

基于调制传递函数相似度的波前编码系统优化技术

闫 锋

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 定义了调制传递函数相似度作为优化波前编码系统的评价函数,并在光学设计过程中通过引入数学软件实现了波前编码系统的快速优化。在优化过程中,通过引入数学软件与光学设计软件的动态数据交换接口实现了优化函数的快速计算和高速数据交换,并通过采用遗传算法加快了评价函数收敛速度。经过优化系统调制传递函数相似度由原来的0.0187降为0.0119,且调制传递函数幅值均高于0.18,处于设定的范围内。研究结果表明动态数据交换和外部程序的引入可以进一步提高具有特殊性质的非常规光学系统优化效率。

关键词 光学设计;波前编码;调制传递函数相似度;动态数据交换;优化

中图分类号 O435.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0411004

Optimization Technique of Wavefront Coded System Based on Modulation Transfer Function Invariance

Yan Feng

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract The invariance of modulation transfer function (MTF invariance) is defined to be the evaluating criterion of the wavefront coding system. The rapid optimization of wavefront coding system based on the MTF invariance is proposed by means of introducing the mathematical program to normal optical design process. The interface called dynamic data exchange (DDE) interface, between mathematical program and optical design program is applied to realize the fast data exchanging and merit function calculating. The MTF invariance of the optimized system decreases to 0.0119, compared with 0.0187 of the original system. Results show that the optimization of special optical systems can be executed more conveniently and fleetly with the help of external program and dynamic data exchange.

Key words optical design; wavefront coding; modulation transfer function invariance; dynamic data exchange; optimization

OCIS codes 110.1758; 110.4100; 220.3620

1 引 言

波前编码技术作为一种计算光学技术在虹膜识别、条码扫描、生物显微镜和热成像技术等领域得到了越来越广泛的应用^[1~5]。其基本原理为通过引入特殊光学表面、相位调制等手段改变光瞳函数的相位分布,从而在一定范围内大幅度降低系统成像质量对像面位置的敏感程度。其效果相当于在菲涅耳数 $F\#$ 保持不变的情况下扩展了系统焦深(DOF)。虽然由波前编码系统得到的直接图像像质有所降

低,但在扩展的焦深范围内图像的模糊程度几乎完全一致,可以通过相对简单的后续图像处理过程将降质图像恢复为清晰、锐利的最终图像^[6~8]。

与传统系统不同的是,波前编码系统的优化目标并不是最佳的成像质量而是要使成像质量在扩展了的焦深范围内尽可能保持不变。因此,优化波前编码系统的关键因素是建立合适的评价函数来精确地描述调制传递函数在大焦深范围内的相似性。费舍尔信息(FI)表征了波前编码系统光学传递函数

收稿日期: 2012-10-31; **收到修改稿日期**: 2012-12-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61036015)资助课题

作者简介: 闫 锋(1981—),男,博士,副研究员,主要从事波前编码和光学检测等方面的研究。

E-mail: yanfeng@ciomp.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

(OTF)或点扩散函数(PSF)对离焦误差的敏感程度,是应用较为广泛的优化评价函数^[9]。质量因子(QF)作为带有离焦误差的调制传递函数关于空间频率的积分,是基于调制传递函数的评价函数^[10]。对于回转对称的波前编码系统,斯特雷尔比(SR)也被认为是一种有效的评价函数^[11]。此外,能量集中度(EE)与斯特雷尔比的组合也被用于应用波前编码技术的物镜优化^[12~14]。以上方法都相当于基于OTF(或是PSF)的间接评价方法,不能直观反映波前编码系统的OTF、尤其是调制传递函数(MTF)在扩展焦深范围内的一致性程度、波动范围等信息。提出了一种直接基于调制传递函数的评价函数,即调制传递函数相似度(MTF invariance),并以此作为判据对波前编码系统进行了优化。

2 调制传递函数相似度

根据波前编码理论,一个理想的波前编码系统应满足

$$\frac{\partial f_{MTm,n}}{\partial W_{020}} = 0, \quad (1)$$

式中 m 为在扩展了的焦深范围内的不同像面位置(对应不同的离焦量 W_{020}), n 为从 0 到系统截止频率 $f_{cut-off}$ 范围内不同的空间频率。(1)式的物理意义为一个理想波前编码系统的在截止频率范围内任一空间频率的调制传递函数在整个扩展了的焦深范围内

保持不变,或者说在整个扩展了的焦深范围内的系统调制传递函数与像面位置(离焦量大小)无关。因此反映了波前编码系统本质的(1)式本身应该是优化此类系统最直接的判据。

根据以上的理论分析,提出了调制传递函数相似度的概念。调制传递函数相似度的思想借鉴了光学检测领域中峰谷(PV)误差及均方根误差(RMS)的概念。其中PV为实际表面与理想面形的最大偏离,RMS为实际表面与理想面形的平均偏离程度。而在实际工程中,RMS通常更能准确反映实际表面的质量。仿照这种PV与RMS的定义,给出调制传递函数相似度的定义为

$$I_{MTF} \begin{cases} v_{MTF-PV} = \max(\Delta f_{MTi}) \\ v_{MTF-RMS} = \sum_i \{ [\Delta f_{MTi}^2 - (\overline{\Delta f_{MTi}})^2]^{1/2} \}, \end{cases} \quad (2)$$

式中 v_{MTF-PV} 为调制传递函数值, $v_{MTF-RMS}$ 为调制传递函数的RMS值,其中各物理量的含义如图1所示。 $\Delta f_{MTi} = f_{MT-test,i} - f_{MT-ref,i}$, $f_{MT-ref,i}$ 为在扩展了的焦深范围内被选作参考像面处的调制传递函数,该位置不一定是扩展焦深的中心位置(即传统系统的高斯像面),需要通过计算确定; $f_{MT-test,i}$ 表示的是在扩展了的焦深范围内的任意一个需要评价的像面处的调制传递函数(如图1所示,其中 λ 为光波长); $i = 1, 2, \dots, k$, k 为需要计算的调制传递函数采样点的数目。

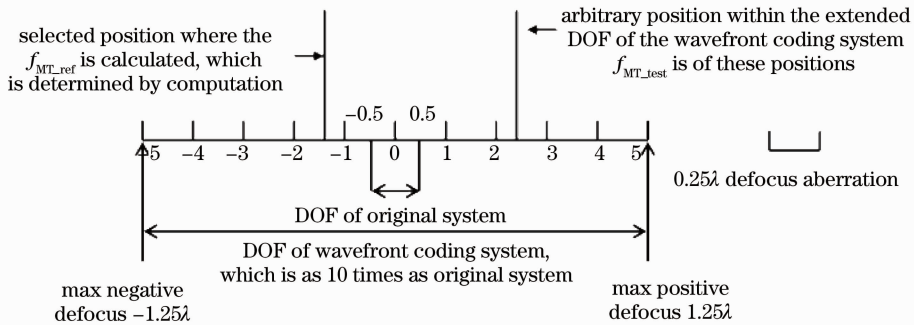


图1 调制传递函数相似度的定义示意图

Fig. 1 Schematic explanation of the definition of MTF invariance

从调制传递函数相似度的定义可以看到, v_{MTF-PV} 和 $v_{MTF-RMS}$ 直观的表达了波前编码系统的MTF在其扩展焦深范围内的一致程度。对于理想的波前编码系统[即满足(1)式要求],其 $v_{MTF-RMS}$ 和 v_{MTF-PV} 都相应的等于0。而对于实际波前编码系统, $v_{MTF-RMS}$ 和 v_{MTF-PV} 的值越小,系统的MTF在有效扩展焦深范围内的波动越小、相似程度越高、越趋近于理想、越有利于后续图像复原处理。因而由 $v_{MTF-RMS}$

和 v_{MTF-PV} 表征的调制传递函数相似度完全可以作为直观反映系统基本性质的评价函数应用于波前编码系统的优化中。具体而言, v_{MTF-PV} 表征了 $f_{MT-test}$ 相对于 f_{MT-ref} 的最大偏离程度,而 $v_{MTF-RMS}$ 则表征了 $f_{MT-test}$ 相对于 f_{MT-ref} 在整个有效空间频率范围内的平均偏离程度。 $v_{MTF-RMS}$ 相对于 v_{MTF-PV} 更好的描述了 $f_{MT-test}$ 与 f_{MT-ref} 的相似程度。因此可以选择 $v_{MTF-RMS}$ 作为评价函数,而将 v_{MTF-PV} 作为评判优化结

果好坏的尺度以评判优化结果是否正确有效。

基于调制传递函数相似度的系统优化评价函数为

$$f_c = \max(R_j), \quad (3)$$

式中 $R_j = \sum_{i=1}^k [\overline{\Delta f_{MTi}^2} - (\overline{\Delta f_{MTi}})^2]^{1/2} \Big|_{i=1, \dots, n, j=1, \dots, m}$,

$\Delta f_{MTi} \Big|_{j=1, \dots, m} = f_{MT-test, i} - f_{MT-ref, i} \Big|_{i=1, \dots, n, j=1, \dots, m}, j = 1, 2, \dots, m, m$ 为采样位置的数目,即对于不同的离焦量大小总共有 m 个 $f_{MT-test}$ 被计算出来以表征在扩展了的焦深范围内调制传递函数的一致程度; n 为采样空间频率的个数(例如系统截止空间频率为 50 lp/mm,取采样间隔为 0.5 lp/mm,则 n 值为 100)。基于该判据的优化思路为:根据给定的采样空间频率计算 m 个采样位置的 $v_{MTF-RMS}$ 并求取其中的最大值,通过优化算法搜索、遍历全部变量空间并反复迭代,得到使该最大值最小的一组设计变量为最终的解,此时 f_c 达到其最优值即 $\max(v_{MTF-RMS_j})$ 达到最小。

(3)式中 m 的取值需要兼顾计算时间与采样密度两个方面,过高的采样密度可以更细致地反映在扩展了的焦深范围内调制传递函数的一致程度及变化趋势,但同时会使计算量显著增加进而降低优化的效率。同理, n 的取值也同样要兼顾这两个方面,需要指出的是过高的采样密度会使计算量显著增加但对提高优化效果的作用却很小。一般情况下选择 0.5~1.0 lp/mm之间的值均可。

3 系统优化

待优化的波前编码系统(如图 2 所示)为 Cook 式离轴三反(TMA)系统,图中 FM 为折叠镜, TM 为三镜, SM 为次镜, PM 为主镜, $F\#$ 为 9,口径为 220 mm,视场 $1.5^\circ \times 5^\circ$,工作在可见光波段。其次镜被选为波前编码元件,通过在原始面形上附加三次项 $\alpha(x^3 + y^3)$ 实现焦深扩展。其扩展焦深范围内的 MTF 曲线及调制传递函数相似度曲线如图 3 和图 4 所示。

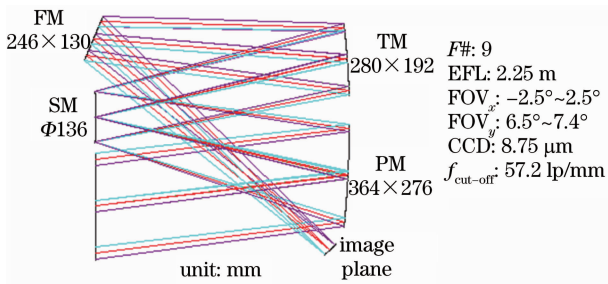


图 2 在研离轴 TMA 系统的结构及参数

Fig. 2 Layout and parameters of the off-axis TMA system under research

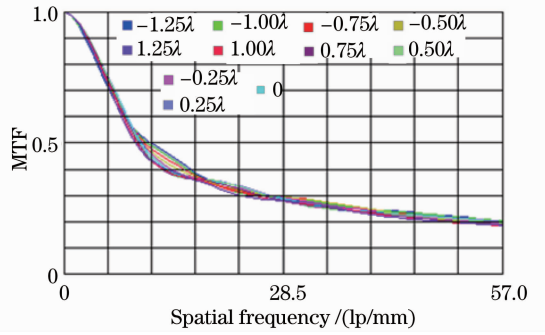


图 3 未优化系统扩展焦深范围内的调制传递函数曲线
Fig. 3 MTF curves of the system before optimization within extended DOF

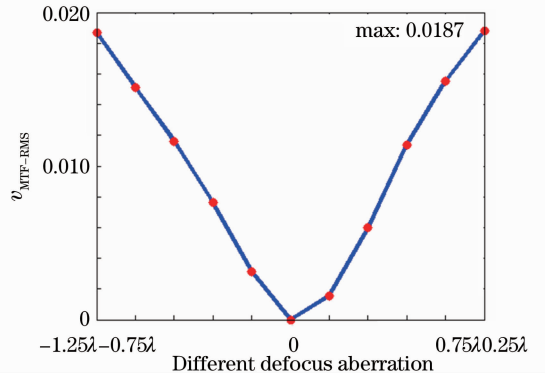


图 4 未优化系统扩展焦深范围内的调制传递函数相似度

Fig. 4 MTF invariance of the system before optimization within extended DOF

x^3 和 y^3 是原设计中固有的三次项,这里在原设计基础上引入 x^2y 与 xy^2 项,与 x^3 和 y^3 一同构成次镜面形附加项,其系数 $a_i (i = 1 \dots 4)$ 作为优化变量,即

$$z(x, y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(x^2 + y^2)}} + a_1x^3 + a_2x^2y + a_3xy^2 + a_4y^3. \quad (4)$$

在优化过程中除需引入次镜面形的变化因素外,还有两个问题需要考虑:1)对于未经优化的波前编码系统,其扩展焦深仍然是关于传统系统的高斯像面对称的。但对于优化系统,这种对称性就不一定存在,即偏离原位置的新的扩展焦深范围可能会更有利于得到更小的 $\max(v_{MTF-RMS_j})$ 。这里以变量 a_5 来表征新焦深范围相对于原位置的偏离;2)在计算未经优化的波前编码系统的 $v_{MTF-RMS}$ 曲线时,是指定了扩展焦深范围内的中间像面(即名义高斯像面)作为参考。而在进行优化的时候,参考像面的位置也需要一并进行优化,这里以变量 a_6 来描述参考像面在优化了的扩展焦深范围内的位置。因此,优化

矢量由 6 个变量构成,即

$$\mathbf{A} = [a_i]_{i=6}. \quad (5)$$

设定的有效焦深扩展范围为 $W_{020} = -1.25\lambda - 1.25\lambda$, 取每相邻两个(采样)像面之间离焦量为 0.25λ , 则优化函数中[如(3)式所示] m 取 11; 系统截止频率为 57.2 lp/mm , 取采样空间频率间隔为 0.5 lp/mm , 则优化函数中[如(3)式所示] n 取 115。

此外,还需要对优化变量施加一些边界条件、进行必要的约束。三次项系数 a_1 和 a_4 直接确定了系统焦深的扩展范围等一系列重要性质。如果 a_1 和 a_4 偏离原始值太多,优化后的系统将与原系统有较大差别。为此,将 a_1 和 a_4 限制在相当于其原始数值 $0.9 \sim 1.0$ 倍的范围内,保证优化后的调制传递函数值不会显著下降。 x^2y 与 xy^2 是作为优化的附加项引入到次镜面形方程中,如果它们的数值过大将显著改变系统性质,因此将它们的绝对值限制在小于 a_1 和 a_4 数值的 10% 范围内。另外将 a_5 的绝对值约束在相当于正负三倍原系统焦深 R_{DOF} 范围内($\pm 3 R_{\text{DOF}}$),使扩展焦深的位置不至于偏离原位置太远。通过约束 a_6 的取值使参考像面位于扩展焦深的范围内。所有约束条件的设置都是为了避免以牺牲调制传递函数幅值的代价换取较小的 $v_{\text{MTF-RMS}}$ 。需要指出的是,变量约束条件的给定一方面依赖于具体的系统及相应指标的要求,一方面也具有较大的灵活性。例如,若初始系统的设计调制传递函数超出指标较多,就可以通过放松约束条件来增大设计空间,追求更高的调制传递函数相似度。

从评价函数的定义中可知,在每一次评价函数值计算过程中,要按照规定的采样空间频率求取总共 11 个位置的调制传递函数,再经过由相加、相减、均方根、比较等多种运算方式组成的复杂计算才能得到评价函数的值。但常用的光学软件如 Zemax 并不擅长于进行这种复杂的代数运算,因此提出了基于光学软件外部扩展的优化方法。以 Zemax 为例,Windows 应用程序和 Zemax 之间可通过动态数据交换(DDE)进行通信,其中 Zemax 作为服务器程序,Windows 应用程序(包括 Visual Basic、Excel 和 Matlab 等)作为客户程序。由此客户程序可以将 Zemax 其作为光线追迹引擎,通过 DDE 接口将追迹结果输出至客户程序进行高级运算,从而扩展应用范围、提高计算效率。

基于以上考虑,选择 Matlab 软件作为外部优化软件,一方面 Matlab 软件计算功能强大,可以灵活选择优化方法;另一方面 Zemax 与 Matlab 软件间

的动态数据交换接口(MZDDE)是已有的,可以省去接口的二次开发。优化过程的主要思想可以概括为:通过 Zemax 软件计算不同像面处的调制传递函数值,然后通过 MZDDE 接口将调制传递函数数据导入 Matlab 软件,在 Matlab 软件中完成评价函数的计算和优化;再根据其运算结果给出下一个需要计算调制传递函数数据的系统参数,并将其通过 MZDDE 接口送入 Zemax 软件并取代原有数据,开始新的计算。这个过程将多次循环直至最后得到最优解为止。在该过程中,Zemax 软件仅作为调制传递函数数据的计算工具,而调制传递函数的计算是 Zemax 软件的基本功能,计算精度及速度都相当高。Matlab 软件不参与调制传递函数数值的计算,只负责根据调制传递函数数值计算优化函数并寻找最优解,可以充分发挥其在数学运算及优化算法方面的优势。MZDDE 不参与任何运算,只负责 Zemax 软件与外部软件之间的高速数据通讯。优化过程的主要步骤为

- 1) 在 Matlab 软件中建立优化矢量 $\mathbf{A} = [a_i]_{i=6}$;
- 2) 通过 MZDDE 将数据导入至 Zemax,并按照事先规定的采样空间频率在 Zemax 环境中计算 11 个位置的调制传递函数;
- 3) 通过 MZDDE 将由 Zemax 计算好的调制传递函数值导入至 Matlab 软件,并根据导入的调制传递函数值建立变量矢量;
- 4) 计算 f_c 的值,由 Matlab 软件的优化算法根据 f_c 的值确定下一组可行的优化矢量;
- 5) 将新生成的优化矢量通过 MZDDE 导入至 Zemax,计算新的调制传递函数数据;
- 6) 重复步骤 2)~5),直至 f_c 值达到最优,并将对应的优化矢量作为结果。

4 优化结果

由于是在 Matlab 软件环境下进行评价函数的计算和寻优,摆脱了 Zemax 单一优化算法的限制,优化算法的选择更加灵活。经过综合考虑,选择遗传算法作为优化算法。综合考虑计算时间及最终解得收敛程度,将遗传代数设为 200,每一代人口设为 50。经优化求得优化矢量 \mathbf{A} 为

$$\mathbf{A} = [7.9173 \times 10^{-4}, -4.8206 \times 10^{-5}, -4.2266 \times 10^{-5}, 7.9560 \times 10^{-4}, 1.4910, 0.3800], \quad (6)$$

其中 a_1 和 a_4 的初始值为 8×10^{-4} , 可见 a_1 和 a_4 的计

算值满足初始约束条件要求；优化后的扩展焦深范围偏离原位置(1.491 R_{DOF})；计算参考 MTF 的像面位置偏离扩展焦深中心位置(0.38 R_{DOF})。

从图 5(a)中可知,与未经优化的系统相比,优化系统的 $v_{\text{MTF-RMS}}$ 从大于 0.018 降至小于 0.012,且所有实现设定的对优化变量的限制全部满足。从

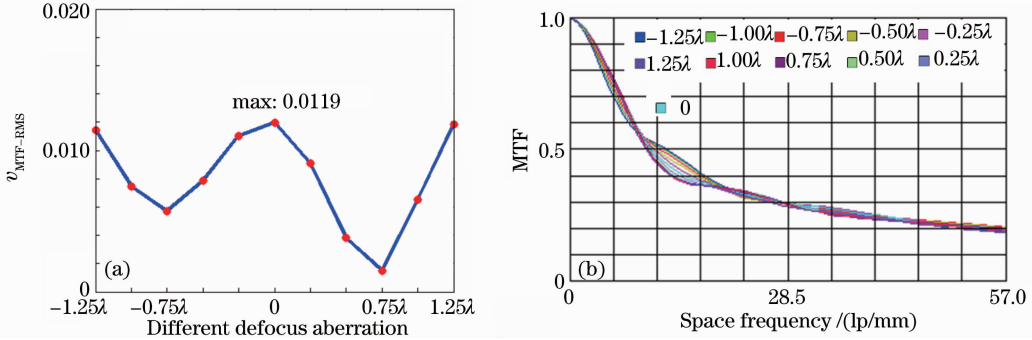


图 5 (a)优化后波前编码系统的扩展焦深范围内的调制传递函数相似度和(b)优化后波前编码系统的扩展焦深范围内 MTF 曲线

Fig. 5 (a) MTF invariance of the optimized system; (b) MTF curve of the optimized system

由于 Matlab 软件的引入以及遗传算法的使用,整个优化过程仅耗时 20 min. 而如果优化函数不变,而在 Zemax 中直接进行优化,则优化过程很难顺利执行;往往因为计算量过大导致系统资源耗尽,而在没有得到任何结果的情况下优化进程就非正常终止。因此节省时间与系统资源是本方法的最大优点。

需要指出的是,在优化过程中只考虑了中心视场,而没有考虑其他视场。这是基于这样一种假设:即只要中心视场的 $v_{\text{MTF-RMS}}$ 达到最优值,那么其他各视场的 $v_{\text{MTF-RMS}}$ 也就相应的达到最小。虽然这个假

图 5(b)中可知,经过优化后的调制传递函数曲线彼此的一致性要强于优化前, $v_{\text{MTF-PV}}$ 值从 0.057 降至 0.046,而且各调制传递函数曲线没有显著下降。图 5 中有效焦深扩展范围为 $-1.25\lambda \sim 1.25\lambda$,相临两个像面之间的离焦为 0.25λ 。

设并不十分精确,但实际结果表明优化对全视场范围内的调制传递函数相似度提升都有积极的作用。图 6 为系统优化前后其他视场扩展焦深范围内的 $v_{\text{MTF-RMS}}$ 曲线。由图 6 可知,系统优化前其他视场的 $v_{\text{MTF-RMS}} > 0.020$ 而优化后系统的 $v_{\text{MTF-RMS}} < 0.015$ 。虽然其他视场的 $v_{\text{MTF-RMS}}$ 都稍大于中心视场的 $v_{\text{MTF-RMS}}$,但其相似度都有不同程度的提高且没有超过容许范围的偏离。图 6 中的有效离焦扩散范围为 $-1.25\lambda \sim 1.25\lambda$ 这里没有考虑其他视场 $v_{\text{MTF-RMS}}$ 仍然是出于优化时间的考虑,如果所有视场的 $v_{\text{MTF-RMS}}$ 都被纳入优化函数,那么优化时间将大大延长。

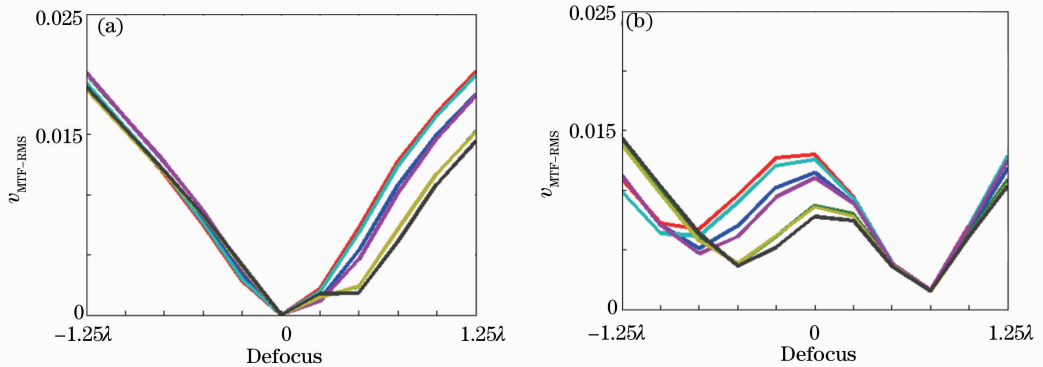


图 6 系统优化前(a)后(b)其他视场扩展焦深范围内的 $v_{\text{MTF-RMS}}$ 曲线

Fig. 6 $v_{\text{MTF-RMS}}$ curves of different field of view between (a) original system and (b) optimized system

5 结 论

定义了调制传递函数相似度作为波前编码系统的优化函数,同时采用基于光学设计软件外部扩展

的优化方法对波前编码系统进行了优化。结果表明,提出的优化方法在优化效率上显著优于单纯依靠光学设计软件的传统优化手段,优化后系统中心

视场调制传递函数相似度由大于 0.018 将至于 0.012,其他各视场调制传递函数相似度也有显著改善,且调制传递函数幅值基本保持稳定。下一步的工作包括通过对各视场加权平均得到全视场优化函数、设计新的优化函数结构以压缩运算量、通过 VC 等基本语言直接调用 DDE 接口实现与光学软件的联合优化、选用其他光学软件及速度更快的数据接口进一步缩短时间、提高效率等。

参 考 文 献

- 1 R. Narayanswamy, A. E. Baron, V. Chumachenko *et al.*. Applications of wavefront coded imaging [C]. *SPIE*, 2004, **5299**: 163~174
- 2 E. R. Dowski, R. H. Cormacka, S. D. Saramab. Wavefront coding: jointly optimized optical and digital imaging systems [C]. *SPIE*, 2000, **4041**: 114~120
- 3 K. Kubala, E. Dowski, J. Kobus *et al.*. Design and optimization of aberration and error invariant space telescope systems [C]. *SPIE*, 2004, **5524**: 54~65
- 4 R. Porras, S. Vázquez, J. Castro. Wavefront coding technology in the optical design of astronomical instruments [C]. *SPIE*, 2004, **5622**: 796~800
- 5 S. Mezouari, A. R. Harvey. Wavefront coding for aberration compensation in thermal imaging systems [C]. *SPIE*, 2001, **4442**: 34~42
- 6 R. Narayanswamy, P. E. X. Silveira, H. Setty *et al.*. Extended depth-of-field iris recognition system for a workstation environment [C]. *SPIE*, 2005, **5779**: 41~50
- 7 E. R. Dowski, W. T. Cathey. Extended depth of field through wave-front coding [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(11): 1859~1866
- 8 S. Braddum, W. Thomas Cathey, E. R. Dowski. Realizations of focus invariance in optical-digital systems with wave-front coding [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(35): 9157~9166
- 9 S. Bagheri, Z. Kavehvash, K. Mehrany *et al.*. Design and optimization of the cubic-phase pupil for the extension of the depth of field of task-based imaging systems [C]. *SPIE*, 2006, **6311**: 6311OR1
- 10 S. Prasad, V. P. Pauca, R. L. Plemmons *et al.*. Pupil-phase optimization for extended focus, aberration corrected imaging systems [C]. *SPIE*, 2004, **5559**: 335~345
- 11 S. Mezouari, A. Harvey. Phase pupil functions for reduction of defocus and spherical aberrations [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(10): 771~773
- 12 Zhou Feng, Ye Ran, Li Guangwei *et al.*. Image restoration in a wavefront coding imaging system with a wide field of view [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 388~393
周峰,叶然,李光伟等.大视场波前编码成像系统中的图像复原 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 388~393
- 13 Chen Shouqian, Fan Zhigang, Wang Shuai. Analysis of wavefront coding system with primary astigmatism and coma by using ray aberration approach [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1211005
陈守谦,范志刚,王帅等.基于光线像差的波前编码系统离轴像差敏感性分析 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1211005
- 14 Fan Zhigang, Chen Shouqian, Chang Hong *et al.*. Non-axial characteristics of strehl ration of cubic phase mask in wavefront coding system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0611001
范志刚,陈守谦,常虹等.三次相位掩模波前编码系统非轴向斯特雷尔比 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0611001

栏目编辑: 韩峰