

文章编号 1004-924X(2010)03-0528-08

基于 ZEMAX 用户自定义操作数的 波前编码成像系统优化设计

周 峰^{1,2}, 闫 海¹, 王晓莉¹, 陈京平¹

(1. 空军装备研究院 雷达与电子对抗研究所, 北京 100085;

2. 清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要:针对目前波前编码成像系统中相位板的设计工作量大且未能考虑除相位板外其它光学元件像差的问题,提出了两种基于常用光学设计软件 ZEMAX 的优化设计方法:使用 ZPL 宏指令编写用户自定义操作数,优化点扩散函数的能量集中度和一致性,实现了旋转对称型相位板的设计,以斯托列尔比不小于 0.8 为衡量标准,设计结果使景深扩展到传统光学系统的 5.5 倍;使用在外部定义和编译的 C 程序编写用户自定义操作数,优化调制传递函数的离焦不变性,实现了奇对称型相位板的设计;以 MTF 离焦不变性为衡量标准,设计结果使景深扩展到传统光学系统的 12.5 倍,而同等条件下的三次方相位板只能使景深扩展到传统光学系统的 10.1 倍。得到的实验结果说明本文所述设计方法是方便而有效的。

关键词:波前编码;成像系统;相位板;扩展景深;用户自定义操作数

中图分类号:TH703;TP391 **文献标识码:**A

Optimization of wavefront coding imaging systems based on ZEMAX user defined operands

ZHOU Feng^{1,2}, YAN Hai¹, WANG Xiao-li¹, CHEN Jing-ping¹

(1. Institute of Radar and Electronic Countermeasure,

Equipment Academy of Air Force, Beijing 100085, China;

2. Department of Precision Instrument and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As the design of phase mask in wavefront coding imaging systems is complex and the aberration of original optics cannot be taken into consideration, two new design methods are proposed based on the popular optical software ZEMAX. By using ZPL macros, the user defined operands are written to optimize the energy concentration and consistency of the point spread function, and the depth of focus of the optimized rotationally symmetric phase mask is 5.5 times as large as that of traditional imaging systems at the criterion of Strehl ratio larger than 0.8. By using an externally defined and compiled C program, the user defined operands are written to optimize the defocus invariance of modulation transfer function, and the depth of focus of the optimized odd symmetric phase mask is 12.5 times as large as that of traditional imaging systems. However, the depth of focus of the cubic phase mask is

收稿日期:2009-05-31;修订日期:2009-08-18.

基金项目:总装备部“十一五”装备预先研究资助项目(No. 51309010601)

only 10.1 times as large as that of traditional one in the same condition. These results show that the design methods proposed are practical and effective.

Key words: wavefront coding; imaging system; phase mask; extending the depth of focus; user defined operand

1 引言

波前编码成像系统通过传统光学系统中引入纯相位器件(相位板)对入射光的波前进行编码,使得编码后的成像结果对某些像差不敏感,尤其是可以抑制离焦和与离焦相关的像差^[1-5],故而常用于扩展景深。相位板是波前编码成像系统的关键器件,其中研究较多的是旋转对称型相位板^[4-5]和奇对称型相位板^[6-12]。前者可以直接得到对离焦不敏感的成像,景深扩展倍数较小,但它可以采用金刚石磨削等传统方法加工,易于控制成本;后者首先得到对离焦不敏感的中间模糊图像,然后对它解码滤波得到清晰成像,通常有着更大的景深扩展倍数,但其奇对称性也使得加工和检测颇为困难^[2]。

波前编码成像系统的设计不仅要考虑光学系统成像的离焦不敏感性,还可能牵涉到解码滤波器的设计,现有的光学设计软件常常难以胜任。在目前的设计中,相位板的设计多孤立于传统光学系统的设计,依靠研究者自行编制优化设计软件,这样做一方面工作量很大,不能使用现有光学设计软件强大的像质评价方法和优化功能,另一方面也未能考虑传统光学系统像差对相位板的影响,因而设计结果很难是最优的。

本文提出基于用户自定义操作数的设计方法,在常用光学设计软件 ZEMAX 中分别实现旋转对称型相位板和奇对称型相位板的优化设计。对前者,通过使用 ZPL 宏指令指导优化给定焦深范围内的点扩散函数(PSF)的能量集中度和一致性实现;对后者,通过使用在外部定义和编译的程序实现与 ZEMAX 的通信,从而指导对系统调制传递函数(MTF)离焦不变性的优化。

2 波前编码成像系统的设计思路

在传统光学系统的孔径光阑处引入相位板后,广义瞳函数可以写作^[13]:

$$P(x, y) = \exp\{j[\varphi_0(x, y) + \varphi(x, y) + \psi(x^2 + y^2)]\} \quad (1)$$

$$x^2 + y^2 \leq D^2/4,$$

其中, (x, y) 为二维孔径坐标, D 为孔径光阑口径, $\varphi(x, y)$ 为相位板引入的相位分布函数, $\varphi_0(x, y)$ 为除相位板外的原光学系统的相位分布函数, 离焦参数定义为^[11]:

$$\psi = \frac{\pi D^2}{4\lambda} \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} - \frac{1}{d_i} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} W_{20}, \quad (2)$$

其中, f 为焦距, d_o 为物距, d_i 为实际像面与像方主面的间距, W_{20} 为孔径内的最大光程差。

根据广义瞳函数可以对波前编码成像系统的抗离焦性能进行计算分析,系统 PSF 可以通过计算广义瞳函数的傅里叶变换,然后取模再取平方得到;系统光学传递函数(OTF)即是广义瞳函数的自相关,也可以通过计算 PSF 的傅里叶变换得到,而 MTF 即是 OTF 的模^[13]。

目前波前编码成像系统的设计中,研究者多仅考虑相位板波像差即 $\varphi(x, y)$ 的作用,而未涉及原光学系统波像差即 $\varphi_0(x, y)$ 的影响;而且在设计奇对称型相位板时,多假设相位板为二维可分离变量情形^[1, 11-12],仅考虑了一维,而实际上传统光学系统通常是旋转对称型的,二者结合而成的波前编码成像系统并不符合二维可分离变量假设。本文提出基于用户自定义操作数的设计方法,综合考虑了原光学系统波像差和二维瞳函数,直接在常用光学设计软件 ZEMAX 中完成波前编码成像系统的优化设计,其流程如图 1 所示。

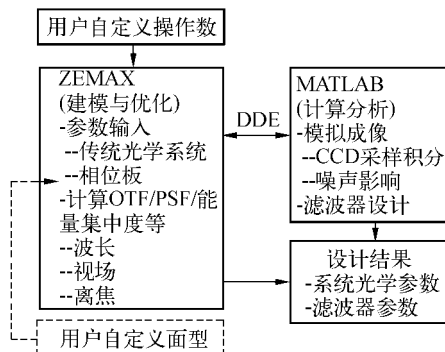


图1 波前编码成像系统设计流程图

Fig. 1 Design flow of wavefront coding system

首先,在 ZEMAX 建立波前编码成像系统的初始模型,本文选择典型的三片式照相物镜作为原型,如图 2 所示,在第 4 面后 1 mm 处放置一块厚度 1 mm 的圆口径相位板,并以此为孔径光阑,整个光学系统的主要参数如表 1 所示。简单的相位板曲面可以用 ZEMAX 内置的面型描述,而当内置面型不能满足时可使用用户自定义面型(UDS),由用户自己编写定义形状、光路追迹和其他有关表面特性的 C/C++ 程序,然后采用 Windows 动态链接库(DLL)技术将此程序动态地链接到 ZEMAX 中。对已建立的系统初始结构,通过 ZEMAX 强大的光线追迹功能可以计算不同波长、视场和离焦量下的 OTF/PSF/能量集中度等。由于 ZEMAX 自身并无有关离焦不敏感的优化操作数,需要用户自定义操作数,简单的优化操作数可以通过使用 ZEMAX 自带编程语言(ZPL)编写宏指令实现,而要使复杂的操作数具有较高的执行效率则可使用在外部定义和编译的程序,下文将分别对这两种实现用户自定义操作数的方法做详细描述。采用用户自定义操作数,直接在 ZEMAX 完成优化即得到系统的光学参数。通过 Windows 动态数据交换(DDE)技术可以实现 ZEMAX 和 MATLAB 科学计算软件之间的数据通信以完成以上设计结果的后续处理。在作为客户端的 MATLAB 中编程呼叫作为服务器的 ZEMAX,建立数据通信协议,ZEMAX 根据 MATLAB 程序呼叫中设置计算 PSF/OTF,并将

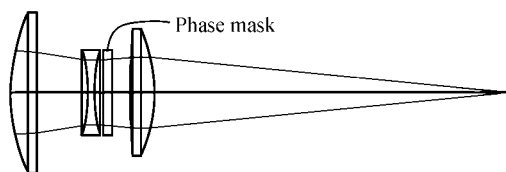


图 2 波前编码成像系统

Fig. 2 Wavefront coding system

表 1 波前编码成像系统主要参数

Tab. 1 Main parameters of wavefront coding system

参数	数值
波长 λ	0.55 μm
有效焦距 f	50 mm
后焦距 f_b	42.883 mm
孔径光阑口径 D	10 mm
相位板半径 r	5 mm

数据传递给 MATLAB, MATLAB 参照系统 CCD 采样积分模型和噪声模型完成滤波器设计和模拟成像(对于奇对称型相位板)以及后续的显示和计算处理^[14]。

3 旋转对称型相位板的优化设计举例

3.1 优化策略

首先选择 ZEMAX 内置的 Extended Odd Asphere 表面类型作为旋转对称型相位板的原型^[14],令曲率 $c=0$,则其引入的相位分布函数取作

$$\varphi(\rho) = \sum_{n=1}^N a_n \rho^n, \quad (3)$$

其中, $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ 为径向孔径坐标, $\{a_n\}$ 为待优化系数。采用式(3)实际上是用多项式旋转对称非球面去逼近待求最优相位板曲面,为优化设计提供了一个遍历的搜索空间。考虑到常数项对成像没有影响,取 $a_0 = 0$;考虑到相位板曲面中心导数为零更易于加工,取 $a_1 = 0$;经验表明,高阶项对优化结果影响越来越小,取最高项次数 $N = 15$ 。

旋转对称型相位板一般用于全光成像系统,不需要后续解码滤波处理,这要求在给定焦深范围内波前编码系统的 PSF 中心有尖锐的峰且具有较小的支撑区,通过限制 PSF 的能量集中度和一致性可以达到这一目的。ZEMAX 提供的 DENC 操作数可以用来评价某一像面位置 ψ_i 处 PSF 的能量集中度,它能计算指定能量百分比时的包围圆半径 r_i ,包围圆半径越小表明能量集中度越高。通过使用 ZPL 宏指令可以设定并计算规定焦深范围一系列像面位置处 PSF 的能量集中度,评价函数可以设定为

$$MF^2 = \frac{(\sum r_i)^2 + \sum W_i (r_i/r_0 - 1)^2}{1 + \sum W_i}, \quad (4)$$

其中, r_0 为理想像面($\psi_i = 0$)处的包围圆半径; W_i 为像面位置 ψ_i 的相对权重。优化式(4)即使各像面位置处 PSF 的能量集中度相似且总的能量集中度最大。

ZPL 宏指令易于与 ZEMAX 结合,使用时只需在 ZEMAX 评价函数表中使用操作数 ZPLM 调用 ZPL 宏指令即可。上述评价函数在 ZPL 宏指令中可以描述为^[14]:

Step1:指定能量百分比 K ;

Step2:for $i = 0, 1, 2, \dots$

用 ZPL 关键字 SURP 设定像面位置 ψ ;

用 ZPL 关键字 OPEV 和 OCOD 调用优

化操作数 DENC 求包围圆半径 r_i ;

end

Step3:计算 $(\sum r_i)^2$ 和 r_i/r_0 ;

Step4:用 ZPL 关键字 OPTRETURN 将计算结果按编号返回给 ZPLM。

以 $\{a_n\}$ 为变量,在 ZEMAX 评价函数表中设定好相对权重 w_i ,即可进行优化。通常采用阻尼最小二乘进行局部优化即可快速得到较好的结果,而使用全局搜索和锤形优化将使结果得到进一步改善^[14]。

3.2 优化结果

设定能量百分比 $K = 0.1$,考虑 $\psi_{0-4} = 2\pi(0, 0.5, -0.5, 1, -1)$,相对权重 $w_{0-4} = 1$,在 ZEMAX 中完成优化。图 3 为优化得到的旋转对称型相位板截面曲线。以斯托列尔比 (Strehl ratio) 来衡量能量集中度,根据瑞利判据^[13],当斯托列尔比不小于 0.8 时认为离焦误差尚可接受,含旋转对称型相位板的波前编码成像系统的景深大约是传统光学系统的 5.5 倍。图 4 为模拟辐条目标,图 5 为在 MATLAB 下的对其模拟成像的结果。从图 5 可以看出,传统光学系统(无相位板情形)只在理想像面($\psi = 0$)附近成像结果优于带有旋转对称型相位板的波前编码成像系统,后者在很宽的景深范围内都有着较好的成像效果。为了量化考察模拟成像结果,本文计算了它们的归一化互相关 (NCC)^[15],以 NCC 的峰值 (PNCC) 表征模

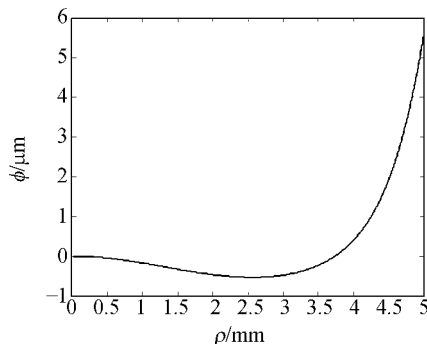


图 3 优化后旋转对称型相位板截面曲线

Fig.3 Phase profile of optimized rotationally symmetric phase mask

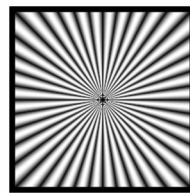


图 4 模拟辐条目标

Fig.4 Simulated spoke target

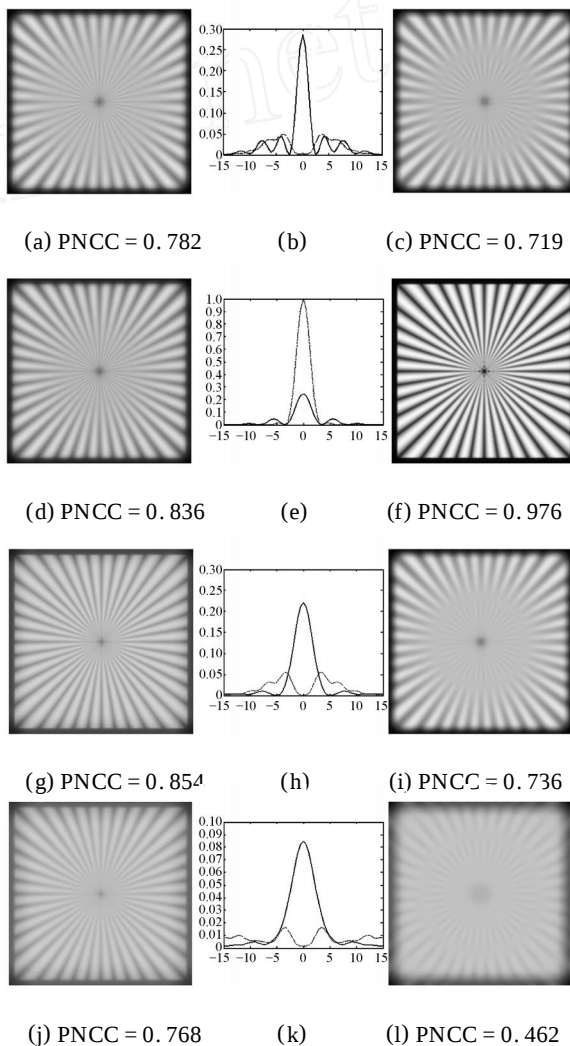


图 5 模拟成像结果。第 1~4 行:离焦量 ψ 分别为 $-2\pi, 0, 2\pi, 4\pi$; 第 1 列:优化得到的旋转对称型相位板,第 3 列:无相位板,第 2 列:PSF 横截面(实线:优化后的旋转对称型相位板,虚线:无相位板)

Fig.5 Simulated images. Row 1-4: $\psi = -2\pi, 0, 2\pi, 4\pi$; Column 1: optimized rotationally symmetric phase mask; Column 3: no phase mask; Column 2: PSF cross section (solid line: optimized rotationally symmetric phase mask; dashed line: no phase mask)

拟成像结果与图 4 间的相似度并将数值标注在各成像结果下面, PNCC 的变化趋势与上述结论是一致的。对比两种情况下的 PSF 横截面可以进一步理解上述成像结果, 波前编码成像系统在所考虑景深范围内 PSF 均有着尖锐的峰且具有较小的支撑区, 即保持着近似且较高的能量集中度, 故能扩展景深; 而传统光学系统的 PSF 能量集中度随着离焦量增大很快恶化, 故而景深很小。

4 奇对称型相位板的优化设计举例

4.1 优化策略

使用 ZPL 宏指令编写用户自定义操作数虽然比较简单, 然而它受 ZPL 宏指令语言性能的限制。奇对称型相位板的设计通常以全空间频率下 MTF 的离焦不变性作为评价函数^[11-12], 而 ZEMAX 优化操作数仅能给出某一空间频率下的 MTF, ZPL 宏指令是被通译的, 这样使用 ZPL 宏指令编写用户自定义操作数意味着降低执行速度。此时可以考虑使用在外部定义和编译的程序(通常是 C/C++ 程序)来计算数据, 然后使用 DDE 链将数据输入 ZEMAX 中或从 ZEMAX 中输出。由于外部程序是被编译的, 所以它们的运行速度明显比较快, 通常越复杂的计算越有益于在外部编译的程序^[14]。

首先选择 ZEMAX 内置的 Extended Polynomial 表面类型作为奇对称型相位板的原型^[14], 令曲率 $c=0$, 只取两坐标指数和为奇数的项, 其引入的相位分布函数取作

$$\varphi(x, y) = \sum_{n=1}^N \left[\sum_{m=1}^{(n-1)/2} b_{(n-m)m} (x^{n-m} y^m + x^m y^{n-m}) \right], \quad k=1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

其中, $\{b_{mm}\}$ 为待优化系数, 考虑到 $n=1$ 时各项对成像质量没有影响, 故舍弃; 经验表明, 高阶项对优化结果影响越来越小, 取最高项次数 $N=9$ 。采用式(5)实际上是用奇次多项式相位板(OP-PPM)曲面去逼近待求最优相位板曲面, 也为优化设计提供了一个遍历的搜索空间。

以全空间频率下 MTF 的离焦不变性作为评价指标, 兼顾到中间模糊图像的可恢复性, 评价函数可以设定为:

$$MF^2 = \sum \sum \sum [MTF(u_p, v_q, \psi_i) - MTF(u_p, v_q, 0)]^2, \quad (6a)$$

$$s. t. \quad \sum \sum MTF(u_p, v_q, 0) \geq I_0, \quad (6b)$$

其中, (u, v) 为归一化空间频率; MTF 曲面下的体积对应 PSF 中心点的强度, 约束式(6b)要求 MTF 曲面下的体积不小于给定正实数 I_0 , 以为中间模糊图像的解码恢复提供足够的信噪比(SNR)。

ZEMAX 操作数 UDOP 被用来调用一个在外部定义和编译的客户程序。客户程序可能通过制造多个联系到 ZEMAX 服务器的 DDE 调用来执行要求的计算, 再使用 DDE 界面将结果返回到 ZEMAX, 然后将计算得出的数据放在评价函数表中, 这样就可以以通常的方法进行优化。整个客户程序的执行过程可以描述为^[14]:

Step 1: 建立与 ZEMAX 服务程序相连的 DDE 链;

Step 2: 将正确的镜头数据加载到 ZEMAX 服务程序的存储器中;

Step 3: 计算要求的数据:

设定像面在理想像面($\psi_0=0$), 给定正实数 I_0 ;

通过 DDE 链调用 ZEMAX 计算 MTF(0);

if (式(6b)成立)

for $i=1, 2, 3, \dots$

设定像面 ψ_i ;

通过 DDE 链调用 ZEMAX 计算 MTF(ψ_i);

end

按式(6a)计算评价函数 MF^2 ;

else

评价函数 MF^2 为无穷大;

end if

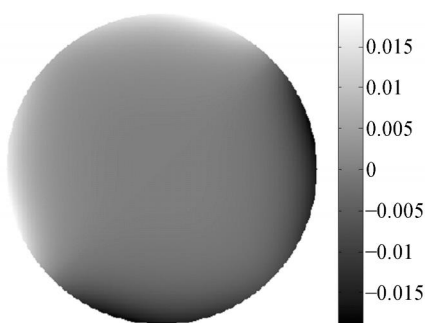
Step 4: 将计算结果返回 ZEMAX 操作数 UDOP;

Step 5: 清除 ZEMAX 服务程序的存储器中的内容;

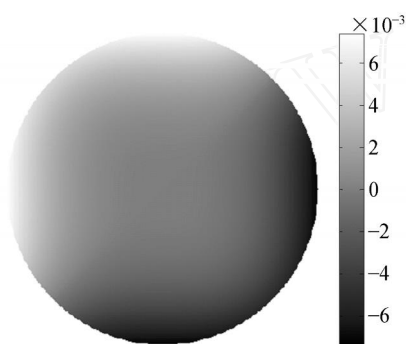
Step 6: 终止 DDE 链, 并退出。

4.2 优化结果

设定约束条件 $I_0=0.1$, 考虑 $\psi_{0-2}=2\pi(0, 1, -1)$, 在 ZEMAX 中完成优化。图 6(a) 为优化得到的 OOPPM 曲面灰度图; 为方便比较, 在同样条件下优化了目前常用的三次方相位板(CPM)^[11, 7-10], 其曲面灰度图如图 6(b) 所示, 它引入的相位调制函数为 $\varphi(x, y) = \alpha(x^3 + y^3)$, 经优



(a) 奇次多项式相位板
(a) Odd order polynomial phase mask



(b) 三次方相位板
(b) Cubic phase mask

图 6 优化后的相位板曲面(单位:mm)

Fig. 6 Optimized phase mask surfaces(unit: mm)

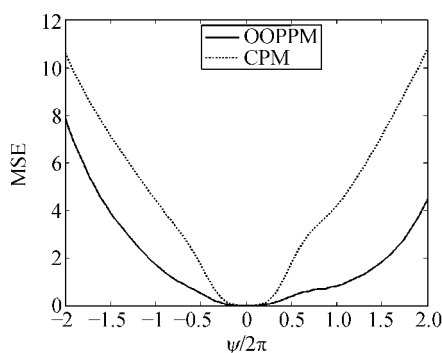


图 7 用 MSE 曲线刻画离焦不变性

Fig. 7 Defocus insensitivity represented by MSE curve

化系数 $\alpha = 0.00742$; 可以看到 OOPPM 曲面的起伏要大于 CPM 曲面。定义均方差

$$\text{MSE}(\psi) = \sum \sum [\text{MTF}(u_p, v_q, \psi) - \text{MTF}(u_p, v_q, 0)]^2, \quad (7)$$

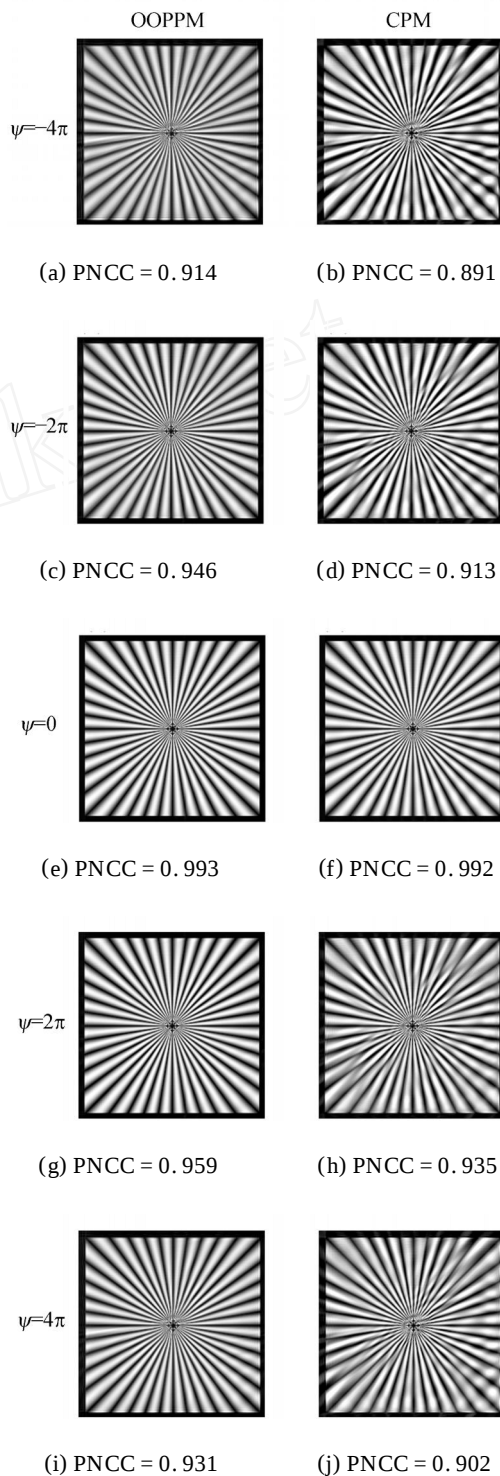


图 8 无噪声下的复原图像

Fig. 8 Restored images without noise condition

图 7 绘出了以上两种相位板的 MSE 曲线, 可以看出在 $\psi \in [-4\pi, 4\pi]$, OOPPM 的 MSE 曲线明显低于 CPM 的 MSE 曲线, 其 MTF 具有更好的离焦不变性。以 PNCC 来衡量离焦 MTF 和对焦 MTF 之间的相似度, 取 PNCC 不小于 0.9 为可

接受的相似度,含 OOPPM 的波前编码成像系统的景深大约是传统光学系统的 12.5 倍,含 CMM 的波前编码成像系统的景深大约是传统光学系统的 10.1 倍。对图 4 所示辐条目标模拟成像得到中间模糊图像,再进行维纳滤波^[11-12,16]得到图 8 所示无噪声条件下的复原图像。可以看出,奇对称型相位板极大地扩展了光学系统的景深;存在离焦误差时,OOPPM 的最终成像质量要优于 CPM,PNCC 已标注在各成像结果下面,其变化趋势与上述结论是一致的。如果对中间模糊图像加入噪声,例如加入常见的高斯白噪声使 SNR = 20 dB,如图 9 所示,上述结论仍然成立,同时可以看出受噪声影响理想像面附近的像质和大离焦位置处的像质差别有所减小。需要指出,CPM 是假定相位分布函数为单项式时具有最优离焦不变性

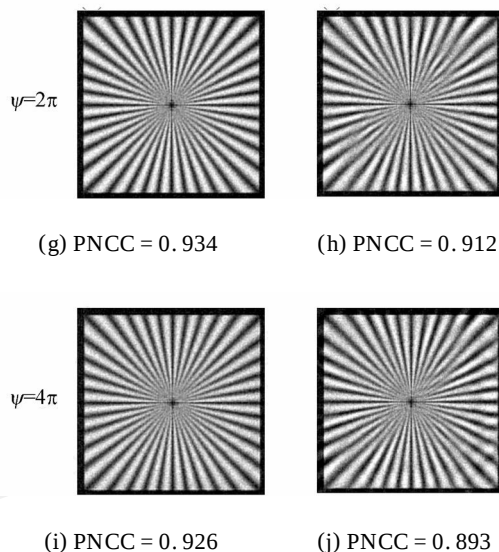
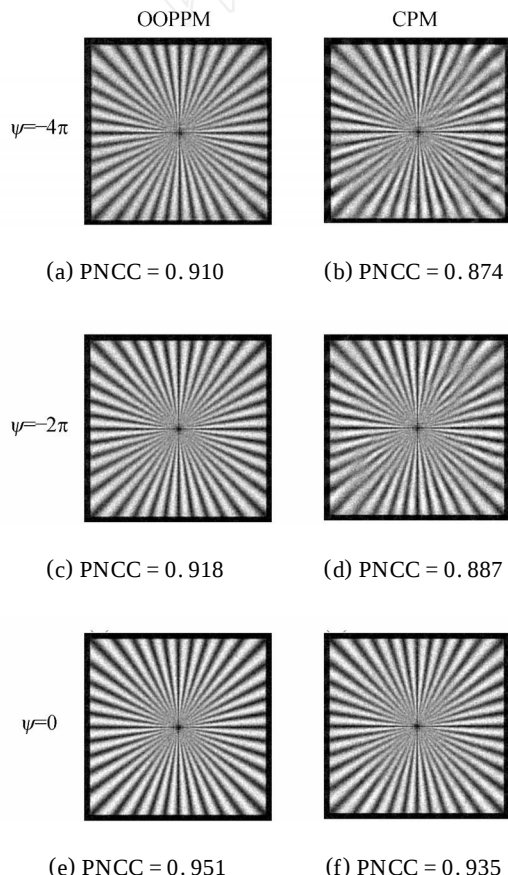


图 9 有噪声下的复原图像 (SNR = 20 dB)

Fig. 9 Restored images with noisy (SNR = 20 dB)

的相位板^[1],本文的设计摒弃了这一“假定”,选用更一般的多项式自由曲面,通过全局搜索优化得到 OOPPM,使离焦不变性得到了进一步提高。

5 结 论

本文提出了两种实用的波前编码成像系统设计方法:使用 ZPL 宏指令和使用在外部定义和编译的程序编写用户自定义操作数,在常用光学设计软件 ZEMAX 中分别实现了旋转对称型相位板和奇对称型相位板的优化设计。计算结果表明:以斯托列尔比不小于 0.8 为衡量标准,优化后的旋转对称型相位板能使景深扩展到传统光学系统的 5.5 倍;以 MTF 离焦不变性为衡量标准,优化后的奇对称型相位板能使景深扩展到传统光学系统的 12.5 倍,而同等条件下的三次方相位板只能使景深扩展到传统光学系统的 10.1 倍,这说明本位所述的设计方法是方便而有效的。

参考文献:

[1] DOWSKI E R, CATHEY W T. Extended depth of field through wave-front coding [J]. *Appl. Opt.*, 1995, 34(11): 1859-1866.

[2] MEZOUARI S, HARVEY A R. Wavefront coding for aberration compensation in thermal imaging systems [J]. *SPIE*, 2001, 4442: 34-42.

[3] FRAUEL Y, CASTRO A. Increasing the depth of field of imaging systems with numerically optimized

- phase masks [J]. *SPIE*, 2007, 6736: 673611-1-8.
- [4] SOCHACKI J, BARA S, JAROSZEWICZ Z, *et al.*. Phase retardation of uniform intensity axilens [J]. *Opt. Lett.*, 1992, 17: 7-9.
- [5] MEZOUARI S, HARVEY A R. Phase pupil functions for control defocus and spherical aberrations [J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28: 771-773.
- [6] 雷广智, 张新, 张建萍, 等. 波前编码系统的新设计[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7): 1171-1176.
- LEI G ZH, ZHANG X, ZHANG J P, *et al.*. Novel optimization method for wavefront coding system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1171-1176. (in Chinese)
- [7] 杨皓明, 张新, 方志良, 等. 含三次位相元件照相物镜的设计[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7): 1026-1031.
- YANG H M, ZHANG X, FANG ZH L, *et al.*. Design of a photographic objective using cubic phase plate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1026-1031. (in Chinese)
- [8] 许英朝, 周平, 张新. 三次位相传播中的波像差及在CGH中衍射级次的分离[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2104-2109.
- XU Y CH, ZHOU P, ZHANG X. Wavefront aberration of cubic phase in propagation and order separation by computer generated hologram [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2104-2109. (in Chinese)
- [9] 陈燕平, 张文字, 赵廷玉, 等. 波前编码系统成像特性的空间域分析[J]. *光学学报*, 2007, 27(8): 1425-1429.
- CHEN Y P, ZHANG W Z, ZHAO T Y, *et al.*. Imaging characteristics of wavefront coding system within spatial domain [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(8): 1425-1429. (in Chinese)
- [10] 阳庆国, 刘立人, 孙建锋, 等. 扩大景深的波前编码成像系统特性分析[J]. *光学学报*, 2006, 26(12): 1807-1812.
- YANG Q G, LIU L R, SUN J F, *et al.*. Property of wavefront coding imaging systems for extending the depth of field [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(12): 1807-1812. (in Chinese)
- [11] YANG Q G, LIU L R, SUN J F. Optimized phase pupil masks for extended depth of field [J]. *Opt. Commun.* 2007, 272: 56-66.
- [12] ZHOU F, LI G W, ZHANG H T, *et al.*. Rational phase mask to extend the depth of field in optical-digital hybrid imaging systems [J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(3): 380-382.
- [13] GOODMAN J W. *Introduction to Fourier Optics*, 3rd ed. [M]. Colorado: Roberts & Company Publishers, 2005.
- [14] ZEMAX Development Corporation. *ZEMAX Optical Design Program User's Guide* [M]. Seattle: ZEMAX Development Corporation, 2007.
- [15] LEWIS J P. Fast Normalized Cross-Correlation [C]. *Proceedings of Vision Interface (VI '95)*. Quebec, Canada: Industrial Light & Magic, 1995: 120-123.
- [16] YAN F, ZHENG L G, ZHANG X J. Image restoration of an off-axis three-mirror anastigmatic optical system with wavefront coding technology [J]. *Opt. Eng.*, 2008, 47(1): 017006-1-8.

作者简介:



周峰(1982-),男,河南项城人,博士研究生,助理工程师,2005年于清华大学获得学士学位,主要从事光电成像、雷达与电子对抗技术方面的研究。E-mail: zhougj776@sohu.com

阎海(1974-),男,北京人,高级工程师,1997年于西安电子科技大学获得学士学位,2002年于北京航空航天大学获得硕士学位,主要从事雷达信号处理方面的研究。E-mail: chaofanli@163.com

王晓莉(1980-),男,陕西西安人,工程师,2002年、2005年分别于空军工程大学获得学士、硕士学位,主要从事电磁场理论方面的研究。E-mail: lgw02@sohu.com

陈京平(1979-),男,山西运城人,博士,工程师,2001年于空军雷达学院获得学士学位,2006年于军械工程学院获得博士学位,主要从事电磁兼容技术方面的研究。E-mail: violet776@sina.com