

衍射光学系统波前反演误差分析方法

乔凯¹, 智喜洋^{2*}, 杨冬³, 于颀², 王达伟²

¹北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;

²哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001;

³北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094

摘要 提出一种基于相位差异法的衍射光学系统波前反演误差分析方法。从衍射光学系统波前反演模型出发, 分析了产生波前反演误差的物理因素; 对各影响因素进行了理论建模, 建立了衍射光学系统波前反演误差分析方法。以某衍射光学系统为应用实例, 分析了各因素对波前反演误差的影响规律, 并验证了误差分析模型与方法。实验结果表明, 模型分析结果与实际误差之间的平均偏差小于 13.5%, 可为衍射光学系统的空间应用提供支撑。

关键词 衍射; 衍射光学系统; 相位差异; 波前反演; 误差分析模型

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1105002

Wavefront Reconstruction Error Analysis Method for Diffraction Optical System

Qiao Kai¹, Zhi Xiyang^{2*}, Yang Dong³, Yu Di², Wang Dawei²

¹Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;

²Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

³Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China

Abstract A wavefront reconstruction error analysis method based on the phase diversity (PD) method for diffraction optical systems is proposed. Based on the wavefront reconstruction model of the diffraction optical system, the physical factors which cause wavefront reconstruction error are analyzed, and the influencing factors are theoretically modeled. Furthermore, the analysis method for wavefront reconstruction error is established. Taking a diffraction optical system as an application example, the influences of various physical factors on the wavefront reconstruction error are analyzed, and the error analysis model and method are verified. The experimental results show that the average deviation between the wavefront reconstruction error obtained by the error analysis model and the actual error is less than 13.5%. The method proposed in this paper can be used as the basis of application of space based diffraction optical systems.

Key words diffraction; diffraction optical system; phase diversity; wavefront reconstruction; error analysis model

OCIS codes 050.1965; 100.5070; 010.7350

1 引 言

随着高轨卫星空间分辨率要求的不断提高, 传统的折反射式光学遥感载荷已无法满足超大口径、轻量化、低成本的要求, 一些新型光学成像技术应运而生, 其中, 衍射光学系统采用超薄可控薄膜材料作为主镜材料, 具有质量超小、面型可变、易于空间折叠和展开、成本低廉的优点, 是解决空间超大口径、超轻载荷成像问题最有前景和最有效的途径之

一^[1-2]。但受制于衍射成像机理和柔性薄膜材料, 衍射光学系统调制传递函数(MTF)较低, 点扩展函数(PSF)空间移变严重, 衍射效率低, 波前畸变严重, 其在轨成像结果很难满足图像应用需求^[3-5]。借助基于在轨图像的波前反演技术可获取衍射光学系统在轨成像全链路的波前信息, 对于提升 MTF、校正波前畸变等图像质量恢复工作具有重要意义^[6-7]。

相位差异(PD)法是一种利用在轨焦面图像和

收稿日期: 2019-06-13; 修回日期: 2019-07-15; 录用日期: 2019-07-24

* E-mail: zhixiyang@hit.edu.cn

离焦图像对波前进行反演的方法^[8-9],工程可实现性强、能量利用率高,但易受到焦面位置误差、离焦量误差、像差大小、衍射效率,以及噪声等多种因素的影响^[10-11]。目前,尽管有关于相关误差分析方法的研究^[12-13],但仅是针对折反射系统,关于衍射成像系统的相位差异波前反演方法及误差分析尚未见报道。由于衍射系统特殊成像机制的影响,上述误差的影响将被显著放大。

本文针对上述问题,从衍射光学系统波前反演误差的影响机理出发,基于衍射成像机理和相位差异法原理,理论推导各因素对波前反演精度影响的分析模型,构建多误差因素共同作用的波前反演误差分析方法,并以某衍射光学系统为应用实例,开展波前反演误差分析实验。

2 衍射光学系统波前反演原理

对于衍射光学系统,以衍射效率表征其成像特性,数学表达形式为^[14]

$$G = [\eta H + (1 - \eta)\delta(x, y)]F + N, \quad (1)$$

式中: (x, y) 为焦面位置坐标, G 、 F 、 N 分别是退化图像、原始图像、随机噪声的频谱; H 为衍射光学系统的在轨传递函数; η 为衍射效率; $\delta(x, y)$ 为单位冲激函数。

对于衍射光学系统,当成像光源为非相干光源时,光学传递函数(OTF)与波前相位 $\phi(x, y)$ 的关系为^[15]

$$O_{\text{OTF},k} = \eta \{ \mathcal{F} \{ | \mathcal{F} \{ A(x, y) \exp[i\phi(x, y)] \} \times \exp[i\phi_k(x, y)] \} |^2 \} + (1 - \eta)\delta(x, y), \quad (2)$$

式中: $O_{\text{OTF},k}$ 为第 k 个通道的光学传递函数; $\phi_k(x, y)$ 为第 k 个通道引入的离焦像差; $A(x, y)$ 为光瞳函数; \mathcal{F} 表示傅里叶变换; $\phi(x, y)$ 为相位函数,可表示为 Zernike 多项式的线性拟合,即

$$\phi(x, y) = \sum_{j_1=1}^K a_{j_1} Z_{j_1}(x, y), \quad (3)$$

其中 j_1 为 Zernike 多项式阶数, K 为选取的 Zernike 多项式最大阶数, a_{j_1} 和 $Z_{j_1}(x, y)$ 分别为第 j_1 阶 Zernike 多项式系数和函数。(2)式中 $\phi_k(x, y)$ 可表示为

$$\phi_k(x, y) = \begin{cases} 0, & k = 1 \\ \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d}{8F_{\#}^2} (\epsilon^2 + \gamma^2), & k = 2 \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $F_{\#}$ 为光学系统 F 数; λ 为波长; d 为离焦量; ϵ 和 γ 表示光瞳面的归一化坐标。(4)式中,当 $k=1$ 时为焦面图像, $k=2$ 时为离焦图像。基于最大似然

原理,构建反演波前的目标函数以表征重建图像与实际图像之间的相似程度,即

$$E(O, \eta, a) = |I - O_{\text{OTF}}^{\text{focus}}|^2 + |I_d - O_{\text{OTF}}^{\text{defocus}}|^2, \quad (5)$$

式中: a 为像差系数; I 为焦面图像 i 的功率谱; $O_{\text{OTF}}^{\text{focus}}$ 为焦面光学传递函数; I_d 为离焦图像 i_d 的功率谱; $O_{\text{OTF}}^{\text{defocus}}$ 为离焦光学传递函数; O 为目标物体分布函数。

构造目标函数与系统波前之间的关系,对目标函数中的目标物体分布函数 O 求偏导,并令偏导为0,最终可得到目标物体分布函数 O ,以及仅与像差系数 a 相关的目标函数 $E(a)$,即

$$O = \frac{IO_{\text{OTF}}^{\text{focus}*} + I_d O_{\text{OTF}}^{\text{defocus}*}}{|O_{\text{OTF}}^{\text{focus}}|^2 + |O_{\text{OTF}}^{\text{defocus}}|^2}, \quad (6)$$

$$E(a) = \frac{|IO_{\text{OTF}}^{\text{defocus}} - I_d O_{\text{OTF}}^{\text{focus}}|^2}{(O_{\text{OTF}}^{\text{focus}})^2 + (O_{\text{OTF}}^{\text{defocus}})^2}, \quad (7)$$

式中: $E(a)$ 为目标函数; $O_{\text{OTF}}^{\text{defocus}*}$ 为离焦时的光学传递函数; $O_{\text{OTF}}^{\text{focus}*}$ 为焦面的光学传递函数。衍射效率 η 可根据在轨观测点源估计得到。

采用粒子群算法对(7)式进行优化求解,当目标函数取得最小值时,可认为搜索得到的一组像差系数 a 可表征此时的波前信息。基于相位差异法的衍射光学系统波前反演流程如图1所示。

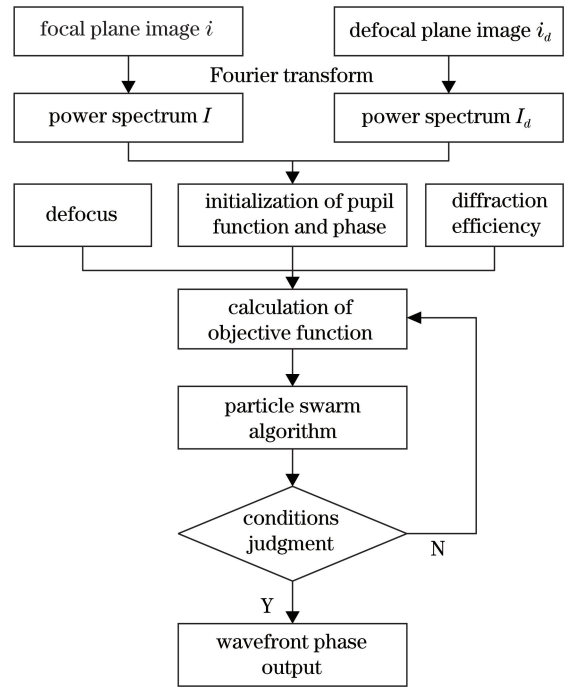


图1 相位差异法波前反演流程图

Fig. 1 Flow chart of phase diversity wavefront reconstruction

如图2所示,相位差异法波前反演误差的影响因素可主要分为两类:1)影响焦面图像和离焦图像

质量的图像质量退化因素,包括衍射效率、光学系统像差、噪声等;2)反演方法的输入误差,包括焦面位置误差、离焦量误差、衍射效率误差等,这类因素会直接向解算输入参数中引入误差,进而降低波前反演精度。以下主要围绕输入误差对波前反演误差的影响开展误差分析模型与方法研究。

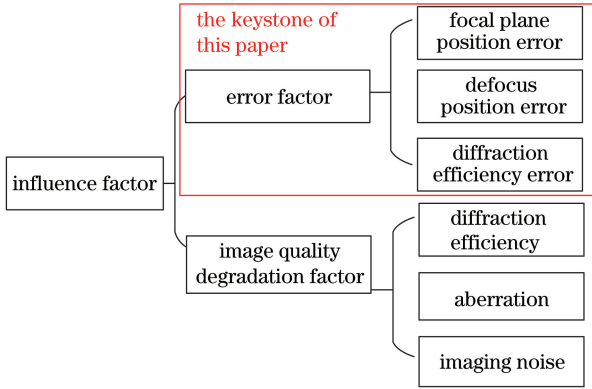


图 2 相位差异法波前反演误差影响因素分类
Fig. 2 Classification of influencing factors of phase diversity wavefront reconstruction error

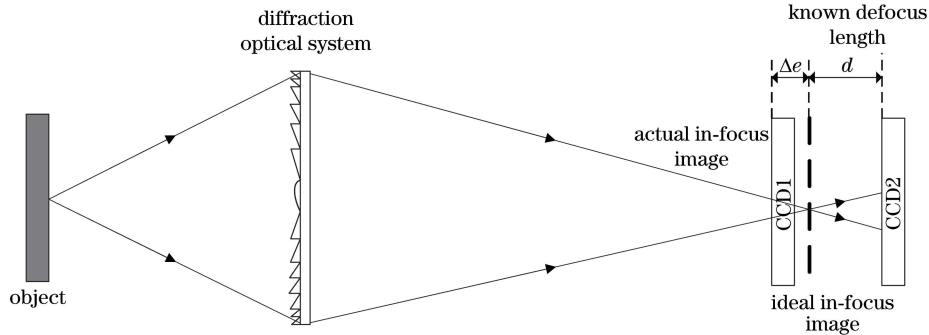


图 3 焦面位置误差示意图
Fig. 3 Diagram of focal plane position error

当存在焦面位置误差的目标函数 E' 取得最小值时,根据不等式定理,应有

$$|I_{\Delta e} - O_{\text{OTF}}^{\text{focus}} O| = |I_d - O_{\text{OTF}}^{\text{defocus}} O|. \quad (10)$$

对于理想波前,其对应的目标函数 $E = 0$,即 $I = O_{\text{OTF}}^{\text{focus}} O, I_d = O_{\text{OTF}}^{\text{defocus}} O$,将上述表达式代入存在误差的目标函数 E' ,得到存在焦面位置误差情况下理想波前的目标函数 E'_{ideal} :

$$E'_{\text{ideal}} = |I_{\Delta e} - O_{\text{OTF}}^{\text{focus}} O|^2 + 0 = |I_{\Delta e} - I|^2. \quad (11)$$

因此,理想波前并非目标函数 E' 的全局最优解,这说明焦面位置误差会向相位差异方法的反演波前引入一定的误差,并且随着焦面位置误差的增加,相应波前的解算误差逐渐增大。

通过数值拟合的方式建立焦面位置误差的分析

3 相位差异法波前反演误差分析模型

3.1 焦面位置误差分析模型

在相位差异法的实际应用中,通常难以确定最佳的焦面位置,因此该方法获取的焦面位置与理想焦面位置之间存在一定的误差,进而向焦面图像引入离焦像差,造成波前反演误差。

图 3 所示为所获取的焦面位置与理想焦面位置的偏差 Δe 的示意图,其中,CCD1 和 CCD2 分别表示焦面和离焦面探测器。此时,焦面位置误差所引入的离焦相位表达式为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\Delta e}{8F_{\#}^2} (\epsilon^2 + \gamma^2), \quad (8)$$

式中: $\Delta\phi$ 为离焦相位; Δe 为焦面位置与理想焦面位置的距离。此时,存在焦面位置误差的相位差异法对应的目标函数为

$$E' = |I_{\Delta e} - O_{\text{OTF}}^{\text{focus}} O|^2 + |I_d - O_{\text{OTF}}^{\text{defocus}} O|^2, \quad (9)$$

式中: E' 为存在焦面位置误差的相位差异法的目标函数; $I_{\Delta e}$ 为存在焦面位置误差时图像的功率谱。

模型。设焦面位置误差引起的波前反演的均方根误差(RMSE) ϵ_{Focus} 与焦面位置误差 x_{Focus} 的关系为

$$\epsilon_{\text{Focus}} = F_1(x_{\text{Focus}}), \quad (12)$$

式中: F_1 表示焦面位置误差到其引起的波前 RMSE 的函数映射,即 $F_1: x_{\text{Focus}} \rightarrow \epsilon_{\text{Focus}}$ 。

波前 RMSE 的表达式为

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\sum_{x,y} [\phi(x,y) - \hat{\phi}(x,y)]^2 / N_p}, \quad (13)$$

式中: $\hat{\phi}$ 为存在误差因素时所对应的反演波前; ϕ 为无误差因素时所对应的反演波前; N_p 为采样点数。此时,波前 RMSE 可以表征误差因素所引入的波前误差。

用多项式拟合焦面位置误差与波前 RMSE 的

函数映射关系,可表示为

$$\epsilon_{\text{Focus}} = \sum_{j_2=0}^{N_1} k_{j_2} (x_{\text{Focus}})^{j_2}, \quad (14)$$

式中: $(x_{\text{Focus}})^{j_2}$ 表示 x_{Focus} 的 j_2 次幂; N_1 为所用多项

式的阶数; k_{j_2} 为对应于焦面位置误差的第 j 阶拟合多项式的系数。通过仿真获取的焦面位置误差与波前 RMSE 的关系,以及焦面位置误差对波前反演误差的影响分析模型如图 4 所示,图中“Eq.”表示公式。

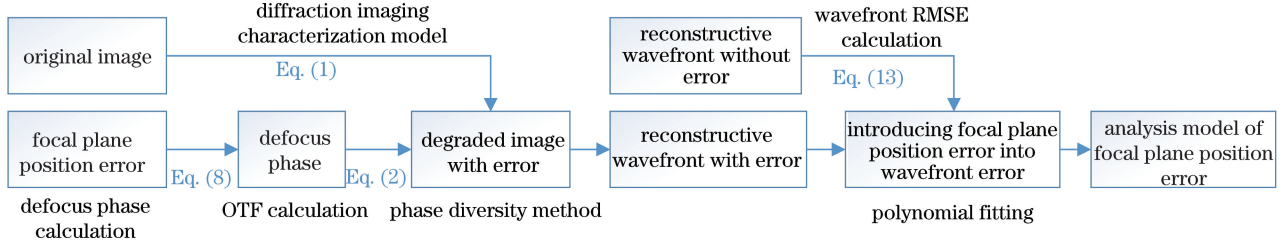


图 4 焦面位置误差对波前反演误差的影响分析模型

Fig. 4 Analysis model of influence of focal plane position error on wavefront reconstruction error

3.2 离焦量误差分析模型

受制于在轨焦面位置的测量精度,实际离焦位置与理想离焦位置之间存在一定的偏差,进而直接

对算法的离焦量输入引入误差,对解算精度造成影响。如图 5 所示,设定离焦距离为 d ,实际离焦位置与设定离焦位置的距离为 Δd 。

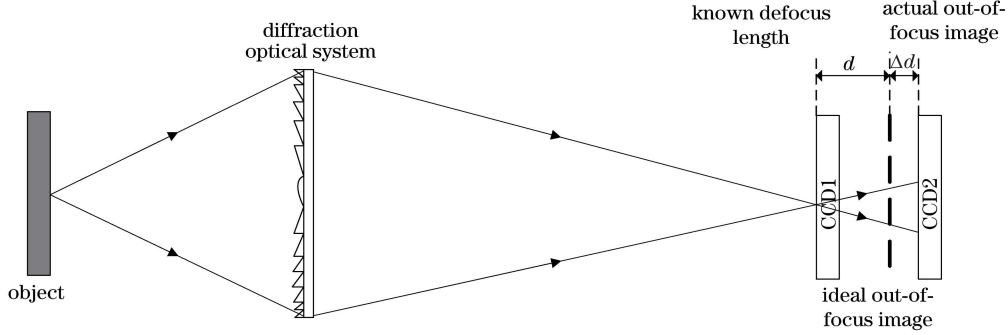


图 5 离焦量误差示意图

Fig. 5 Diagram of defocus distance error

离焦面图像所对应的离焦相位表达式为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{d + \Delta d}{8F_{\#}^2} (\epsilon^2 + \gamma^2). \quad (15)$$

此时,相位差异法目标函数可表示为

$$E' = |I - O_{\text{OTF}}^{\text{focus}} O|^2 + |I_{d+\Delta d} - O_{\text{OTF}}^{\text{defocus}} O|^2. \quad (16)$$

与焦面位置误差引入反演波前误差的原理相似,离焦量误差会向相位差异方法引入一定的误差,且误差随离焦量误差的增大而增大。

与焦面位置误差的分析模型建立过程类似,设离焦量误差引起的波前 RMSE $\epsilon_{\text{Defocus}}$ 与离焦量误差 x_{Defocus} 的关系为

$$\epsilon_{\text{Defocus}} = F_2(x_{\text{Defocus}}). \quad (17)$$

用多项式拟合离焦量误差与波前 RMSE 的函数映射关系,可以表示为

$$\epsilon_{\text{Defocus}} = \sum_{j_3=0}^{N_2} g_{j_3} (x_{\text{Defocus}})^{j_3}, \quad (18)$$

式中: $(x_{\text{Defocus}})^{j_3}$ 为 x_{Defocus} 的 j_3 次幂; N_2 为所用多项

式的阶数; g_{j_3} 为对应于离焦量误差的第 j 阶拟合多项式的系数。通过仿真获取的离焦量误差与波前 RMSE 的关系,以及离焦量误差对波前反演误差的影响分析模型如图 6 所示。

3.3 衍射效率误差分析模型

不同于传统的折反射式光学系统,衍射效率是表征衍射光学系统成像特性的特征参数,也是衍射系统波前反演的必要输入。空间应用的衍射光学系统难以实现衍射效率的在轨高精度测量或估计;因此,有必要就衍射效率误差对相位差异法波前解算精度的影响进行探究。

假设实际采集得到的图像对应的衍射效率为 η ,基于采集图像信息估计的衍射效率为 η' ,则两者之间的偏差可以表示为 $\Delta = (\eta' - \eta) / \eta$ 。将衍射效率 η 代入光学传递函数 OTF 公式中,可以得到迭代过程中的 OTF 的表达形式为

$$\begin{cases} O_{\text{OTF}}^{\text{focus}} = \eta O_{\text{OTF}} + (1 - \eta)\delta \\ O_{\text{OTF}}^{\text{defocus}} = \eta O_{\text{OTF},d} + (1 - \eta)\delta \end{cases}, \quad (19)$$

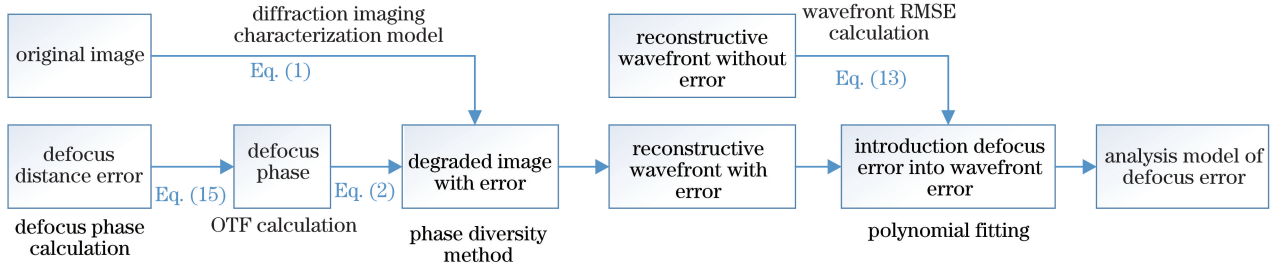


图 6 离焦量误差对波前反演误差的影响分析模型

Fig. 6 Analysis model of influence of defocus distance error on wavefront reconstruction error

式中： O_{OTF} 为离焦时的光学传递函数； $O_{\text{OTF},d}$ 为焦面的光学传递函数。

对应的目标函数表达形式为

$$E = \frac{|I[\eta O_{\text{OTF}} + (1 - \eta)\delta] - I_d[\eta O_{\text{OTF},d} + (1 - \eta)\delta]|^2}{[\eta O_{\text{OTF}} + (1 - \eta)\delta]^2 + [\eta O_{\text{OTF},d} + (1 - \eta)\delta]^2} \quad (20)$$

令 $A = (1 - \eta)\delta/\eta$ ，可知 A 是关于 η 的函数，当 η 固定时， A 为定值。因此，目标函数可以改写为

$$E = \frac{|IO_{\text{OTF},d} - I_d O_{\text{OTF}} + A(I - I_d)|^2}{(O_{\text{OTF}} + A)^2 + (O_{\text{OTF},d} + A)^2} \quad (21)$$

当衍射效率存在误差时，即 $A = (1 - \eta')\delta/\eta'$ ，此时 A 的变化为

$$\Delta A = \left(\frac{1}{\eta} - \frac{1}{\eta'} \right) \delta \quad (22)$$

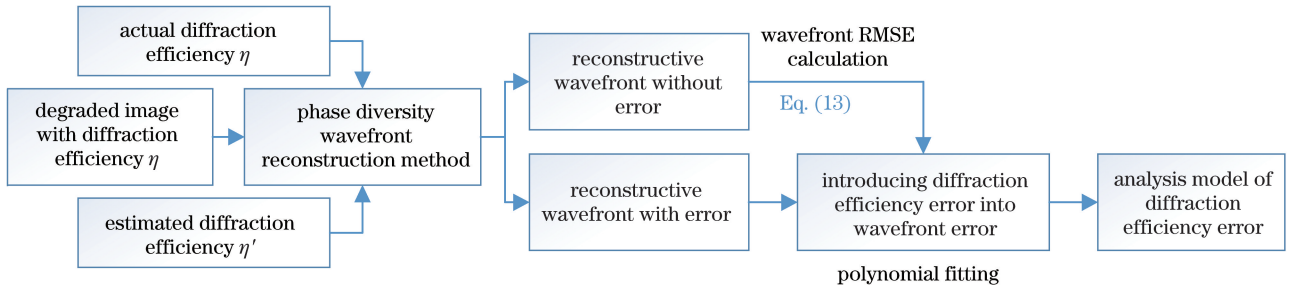


图 7 衍射效率误差对波前反演误差的影响分析模型

Fig. 7 Analysis model of influence of diffraction efficiency error on wavefront reconstruction error

4 实验结果与分析

4.1 仿真方案

通过仿真对实际衍射光学系统开展波前反演和误差评定，并与所建立的误差模型分析结果进行对比，验证模型与方法的有效性。实验方案如图 8 所示：首先，以衍射光学系统信息和误差因素为输入，仿真得到单误差因素及多误差因素同时存在时的退化图像；然后，利用衍射系统波前反演算法，分析单

从(22)式可以看出，图像零频成分较高，且实际衍射效率 η 与预估衍射效率 η' 相差较大时，衍射效率误差会对目标函数的解算过程造成较大影响，反之则影响较小。

设衍射效率误差引起的波前 RMSE ϵ_{Eff} 与衍射效率误差 x_{Eff} 的关系为

$$\epsilon_{\text{Eff}} = F_3(x_{\text{Eff}}) \quad (23)$$

用多项式拟合衍射效率与波前 RMSE 的函数映射关系，可表示为

$$\epsilon_{\text{Eff}} = \sum_{j_4=0}^{N_3} h_{j_4} (x_{\text{Eff}})^{j_4} \quad (24)$$

式中： $(x_{\text{Eff}})^{j_4}$ 为 x_{Eff} 的 j_4 次幂； N_3 为所用多项式的阶数； h_{j_4} 为对应于衍射效率误差的第 j 阶拟合多项式的系数。通过仿真获取的衍射效率误差与波前 RMSE 的关系，以及衍射效率误差对波前反演精度的影响分析模型如图 7 所示。

误差因素及多误差因素同时存在时的波前误差；最后，利用所建立的误差合成分析方法，获取多种误差同时存在下的模型分析结果，与相应输入误差条件下的实际波前误差值进行比对。

衍射光学系统的设计参数如表 1 所示。

4.2 单项误差因素分析结果

为定量分析各误差因素对波前反演误差的影响，分别对焦面位置误差、离焦量误差、衍射效率误差对波前反演误差的影响进行分析，结果如图 9 所示。

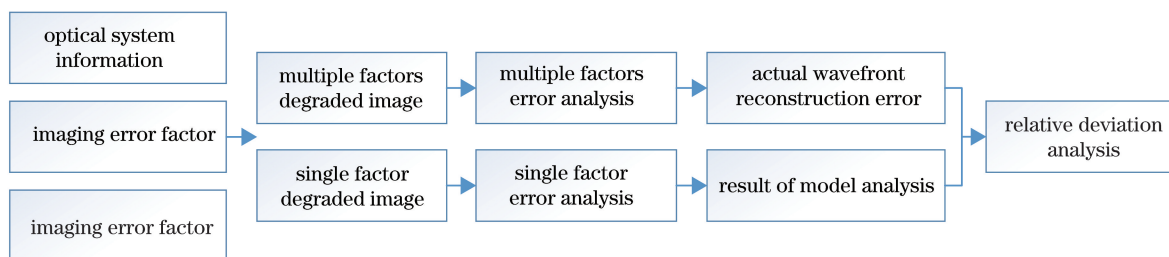


图 8 实验方案

Fig. 8 Experimental verification scheme

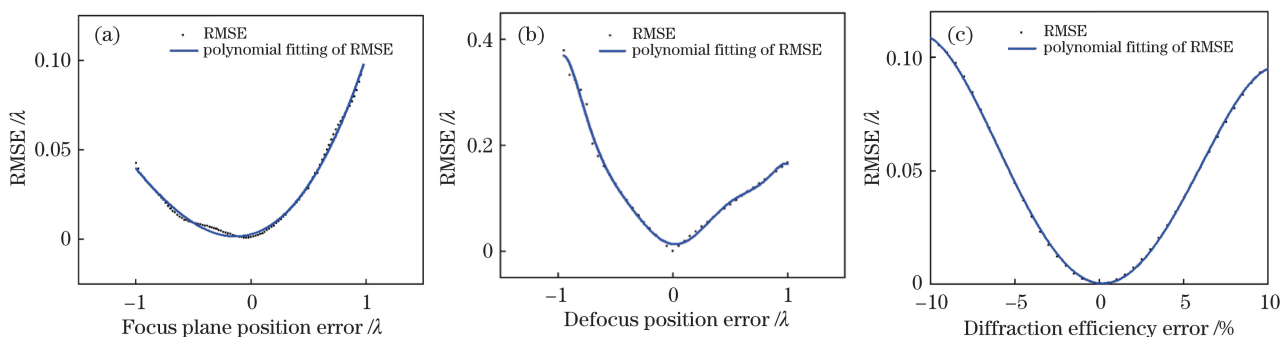


图 9 单项误差因素分析结果。(a) 焦面位置误差; (b) 离焦量误差; (c) 衍射效率误差

Fig. 9 Analysis result of single error factor. (a) Focal plane position error; (b) defocus distance error; (c) diffraction efficiency error

表 1 衍射光学系统设计参数

Table 1 Design parameters of diffractive optical system

Optical system parameter	Value
Focus length f /mm	10
$F\#$	5
Wavelength λ /nm	500
Diffraction efficiency η	0.60
CCD pixel size / μm	3
Field of view /($^\circ$)	0.10
Gaussian noise	0.002
Aberration	0.3017 λ

从仿真结果可以看出,随着焦面位置误差、离焦量误差、衍射效率误差的增加,波前反演 RMSE 呈明显上升趋势。其中,离焦量误差对波前反演误差的影响最大,焦面位置误差和衍射效率误差对波前反演误差的影响相当。当衍射效率误差为 10% 时,波前反演误差达到 0.1062 λ 。因此,在衍射系统中,衍射效率的精确测量对于保证波前反演精度尤为重要。

4.3 波前反演误差合成分析结果

在相位差异法的工程应用中,焦面位置误差、离焦量误差和衍射效率误差无法被忽视。相位差异法

波前反演的合成波前均方根误差 U_{RMSE} 与各误差因素的关系为

$$U_{\text{RMSE}} = \sqrt{\epsilon_{\text{Focus}}^2 + \epsilon_{\text{Defocus}}^2 + \epsilon_{\text{Eff}}^2} \quad (25)$$

此时,通过单误差因素分析结果,可得到多种误差因素共同作用时的波前反演误差。

定量分析焦面位置、离焦量和衍射效率误差共同作用下的波前反演误差。表 2 给出了各误差因素单独存在情况下对应的反演波前 RMSE。利用所建立的合成误差分析方法可得:当焦面位置误差为 0.5 λ 、离焦量误差为 0.5 λ 、衍射效率误差为 10% 时,对应的合成波前 RMSE 应为 0.1412 λ 。

表 2 各误差因素及波前 RMSE 取值

Table 2 Values of error factors and wavefront RMSE

Error type	Error value	Corresponding wavefront RMSE
Focus plane position error	0.5 λ	0.0511 λ
Defocus distance error	0.5 λ	0.0887 λ
Diffraction efficiency error	10%	0.0972 λ

在波前反演过程中引入表 2 所示的误差,通过对比反演波前与设计波前可知,反演波前误差的 RMSE 为 0.1398 λ ,与误差分析模型给出的误差值相近。多种误差组合条件下的波前反演误差分析结果如表 3 所示。

表 3 多种误差组合条件下的仿真及合成结果

Table 3 Simulation and synthesis results under various error combination conditions

Focus plane position error /nm	Defocus distance error /nm	Diffraction efficiency error /%	Model analysis results / λ	Actual wavefront reconstruction error / λ	Relative deviation /%
-300	-300	5	0.1778	0.1540	15.4
-300	-300	10	0.1989	0.2468	19.4
-300	-150	5	0.0796	0.0714	11.5
-300	-150	10	0.1196	0.1036	15.5
-300	100	5	0.0598	0.0542	10.2
-300	100	10	0.1075	0.1253	14.2
-300	200	5	0.0859	0.0761	12.8
-300	200	10	0.1239	0.1489	16.8
-200	-300	5	0.1765	0.1545	14.2
-200	-300	10	0.1978	0.1673	18.2
-200	-150	5	0.0766	0.0854	10.3
-200	-150	10	0.1177	0.1030	14.3
-200	100	5	0.0558	0.0614	9.0
-200	100	10	0.1054	0.0932	13.0
-200	200	5	0.0832	0.0745	11.6
-200	200	10	0.1221	0.1446	15.6
100	-300	5	0.1763	0.2026	13.0
100	-300	10	0.1976	0.1689	17.0
100	-150	5	0.0762	0.0698	9.1
100	-150	10	0.1174	0.1351	13.1
100	100	5	0.0552	0.0512	7.8
100	100	10	0.1050	0.1191	11.8
100	200	5	0.0827	0.0749	10.4
100	200	10	0.1218	0.1422	14.4
200	-300	5	0.1793	0.1570	14.2
200	-300	10	0.2003	0.2449	18.2
200	-150	5	0.0830	0.0925	10.3
200	-150	10	0.1220	0.1067	14.3
200	100	5	0.0643	0.0590	9.0
200	100	10	0.1101	0.1265	13.0
200	200	5	0.0891	0.1008	11.6
200	200	10	0.1262	0.1495	15.6

从表 3 可以看出,在不同影响因素误差条件下,所建立模型的分析结果与实际波前反演误差十分接近,平均偏差小于 13.5%。这说明:所建立的波前反演误差分析模型与方法可实现对衍射光学系统波前反演误差的准确估计。后续将设计并加工薄膜衍射光学系统,结合地面半物理实验进一步验证和优化波前反演误差分析方法。

5 结 论

在分析影响衍射光学系统波前反演误差的物理因素的基础上,从衍射光学系统相位差异法原理出发,建立了焦面位置、离焦量和衍射效率误差对波前反演影响的误差分析模型,并针对某衍射光学系统开展了波前反演误差仿真分析。分析结果表明:

1)离焦量误差对波前反演的影响最大,焦面位置和衍射效率误差对波前反演的影响相当;2)当衍射效率误差为10%时,波前反演误差达到了 0.1062λ ,因此不同于折反射式系统,对衍射光学系统进行波前反演时,必须对衍射效率进行高精度的测量;3)所提模型的分析结果与实际波前反演误差之间的平均偏差小于13.5%。所建立的误差分析模型与方法可实现对衍射光学系统波前反演误差的准确估计,为空间衍射光学系统波前反演技术的工程应用提供了基础。

参 考 文 献

- [1] Gumus C, Ozkendir O M, Kavak H, *et al.* Structural and optical properties of zinc oxide thin films prepared by spray pyrolysis method[J]. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2006, 8(1): 299-303.
- [2] Barton I M, Britten J A, Dixit S N, *et al.* Fabrication of large-aperture lightweight diffractive lenses for use in space[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(4): 447-451.
- [3] Atcheson P D, Stewart C, Domber J, *et al.* MOIRE: initial demonstration of a transmissive diffractive membrane optic for large lightweight optical telescopes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8442: 844221.
- [4] Atcheson P, Domber J, Whiteaker K, *et al.* MOIRE: ground demonstration of a large aperture diffractive transmissive telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9143: 91431W.
- [5] Waller D, Campbell L, Domber J L, *et al.* MOIRE primary diffractive optical element structure deployment testing[C]//2nd AIAA Spacecraft Structures Conference, January 5-9, 2015, Kissimmee, Florida. USA: AIAA, 2015: 1836.
- [6] Paxman R G, Schulz T J, Fienup J R. Joint estimation of object and aberrations by using phase diversity[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1992, 9(7): 1072-1085.
- [7] Zhi X Y, Jiang S K, Zhang W, *et al.* Image degradation characteristics and restoration based on regularization for diffractive imaging[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 86: 226-238.
- [8] Yue D, Xu S Y, Nie H T, *et al.* Error analysis and eliminate methods for wavefront detection based on phase diversity algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0111003.
岳丹, 徐抒岩, 聂海涛, 等. 相位差异法探测波前的误差分析及消除方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0111003.
- [9] Paxman R G, Fienup J R. Optical misalignment sensing and image reconstruction using phase diversity[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1988, 5(6): 914-923.
- [10] Zhang L, Zhao H, Fan X W. Performance evaluation of phase diversity wave-front sensing in obtaining high-resolution images[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10806: 1080630.
- [11] Meynadier L, Michau V, Velluet M T, *et al.* Noise propagation in wave-front sensing with phase diversity[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(23): 4967-4979.
- [12] Fan J L, Wu Q Y, Lu Z Y, *et al.* Cramér-Rao lower bound analysis of phase diversity for sparse aperture optical systems[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(9): 2563-2567.
- [13] Shi G H, Ding J M. Optical design of catadioptric lenses with long focal length and wide field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, 11(7): 651-655.
史光辉, 丁甲民. 长焦距大视场折反射系统的光学设计[J]. *光学学报*, 1991, 11(7): 651-655.
- [14] Buralli D A, Morris G M. Effects of diffraction efficiency on the modulation transfer function of diffractive lenses[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(22): 4389-4396.
- [15] Wang D W, Zhi X Y, Zhang W, *et al.* Influence of ambient temperature on the modulation transfer function of an infrared membrane diffraction optical system[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(30): 9096-9105.