上的光斑(与图 3 中的 ① 和 ② 类似)。

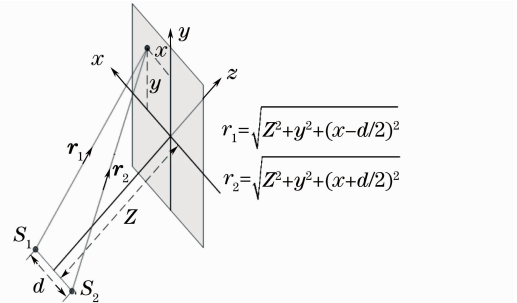


图 5 干涉条纹的形成图

Fig. 5 Generation of interference fringe

当  $d \ll Z$  以及  $x$  和  $y$  也比  $Z$  小得多(即光斑尺寸远小于传输距离)时, 光程差可表示为

$$\Delta = r_2 - r_1 = \frac{2xd}{r_1 + r_2} \approx \frac{xd}{Z}, \quad (1)$$

从而干涉场可表示为

$$I(x, t) = 2I_0 + 2I_0 \cos\left(\Delta\omega t + k_0 \frac{xd}{Z} + \delta_{12}\right), \quad (2)$$

式中  $I_0$  是单束光在目标处的光强(假设每束光光强一致),  $\Delta\omega$  是两光束频差,  $k_0$  为波数,  $\delta_{12}$  为两光束初始相位差。可见, 仍然形成的是余弦条纹, 条纹频率为

$$f = \frac{d}{Z\lambda}, \quad (3)$$

如图 4 所示, 令两光束到达目标处时光束夹角为  $\theta$ , 而 BS3 出射的光束夹角为  $\theta_0$ 。根据图 4 的几何关系和几何光学成像定理, 容易得到

$$\tan \theta = \left(\frac{Z}{f_2} - 1\right) \left(\frac{Z_0}{f_1} - 1\right) \tan \theta_0, \quad (4)$$

当  $\theta$  以及  $\theta_0$  比较小时, 可做近似  $\tan \theta \approx \theta$  和  $\tan \theta_0 \approx \theta_0$ , 最终得到条纹频率  $f$  与  $\theta_0$  关系为

$$f = \frac{d}{Z\lambda} \approx \frac{\theta}{\lambda} \approx \left(\frac{Z}{f_2} - 1\right) \left(\frac{Z_0}{f_1} - 1\right) \frac{\theta_0}{\lambda}. \quad (5)$$

实验中,  $f_1$  为 120 mm,  $f_2$  为 50 mm,  $Z$  约为 2 m, 激光初始直径 1 mm, 在目标表面光斑直径为 30 mm, 由此可计算出光束发散角达到了  $1.5 \times 10^{-2}$  rad, 完全满足上述近似条件。可见, 条纹频率与 BS3 旋转角度应该保持线性关系, 下文的实验测量(图 6)将为此验证。

最后, 干涉光场经过透射目标后由透镜 L3 汇聚, 光强探测器将光强信号转化为电压信号并经过隔直放大电路后, 经数据采集卡采集存入计算机, 实验中的光强探测器为美国 EOS 公司的硅探测器, 其有效探测直径是 1 mm, 频率响应为 1 MHz; 数据采集卡是 NI 公司的 USB6251, 最高采样频率达 1.25 MHz。

### 3 实验步骤与结果分析

在对目标进行频率扫描之前, 需要先对条纹场频率进行标定, 以确定抽取的目标频率点在频谱中的位置。由于光路是确定的, 条纹场频率可以由公式计算得出, 但实验中为了便于实验操作, 条纹场频率可以有更简单更有效的方法进行标定。如图 2 中, 在矩孔光阑与目标之间的分束镜 BS5 将光场投

射到一白屏上, 并用 CCD 照相机将光场拍下(此时各光束频差设置为零, 以得到静止条纹), 然后经傅里叶变换后求得该光场的空间频率。改变电控旋转台角度, 重复上述过程, 就能测量出夹角与条纹场频率的关系曲线。注意到, 两方向的线性斜率不一致, 因为由(5)式, 条纹频率与  $Z_0$  有关, 而由图 2 可以看到 BS3 和 BS4 之间有一段距离, 使得两方向的  $Z_0$  不一致。

由于电控旋转台是以步为单位, 即一个脉冲, 给出旋转台旋转步数与条纹频率的关系, 如图 6 所示。图 6(a)和图 6(b)分别是表示  $x$  和  $y$  方向, 即图 2 中控制 BS3 和 BS4 的旋转台旋转步数与目标处条纹频率的关系曲线。理论上这些关系曲线应该是直线, 所以用最小二乘法对实验点进行直线拟合, 得到线性相关度分别为 0.99 和 0.98, 良好的线性关系使实验操作简便精确。根据这些拟合的直线, 就知道形成任意条纹频率所需的旋转步数。图 7 是在测量图 6 关系过程中某一频率条纹场的 CCD 照片, 可以看到尽管是发散光干涉, 条纹场的余弦性仍然是很好的, 正如(2)式所示。

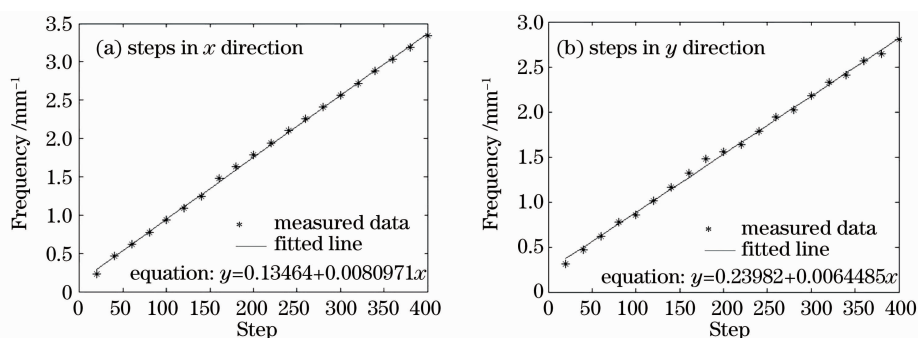


图 6 旋转台旋转步数与干涉条纹场频率的关系

Fig. 6 Relation of interference fringe field's frequency and stage's rotary step

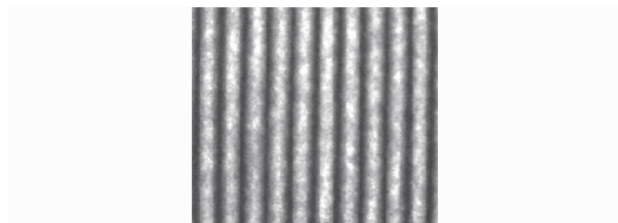


图 7 单频率的实验条纹场

Fig. 7 Fringe field of single frequency in experiment

当频率标定完后就可以对目标进行成像了, 图 8 是实验的一维(1D)和二维(2D)目标实物照片。目标都是透射式的, 一维目标是用直径 1 mm 的 3 根铜丝排列成的 3 条直线, 二维目标是在纸片上手工剪裁出的一个五角星, 纸片大小为 8 mm × 8 mm。

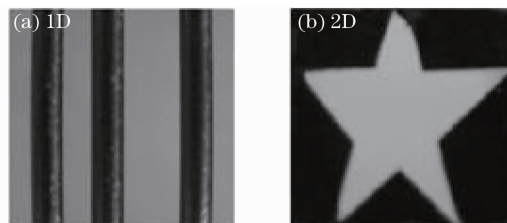


图 8 实验目标

Fig. 8 Experimental targets

由于物体透射率函数为实函数, 其傅里叶频谱是复共轭的, 因此对于一维目标只需采集  $x$  正半轴的频率点, 二维目标则需采集  $x$  和  $y$  正半轴以及第 1、第 2 象限中的频率点, 实验中  $x$  方向就是图 3 中 ①、② 确定的方向,  $y$  方向是 ①、③ 确定的方向。在

满足 Nyquist 采样定理的条件下,两方向上分别进行了 30 个空间频率点抽取,则每个象限抽取了  $30 \times 30$  个频率点,这样,对二维目标就总共采集了  $2 \times (30 \times 30 + 30) = 1860$  个频率点。时间采样频率为 30 kHz,在每个空间频率点位置处持续采样  $3 \times 10^4$  个数据。图 9 是基于全相位谱分析方法<sup>[13]</sup>的实验重构图像,可以看出重构图像较好的还原了目标,证明了傅里叶望远镜作为一种远距离高分辨率主动成像技术的可行性,也说明我们设计的 FT 实验方案是可行的。需要说明的是,傅里叶望远镜重构目标时,在理论上还原图像会产生某一方向的未知平移<sup>[15]</sup>,所以图 9 是对直接重构图像进行了周期延拓后剪裁得到的。当然,这种平移并不会对图像观察产生影响。

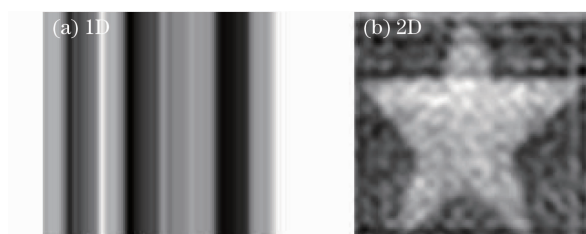


图 9 目标的 FT 实验重构图像

Fig. 9 Reconstructed images by FT in experiment

此外,该实验方案的成功还给了我们另外一点启示:利用发散光照明更有利于避免大气湍流的影响。因为相位闭合技术只能消除光束与光束之间整体的相位误差,即所谓的活塞抖动<sup>[5]</sup>,对于每束光截面内的相位起伏是无能为力的,而这种相位起伏直接决定了干涉条纹的质量,从而决定了目标频谱提取的准确性。当采用发散光照明时,就可以使得在大气层内的光斑很小,从而使得每束光截面内的相位起伏尽可能的小。假设对于直径 100 m 的地球同步轨道目标(高度 35786 km),按大气层厚度 20 km 计算,在大气层内光斑直径最大只需 5 cm,这样不仅使得采用小孔径发射成为可能,而且更大程度上避免了大气湍流的影响。我们实验方案设计的光束发散角达  $1.5 \times 10^{-2}$  rad,充分说明了减小光束直径而增大发散角的方法是可行的,对实际外场成像系统设计具有一定指导意义。实际上,美国的 GLINT 系统中,科研人员为进一步消除强湍流,将原来的大发射孔径用一个孔径矩阵来代替<sup>[16]</sup>,每一个矩阵元是一个小的发射孔径,而这些矩阵元发射同一频率的激光。他们这种做法实际也是减小孔径,当然势必要增大发散角。

## 4 结 论

独立设计了一种在实验室条件下实现傅里叶望远镜对远距离目标进行图像重构的实验方案,并且成功地实现了目标的图像重构。该方案具有以下几个特点:1)较好地模拟了‘T’型发射阵列结构,对在外场实验条件还不成熟的情况下研究 FT 技术的实用性具有一定研究意义;2)独立设计的双透镜组合方式,使得 3 个光斑能在目标表面充分有效地重合,最大程度利用了光斑能量,有利于提高信号信噪比,有利于对较大目标成像。在实际的 FT 系统中,还存在各光束对目标的瞄准和跟踪问题,由于该方案使得各光束在不同位置处能自动瞄准目标,因此其对外场的发射瞄准系统设计也具有一定参考价值;3)采用发散光照明目标,对外场成像系统进一步避免大气湍流的影响具有一定的参考价值。但是,我们也意识到图 9 的复原目标效果不是很好,一是采样不足,或者即使进行了高频采样,但探测器响应不足致使信号淹没在噪声中间(对一般目标,越到高频分量,回波信号越弱),相当于目标的高频部分损失或者错误;二是在算法上还有很多工作要做,主要涉及微弱信号检测和高分辨率图像处理。这些都是我们需要继续研究和改进的地方。

## 参 考 文 献

- Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun. Influence of atmospheric turbulence on far-field beam quality of coherent and incoherent combined laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1042~1046
- 周朴,刘泽金,许晓军. 湍流对相干合成与非相干合成远场光束质量的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1042~1046
- Huang Yinbo, Wang Yingjian. The effect of tracking jitter on the beam spreading induced by atmospheric turbulence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 152~156
- 黄印博,王英俭. 跟踪抖动对激光湍流大气传输光束扩展的影响[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 152~156
- Yang Huafeng, Rao Changhui, Zhang Yudong et al.. Adaptive optics system based on combinational deformable mirror for improving wavefront spatial correction capability[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 587~593
- 杨华峰,饶长辉,张雨东等. 一种提高波前空间校正能力的组合变形镜自适应光学系统[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 587~593
- Hua Zhili, Li Hongping. Phase errors compensation in airborne synthetic aperture radar data processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1149~1154
- 华志励,李洪平. 一种机载合成孔径激光雷达相位误差补偿方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1149~1154
- R. B. Holmes, T. J. Brinkley. Reconstruction of images of deep-space objects using Fourier telescope[C]. *SPIE*, 1999, **3815**: 11~22
- Peter Alekseevich Bakut. Theoretical studies of Fourier telescope for deep space imaging[R]. International Information Academy, Moscow, 1999. 1~44

- 7 K. R. MacDonald, J. K. Boger, M. Fetrow *et al.*. An experimental demonstration of Fourier telescope [C]. *SPIE*, 1999, **3815**: 23~29
- 8 Mathis J., Stapp J., Cullar E. L. *et al.*. Field experiment performance of the receiver elements for a Fourier telescope imaging system[C]. *SPIE*, 2005, **5896**(0F): 114~125
- 9 Stapp J., Spivey B., Chen L. *et al.*. Simulation of a Fourier telescope imaging system for object in low earth orbit[C]. *SPIE*, 2006, **6307**(01): 1~11
- 10 Stapp J., Cuellar E. L., Spivey B. *et al.*. Dynamic simulation of a multiple beam Fourier telescope imaging system [C]. *TELESCOPY & SENSORS, AMOS Conference*, 2006. 162~170
- 11 Brett Spivey, James Stapp, David Sandler. Phase closure and object reconstruction algorithm for Fourier telescope applied to fast-moving targets[C]. *SPIE*, 2006, **6307**: 1~16
- 12 E. Louis Cuellar, Justin Cooper, James Mathis *et al.*. Laboratory demonstration of a multiple beam Fourier telescope imaging system[C]. *SPIE*, 2008, **7094**(0G): 1~12
- 13 Chen Baogang, Zhang Jingxu, Yang Fei *et al.*. Design of segment support module of collecting light mirror in Fourier telescope for field experiment[J]. *Chin. J. Opt. & Appl. Opt.*, 2009, **2**(4): 329~333
- 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
- 14 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
- 15 Wang Xiaowei, Li Quan, Wang Yangui *et al.*. Analysis and simulation on phase closure of Fourier telescope[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2009, **31**(1): 38~42
- 王小伟, 黎 全, 王雁桂等. 傅里叶望远镜术中的相位闭合分析及其仿真[J]. *国防科学技术大学学报*, 2009, **31**(1): 38~42
- 16 Valery I. Mandrosov, Vicor I. Camiz. High-resolution Fourier-telescope imaging in strongly inhomogeneous atmosphere under high level of additive noises[C]. *SPIE*, 2004, **5572**: 49~56