

光学非球面面形非零位检测的回程误差校正

师 途¹ 臧仲明¹ 刘 东¹ 杨甬英¹ 种诗尧¹ 张 磊¹ 白 剑¹ 沈亦兵¹ 苗 亮² 黄 玮²

¹浙江大学光电科学与工程学院现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 光学非球面面形的非零位检测较零位检测而言具有更强的通用性。详细分析了非球面非零位检测中回程误差的产生机理,结合校正方法将其分为可预知回程误差和不可预知回程误差两部分,分析其对最终检测结果的影响。然后介绍了实际检测中常用的回程误差校正方法的原理,通过仿真实验对比各种方法对不同非球面度、不同面形误差大小的被测非球面的校正效果,并结合方法原理和仿真结果分析了不同方法的回程误差校正能力,总结其适用范围。

关键词 测量;干涉;非球面检测;非零位;回程误差;校正方法

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0812006

Retrace Error Correction for Non-Null Testing of Optical Aspheric Surface

Shi Tu¹ Zang Zhongming¹ Liu Dong¹ Yang Yongying¹ Chong Shiyao¹
Zhang Lei¹ Bai Jian¹ Shen Yibing¹ Miao Liang² Huang Wei²

¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

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

Abstract Non-null testing methods of optical aspheric surface are more common than the null testing ones. The mechanism of the production of retrace error in aspheric non-null testing are analyzed in detail. The retrace error is divided into predictable part and unpredictable part by combing calibration method and its influence on final testing result is analyzed. The principle of common retrace error calibration method in actual testing is introduced. The correction effects of each method on aspheric surface under test with different asphericities and different surface errors are compared by simulation experiment. The correction ability of retrace error of each method is analyzed by combing the method principle and simulation result, and the application range is summarized.

Key words measurement; interferometry; aspheric testing; non-null; retrace error; calibration method

OCIS codes 120.6650; 120.3180; 220.4840; 220.1250

1 引 言

干涉检测是实现高精度、无接触非球面检测的主要方法^[1-2]。其中,零位干涉法需要针对不同参数的非球面设计不同的光路结构或零位补偿器,通用性差,时间与经济成本较高^[3-7];相对而言,非零位干涉法具有较高的通用性且测量成本较低。由于非零位检测偏离了零位条件,参考波面和被测面的理论形状不完全一致,大部分光线并非沿被测面的法线方向入射,导致返回的光偏离原入射光路,产生回程误差^[6-10],探测器得

收稿日期: 2016-03-21; **收到修改稿日期:** 2016-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(61475141)、现代光学仪器国家重点实验室创新基金(MOI2015QN01)、应用光学国家重点实验室开放基金

作者简介: 师 途(1991—),女,博士研究生,主要从事光学非球面精密检测方面的研究。E-mail: shitu0209@163.com

导师简介: 刘 东(1982—),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事光学传感与信息处理技术方面的研究。

E-mail: liudongopt@zju.edu.cn(通信联系人)

到的干涉图为回程误差与被测面形共同作用的结果,要从中获得准确的面形信息,就必须校正回程误差。

非零位检测回程误差的校正最早是基于干涉检测理论的“二倍关系”法^[11-12],即干涉波前相位的一半直接减去参考波面与被测面理论值之间的几何偏差。Murphy等^[13-14]从成像角度利用三阶像差理论对回程误差进行预测和校正,计算较复杂,而且对系统装调精度要求极高,一般较少在实际检测中使用。Gappinger等^[15-16]将检测路的光程分为三个部分,结合实际测得的光程差分布,提出光线逆向追迹算法,通过差值、估算和不断迭代求得被测面矢高,整体计算过程步骤多而复杂,在多个分步骤中又分别采用了估算和迭代求解,若要提升结果精度将进一步增大运算量。He等^[17]利用哈密顿光学中的点特征函数对回程误差进行分析,为回程误差的校正提供了良好的数学模型。2009年,本课题组^[11,18]将回程误差分为轴向误差和坐标径向剪切误差,对其分别进行初级校正后得到被测面的面形,在面形误差较小的情况下取得了良好的检测效果。2011年,本课题组^[19]又提出理论参考波前(TRW)法来校正回程误差,进而重构被测面的面形,可在一定误差范围内实现非球面面形较高精度的重构。2014年,本课题组^[2,20]又提出基于检测系统理论建模的面形逆向求解技术,即逆向优化面形重构(ROR)法,在准确建模的基础上对被测面的面形进行逆向迭代求解,从而实现高精度的回程误差校正与面形重构。

目前关于非零位检测系统的研究有很多^[21-25],但尚无回程误差校正方法的统一分析。本文对非零位检测回程误差进行了详细推导,介绍了目前常用的回程误差校正方法及其特点,并通过仿真实验研究了各种方法的回程误差校正效果,得到不同方法的校正能力、精度和适用范围。

2 非零位干涉检测的回程误差分析

在干涉检测中,当参考波前的形状偏离被测面的理论形状时,检测光线从被测件返回的路径将无法与原入射路径重合。如果此时仍应用零位干涉检测原理来反演被测面的面形,将会产生回程误差。根据回程误差对波像差的影响,可将回程误差分为轴向位相误差和径向坐标误差^[11];从回程误差来源的角度分析,又可将其分为可预知误差和不可预知误差。

对于非零位检测,参考波前与被测面的形状不完全一致,偏离了零位检测条件。即使被测镜形状理想,不包含面形缺陷,大部分检测光也并非沿被测面的法线方向入射,入射光经被测面反射后,光线不沿原光路返回。以标准球面波作为参考波检测非球面的示意图如图1所示,干涉仪出射的光线分别与参考球面和被测面交于S点和C点,由被测面C点反射的光线交参考球面于S'点后返回干涉仪中。

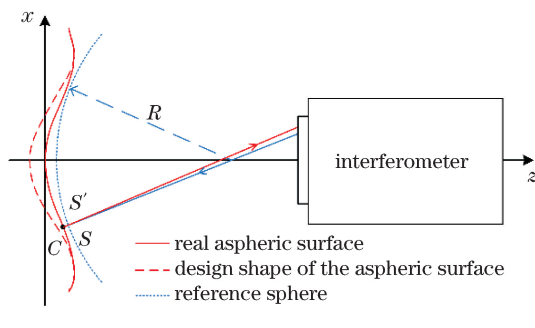


图1 非零位检测中的回程误差示意图

Fig. 1 Schematic of retrace error in non-null testing

设被测非球面的理论形状方程为 $z=f(x,y)$,其待测面形误差为 $g(x,y)$ 。参考光的光程可以根据具体的系统结构参数通过光线追迹得到,记为 D_0 。若检测光的光程为 D_1 ,则探测器检测所得光程差为

$$D_{OP} = D_1 - D_0, \quad (1)$$

式中 D_1 是关于非球面形状 $f(x,y)+g(x,y)$ 和系统结构的函数。假设被测非球面为理想形状,不存在面形缺陷,则 $g(x,y)=0$, (1)式表示的即为系统固有程差,其大小和分布可以根据系统结构参数通过光线追迹和数学计算的方法获得。由于检测光与参考光不共路, $D_1 \neq D_0$,所以干涉系统和非球面在理想状态下也无法得到零条纹,而是存在一个固有的光程差,可通过计算得到,此即可预知回程误差。

可预知回程误差产生于参考波面与理想被测面之间几何偏离造成的非共路误差。这一误差不单指入射光和反射光在空气介质中光线传播几何路径的不同,还包括二者经过检测系统中光学元件的不同位置而引入的器件非对称误差。通过光线追迹和数学计算可以得到被测面为理想形状时系统可预知回程误差的大小与分布。

实际非零位检测中,被测光学元件的面形误差在被测面理想形状上附加了待测偏离,使被测面反射的光线增加了新的偏离度,即在可预知回程误差的基础上,进一步增大或减小了反射光与入射光之间的非共路性。在此情况下, $g(x, y) \neq 0$ 且为未知量, D_1 难以通过简单的光线追迹而准确得到,以致难以获得实际回程误差的大小和分布。这种由 $g(x, y)$ 引起的无法预测的非共路误差即为不可预知回程误差。不可预知回程误差对非零位检测准确与否有重要影响,尤其当被测面的面形误差相对较大时,不可预知回程误差是决定检测精度的主要因素。

非零位检测偏离零位条件,参考波前与被测面的形状不完全一致,由此引入的回程误差不可忽略。实际测量时,回程误差与被测面面形误差对干涉条纹的影响互相混叠,其中更包含了不可预知回程误差的作用,因此回程误差的校正尤为关键。对回程误差,尤其是不可预知回程误差判断的准确性,直接关系到回程误差的校正以及面形检测结果的精确性。

3 回程误差校正

非零位检测中,回程误差普遍存在且不可忽略。常用的亚奈奎斯特法、长波长法、部分补偿法^[23-25]和子孔径拼接法^[1,26-27]等非零位干涉检测方法无一例外都需要对回程误差进行校正以得到被测面形。应用较广的回程误差校正方法主要有非零位“二倍关系”(NDP)法、TRW法和ROR法等。

3.1 NDP法

NDP法将参考波与被测面之间的几何偏差近似为系统回程误差,在零位“二倍关系”^[18]的基础上对此误差进行校正以求得被测面的面形。一般取可与被测面产生最少干涉条纹的最佳比较球面作为参考波前,被测面面形误差可表示为

$$W_{\text{asp}} = \frac{1}{2}W_{\text{det}} - \{f(x, y) - [R_0 - \sqrt{R_0^2 - (x^2 + y^2)}]\} \frac{R_0}{\sqrt{R_0^2 + (x^2 + y^2)}}, \quad (2)$$

式中 W_{asp} 为被测面面形误差, W_{det} 为探测器所得波前, $z = f(x, y)$ 为被测面的理论形状方程, R_0 为其最佳球半径。NDP比较简单,且计算速度快。当被测面与参考波之间的几何偏差小且被测面面形误差较小时,该近似基本准确,故目前此方法在非球面子孔径拼接检测中得到了较多的应用^[12]。

3.2 TRW法

基于系统建模和单次光线追迹的TRW法^[19]能够对可预知回程误差进行准确校正。在光线追迹软件中对理想非零位干涉检测系统建模,经过单次光线追迹,得到像面处的光程差为 W'_{det} 。类似的,在被测面带有面形误差的实际检测系统中,探测器处的光程差为 W_{det} 。结合干涉原理,被测面的面形误差为

$$W_{\text{asp}} \approx \frac{1}{2}(W_{\text{det}} - W'_{\text{det}})。 \quad (3)$$

需要注意的是,由于实际检测系统中总会存在器件误差和对准误差,故需要对波像差进行进一步校正^[19]。

TRW法最初用在以球面波作为参考波的干涉检测系统中,为了简便将此称为球面理论参考波前(STRW)法;为了进一步减小像面处的干涉条纹密度,提升系统检测能力,采用更接近被测面理论形状的非球面波作为参考波前,仍利用TRW法对回程误差进行校正,称为非球面理论参考波前(ATRW)法。实际上,TRW法是对系统的可预知回程误差进行了校正,即使被测面的非球面度较大,理论上TRW法也能够准确校正该误差。此外,TRW法仅需对建模系统进行单次光线追迹,速度较快。然而,该方法只考虑了可预知回程误差,当被测面自身的面形误差较大时,由面形引入的不可预知回程误差不可忽略,此时TRW法的回程误差校正精度将下降,从而影响重构面形的准确性。

3.3 ROR法

为提高回程误差的校正精度和方法的通用性,同样是基于系统建模与光线追迹,ROR法^[2,20]可以同时

实现对可预知和不可预知回程误差的校正。一般而言,光学元件经过精密抛光后,面形变化平缓且连续,由干涉仪检测得到的面形误差频率主要集中在中低频。所以,被测面的面形误差 W_{asp} 可以用有限项泽尼克圆多项式的线性组合表示为

$$W_{\text{asp}} \approx \sum_{j=1}^M B_j Z_j(\rho, \theta), \quad (4)$$

式中 ρ 和 θ 分别表示被测面上某点的归一化径向坐标和角度坐标, B_j ($j=1, 2, \dots, M$) 为相应的泽尼克多项式 Z_j 的系数,求得 B_j 即可重构出被测面的面形误差。

实际搭建的检测系统正确装调后,探测器检测到的波前为 W_{det} ,而在光线追迹软件中按实际检测系统结构参数建模,非球面取其理论形状,这时探测器检测到的波前为 W_{det}^* 。在建模的被测非球面理论形状上附加以泽尼克多项式表示的可变面形误差 $W_{\text{asp-temp}}$,设置泽尼克多项式的系数 $B_{j\text{-temp}}$ 为变量,不断对 $B_{j\text{-temp}}$ 进行迭代优化,直到模型中探测器检测到的波前 W_{det}^* 与实际波前 W_{det} 一致,这时可认为可变面形误差 $W_{\text{asp-temp}}$ 与实际面形误差 W_{asp} 一致。由此将最终得到的系数 B_j 进行泽尼克多项式拟合即可重构出被测非球面的面形误差。

ROR 法直接以被测面形误差为变量,通过系统建模和 ROR 避免了求解面形误差的显示解析表达式,可以同时可对可预知回程误差和不可预知回程误差进行准确校正,因此在被测面的非球面度和面形误差均较大的情况下也能够准确重构出被测面的面形。ROR 法通用性的特点使得其无论在全孔径测量^[20]还是子孔径拼接^[23]系统中,均能良好地校正测量区域内的回程误差,求得面形信息。

4 仿真实验与校正能力研究

利用光线追迹软件和数学计算平台对 NDP 法、TRW 法和 ROR 法等三种常用非零位检测回程误差校正方法进行仿真,研究不同方法的面形重构精度和回程误差校正能力,分析各种方法的适用条件。

仿真采用基于泰曼-格林干涉仪的部分补偿检测系统对被测面进行非零位检测,系统光路如图 2 所示。波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器发出的激光经准直扩束系统后变成宽光束平行光,平行光入射到半透半反镜上被分为反射光和透射光两路。反射光作为参考路,经参考平面镜反射后仍为平行光;透射光作为检测路,经过部分补偿镜(PCL)后补偿了被测面的大部分法线像差。由被测面反射的光携带面形信息和回程误差,不是沿原入射光路返回,而是再次经过 PCL 后与由参考平面镜反射的参考光在分束镜处汇合并产生干涉,干涉条纹被成像系统成像于探测器 CCD 上。通过压电陶瓷(PZT)驱动参考镜,实现对干涉条纹的相位调制,探测到的多幅干涉图经过相位解调和回程误差校正,最终可以重建出待测面的面形误差。

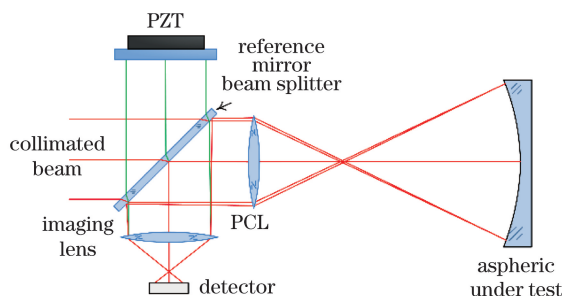


图 2 非零位非球面面形检测系统

Fig. 2 Non-null aspheric surface shape testing system

仿真实验中的被测面理想形状为两个凹抛物面,I号抛物面的通光口径 D 为 100 mm,顶点球半径为 800 mm, F 数为 4,相对于顶点球和最佳球的最大非球面度分别为 $1.529 \mu\text{m}$ 和 $0.381 \mu\text{m}$;II号抛物面的通光口径 D 也为 100 mm,但顶点球半径为 200 mm, F 数为 1,相对于顶点球和最佳球的最大非球面度分别为 $100.83 \mu\text{m}$ 和 $24.41 \mu\text{m}$ 。两个抛物面相对于顶点球的非球面度如图 3(a)所示。在抛物面的理想形状上附加两种不同大小的面形误差 A[峰值(PV)为 0.154λ ,均方根(RMS)为 0.021λ]和 B(PV 为 15.435λ ,RMS 为 2.080λ),分别如图 3(b)和(c)所示。

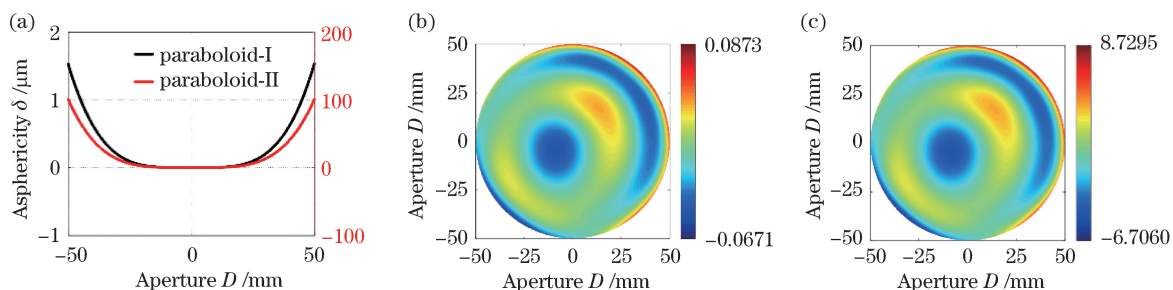


图 3 被测面的非球面度及面形误差。(a) I 和 II 号抛物面的非球面度;(b) 面形误差 A;(c) 面形误差 B
Fig. 3 Asphericities and figure errors of the surfaces under test. (a) Asphericities of paraboloid I and II; (b) figure error A; (c) figure error B

将 I、II 号抛物面和 A、B 面形组合成 4 种被测面的形式,分别代表非球面度较小或较大的被测面带有较小或较大面形误差时的情况。利用常用回程误差校正方法对 4 种被测面进行重构,验证不同方法的后程误差校正能力和面形重构精度,研究其适用条件。其中,NDP 法和 STRW 法使用消球差镜产生球面参考波,其半径与被测面的最佳球一致,对于 I、II 号抛物面来说分别为 800.7813 mm 和 203.125 mm; ATRW 法和 ROR 法中使用 PCL 产生非球面参考波,PCL 的参数如表 1 所示。

表 1 PCL 结构参数

Table 1 Structure parameters of PCL

	Surface number	Radius /mm	Thickness /mm	Glass
Paraboloid I	1	89.148	10.650	UBK7
	2	-50.678	-	-
Paraboloid II	1	83.000	10.300	K9
	2	-35.865	-	-

4.1 小非球面度被测面的回程误差校正

以附加较小面形误差 A 的非球面度相对较小的抛物面 I 作为被测面,使用 NDP、TRW 和 ROR 三种方法校正回程误差,重构出的面形结果如图 4 所示。三种方法重构结果的 PV、RMS 及其与真实面形之间的剩余误差如表 2 所示。

表 2 附加小面形误差的小非球面度被测面的重构结果

Table 2 Reconstruction results of the small asphericity surface with small figure error

λ

Method	Figure error			
	PV	Residual PV	RMS	Residual RMS
Actual	0.154	-	0.021	-
NDP	0.113	0.076	0.020	0.011
STRW	0.105	0.049	0.019	0.005
ATRW	0.180	0.026	0.022	0.002
ROR	0.154	1.423×10^{-8}	0.021	1.679×10^{-9}

在非球面度和所附加面形误差均比较小时,4 种回程误差校正方法得到的面形误差与真实面形分布基本一致,从 PV 和 RMS 来看,NDP 和 STRW 法仍存在不小的误差,ATRW 法误差减小,ROR 法则只有很小的计算误差。

在抛物面 I 上附加大面形误差 B,4 种方法校正回程误差的结果如图 5 和表 3 所示。

在同样的小非球面度被测面上附加了很大的面形误差时,NDP 和 TRW 法重构的结果十分不准确,原因在于偏离度较小时,不可预知回程误差起主导作用,相比于可预知回程误差引入了更大的光线不共路。而相同条件下,ROR 法通过多次迭代的方式,依然可以实现非球面面形的高精度重构。

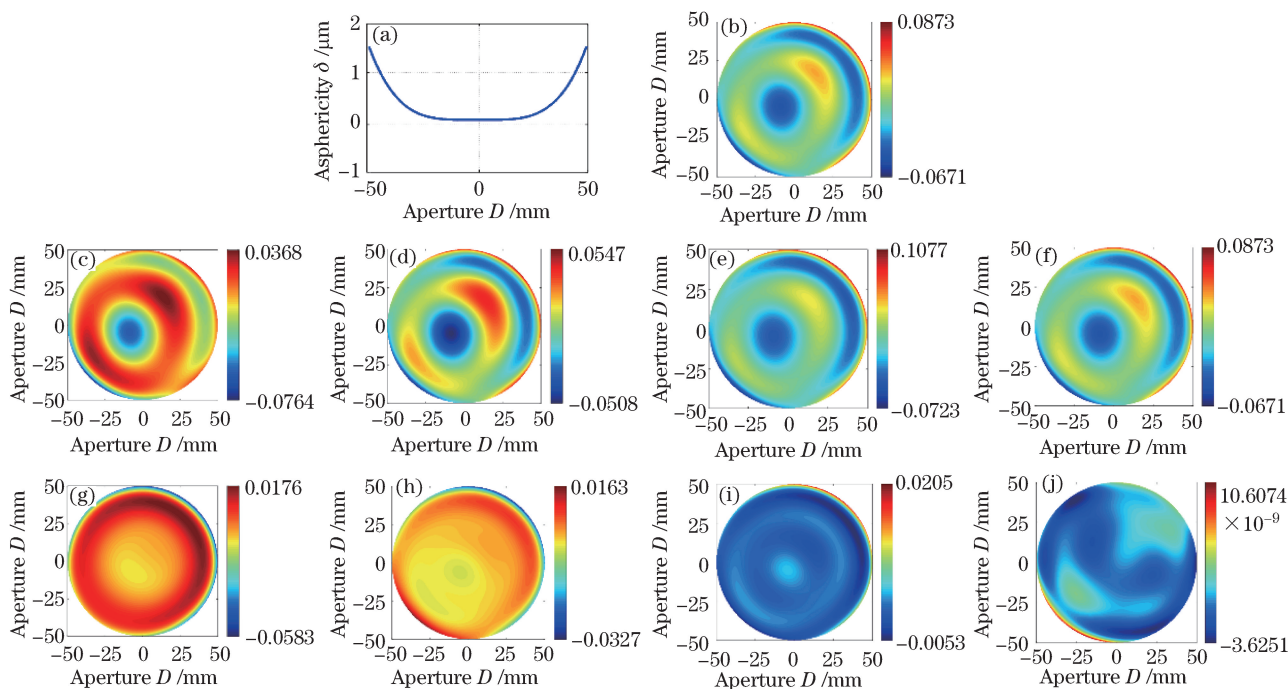


图 4 附加小面形误差的小非球面度被测面的重构结果。(a)抛物面 I 相对于顶点球的非球面度；(b)附加的真实面形；(c)NDP、(d)STRW、(e)ATRW、(f)ROR 法的面形重构结果；(g)NDP、(h)STRW、(i)ATRW、(j)ROR 法的剩余误差
Fig. 4 Reconstruction results of the small asphericity surface with small figure error. (a) Asphericity of paraboloid I relative to the vertex sphere; (b) additional actual figure; reconstructed figure results of (c) NDP, (d) STRW, (e) ATRW, (f) ROR methods; residual errors of (g) NDP, (h) STRW, (i) ATRW, (j) ROR methods

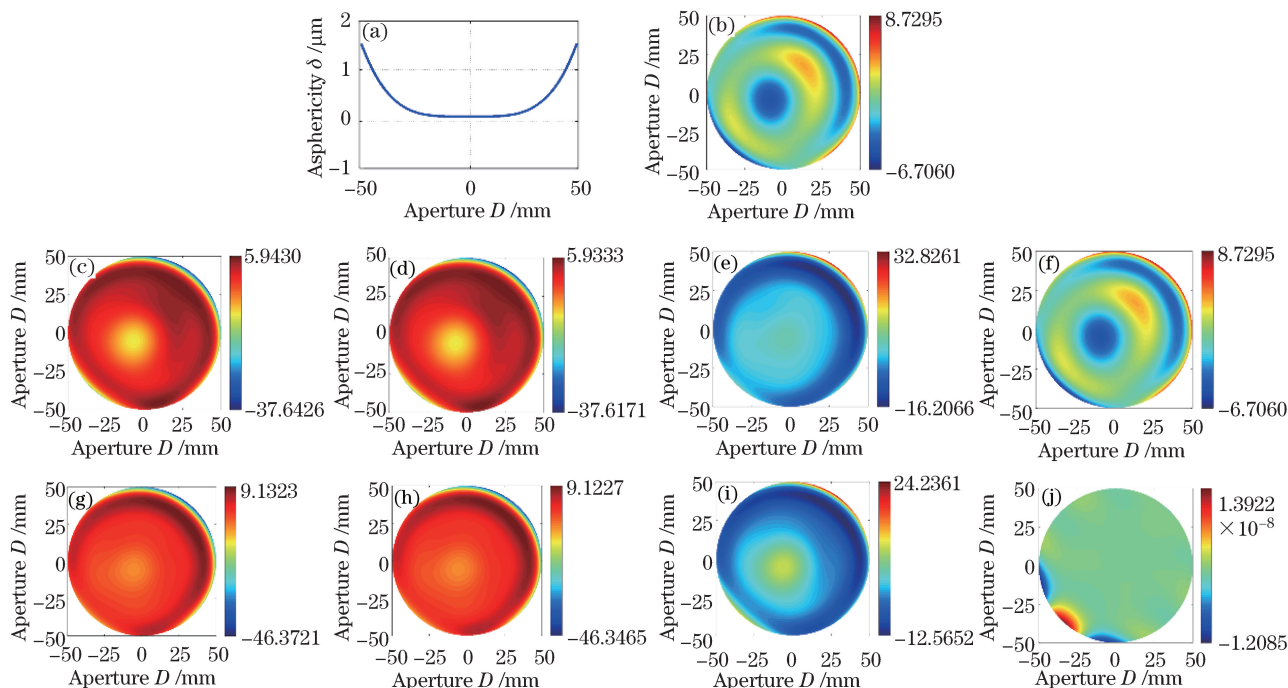


图 5 附加大面形误差的小非球面度被测面的重构结果。(a)抛物面 I 相对于顶点球的非球面度；(b)附加的真实面形；(c)NDP、(d)STRW、(e)ATRW、(f)ROR 法的面形重构结果；(g)NDP、(h)STRW、(i)ATRW、(j)ROR 法的剩余误差
Fig. 5 Reconstruction results of the small asphericity surface with large figure error. (a) Asphericity of paraboloid I relative to the vertex sphere; (b) additional actual figure; reconstructed figure results of (c) NDP, (d) STRW, (e) ATRW, (f) ROR methods; residual errors of (g) NDP, (h) STRW, (i) ATRW, (j) ROR methods

表 3 附加大面形误差的小非球面度被测面的重构结果

Table 3 Reconstruction results of the small asphericity surface with large figure error

λ

Method	Figure error			
	PV	Residual PV	RMS	Residual RMS
Actual	15.435	—	2.080	—
NDP	43.586	55.504	5.317	5.823
STRW	43.550	55.469	5.312	5.817
ATRW	49.033	36.801	5.849	5.165
ROR	15.435	2.600×10^{-8}	2.080	1.662×10^{-9}

4.2 大非球面度被测面的回程误差校正

在非球面度较大的抛物面 II 上附加小面形误差 A, 采用 4 种方法对回程误差的校正结果如图 6 和表 4 所示。

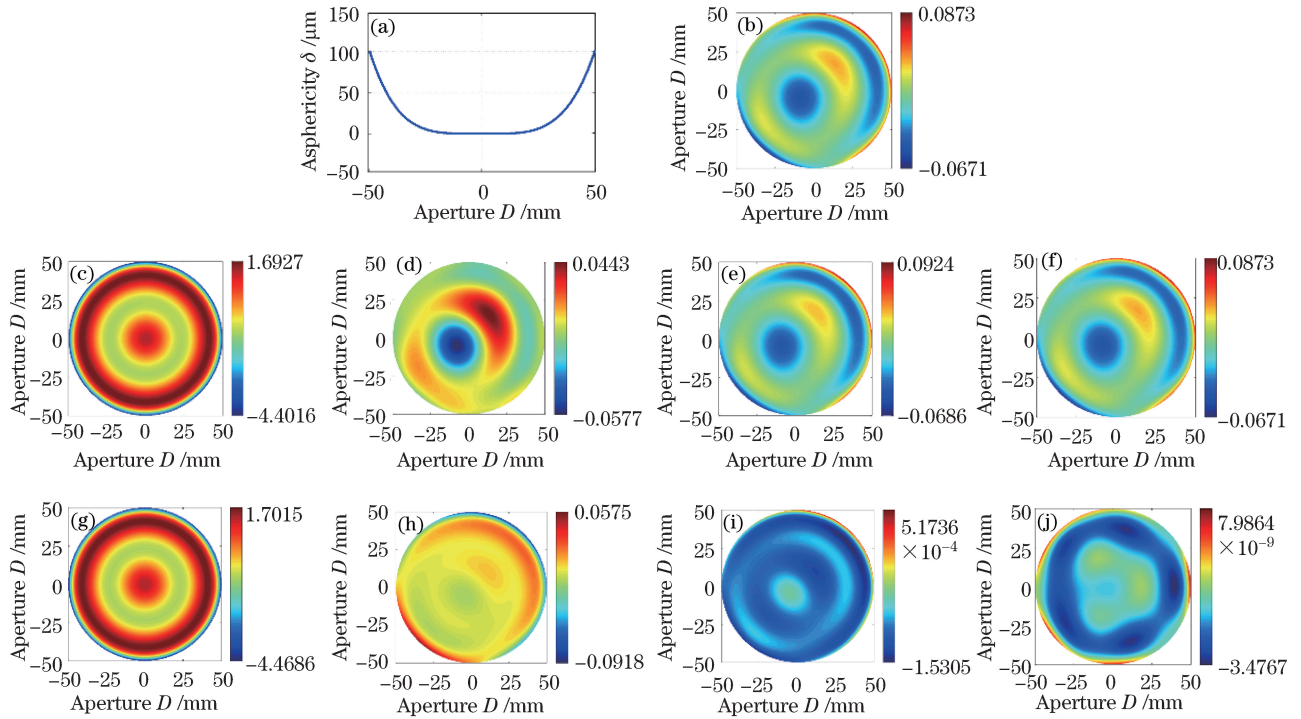


图 6 附加小面形误差的大非球面度被测面的重构结果。(a)抛物面 II 相对于顶点球的非球面度;(b)附加的真实面形;(c)NDP、(d)STRW、(e)ATRW、(f)ROR 法的面形重构结果;(g)NDP、(h)STRW、(i)ATRW、(j)ROR 法的剩余误差

Fig. 6 Reconstruction results of the large asphericity surface with small figure error. (a) Asphericity of the paraboloid II relative to the vertex sphere; (b) additional actual figure; reconstructed figure results of (c) NDP, (d) STRW, (e) ATRW, (f) ROR methods; residual errors of (g) NDP, (h) STRW, (i) ATRW, (j) ROR methods

表 4 附加小面形误差的大非球面度被测面的重构结果

Table 4 Reconstruction results of the large asphericity surface with small figure error

λ

Method	Figure error			
	PV	Residual PV	RMS	Residual RMS
Actual	0.154	—	0.021	—
NDP	6.094	6.170	1.274	1.282
STRW	0.102	0.149	0.017	0.013
ATRW	0.161	0.007	0.021	7.015×10^{-4}
ROR	0.154	1.146×10^{-8}	0.021	1.836×10^{-9}

对于在一个非球面度较大的被测面上附加小面形误差的情况, NDP 法仍然得不到精确的结果;从 PV 和 RMS 来看, STRW 法误差较大, 而 ATRW 法比较准确, 原因是这种情况下非球面参考波更加接近被测面

理论形状, ATRW 法精度更高。

在抛物面 II 上附加大面形误差 B, 三种方法校正回程误差的结果如图 7 和表 5 所示。

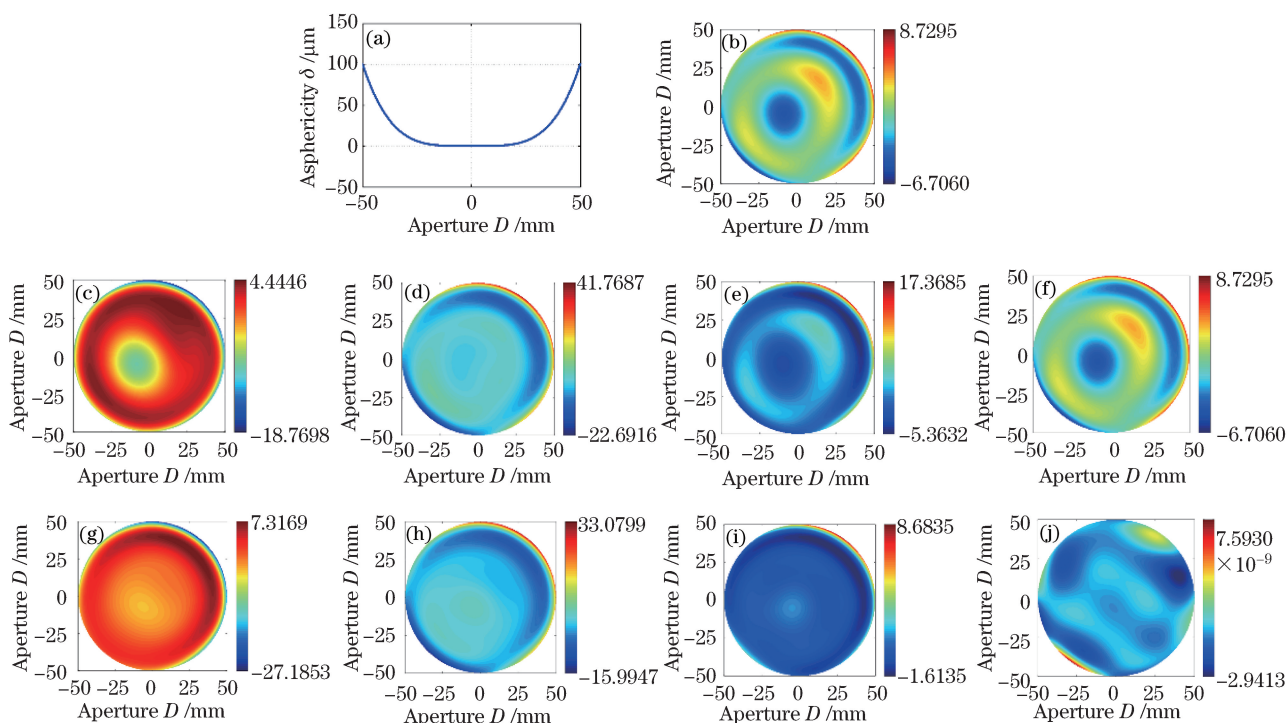


图 7 附加大面形误差的大非球面度被测面的重构结果。(a)抛物面 II 相对于顶点球的非球面度;(b)附加的真实面形;(c)NDP、(d)STRW、(e)ATRW、(f)ROR 法的面形重构结果;(g)NDP、(h)STRW、(i)ATRW、(j)ROR 法的剩余误差
Fig. 7 Reconstruction results of the large asphericity surface with large figure error. (a) Asphericity of the paraboloid II relative to the vertex sphere; (b) additional actual figure; reconstructed figure results of (c) NDP, (d) STRW, (e) ATRW, (f) ROR methods; residual errors of (g) NDP, (h) STRW, (i) ATRW, (j) ROR methods

表 5 附加大面形误差的大非球面度被测面的重构结果

Table 5 Reconstruction results of the large asphericity surface with large figure error

λ

Method	Figure error			
	PV	Residual PV	RMS	Residual RMS
Actual	15.435	—	2.080	—
NDP	23.214	34.502	3.889	4.314
STRW	64.460	49.075	6.186	4.794
ATRW	22.731	10.297	2.644	1.007
ROR	15.435	1.053×10^{-8}	2.080	9.823×10^{-10}

非球面度和面形误差都比较大时, NDP 法与 TRW 法得到的结果均不准确, 而 ROR 法可以同时校正可预知回程误差与不可预知回程误差, 因此能得到十分精确的结果。

4.3 仿真结果分析

通过上述系列仿真实验可知, NDP 法将几何偏差近似为系统回程误差来进行校正, 在被测面的非球面度和面形误差均较小时可用于面形误差重构, 能够得到较准确的结果; 而当非球面度或面形误差增大时, 这一近似不再成立, 以该方法校正回程误差所得的重构面形不再正确, 失真较大。基于系统理论建模和单次光线追迹的 TRW 法可以准确校正由被测面与参考波的理论偏离所引入的可预知回程误差, 因此无论被测面非球面度的大小如何, 该方法均可在面形误差较小时得到相对准确的结果; 而由于 TRW 法无法校正由被测面形引入的不可预知回程误差, 因此当面形误差增大时, TRW 法的回程误差校正精度下降, 重构精度降低; 参考波前越接近被测面形状时, TRW 法精度越高, 所以 ATRW 法相对 STRW 法有更好的校正效果。当被测面的非球面度和面形误差均较大时, 不可预知回程误差对干涉结果的影响不可忽略, 以上方法难以实现被

测面形的准确重构。ROR 法则通过系统建模和逆向多次迭代,可同时校正可预知回程误差与不可预知回程误差,在各种情况下均能得到十分准确的结果。

在实际测量时,ROR 法和 TRW 法需要对检测系统进行精确建模,建模精度会限制这两种方法的面形重构精度。在实际检测中,系统装调和标定等各种公差会引入建模误差,对干涉仪检测精度带来影响,因此实际检测时需要先对系统进行仔细校准^[2,16,28]。尤其是当参考波前为非球面波时,相比于参考波前为球面波来说,被测面的调整具有更严格的要求^[28-30]。另外,ROR 法校正回程误差时需要通过多次光线追迹,与 TRW 法相比,运算速度较慢,所以在被测面的面形误差较小且要求运算速度较快时,TRW 法更加适用。此外,实际测量时要保证探测器采集到的干涉图能够被分辨及解调,这是进行后续数据处理的前提。对于上述仿真,当采用非球面波作为参考波时,探测器处干涉条纹密度均小于 $0.2\lambda/\text{pixel}$,符合采样定理,条纹能够直接被 CCD 分辨;当非球面偏离量较大时,采用球面波作为参考波所得到的干涉条纹密度超过 $0.5\lambda/\text{pixel}$,此时若要分辨或解调波前相位,可使用高密度探测器或欠采样计算法^[31],否则在这种情况下,需要对全口径进行子孔径划分并分别检测。实际检测时应根据不同被测面和测量系统的检测情况选择合适的回程误差校正方法,以达到最优效果。根据分析结果和大量仿真,得到三种回程误差校正方法的参考适用范围如表 6 所示。

表 6 3 种回程误差校正方法的适用范围
Table 6 Application range of the three retrace error methods

Non-null figure error reconstruction methods	For large figure error	Applications
NDP	No	Small asphericity ($F \geq 2$) Small figure error ($< 0.3\lambda$)
TRW	No	Small figure error ($< 0.5\lambda$)
ROR	Yes	Generalized (with phase can be unwrapped)

5 结 论

光学元件面形非零位检测中的回程误差可以分为可预知回程误差与不可预知回程误差。可预知回程误差主要由被测面的理论形状与参考波的偏离所引入,不可预知回程误差的产生则主要是由于被测面的面形误差引入额外的光线偏离。实际测量时,回程误差造成的影响混叠在干涉图上,校正回程误差对获得被测面真实的面形误差信息十分关键。常用的回程误差校正方法有 NDP 法、TRW 法和 ROR 法。其中,NDP 将回程误差近似为几何偏差来计算,没有考虑此几何偏差之外由入射光和反射光非共路引入的光程差,因此较不准确;TRW 法通过一次光线追迹校正了可预知回程误差,但在被测面面形误差较大时得不到准确的结果;ROR 法则可以同时校正可预知回程误差与不可预知回程误差,在系统建模准确时可以得到完全精确的结果。

通过仿真实验,对三种方法在不同非球面度、不同面形误差情况下的校正结果进行验证,分析得出其校正能力和适用条件。NDP 法适用范围窄,只适合非球面度和面形误差都很小时的回程误差校正;而 TRW 法由于能够准确校正可预知回程误差,因此在面形误差较小时均适用;ROR 法能够通过多次光线追迹和 ROR 完全校正回程误差,因此可以准确地重构被测面的面形。

参 考 文 献

- Shi Tu, Yang Yongying, Zhang Lei, *et al.* Surface testing methods of aspheric optical elements[J]. Chinese Optics, 2014, 7(1): 26-46.
师 途, 杨甬英, 张 磊, 等. 非球面光学元件的面形检测技术[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 26-46.
- Shi Tu, Liu Dong, Zhang Lei, *et al.* Reverse optimization reconstruction method for aspheric testing in a nonnull interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 612007.
师 途, 刘 东, 张 磊, 等. 非球面非零位检测的逆向优化面形重构[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 612007.
- Qiao Yujing, Lü Ning. Study on aspheric surface and aspheric measurement [J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2005, 21(3): 357-361.

- 乔玉晶, 吕 宁. 非球面及非球面测量技术[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2005, 21(3): 357-361.
- 4 Guo Peiji, Yu Jingchi. Some problems about compensator designing[J]. Optical Technique, 2006, 32(1): 0118.
郭培基, 余景池. 设计非球面检测用补偿器应注意的几个问题[J]. 光学技术, 2006, 32(1): 0118.
- 5 Li Le, Gao Songtao, Sui Yongxin, *et al.* Compensator system design by iteration method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(7): 072203.
李 乐, 高松涛, 隋永新, 等. 基于迭代方法的补偿器系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(7): 072203.
- 6 Qu Hemeng, Zhang Xin, Wang Lingjie, *et al.* Research of null optics testing for elliptical windows[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0222001.
曲贺盟, 张 新, 王灵杰, 等. 新型椭球形窗口零位检测技术研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0222001.
- 7 Xing Zhenchong, Zhang Bao, Hong Yongfeng. Design of compensator of convex aspheric surface with small apertures[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(11): 1116001.
邢振冲, 张 葆, 洪永丰. 一种小口径凸非球面补偿器的设计[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1116001.
- 8 Han S, Novak E. Retrace error for the measurement of a long radius optic[C]. SPIE, 1999, 3749: 597-598.
- 9 Gardner N, Davies A. Retrace error evaluation on a figure-measuring interferometer[C]. SPIE, 2005, 5869: 58690V.
- 10 Geary J M, Yoo M, Guo J. Retrace error: a case study[C]. SPIE, 1992, 1776: 98-105.
- 11 Liu D, Yang Y, Tian C, *et al.* Practical methods for retrace error correction in nonnull aspheric testing[J]. Optics Express, 2009, 17(9): 7025-7035.
- 12 Wang Xiaokun, Wang Lihui, Deng Weijie, *et al.* Measurement of large aspheric mirrors by non-null testing[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(3): 520-528.
王孝坤, 王丽辉, 邓伟杰, 等. 用非零位补偿法检测大口径非球面反射镜[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3): 520-528.
- 13 Murphy P E, Brown T G, Moore D T. Interference imaging for aspheric surface testing[J]. Applied Optics, 2000, 39(13): 2122-2129.
- 14 Murphy P E, Brown T G, Moore D T. Measurement and calibration of interferometric imaging aberrations[J]. Applied Optics, 2000, 39(34): 6421-6429.
- 15 Gappinger R O, Greivenkamp J E. Iterative reverse optimization procedure for calibration of aspheric wave-front measurements on a nonnull interferometer[J]. Applied Optics, 2004, 43(27): 5152-5161.
- 16 Micali J D, Greivenkamp J E. Method for reconstruction of complex surface shapes from a reflection-based non-null interferometric measurement[J]. Optical Engineering, 2016, 55(3): 034101.
- 17 He Y, Hou X, Quan H, *et al.* Retrace error reconstruction based on point characteristic function[J]. Optics Express, 2015, 23(22): 28216-28223.
- 18 Liu Dong, Yang Yongying, Tian Chao, *et al.* Analysis and correction of retrace error for nonnull aspheric testing[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 688-696.
刘 东, 杨甬英, 田 超, 等. 非球面非零位检测中的回程误差分析与校正[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 688-696.
- 19 Tian C, Yang Y, Zhuo Y. Generalized data reduction approach for aspheric testing in a non-null interferometer[J]. Applied Optics, 2012, 51(10): 1598-1604.
- 20 Liu D, Shi T, Zhang L, *et al.* Reverse optimization reconstruction of aspheric figure error in a non-null interferometer[J]. Applied Optics, 2014, 53(24): 5538-5546.
- 21 Kulawiec A, Murphy P, Demarco M. Measurement of high-departure aspheres using subaperture stitching with the variable optical null (VON)[C]. SPIE, 2010, 7655: 765512.
- 22 Murphy P, Fleig J, Forbes G, *et al.* Subaperture stitching interferometry for testing mild aspheres[C]. SPIE, 2006, 6293: 62930J.
- 23 Zhang L, Liu D, Shi T, *et al.* Aspheric subaperture stitching based on system modeling[J]. Optics Express, 2015, 23(15): 19176-19188.
- 24 Liu Huilan, Hao Qun, Zhu Qiudong, *et al.* Testing an aspheric surface using part compensating lens[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(7): 625-628.
刘惠兰, 郝 群, 朱秋东, 等. 利用部分补偿透镜进行非球面面形测量[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(7): 625-628.
- 25 Sullivan J J, Greivenkamp J E. Design of partial nulls for testing of fast aspheric surfaces[C]. SPIE, 2007, 6671: 66710W.
- 26 Chen Shanyong, Dai Yifan, Xie Xuhui, *et al.* Approach to accuracy evaluation for subaperture stitching interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(5): 883-888.
陈善勇, 戴一帆, 解旭辉, 等. 子孔径拼接干涉测量的精度估计方法[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 883-888.

-
- 27 Qiao Yujing, Tan Jiubin, Wang Weibo. Model analysis of sub-aperture stitching interferometry for aspheric surface test [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(10): 1880-1885.
乔玉晶, 谭久彬, 王伟波. 子孔径干涉拼接测量非球面的模型分析[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(10): 1880-1885.
- 28 Zhang L, Liu D, Shi T, *et al.* Practical and accurate method for aspheric misalignment aberrations calibration in non-null interferometric testing[J]. Applied Optics, 2013, 52(35): 8501-8511.
- 29 Yang Y, Liu D, Gao X, *et al.* Research of precision interference locating method for a partial null compensator at aspheric testing[C]. SPIE, 2009, 7426: 74260R.
- 30 Tian Chao. Measurement of aspheric surfaces by non-null annular subaperture stitching interferometry[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 90-102.
田 超. 非球面非零位环形子孔径拼接干涉检测技术与系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 90-102.
- 31 Greivenkamp J E. Sub-Nyquist interferometry[J]. Applied Optics, 1987, 26(24): 5245-5258.