

基于功率谱的波前光学抖动分析

杨 飞^{1,2} 刘国军¹ 安其昌²

¹长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022

²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 介绍了一种受到视宁限制的光机系统的光学抖动, 针对系统波前误差的中高频分量, 引入功率谱方法, 提出一种波前光学抖动的评价方法并将此方法应用于激光平面波前的实际检测结果, 得出了该系统光学抖动的频域特性。该方法可对受视宁限制的光机系统的误差测量与分析有很好的帮助; 同时, 对光学系统波前质量的评价有一定的指导意义。

关键词 测量; 光学抖动; 功率谱; 大口径光学系统; 视宁度

中图分类号 TH751 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.091201

Analysis of Wavefront Optical Jitter Based on Power Spectral Density

Yang Fei^{1,2} Liu Guojun¹ An Qichang²

¹State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

²Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract The essential principle of optical wavefront jitter for seeing-limited in large aperture telescope is presented. The mid and high frequency deviations from perfect wavefront are processed by power spectral density, which is used to evaluate the optic jitter. And it is applied to the plan wavefront measurement for laser, representing the jitter properties in frequency domain. This method contributes to the error analysis and budget of seeing limited optomechanical system and is useful as guidance for the evaluation of the wavefront quality.

Key words measurement; optical jitter; power spectral density; large aperture optical aystem; seeing

OCIS codes 120.6650; 220.4840; 120.4800

1 引言

随着人类对宇宙探知需求的增长, 作为探索宇宙的主要手段之一的天文望远镜技术越来越被各国科学家所重视。为了实现对宇宙更深远更详细的探索, 望远镜的口径制作越来越大。随着下一代大口径光电探测系统的复杂程度与尺寸的增加, 为了获得更稳定的图像、更长的曝光时间, 对系统抖动误差的要求也随之增加^[1-4]。

系统的抖动是指光机系统在利用控制策略修正指向误差之后的残余波前误差。抖动一般分为整体刚体位置抖动与波前光学参数抖动, 对应的评价方法也不尽相同。刚体抖动是指由于风载与惯性载荷引起机械的颤动使系统光轴发生几何位置上的偏移, 主要造成波前整体斜率及低阶像差的变化; 而光学抖动是由于大气视宁的影响以及光源本身的参数变化, 使系统波前的中高频特性发生改变。

一般的光电观测系统, 由于口径较小, 大多只考虑刚体抖动问题, 如美国喷气推进实验室(JPL)的1 m口径地基望远镜(OCTL), 为了使系统在观测时视轴不会偏出大气等晕角, 在考虑风载以及外部激励的情况下

收稿日期: 2015-01-10; 收到修改稿日期: 2015-02-10; 网络出版日期: 2015-07-11

基金项目: 中国科学院三期创新基金(Y3J32GE130)、国家自然科学基金(11403022)

作者简介: 杨 飞(1982—), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要从事大口径光电望远镜光机系统方面的研究。

E-mail: yangflying@163.com

导师简介: 刘国军(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子器件与技术方面的研究。E-mail: gjliu626@126.com

利用状态观察/预测器,根据望远镜各部分的刚体位移,合成系统的刚体抖动,进而修正控制信号,以达到抑制刚体抖动在 $1''$ 之内的目的。但是随着地基设备的口径增大,其波前内部的起伏越来越明显,如果不能对其进行合理的评价与抑制,将对系统的功能实现造成巨大的影响^[5-8]。

功率谱(PSD)是由美国国家点火装置(NIF)实验室提出在频域中的评价波前的方法,但主要应用对象口径偏小,同时具体的算法也有待改进^[9]。本文将改进的功率谱方法应用于系统波像差的中高频成分的分析,从而得出系统的光学抖动特性。

2 基本推导

为了研究系统的中高频特性,需要将波前的低频分量分离出来。泽尼克多项式是表述系统低阶波像差的普遍方法。泽尼克多项式是一组在单位元上的正交基,但是离散化之后,由于取样与代数精度的问题,需要考虑利用法方程来求解问题^[10-14],在此仅考虑泽尼克多项式中的离焦与两个方向的像散(Z_4 、 Z_5 、 Z_6)。对原始波前信息进行拟合的法方程为

$$\begin{pmatrix} Z_4^2 & Z_4Z_5 & Z_4Z_6 \\ Z_4Z_5 & Z_5^2 & Z_5Z_6 \\ Z_4Z_6 & Z_5Z_6 & Z_6^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi Z_4 \\ \phi Z_5 \\ \phi Z_6 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中 a_4, a_5, a_6 为泽尼克多项式系数, ϕ 为检测到的实际波前。

将前若干阶像差去除之后,剩余的就是系统的中高频成分,为了描述系统在该频段内的光学抖动,在此引入功率谱方法。功率谱方法是功率谱密度方法的简称,其定义为自相关序列的傅里叶变换,但是由于实际的随机序列长度有限,得到的功率只是对真实功率的一种估计,这种估计方法被称为周期图法。

Welch 提出将修正的周期图作为随机序列功率谱密度。其主要思想为将整个序列分为若干子序列,并对每个子序列加窗(MASK),之后求各序列功率谱的均值。

通过 Welch 法得到的每个子序列的修正周期图为

$$P_{\text{PSDsubi}} = \frac{1}{L'L'} \times \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S_{\text{full}}(u-\theta', v-\theta) |W(\theta', \theta)|^2 d\theta' d\theta, \quad (2)$$

式中 U 为待定的修正系数, L, L' 为序列长度, S_{full} 为全口径数据, W 为窗函数, θ, θ' 为频域坐标。对于每个 MASK, 由于其结构形式完全相同,其模(即频谱总能量)也必定相同,故各个子序列的周期图都相等,即:

$$E(P_{\text{PSDsubi}}) = \frac{1}{L'LUKK'} \times KK' \times \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S_{\text{full}}(u-\theta', v-\theta) |W(\theta', \theta)|^2 d\theta' d\theta. \quad (3)$$

式中 K, K' 为子序列长度。另一方面,令

$$U = \frac{1}{L'L} \times \sum_{m=0}^{L'-1} \sum_{n=0}^{L-1} |\omega(m, n)|^2. \quad (4)$$

(3)式中窗函数为 welch 窗,即 $\omega(n, m) = 1 - \left| \frac{\sqrt{m^2 + n^2}}{\sqrt{L^2 + L'^2}} \right|^\alpha$; L 和 L' 分别为 n 和 m 在孔径内的最大值;为了平

衡频域的泄露与混叠,令 $\alpha = 8$ 。

根据 Parseval 定理,利用时域与频域序列能量相等可得:

$$U = \frac{1}{L'L} \times \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |W(\theta', \theta)|^2 d\theta' d\theta, \quad (5)$$

则

$$\lim_{L, L' \rightarrow \infty} E(P_{\text{PSDsub}}) = P_{\text{PSDfull}}, \quad (6)$$

即该方法为渐进无偏估计。由 $\text{var}(P_{\text{PSDsub}}) \approx \frac{1}{K'K} \text{var}(P_{\text{PSDfull}})$ 可知当子序列数趋于无穷时,该方法为一致估计。利用以上方法,可以得到系统的二维功率谱,但是二维功率谱难以定量表达。

一维功率谱具有简洁直观的特点,美国 NIF 实验室对于镜面功率谱的经验公式就是以一维功率谱的形式给出的,其具体做法是:沿着某一方向取若干平行线,求在该方向上检测数据的一维功率谱,之后再评价。但这种方法评价效率低、二维数据的利用率不高。在此引入一种二维功率谱坍塌的方法,既可以利用

尽量多的波前信息,也可以保留一维功率谱简单明了的特点。

功率谱坍塌一般有时域坍塌与频域坍塌。对于时域坍塌,其坍塌效果对波前的旋转对称性依赖性较大,同时数据的数值精度对功率谱的计算会有较大影响;而对于频域坍塌,由于傅里叶变换本身的对称性,算法对波前的旋转对称性要求降低,同时由于均值滤波效应,其输出的功率谱质量得到提高。

功率谱频域坍塌的具体方法为通过计算环形区域上的二维功率谱以及平均半径,将二维功率谱坍塌转为一维形式:

$$\bar{\rho}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{N_{i-1}}^{N_i} \rho_i$$

$$P_{\text{PSD}_{1D}} = \frac{1}{N} \sum_{N_{i-1}}^{N_i} P_{\text{PSD}_{2D}}(\rho_i)$$
(7)

式中 ρ_i 为功率谱计算半径; N 为环带数量。

利用此方法不仅可以由二维功率谱得到其一维坍塌形式,而且可以通过设置环带数量控制功率谱的分辨率。对于实际的实验分析与工程应用十分有利。

对于大气湍流,主要有两种统计学表示方法,即功率谱与结构函数。对于反演问题,功率谱由于其反演公式简单以及可以使用快速算法,成为多数情况下的选择。在考虑功率谱的选择时,既可以利用Kolmogorov谱,由之前的统计规律给出;也可以根据实际情况测量站址功率谱的稳态增益与截止频率,之后再用于指导误差分配,反演得到的波前为

$$h(x, y) = \frac{1}{\Delta x \Delta y} \text{IFFT} \left\{ \exp[i\phi(m, n)] \sqrt{A \times P_{\text{PSD}}(m, n)} \right\},$$
(8)

式中 Δx 、 Δy 为两个方向的取样间隔, $\phi(m, n)$ 为服从正态分布的相位矩阵, A 为孔径面积,IFFT为快速傅里叶逆变换。

将由(7)式得到的功率谱代入(8)式,可以得到与实际系统具有相同统计规律的数值波前,从而对系统的模拟仿真与误差分配提供帮助;另一方面,该方法可以得到与实际扰动具有很高相关性的波前,对无波前传感器的自适应光学系统收敛速度的研究有重要意义。

3 实验验证

使用PHASICS公司生产的剪切干涉仪作为波前探测元件,其原理不同于使用微透镜阵列进行波前斜率测量的一代哈特曼波前传感器,而是利用可以分离4个相位的衍波板,实现多像元(500 pixel×500 pixel)、大视场测量和快速连续测量。对于某激光平面波前,进行了9次测量,其中第1、4、7、9次的测量结果如图1所示,利用(1)式,分离出系统前6阶波像差,结果如图2所示。

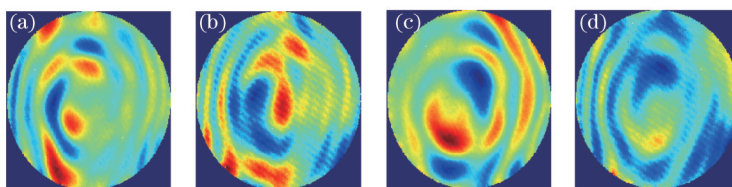


图1 激光平面波前。(a) 第1次;(b) 第4次;(c) 第7次;(d) 第9次

Fig.1 Laser plan wavefronts. (a) First; (b) fourth; (c) seventh; (d) ninth

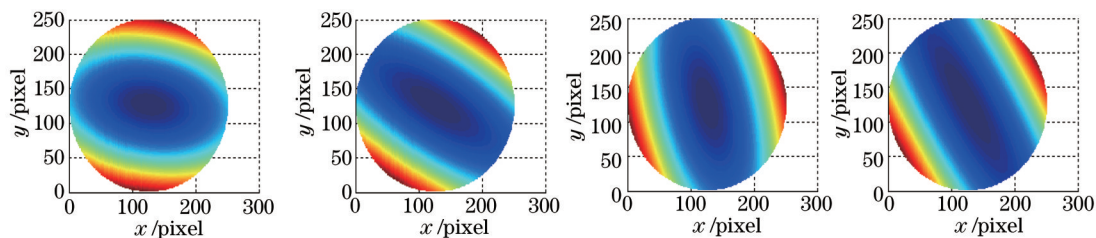


图2 系统前6阶波像差。(a) 第1次;(b) 第4次;(c) 第7次;(d) 第9次

Fig.2 Six orders wavefront of system. (a) First; (b) fourth; (c) seventh; (d) ninth

由图2可知,在测量过程中,波前主要的凹陷方向发生了改变,利用对应的泽尼克系数,可以表征出系统的刚体抖动;对于已知的光学系统,其基本像差与各部件之间的相对位置有着确定的对应关系,故可以结合状态估计器等,对刚体抖动进行抑制。

反射镜表面面形的传统评价方法是用表面高度均方根(RMS),这种方法对于描述局部的起伏情况具有很好的适用性,但不同频率的波前误差可能对应相同的RMS,故波前RMS的变化只能大体表现出波前的光学抖动,如图3所示。

将每一次去除低阶像差的波前数据作为子序列,其功率谱如图4所示。

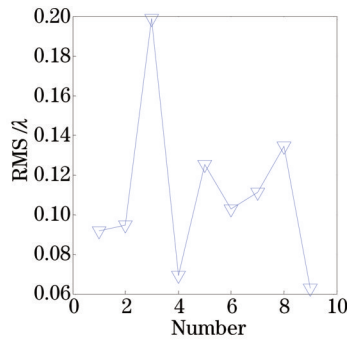


图3 波前RMS变化趋势

Fig.3 Variation of wavefront RMS

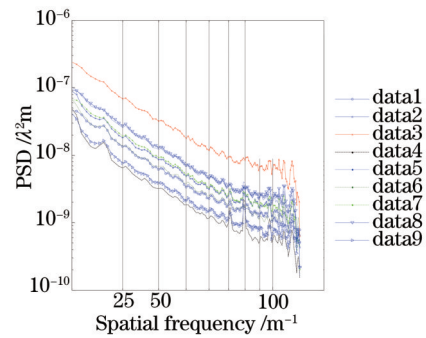


图4 波前误差功率谱

Fig.4 PSD of wavefront error

功率谱的一个重要性质是其在频域的积分等于时域信号RMS的平方,即 $R_{\text{RMS}}^2 = \sum \sum P_{\text{PSD}}$ 。

利用这一性质,可以在中高频段上由每个子序列的高低位置变化得到RMS的趋势。将9个子序列平均可得到系统波前的周期图,如图5所示。

对于系统光学抖动的定量评价,可以仿照NIF实验室给出的中频域临界曲线,将周期图曲线与其相交所对应的频率为衡量系统的重要指标。利用(4)式得到的数值模拟波前如图6所示,可以看出,由于平均作用,波前的频率成分比较单一,可以为系统的抖动评价以及误差分配提供较好的指导。

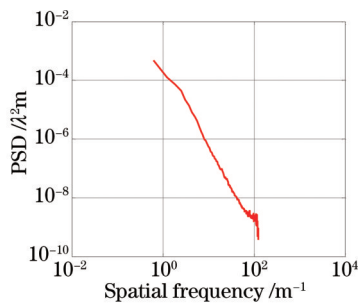


图5 波前平均功率谱

Fig.5 Average PSD of wavefront

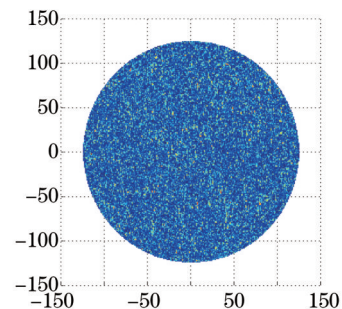


图6 由功率谱得到的数值波前

Fig.6 Numerical wavefront obtained by PSD

4 总 结

从实际的激光平面抖动出发,利用功率谱对波前的中高频分量进行抖动分析,得出系统的平均功率谱,同时利用功率谱反演,得到数值仿真波前。功率谱法对光电系统的误差分析有很好的帮助作用,对激光波前的质量评价有一定的指导意义;另一方面,可以在许多湍流强烈的视宁情况下,为无波前传感器的波前矫正算法提供相关性较强的数值波前,提高算法收敛速度。

参 考 文 献

- 1 Xie Wenke, Ma Haotong, Gao Qiong, *et al.*. Research advances in aero-optics adaptive correction[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 090001.
谢文科, 马浩统, 高穹, 等. 气动光学自适应校正研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 090001.
- 2 Sun Hui. Target localization and error analysis of airborne electro-optical platform[J]. Chinese Optics, 2013, 6(6): 912-918.

- 孙 辉. 机载光电平台目标定位与误差分析[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 912-918.
- 3 Zhao Hongchao, Zhang Jingxu, Yang Fei, *et al.*. Kinematic coupling design and analysis for 30 m telescope tertiary mirror system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0312003.
- 赵宏超, 张景旭, 杨 飞, 等. 30 m 望远镜三镜系统运动学接口设计及分析[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0312003.
- 4 Keas P, Guerra J, Brewster R, *et al.*. SOFIA telescope modal survey test and test-model correlation[C]. SPIE, 2010, 7738: 77380K.
- 5 Yang Lu, Niu Yanxiong, Lü Jianming, *et al.*. Influence of attitude variation on the detection ability of satellite photoelectric imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1223002.
- 杨 露, 牛燕雄, 吕建明, 等. 姿态变化对星载光电成像系统探测能力的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1223002.
- 6 Chen Haiping, Li Jiabin, Liu Changchun, *et al.*. Research on angle measure error based on method of angle difference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1012003.
- 陈海平, 李佳斌, 刘长春, 等. 基于角差法面形测量装置的测角误差研究[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1012003.
- 7 Liu Jun, Huang Wei, Xu Weicai, *et al.*. Optical design of the off-axis three-mirror reflective telecentric system with wide field of view[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 122203.
- 刘 军, 黄 玮, 许伟才, 等. 大视场像方远心离轴三反射镜光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 122203.
- 8 Lampater U, Herter T, Keas P, *et al.*. Preparation of the pointing and control system of the SOFIA airborne telescope for early science missions[C]. SPIE, 2010, 7733: 77330S.
- 9 David M Aikens, C Robert Wolfe, Janice K Lawson. Use of power spectral density (PSD) functions in specifying optics for the National Ignition Facility[C]. SPIE, 1995, 2576: 281-292.
- 10 R D Sobek. Mitigating wind induced telescope jitter[J]. SPIE, 2005, 5810: 1-10.
- 11 Zhang Wei, Liu Jianfeng, Long Funian, *et al.*. Study on wavefront fitting using Zernike polynomials[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(5): 675-678.
- 张 伟, 刘剑峰, 龙夫年, 等. 基于 Zernike 多项式进行波面拟合研究[J]. 光学技术, 2005, 31(5): 675-678.
- 12 Bi Yong, Zhai Jia, Wu Jinhu, *et al.*. One method for mirror surface figure treatment in optical instrument[J]. *Optical Technique*, 2009, 35(1): 10-17.
- 毕 勇, 翟 嘉, 吴金虎, 等. 一种光学仪器镜面面形的处理方法[J]. 光学技术, 2009, 35(1): 10-17.
- 13 Wang Dong, Yang Hongbo, Chen Changzheng. Computer simulation of the optical surface[J]. *Computer Simulation*, 2007, 24(2): 298-301.
- 王 栋, 杨洪波, 陈长征. 光学表面面形的计算机仿真[J]. 计算机仿真, 2007, 24(2): 298-301.
- 14 Zhu Shuo, Zhang Xiaohui. Application of error detaching to Ritchey-Common test for flat mirrors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(1): 7-12.
- 朱 硕, 张晓辉. 误差分离技术在平面镜瑞奇-康芒法检测中的应用[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 7-12.

栏目编辑: 张 雁