

文章编号: 0253-2239(2010)12-3441-06

# 基于全相位谱分析的傅里叶望远镜目标重构

陈 卫 黎 全 王雁桂

(国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 傅里叶望远镜(FT)是一种用多束间距不同、频率受调制的激光干涉照明远距离目标,通过解调反射的强度时序信号来重构图像的主动成像技术。提出了一种基于全相位快速傅里叶变换(apFFT)谱分析的傅里叶望远镜图像重构是一种全新的回波信号处理方法,通过对回波信号做全相位傅里叶变换,能准确地直接提取信号的相位和振幅信息,再结合相位闭合算法消除畸变相位,重构目标图像。与传统的傅里叶望远镜数据处理方法相比,不需要对信号频率做精确估计,从而避免了频率误差带来的影响。这对于实现低轨道快速运动目标成像,以及在一定程度上消除移频器的移频误差和大气湍流的活塞抖动效应是非常有利的。数值仿真验证了该方法的可行性,并且通过信号存在白噪声和频率误差两种情况下与传统方法的对比,显示了其具有良好的消除频率误差能力,同时抑噪性能并不会下降。

**关键词** 图像重构;傅里叶光学;傅里叶望远镜;全相位快速傅里叶变换;相位闭合;远距离成像

**中图分类号** TN348 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103012.3441

## Object Reconstruction of Fourier-Telescope Based on All-Phase Spectrum Analysis

Chen Wei Li Quan Wang Yangui

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Fourier telescope (FT) is an active imaging technology which interferes several spatial diverse, frequency-encoded laser beams on a distant target, and reconstructs the object image by demodulating the reflected time signals of intensity. A new approach of processing the time history of the reflected intensity for object reconstruction of FT is devised based on all-phase spectrum analysis. The phase and amplitude of the FT signals could be deduced by all-phase fast Fourier transform (apFFT) directly and exactly. Then, after eliminating unknown atmospheric phase errors by phase-closure algorithm, the object image could be reconstructed. Compared with the traditional approach, this method can avoid frequency errors of the reflected signals from objects, because the measurement of the phase and amplitude need not depend on the signal frequency. So, it is of great advantage to applying FT to fast moving targets, such as low earth objects (LEO), because the speed errors of the targets will lead to the frequency errors of the reflected signal, which will degrade the reconstruction. Another advantage of this method is that it can eliminate the piston jitter of atmospheric aberrations and the spectrum-shift errors of acoustic-optic modulators to a certain extent, which also leads to the frequency errors of signals. The feasibility of this method is verified by computer simulation. Compared with the traditional method in two situations: the signal with noise and with frequency errors, the new method has the great ability to eliminate the frequency error while not degrading its repression of noise.

**Key words** image reconstruction; Fourier optics; Fourier telescope (FT); all-phase fast Fourier transform (apFFT); phase closure; distant imaging

收稿日期: 2010-03-12; 收到修改稿日期: 2010-04-23

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

## 1 引 言

傅里叶望远术(FT)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(SOD)计划中选取的少数几个高分辨率成像技术之一,它采用激光作为照明光源,利用激光良好的相干性获取物体的频谱,从而获得目标图像。美国 Trex 公司的傅里叶望远术技术小组基于空军实验室的 GLINT 系统和 SAINT 系统,对傅里叶望远术技术进行了大量深入的研究。特别是近年来,他们将傅里叶望远术技术引向了对快速运动目标(如低轨道卫星)成像的发展方向<sup>[1~4]</sup>。在远距离光学高分辨率成像上,国内主要集中在合成孔径技术和综合孔径干涉成像技术方面<sup>[5,6]</sup>,在这一技术领域的研究还比较滞后,也有少量相关报道<sup>[7,8]</sup>。

傅里叶望远术回波信号包含了多个频率的时序信号的叠加,传统的方法在解调信号时需要预先知道频率的精确值<sup>[9]</sup>,但是移频器的移频误差以及大气湍流的影响都会使回波信号的实际频率与预设值产生偏差,从而影响成像效果。并且,对低轨道快速运动目标的成像已经成为傅里叶望远术发展的一个重要趋势,目标的运动直接影响回波信号的频率,对目标速度的估计不仅产生新的误差影响成像质量,

而且势必增加操作时间,不利于快速成像。本文提出的基于全相位谱分析的傅里叶望远术图像重构方法利用全相位傅里叶变换(apFFT)具有“相位不变”的优良性质,通过对信号做全相位傅里叶变换后直接提取信号的相位和幅值信息,再结合相位闭合算法直接重构目标。这是一种全新的傅里叶望远术数据处理方法,不依赖于频率的精确估计,从而放宽了条件限制,减少了误差来源。这种直接提取信号瞬时相位的方法还使得照明激光可以采用连续型而非脉冲型激光,这些优势都有望促进傅里叶望远术技术,特别是其在对快速运动目标成像上的发展。

## 2 全相位谱分析理论简介

全相位数字信号处理是近年提出的一种数字信号处理的新方法<sup>[10]</sup>,该方法可以在包括数字图像和信号的滤波器设计、信号重构、信号的频谱分析和自适应信号处理等研究领域范围应用。

假设  $x(n)$  是一离散的时序信号, $x(0)$  为需要考察的样本点,全相位快速傅里叶变换就是从考虑包含此样本点所有循环移位后的数据分段的快速傅里叶变换(FFT)衍生而来。可以认为对于时序中的点  $x(0)$ ,存在且只存在  $N$  个包含该点的  $N$  维向量:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_0 &= [x(0), x(1), x(2), \dots, x(N-1)]^T, \\ \mathbf{x}_1 &= [x(-1), x(0), x(1), \dots, x(N-2)]^T, \\ &\dots\dots \\ \mathbf{x}_{N-1} &= [x(-N+1), x(-N+2), x(-N+3), \dots, x(0)]^T. \end{aligned}$$

将每个向量进行循环位移,把样本点  $x(0)$  移到首位,再对准  $x(0)$  相加并取其平均值,则可得到全相位数据向量:

$$\mathbf{x}_{ap} = \frac{1}{N} \times$$

$$[Nx(0), (N-1)x(1) + x(-N+1), (N-2)x(2) + 2x(-N+2), \dots, x(N-1) + (N-1)x(-1)]^T. \quad (1)$$

对  $\mathbf{x}_{ap}$  进行  $N$  阶传统傅里叶变换,既得到全相位 FFT 输出。为改善谱分析性能,一般需要对信号进行加窗处理。传统 FFT 须引入长度为  $N$  的窗系列:  $\mathbf{f} = [f(0), f(1), \dots, f(N-1)]^T$ , 而全相位 FFT 须引入长度为  $(2N-1)$  的卷积窗  $\mathbf{w}_c = [w_c(-N+1), \dots, w_c(-1), w_c(0), w_c(1), \dots, w_c(N-1)]^T$ , 其满足:存在另一长度为  $N$  的窗系列  $\mathbf{b} = [b(0), b(1), \dots, b(N-1)]^T$ , 使得如下数学关系成立:

$$w_c(n) = \begin{cases} f(n) * b(-n) = \sum_k f(k)b(k+n) & n \in [-N+1, N-1] \\ 0 & |n| \geq N \end{cases} \quad (2)$$

全相位 FFT 谱分析具有如下基本性质:

- 1) 全相位 FFT 谱分析系统是一个线性系统,仍保留传统 FFT 谱分析的“线性”性质及相移性质;
- 2) 相对于传统 FFT,全相位 FFT 抑制频谱泄

露的性能得以提高;

- 3) 在全相位 FFT 谱线中,信号主谱线附近的相位谱值就是信号的初相位值,即使在信噪比较低的情况下,其仍有较高精度。即全相位 FFT 具有

“相位不变性”，而由传统 FFT 相位谱是不能直接获取信号初始相位的；

4) 高斯随机噪声经 FFT 和全相位 FFT 后，其频谱均方和之比为 2/3。

### 3 傅里叶望远镜术回波信号特征提取与图像重构

设目标反射率函数为  $o(x, y)$ ，用空间频率为  $(f_x, f_y)$ 、时间频率为  $\Delta\omega$  的余弦条纹场

$$I(x, y, t) = R^2 [1 + \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \delta)]. \quad (3)$$

照射时，回波信号将有如下形式<sup>[6]</sup>：

$$S(t) = \iint o(x, y) I(x, y, t) dx dy = R^2 [O_0 + |O(f_x, f_y)| \times \cos(\Delta\omega t + \delta + \varphi(f_x, f_y))], \quad (4)$$

式中  $R$  为干涉光振幅， $\delta$  包括光场初始相位和因光传输引入的畸变相位， $|O(f_x, f_y)|$  和  $\varphi(f_x, f_y)$  分别为目标在空间频率  $(f_x, f_y)$  处的傅里叶振幅和相位。

可见，当用两束干涉光照射目标时，回波为单一的余弦信号，当用三束光照射时，回波将是三个余弦信号的叠加，余弦信号的相位就是目标物体相应傅里叶频率的相位和畸变相位之和，其振幅与目标物体相应傅里叶频率的幅度成正比。以往一般都是文献<sup>[8]</sup>中用  $\exp(-j\omega_{nm}t)$  加权平均的方法或者图 1 所示的方式<sup>[9]</sup>来处理信号，这样能直接得到目标傅里叶复振幅的测量值，再结合相位闭合算法就可重构图像。但不管是将信号与  $\exp(-j\omega_{nm}t)$  还是  $\sin \omega_{nm}t$  相乘，都需要预先精确知道  $\omega_{nm}$  值。前者的方法还要求采样频率  $\omega_s$  满足

$$N\omega_{nm} = k\omega_s,$$

式中  $N$  为采样点数目， $k$  为正整数，从而要求各个  $\omega_{nm}$  之间满足整数倍关系，文献<sup>[9]</sup>给出了各差频的经验关系式： $\Delta\omega_m \sim m^2 \Delta\omega$ ，此外，差频的确定也可以通过戈洛姆法则(Golomb ruler)<sup>[2]</sup>来求取。但在实际应用中，移频器的移频误差、大气湍流造成的频率漂移等各方面的因素使得回波信号频率与预设值之间会存在偏差，从而使得传统的数据处理产生误差。特别是在对运动目标成像时，因为目标的速度直接影响回波信号的频率，按图 1 所示的数据处理方法，还需要先精确估计目标的运动速度，这样又势必增加成像时间，不利于快速成像。另外，如果采用传统的数字信号处理方法来估计最终的回波信号频

率，又会因为数据截断而产生新的误差。因为离散数据的存储实际上就是对信号进行截断的过程，而截断信号会使信号处理(如数字滤波、谱分析、信号重构等)的性能下降，这是个普遍存在的不可忽视的问题。“全相位处理方法”就是考虑包含某样点的所有可能的数据截断情况并分别进行处理，再有机综合这些处理结果，得到最终的输出，从而解决有数据截断引起的信号处理性能下降的问题。

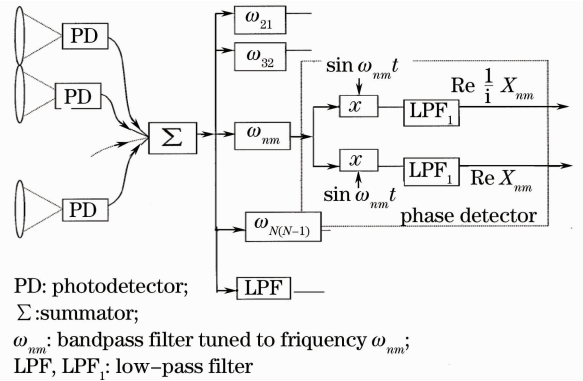


图 1 傅里叶望远镜的传统信号处理方法

Fig. 1 Traditional signal processing of FT

由(4)式可知，只需知道信号中各频率分量在同一时刻的相位和振幅，再结合相位闭合算法消除畸变相位，就可以重构图像。文献<sup>[11]</sup>指出，全相位 FFT 具有非常优良的抑制频谱泄露性能和“相位不变性”，可以进行高精度的相位测量，与 FFT 测相相比，该方法无需任何校正，而且抑噪性能更好。相位和振幅的估计流程如图 2 所示。其中  $k^*$  为信号某一频率分量的主谱线， $\varphi_1(k^*)$  为主谱线处的相位， $\hat{\theta}$  和  $\hat{A}$  即为信号相位和振幅的估计值。信号经全相位傅里叶变换后每一频率的主谱线位置  $k^*$  可以在某一置信区间内根据主谱线特征用简单的最大值判断法搜索得到，因而不需要预先知道频率的精确值，同样对运动目标成像时，也不需要目标精确的运动速度，从而有效避免了因目标运动可能带来的误差。

由于全相位 FFT 的“相位不变性”，由主谱线的相位值就可以直接作为样点瞬间相位值，而无需校

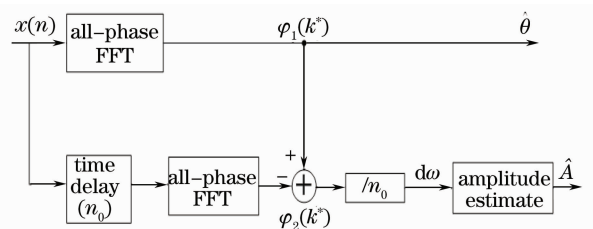


图 2 apFFT 信号处理框图

Fig. 2 Signal processing block diagram of apFFT

正也不依赖于频率的估计,因此,

$$\hat{\theta} = \varphi_1(k^*). \quad (5)$$

对于幅值的估计可以进行校正,比如基于全相位 FFT 谱分析的时移相位差校正法<sup>[12]</sup>,即图 2 所示方法,估计公式为

$$\hat{A} = \frac{|Y(k^*)|}{F_g^2(d\omega)}, \quad (6)$$

式中  $d\omega = [\varphi_1(k^*) - \varphi_2(k^*)]/n_0$ ;  $|Y(k^*)|$  即为信号全相位 FFT 在主谱线处的幅值,可由实验测得;  $F_g^2(d\omega)$  可将  $d\omega$  值带入窗函数的傅里叶变换表达式而得到。其实,在 FT 图像重构时,幅值的精度要求远小于相位的精度要求,因此一般情况下直接用  $|Y(k^*)|$  估计就可以了。

需要注意的是,(5)式所示的  $\hat{\theta}$  包括了畸变相位  $\delta$  和目标频谱的真实相位  $\varphi(f_x, f_y)$ ,即

$$\hat{\theta} = \varphi_1(k^*) = \Delta\omega t_0 + \varphi(f_x, f_y) + \delta, \quad (7)$$

式中  $t_0$  为全相位数据的中点时刻。经文献[6]的相位闭合算法消除  $\delta$  和  $\Delta\omega t_0$  后,即可得到  $\varphi(f_x, f_y)$  的估计值  $\hat{\varphi}(f_x, f_y)$ 。而(6)式所示的振幅  $\hat{A}(f_x, f_y)$  与目标频谱真实振幅  $|O(f_x, f_y)|$  相比还相差一个比例因子,即(4)式所示的  $R^2$ ,当形成干涉条纹的两光束强度不等时,此比例因子实际上是条纹的对比度。文献[13]指出,在图像重构时可以将  $\hat{A}$  直接作为  $|O(f_x, f_y)|$  的估计,即认为每次条纹的对比度是大致相同的,这也是基本符合实际情况的。所以,最后得到目标频谱的估计值:

$$O(f_x, f_y) = \hat{A}(f_x, f_y) \exp[j\hat{\varphi}(f_x, f_y)], \quad (8)$$

再经傅里叶反变换就可还原目标图像。

## 4 仿真实验

为了验证这种直接提取信号特征来重构图像的方法是可行的,在 Matlab 平台上进行了仿真实验。并通过在下面两种情况下,与图 1 所示的传统方法的比较来说明该方法的优劣所在。

### 4.1 回波信号频率存在误差的情况

回波信号频率误差的来源主要有:移频器的移频误差;大气湍流的影响<sup>[14]</sup>;运动目标的速度估计误差和多普勒效应。在这些误差来源中,有固定误差也有随机误差,其中大气湍流引起的频率误差随机性最大,假设回波信号频率服从在某一区间的均匀随机分布。其实,信号频率服从何种分布是无关紧要的,因为并不需要其统计特性。

图像仿真目标为一幅像素  $76 \text{ pixel} \times 69 \text{ pixel}$

的灰度图片。仿真参数:发射阵列采用“T”型结构,每次用 3 束光照射,3 束光之间的差频预设值分别为 20, 40 和 60 kHz,误差随机区间长度为 500 Hz。信号采样频率为 200 kHz,每个目标空间频率点采样时间 10 ms,在 X 方向和 Y 方向分别抽取 35 个频率点,总共抽取 2520 个频率点。采用全相位谱分析方法时,为搜索主谱线位置,置信区间为频率预设值左右各拓展 5 kHz,即[15, 25],[35, 45]和[55, 65] kHz,当频率误差比较大时可适当增大搜索区间。在(2)式的窗函数选取上采用汉明窗与汉宁窗的卷积,由于每个空间频率点采样了 2000 个点,单窗长度取为 1000 个点,这样实际利用的数据点数为 1999。在幅值测量时,直接采用  $|Y(k^*)|$  来估计  $|O(f_x, f_y)|$ 。重构图像质量评价指标采用重构图像与理想情况下(无噪声、无误差)的重构图像的相关测度表示,相关测度定义为

$$\gamma = \frac{\left[ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(i, j) * g(i, j) \right]^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f^2(i, j) * \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g^2(i, j)}. \quad (9)$$

图 3(a)为在理想情况下的重构图像,并且通过仿真已经证实在理想情况下,这两种方法的重构质量是一样的,它们的相关测度值为 1。

图 3(b)为存在频率误差情况下用本文提出的新方法重构的结果,与图 3(a)的相关测度为 0.9998。

图 3(c)为存在频率误差时采用图 1 所示的传统方法重构的结果,与图 3(a)的相关测度为 0.9823(由于图像比较简单,虽然图像主观质量较差,但相关测度值仍比较高)。

可见,回波信号频率误差对传统方法的图像重构质量影响较大,而基于全相位谱分析的方法几乎不受频率误差的影响。显然,当频率误差越大,前者的重构效果越差,但只要搜索区间大于误差区间,对后者仍然没有影响。

由于在 X 方向和 Y 方向分别采样 35 个频率点,重构图像像素应该为  $71 \text{ pixel} \times 71 \text{ pixel}$ ,但为了使图像看起来更平滑细致,用补零操作将频谱空间扩展到  $542 \text{ pixel} \times 542 \text{ pixel}$ ,同时考虑到傅里叶望远术重构的图像与原图像相比会有某一方向的平移,因此图 3(a)~(c)对重构图像进行了周期延拓,使得视野中总有一幅完整的图像。

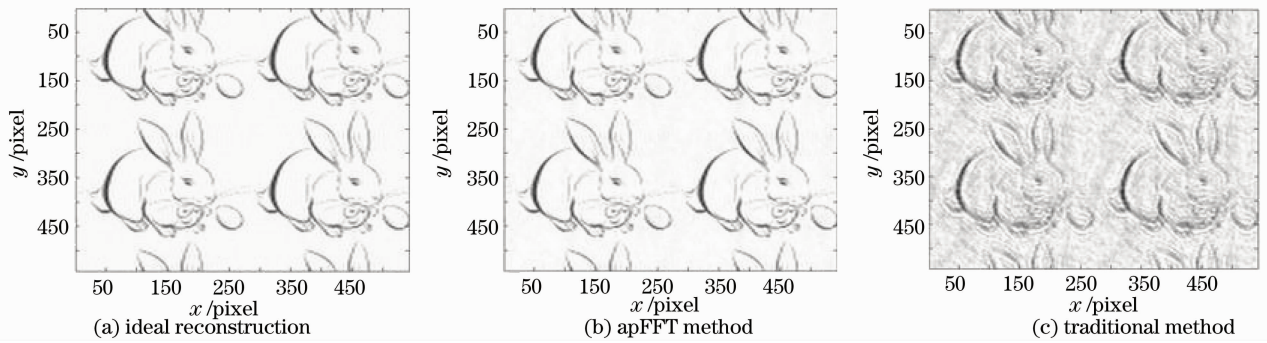


图 3 存在频率误差时重构图像对比

Fig. 3 Reconstructed image contrast by different methods with frequency errors

#### 4.2 回波信号存在噪声的情况

为单独考察噪声的影响,回波信号频率误差设为 0,其它参数同上。噪声模拟为高斯型白噪声,用峰值信噪比 (PSNR) 表征噪声强度(信号峰值采用最大峰值)。

图 4 为分别采用全相位谱分析方法和传统方法重构的图像质量随 PSNR 变化的关系曲线,图像质量仍用与理想情况下重构图像的相关测度表示。仿真时,曲线样点的 PSNR 分别为  $-20, -10, 0, 10,$

30 和 100 dB。图 4(a)与图 4(b)比较表明,这两种方法的白噪声抑制能力相差不大,但都比较高,通过大量仿真实例发现 PSNR 一般大于 10 dB 时,图像重构质量已经非常接近无噪声情况。也就是说新方法具备消除频率误差能力的同时,抑噪能力并不会下降。当然,结合其它微弱信号检测的方法,这两种方法的抑噪能力都可以进一步提高,但已经不涉及它们的本质区别。

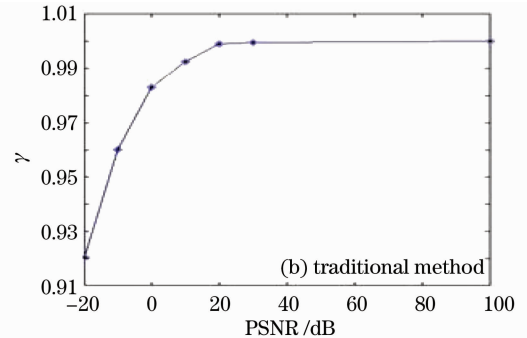
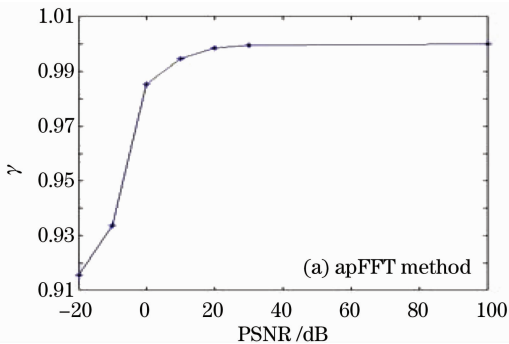


图 4 重构图像质量与信号峰值信噪比关系曲线

Fig. 4 Reconstructed image quality versus PSNR

通过以上两种情况的比较可以发现,基于全相位谱分析方法的傅里叶望远镜术图像重构技术与传统方法相比,所需的信息量要少(不需要精确的信号频率),但在其它能力不变的同时还具备有消除频率误差的能力。

## 5 结 论

提出了一种基于全相位 FFT 谱分析的信号特征提取方法的傅里叶望远镜术图像重构技术,通过数值仿真,证实了该方法是可行的,并且不受频率误差的影响,初步表明其也具有较强的抑噪能力。因此该方法与传统方法相比,在抑噪能力不下降的同时,放宽了对光束的频差限制,不需要考虑移频器的移

频误差和大气湍流造成的频率漂移,以及快速运动目标的速度误差,对傅里叶望远镜术的实际应用特别是对快速运动目标的成像具有很好的应用前景。但是,进一步降噪处理措施是以后工作中还需要完善的。

## 参 考 文 献

- 1 Brett Spivey, James Stapp, David Sandler. Phase closure and object reconstruction algorithm for Fourier telescope applied to fast-moving targets[C]. *SPIE*, 2006, **6307**(2): 1~16
- 2 J. Stapp, B. Spivey, L. Chen *et al.*. Simulation of a Fourier telescope imaging system for object in low earth orbit[C]. *SPIE*, 2006, **6307**(1): 1~11
- 3 J. Stapp, E. L. Cuellar, B. Spivey *et al.*. Dynamic simulation of a multiple beam Fourier telescope imaging system[C]. *Telescope & Sensors, AMOS Conference*, 2006, 162~170
- 4 E. Louis Cuellar, Justin Cooper, James Mathis *et al.*.

- Laboratory demonstration of a multiple beam Fourier telescope imaging system[C]. *SPIE*, 2008, **7094**: 1~12
- 5 Liu Liren. Synthetic aperture imaging lidar (VI): space-time speckle effect and heterodyne signal-to-noise ratio [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2326~2332  
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(VI): 时空散斑效应和外差探测信噪比[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2326~2332
- 6 Wang Haitao, Zhu Yongkai, Cai Jiahui *et al.*. Research on the UV coverage and the optimization arrangement of the optical synthetic aperture telescope array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1112~1116  
王海涛, 朱永凯, 蔡佳慧 等. 光学综合孔径望远镜的 UV 覆盖和孔径排列的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1112~1116
- 7 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
- 8 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
- 9 Peter Alekseevich Bakut. Theoretical Studies of Fourier Telescope for Deep Space Imaging[R]. International Information Academy, Moscow, Russia, Laser and Information Technologies Department, 1999, A827863: 1~44
- 10 Wang Zhaohua, Huang Xiangdong. All-Phase Spectrum Analysis and Filter of Digital Signal[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. 1~71  
王兆华, 黄翔东. 数字信号全相位谱分析与滤波技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009. 1~71
- 11 Wang Zhaohua, Huang Xiangdong. Principle of phase measurement and its application based on all-phase spectral analysis[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2009, **24**(6): 777~782  
王兆华, 黄翔东. 基于全相位谱分析的相位测量原理及其应用[J]. *数据采集与处理*, 2009, **24**(6): 777~782
- 12 Huang Xiangdong, Wang Zhaohua. All-phase time-shift phase difference correcting spectrum method[J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, **41**(7): 815~82  
黄翔东, 王兆华. 全相位时移相位差频谱校正法[J]. *天津大学学报*, 2008, **41**(7): 815~820
- 13 R. B. Holmes, T. J. Brinkley. Reconstruction of images of deep-space objects using Fourier telescope [C]. *SPIE*, 1999, **3815**: 11~22
- 14 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