

文章编号 1004-924X(2012)10-2275-08

基于全相位谱分析的傅里叶 望远镜外场实验数据处理

于树海^{1,2}, 王建立^{1*}, 董磊¹, 刘欣悦¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 为了提高傅里叶望远镜(FT)的成像质量, 实现对运动目标的高分辨率成像, 研究了能抑制由声光移频器移频误差、光学器件偏差及信号采样截断等产生的频谱泄漏且能实时计算信号频率的数据处理方法。首先, 采用全相位预处理技术对外场静态目标的采样信号进行处理; 通过搜索算法得到每束干涉光的整点频率最大值。然后, 基于 apFFT 谱分析时移相位差校正法计算每束干涉光的真实频率。最后, 对非整点频率解调, 采用 5 点最小二乘拟合方法, 得到目标的傅里叶分量信息。实验结果表明: 与传统方法相比, 本文提出的数据处理方法得到的重构图像的斯托里尔比(Strehl)相应提高了 3%。另外, 本文方法对频谱泄漏的抑制能力更强; 对静态目标实验数据进行处理后, 重构图像质量有一定的提升; 该方法也为运动目标的成像数据处理提供了参考。

关键词: 傅里叶望远镜; 全相位谱分析; 频率校正; 图像重构; 数据处理

中图分类号: TH743; TP751 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122010.2275

Field experiment data processing of Fourier telescope based on all phase spectrum analysis

YU Shu-hai^{1,2}, WANG Jian-li^{1*}, DONG Lei¹, LIU Xin-yue¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)
* *Corresponding author, E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn*

Abstract: To improve the imaging quality of a Fourier Telescope(FT) and to implement the high-resolution imaging for moving targets, the data processing methods to inhibit the spectral leakage generated by the frequency shift error from an acousto-optic frequency shifter, the bias of an optical device and truncating signals were researched and how to calculate the signal frequency in real time was given. Firstly, an all phase spectrum analysis technology was used to process sampling signals of a static target and a search algorithm was taken to capture the maximum frequency value of each interferometric beam. Then, the actual frequencies of any two beams were calculated by an all phase time shift

收稿日期: 2012-06-09; 修订日期: 2012-07-09.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2010AAXX4250)

phase difference correcting spectrum method. Finally, the frequency deviation and demodulated target's Fourier information were obtained and the demodulation frequency of the non-whole point was estimated by the least square fitting. The results show that the Strehl ratio of reconstructed image by proposed method is increased by 3% as compared with that of traditional methods. Furthermore, the new method has a higher inhibiting ability for spectral leakage, better reconstructed image, and it can provide the reference for data processing of moving targets.

Key words: Fourier telescope; all phase spectrum analysis; frequency correction; image reconstruction; data processing

1 引言

随着航天航空及卫星技术的发展,对空间目标的高分辨率成像成为近年来国内外研究的热点。传统的光学望远镜需要自适应光学技术来降低大气湍流的影响,而随着对空间目标探测分辨率要求的逐渐提高,要求望远镜的口径越来越大,相应的自适应光学系统单元数逐渐增多,系统的技术难度和成本也越来越高。傅里叶望远镜(FT)多采用激光主动照明技术,同时拥有光学合成孔径成像^[1]的优势,接收器采用能量系统,技术难度小且价格低廉。其照明光束采用单独的发射孔径,通过改变最远发射望远镜的距离可以提高成像分辨率,系统的可扩展性较高,受大气湍流影响小,不需要自适应光学校正,因此其成为对深空暗弱目标高分辨率成像的新技术之一^[2-11]。

通过理论分析及室内外实验发现,FT对静态目标成像的分辨率受到噪声和频谱泄漏等因素的影响。谱泄漏主要由声光移频器(AOS)移频不稳定造成,硬件方面需提高AOS移频稳定性,而移频稳定性越高,制造技术难度和成本增加越明显,并且不可能在成像过程中保持频率完全稳定。应用FT对运动目标成像,返回信号的频率值因目标的运动速度和高度实时变化,因此,研究一种新的不受频谱泄漏及能实时计算信号频率的数据处理方法具有重要的意义。文献[12]首先采用全相位谱分析技术对傅里叶望远镜成像进行数值模拟研究,但并没有给出基于全相位处理技术的傅里叶望远镜外场实验数据处理的全过程。

本文在以上研究的基础上,开展了FT外场静态目标实验数据处理,完成了处理全过程。通过与传统方法重构的图像对比,成像质量有一定的提升。通过分析傅里叶望远镜对静态目标成像

和运动目标成像的异同,验证了本文方法满足对运动目标高分辨率成像的数据处理要求。

2 基本原理

2.1 傅里叶望远镜成像基本原理

傅里叶望远镜原理如图1所示,采用发射基线上不同位置的3束或者多束激光同时照射目标,目标在照射的干涉条纹范围内移动,或者用声光移频器使一个光源相对另一个光源产生微小频移而使条纹在目标上移动,实现将目标的空间频率信息在时域上进行编码。返回的随时间变换的信号就是目标反射率的傅里叶分量。对接收的信号进行傅里叶变换(FFT)(本文采用全相位傅里叶变换(apFFT)),在频域中进行信号处理,每个三重组利用相位闭合技术^[2,8]消除由大气湍流及光学器件等引起的未知相位偏差。相位偏差消除后,比值只包含与目标有关信息。

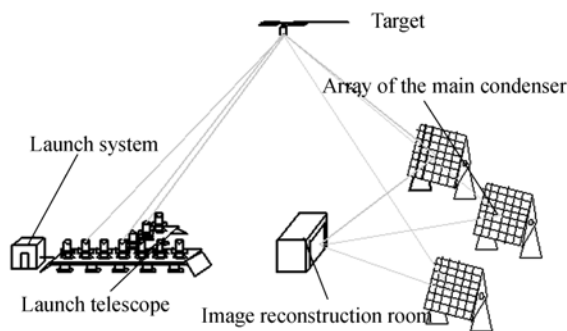


图1 傅里叶望远镜成像原理

Fig. 1 Imaging principle of Fourier telescope

为了从比值中获得非比值的傅里叶分量信息,必须完成一系列测量,对于具有均匀间隔的发

射器阵列,简单地计算相邻的比值之间乘积即可得到每个估算的傅里叶分量。最后通过重构得到目标图像。

2.2 全相位数据预处理

全相位输入数据需要借助卷积窗(τ_c)来完成从长度 $(2N-1)$ 的数据向量^[13]

$\mathbf{x}=[x(n+N-1), \dots, x(n), \dots, x(n-N+1)]^T$ 到长度为 N 的数据向量

$\mathbf{x}_1=[x_1(0), x_1(1), \dots, x_1(N-1)]^T$ 的映射。可认为对于时间序列中的一点 $x(0)$, 存在且只存在 N 个包含该点的 N 维向量:

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

将每个向量进行循环移位,把样本点 $x(0)$ 移到首位,则可得到另外的 N 个 N 维向量:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_0' &= [x(0) \quad x(1) \quad x(2) \cdots x(N-1)]^T \\ \mathbf{x}_1' &= [x(0) \quad x(1) \quad x(2) \cdots x(-1)]^T \\ &\quad \dots \\ \mathbf{x}_{N-1}' &= [x(0) \quad x(-N+1) \quad x(-N+2) \cdots x(-1)]^T \end{aligned} \quad (2)$$

对应相加并取平均得到全相位数据向量:

$$\mathbf{x}_{ap} = \frac{1}{N} [Nx(0), (N-1)x(1) + x(-N+1), \dots, x(N-1) + (N-1)x(-1)]^T. \quad (3)$$

根据卷积窗的不同,全相位数据预处理分为无窗、单窗和双窗 3 种类别。当信号的频率没有偏移或者偏移程度很小时,泄露问题并不突出,但加窗后,信号旁谱线的泄露反而突出起来。当信号的频率偏离 0.5 个 $\Delta\omega$ 时,双窗谱分析结果基本上只剩下 2 根高度相等的主谱线,而无窗、单窗情况除了 2 个主谱线外,还存在很小的旁谱泄漏。其中单窗谱线泄露比无窗时要小些。因此,要根据实际应用情况选择性加窗。

2.3 apFFT 谱分析的时移相位差校正法

以单频复指数为参考简要介绍时移相位差校正法的基本原理^[14],研究序列 $\{x(n) = Ae^{j(\omega^* n + \theta)}, n = [-N+1, N-1]\}$ (其中: A 为振幅, ω^* 为频率, θ 为相位) 与延时 n_0 后的序列 $\{x(n) = Ae^{j[\omega^*(n-n_0) + \theta]}, n = [-N+1, N-1]\}$ 的相位变化情况。

$\{x(n) = Ae^{j(\omega^* n + \theta)}, n = [-N+1, N-1]\}$ 的双窗 apFFT 谱分析为 $Y(k) = Ae^{j\theta} F_g^2(k\Delta\omega - \omega_0)$, 从而主谱线 k^* 上的相位谱表达式为 $\varphi_1(k^*) = \theta$, 延时后的双窗 apFFT 谱分析的结果为: $Y(k) = Ae^{j(\theta - \omega^* n_0)} F_g^2(k\Delta\omega - \omega_0)$, 主谱线 k^* 上的相位谱为 $\varphi_2(k^*) = \theta - \omega^* n_0$, 将 2 个序列主谱线上的相位谱进行差值运算, 有 $\varphi = \varphi_1(k^*) - \varphi_2(k^*) = \omega^* n_0$, 从而可得到信号频率的估计公式 $\hat{\omega}^* = \varphi/n_0$ 。为了对“相位模糊”进行补偿, 可以进行以下运算。主谱线 k^* 处对应的数字角频率为 $2k^* \pi/N$, 经过大小为 n_0 的延时后, 这个数字角频率会引起 $2k^* n_0 \pi/N$ 的附加相移, n_0 增大时, 这部分附加相移也随着增大, 而主谱线位置 k^* 是可以观测到的, 因此相移 $2k^* n_0 \pi/N$ 就是频率差补偿值。从而得到经过相位补偿后的频率估计公式: $\hat{\omega}^* = [\varphi_1(k^*) - \varphi_2(k^*)]/n_0 + 2k^* \pi/N$ 。

3 FT 对静态和运动目标成像分析

以两光束干涉为例简要介绍 T 型发射阵列傅里叶望远镜对静态目标和运动目标成像探测的异同, 并对运动目标成像可行性进行了分析。在目标 r 处, t 时刻接收到的目标反射光强度为公式(4)。式中: $\sigma(r)$ 表示在位置 r 处目标表面光强反射率, \mathbf{v} 目标运动速度, c 是比例常数, I_0 是目标表面入射光强。 ω_1 和 ω_2 为两束光的频率。 $\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2 = k_0 \Delta x/z$, 其中 k_0 为发射光的光波数, Δx 为 2 个激光器之间的距离, z 为成像目标距离。 ϕ_1 和 ϕ_2 为发射器之间初始未知相位。 ξ 表示声光移频器和光学器件产生的频率偏差。傅里叶望远镜的发射器彼此间隔相对探测目标距离相当的小, 因此可以近似认为目标的运动速度 \mathbf{v} 和目标距离 z 对每个发射器的影响相同。但由于目标运动速度对于系统来讲是未知的, 因此需要在解调过程中寻找新的方法来确定解调频率, 这是运动目标和静态目标成像的最主要差别之一。静态目标成像为公式(5), 其中 $(\omega_1 - \omega_2)$ 为声光移频器的预先设定的频率差值, 对比式(4)和式(5), 解调频率都受到 ξ 的影响。若能精确计算出反射的光强信号频率值, 即计算出 $(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{v}$ 和 ξ 可对运动目标进行成像。本文外场实验虽然是对静态目标进行成像并且使用了声光移频器, 但解调过程对频率值进行搜索, 验证了此数据处理方法对运动目标成像

的可行性,同时应用本文方法可以降低 ξ 对成像质量的影响。

$$I_r(\mathbf{r}, t) = o(\mathbf{r}) \cdot cI_0 \{ 2 + \exp i \cdot [(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{v}t) - (\omega_1 - \omega_2 + \xi)t + \phi_1 - \phi_2] + c \cdot c \} , \quad (4)$$

$$I_r(\mathbf{r}, t) = o(\mathbf{r}) \cdot cI_0 \{ 2 + \exp i \cdot [(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} - (\omega_1 - \omega_2 + \xi)t + \phi_1 - \phi_2] + c \cdot c \} . \quad (5)$$

4 实验数据处理及分析

4.1 外场实验简介

实验发射基线配置分别为 $9 \times 9, 17 \times 17, 33 \times 33, 65 \times 65$ 。采用镜面目标外加漫射体做成反射式目标如图 2, 相比原透射式目标^[7,15]更接近实际工程系统。目标直径为 2.5 mm。外场实验选择目标到主镜水平距离为 102 m(系统的成像距离)如图 3, 验证了大气下行链路对成像质量的影响。对不同空间频率目标、不同发射基线长度进行了成像验证, 系统光路简图如图 4。其中 PMT 为光电倍增管, AOS 为声光移频器。

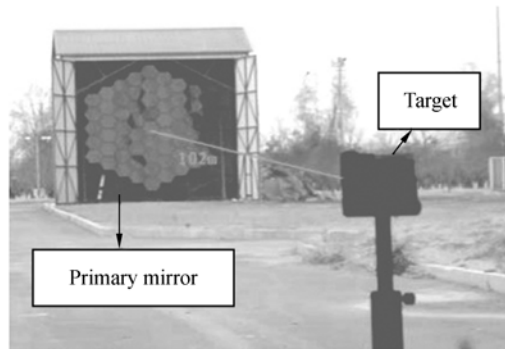


图 3 成像目标距离

Fig. 3 Distance of reconstructed target

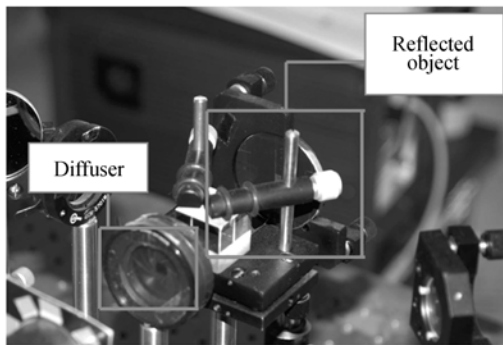


图 2 重构目标和漫射体

Fig. 2 Reconstructed target and diffuser

激光器发射的激光通过分光镜分成偏振态及振幅基本相同的 3 束光, 通过声光移频器设置 3 束激光差频分别为 10, 20, 30 kHz, 光束经过准直扩束镜产生近似平面波, 再经过反射镜及分光镜使 3 束光重叠形成干涉条纹。一部分干涉光照射到目标表面后经反射到主镜上, 经过主镜收集能量再经过次镜和三镜最后由 PMT 进行数据采集, 图 5 为次镜和三镜实物图。另一部分干涉光射向 CCD 方向, CCD 用于监视 3 束光的光斑位置^[7], 发射系统如图 6。不同基线位置的三重组采样周期为 100, 每个周期进行 1 000 点采样, 外场实验的详细描述可参考文献[16]。本文信号处理数据选择成像质量较好的基线为 33×33 的实验数据。

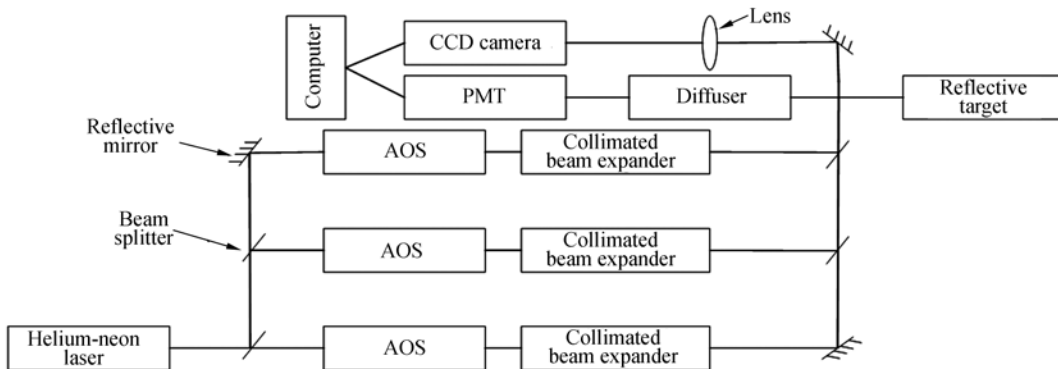


图 4 系统光路简图

Fig. 4 Diagram of optical system

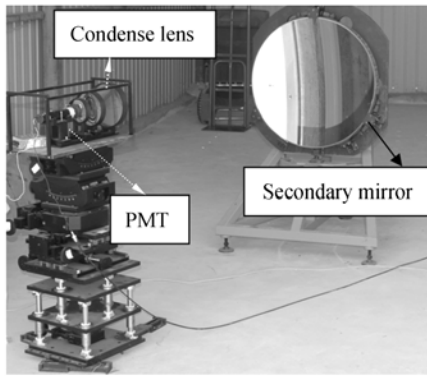


图 5 次镜、三镜和光电倍增管

Fig. 5 Secondary mirror, condense lens and PMT

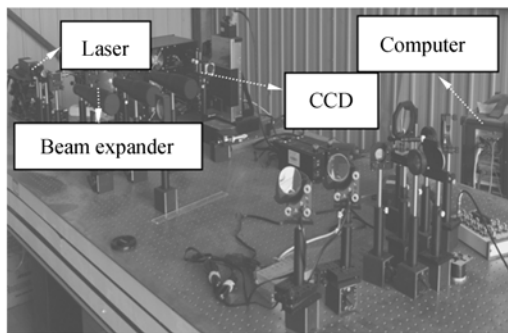


图 6 发射系统

Fig. 6 System of beam launch

4.2 数据处理

数据处理平台为 MATLAB 和 C#。窗函数采用汉宁和汉明窗,对于 N 阶变换即每个周期采样点个数为 N 时,为对数据进行全相位预处理及频率偏差校正需要 $(3N-1)$ 个数据,数据处理流程如图 7。选择连续的 3 个采样周期作为一个处理过程,实验数据对应关系如图 8 所示。

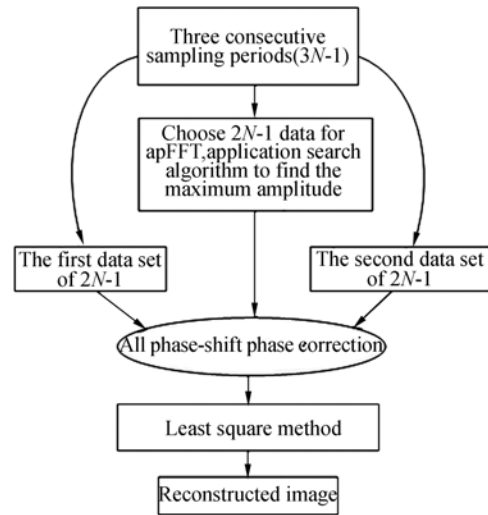


图 7 数据处理流程图

Fig. 7 Data processing flow chart

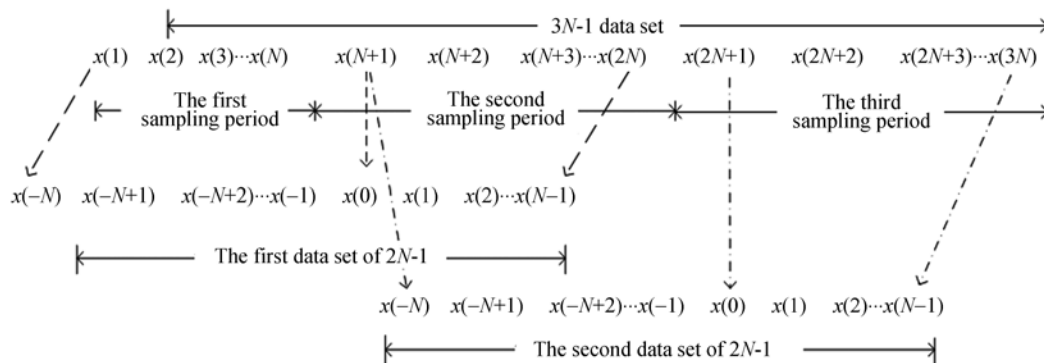


图 8 实验数据对应关系图

Fig. 8 Experiment data corresponding chart

N 为一个周期采样点数,连续 2 个采样周期得到 $2N$ 个数据,如图 8 中的第一行。时间序列中的 $x(N+1)$ 存在且只存在包含该点的 N 维向量,第二行将 $x(N+1)$ 记为 $x(0)$ 。将包含 $x(0)$ 点的 N 维向量进行展开如图 9 的 3 到 7 行。

通过公式(1)、(2)、(3)即可得到全相位处理

数据。应用 apFFT 时移相位差校正法得到真实频率,但真实频率往往是非整数,通过对最大整点频率 2 边的 5 个整点频率值,应用最小二乘法估计得到非整点频率。由于目标运动会造成频率的实时改变,因此传统解调方法只局限于对静态目标成像。本文数据处理方法可以应用到对运动

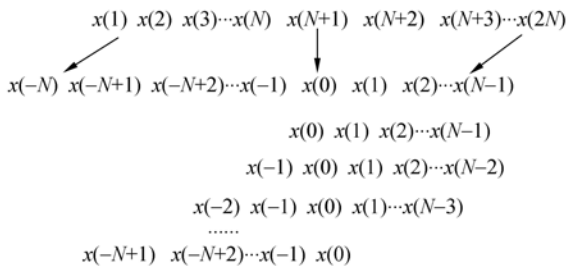


图 9 无窗全相位数据预处理流程图

Fig. 9 Windowless all phase data processing flow chart

目标成像。

4.3 结果与分析

对无噪声环境下仿真基线长度 33×33 , 传统方法采样点数为 195, 采样周期为 1。apFFT 方法采样点数为 65, 采样周期为 3。最大频率偏差为 3 束光最小频率的 10%。目标像素大小 128×128 , 为便于比较, 重构图像由原 33×33 经插值放大到 128×128 , 重构图像如图 10。

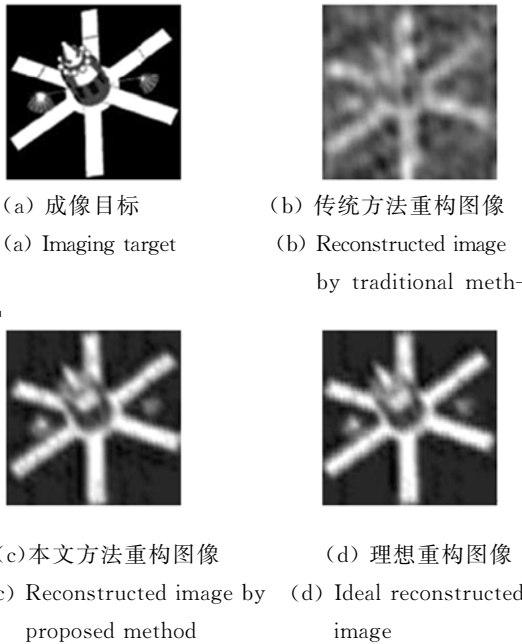
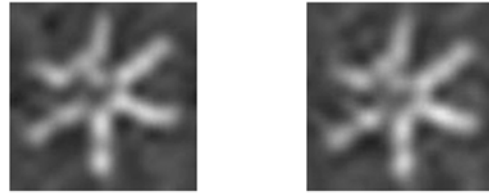


图 10 数值模拟结果

Fig. 10 Numerical results

通过比较图 10(b)和 10(c), 本文方法重构图

像质量不受频率偏差的影响。对基线长度为 33×33 的外场实验数据采用上述处理方法, 考虑到程序运算时间, 本文选择搜索范围为: 固定和剪切形成的干涉条纹搜索频率为 9~13 kHz; 剪切和扫描搜索频率为 19~23 kHz; 固定和扫描搜索频率为 29~33 kHz。重构图像结果如图 11。



(a)传统方法 (b)无窗 apFFT
(a)Reconstructed image by traditional method (b)Reconstructed image by windowless apFFT

图 11 外场重构图像

Fig. 11 Field experiment data of reconstructed image

图 11(a)图像边缘模糊, 右下角的太阳能帆板弯曲, 图 11(b)的卫星顶点较为清晰, 太阳能帆板平直, 边缘性较好。由于噪声影响, 为客观评价 2 种方法重构图像的质量。采用重构图像与理想图像的斯托里尔比 (Strehl) 式 (6) 大小来评价本文方法和传统的 FFT 数据处理方法重构图像的质量。

$$H(x, y) = O_T \otimes O_R = \iint I_T^*(k_x, k_y) I_R(k_x, k_y) \exp(-i \cdot 2\pi(k_x f_x, k_y f_y)) dk_x dk_y, \quad (6)$$

其中: O_T 表示真实图像灰度值分布, O_R 表示重构图像灰度值分布。 I_T^* 和 I_R 分别表示真实图像和重构图像傅里叶变换后的频谱值, 将式 (6) 带入公式 (7) 即可计算出 Strehl。

$$S = \frac{\max |H(x, y)|^2}{\iint O_T^*(x, y) O_T(x, y) dx dy \iint O_R^*(x, y) O_R(x, y) dx dy} \quad (7)$$

对同一外场实验数据分别用无窗、单窗 (汉宁窗)、双窗 (汉宁和汉明窗) apFFT 及三者加入最小二乘估计后的 6 种处理方法, 以及传统方法重构图像得到的 Strehl 值如表 1 所示。

表 1 6 种数据处理方法得到的重构图像的 Strehl 值

Tab. 1 Strehl values of reconstructed image by six kinds of data processing methods

	Windowless apFFT	Single window apFFT	Double windows apFFT
No least-square fitting method	0.716 3	0.715 9	0.714 0
Using least-squares fitting method	0.737 5	0.723 9	0.719 8
Traditional method(FFT)		0.715 1	

由表 1 可以看出,相比单窗、双窗,采用无窗 apFFT 处理的成像质量更好,这主要是因为外场实验是对静态目标成像,干涉光束的频率偏离设定频率程度较小,无窗抑制谱泄漏能力更强,双窗中甚至出现了 Strehl 值不如传统的 FFT 方法,这两点和 2.2 节关于窗函数的选择结论是一致的。在采用最小二乘拟合方法之后,3 种加窗处理重构图像质量得到进一步的提升。仿真重构图像 Strehl 由原来的 0.742 1 提高到 0.981 0,提升幅度较高,而本文数据处理方法实验重构图像的提升仅为 3%,这主要是由于为了验证方法的正确性仿真中加入的频率偏差较大,而实际实验频率偏差较小所致。

参考文献:

- [1] 王海涛,周必方. 光学综合孔径干涉成像技术 [J]. 光学精密工程,2002,10(5):434-442.
WANG H T, ZHU B F. Optical synthesis aperture interference image technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(5):434-442. (in Chinese)
- [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]. *OSA*, 1996,13(2):351-364.
- [3] BRINKLEY T J, SANDLER D. Effect of atmospheric turbulence and jitter on fourier telescope imaging systems [J]. *SPIE*, 1999,3815:42-47.
- [4] KENNETH R, MACDONALDA, JAMES K, et al.. An experimental demonstration of Fourier telescope [J]. *SPIE*, 1999,3815:23-29.
- [5] CUELLAR L E, JAMES S, JUSTIN C. Laboratory and field experimental demonstration of a Fourier telescope imaging system [J]. *SPIE*, 2005, 5896 (D):1-14.
- [6] LOUIS C E, JUSTIN C, JAMES M, et al.. Laboratory demonstration of a multiple beam Fourier telescope imaging system [J]. *SPIE*, 2008, 7094 (G): 1-12.
- [7] 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.
- [8] 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]. 国防科技大学学报,2009,31(1):38-42.
WANG X W, LI Q, WANG Y G, et al.. Analysis and simulation on phase closure of Fourier telescope [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2009,31(1): 38-42. (in Chinese)
- [9] 陆长明,王建军,高昕,等. 傅里叶望远镜原理及改进研究 [J]. 飞行器测控学报,2010,29(2):17-20.
LU CH M, WANG J J, GAO X, et al.. A study on the theory of Fourier telescope and it improvement [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2010,29(2):17-20. (in Chinese)
- [10] 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.
LIU X Y, DONG L, WANG J L. Fourier telescope imaging via sparse sampling [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(3):521-527. (in Chinese)
- [11] 张炎,杨春平,郭晶,等. 实验室中傅里叶望远镜术频谱抽取方式 [J]. 强激光与粒子束,2011,23(3):571-575.
ZHANG Y, YANG CH P, GUO J, et al.. Spec-

5 结 论

傅里叶望远镜对深空暗弱目标探测成像具有独特的优势,为了提高成像质量并对运动目标成像,回波信号需要在正确频率处进行解调,应用 apFFT 谱分析的时移相位差校正法、全相位快速傅里叶变换技术对实验数据进行处理不仅可以解决解调频率问题,更可以抑制信号截断、频谱泄漏等问题,同时抑噪水平不会受到影响。应用最小二乘法可估计目标非整数倍频的傅里叶分量信息,进一步增加重构图像质量。基线为 33×33 的 apFFT 外场静态目标实验数据处理得到的重构图像相对原 FFT 方法的 Strehl 提高 3%,同时可以应用本文方法对运动目标成像进行数据处理,本文方法重构图像边缘性更好。

- trum extraction mode for Fourier telescope in laboratory[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(3):571-575. (in Chinese)
- [12] 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*, 2011, 30(12):3443-3446.
CHEN W, LI Q, WANG Y G. Object reconstruction of Fourier telescope based on all phase spectrum analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 30(12):3443-3446. (in Chinese)
- [13] 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.
WANG ZH H, HUANG X D. *All Phase Spectrum Analysis and Filter of Digital Signal*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009:1-71. (in Chinese)
- [14] 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.
HUANG X D, WANG ZH H. All phase time shift phase difference correcting spectrum method [J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, 41(7):815-820. (in Chinese)
- [15] 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):0311001:1-6.
CHEN W, LI Q, WANG Y G. Experimental research of Fourier telescope imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3), 0311001:1-6. (in Chinese)
- [16] 董磊,刘欣悦,林旭东,等. 傅立叶望远镜外场实验性能改进和结果分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(2):0201004.
DONG L, LIU X Y, LIN X D, et al. . Improvement of performance and analysis of results of field experiments of Fourier telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2):0201004. (in Chinese)

作者简介:



于树海(1985—),男,吉林通化人,博士研究生,2009 于吉林大学获得工学学士学位,主要从事傅里叶望远镜关键技术及光电信号处理方面的研究。E-mail: yushuhai_0707@sina.com



王建立(1971—),男,山东曲阜人,博士,研究员,博士生导师,1999 年、2002 年分别于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士、博士学位,主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像光电望远镜总体技术等方面的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn



董磊(1982—),男,山东济宁人,硕士,助理研究员,2004 年、2007 年分别于山东大学获得学士、硕士学位,主要从事傅里叶光学和激光应用等方面的研究。E-mail: psotgradu@yahoo.com.cn



刘欣悦(1973—),男,辽宁大连人,博士,副研究员,1999 年、2006 年分别于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士、博士学位,主要从事光学成像及图像处理与分析等方面的研究。E-mail: sirliuxy@hotmail.com