

文章编号: 0253-2239(2010)04-1002-07

基于 4f 结构平面集成相关器系统优化

徐海东 徐平 齐森林 梁钱 张旭琳 黄洁锋 黄海漩

(深圳大学电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060)

摘要 在基于 4f 结构的平面集成光电混合相关器系统中, 由于采用折叠光路结构, 增大了像差, 降低了系统的识别能力。通过对平面集成光学相关器的结构分析, 利用斜入射坐标理论, 确定系统中微光学透镜的相位调制函数。对微光学透镜元件的相位函数进行分析, 用 Zemax 软件优化系统以降低系统的像差, 从而提高识别能力。通过分析像质评价图, 得到优化后的系统最大光程差小于 $\lambda/4$, 达到了衍射极限。用 Matlab 软件对优化前后的系统进行对比量化分析, 优化后系统的识别能力提高了约 0.8 倍。表明优化后的像差得到了很好的改善, 系统的识别能力有了明显的提高。

关键词 光学模式识别; 结构优化; 像质评价; 像差分析; 二元光学

中图分类号 TN202 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.1002

System Optimization of 4f-Based Planar-Integrated Hybrid-Optoelectronic Correlator

Xu Haidong Xu Ping Qi Senlin Liang Qian Zhang Xulin

Huang Jiefeng Huang Haixuan

(College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract The folded optical structure used in 4f-based planar-integrated opto-electronic hybrid correlator system, increases aberration and reduces the system's recognition ability. The phase modulation function of micro-optical lens is determined, by using the theory of oblique incidence coordinates to analyse planar integrated optical correlator structure. Then the system aberration is reduced and thereby the recognition ability is enhanced, by analysing the phase function of micro-optical lens elements and using Zemax software optimization system. The optimized system's maximum optical path difference is less than $\lambda/4$ and the system attains diffraction limited performance. The contrastive and quantitating analysis is simulated by Matlab, the result show that the optimized system's recognition performance has been improved by 0.8 times. It shows that the aberration has been improved well, the system's recognition ability has been significantly enhanced.

Key words optical pattern recognition; structure optimization; image quality evaluation; aberration analysis; binary optics

1 引 言

在模式识别领域中, 光学相关器因其处理速度快、识别精度高及可并行处理的特点而备受关注, 然而受制于自身的技术难题未解决而很少被实际应用。直到 20 世纪 80 年代, 由于实时光电转换器件-

空间光调制器(SLM)的发展和被应用, 使得相关模式识别摆脱了纯电识别方法中处理速度慢和纯光识别方法中滤波器制作困难的缺点, 以光电混合系统为发展方向的相关模式识别由此成为新的研究热点, 光学和数字电路各自的处理优势得到了越来越

收稿日期: 2009-03-30; 收到修改稿日期: 2009-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(60878036)、深圳市科技项目(2008008)和深圳市微纳光子信息技术重点实验室资助课题。

作者简介: 徐海东(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事微小光学器件方面的研究。E-mail: xiaoyusi1982@gmail.com

导师简介: 徐平(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事微小光学与器件、信息光学等方面的研究。

E-mail: xuping@szu.edu.cn(通信联系人)

好的结合,在识别速度快和识别图像信息量大的图像识别场合有很大的应用价值^[1],特别是在军用图像识别方面。以美国为首的几个军事发达国家均投入大量人力和巨资以研制军用系列组件化、微小型的相干光学处理系统,现已在许多军事应用实验中取得很大成功^[2~6]。

如何实现光电混合相关器的组件化、微型化、提高识别效率成为当前该领域的研究热点。采用平面光学结构设计光电混合相关器可以把系统高度集成,有效压缩系统体积,有利于系统的组件化、微型化,这种结构已经体现出其优势^[7,8]。但是该结构不可避免的采用斜入射光路设计,增大了系统的像差,从而降低了系统的识别能力。针对这个问题,采

用二元光学技术^[9~17]设计系统中的微光学透镜元件(MOE),应用 MOE 相位调制函数的灵活性来校正像差,使系统像差小于 0.1λ ,达到了衍射极限。最后用 Matlab 软件对优化前后的系统进行模拟,通过对比量化分析识别结果,表明优化后系统的识别能力提高了约 0.8 倍。

2 平面集成光电混合相关器的结构

采用范德鲁特光学相关器结构设计可以充分利用 SLM 的空间带宽积,且识别精度高,它的典型结构是 4f 结构,利用平面光学理论设计,可以得到新的模型^[6],原理图及展开图如图 1 所示。

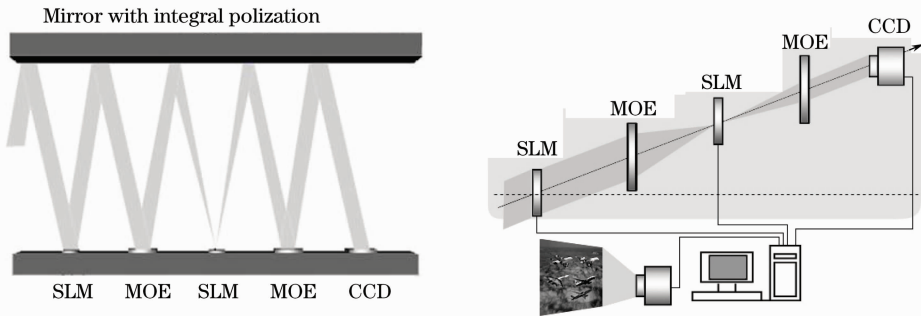


图 1 平面集成光电混合相关器。(a)原理图; (b)展开图

Fig. 1 Planar-integrated hybrid-optoelectronic correlator. (a) principle; (b) unfolded configuration

为了研究的方便,只对其展开图进行分析,它们是完全等效的。

研究中采用 632.8 nm 波长的红光激光器作为光源;采用像素为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,像素间距为 $12 \mu\text{m}$,纯振幅调制的 SLM 作为目标图像输入器件;采用 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,像素间距为 $15 \mu\text{m}$,纯位相调制的 SLM 作为滤波器件。因此可以确定实现光学傅里叶变换所需要的透镜焦距为^[6]

$$f' = \frac{N_2 p_1 p_2}{\lambda} = 145.6384 \text{ mm}, \quad (1)$$

式中 p_1, p_2 分别表示输入面和滤波面 SLM 的像素间距, N_2 为滤波面 SLM 的像素大小。采用二元光学技术制作 MOE,首先需要确定二元光学面的焦距大小。由于系统中设计的 MOE 采用反射结构,如图 2 所示。光波两次通过 MOE 带相位调制分布的表面,受到的调制作用等效于两个完全一样的、彼此间距为 MOE 材料厚度 2 倍的 MOE 透镜组的调制。

根据透镜组的组合焦距公式^[18],该微光学透镜组的等效焦距 f' 和 MOE 实际焦距的关系为

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{d}{f'_1 f'_2}, \quad (2)$$

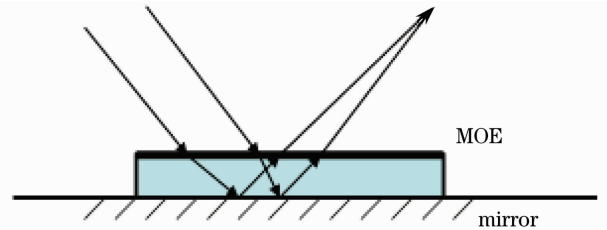


图 2 光波两次经过微光学透镜作用面

Fig. 2 Lights go through the MOE twice

式中 f'_1, f'_2 分别表示第一次及第二次通过 MOE 表面时对应的 MOE 像方焦距的大小,在此有 $f'_1 = f'_2$, d 表示这两个面对应的两个主平面间的距离,在这里即是这两个面的间距,用 H 表示光学材料的厚度,则有 $d = 2H$ 。采用 1.5 mm 厚,牌号为 BK7 的光学材料,则 $d = 3 \text{ mm}$ 。利用关系式 $f'_1 = f'_2$,把 $f' = 145.6384 \text{ mm}$ 及 $d = 3 \text{ mm}$ 代入(2)式可以得到

$$f'_1 = 289.7690 \text{ mm}.$$

为了消除 SLM₁ 所带来的高级衍射光的干扰,斜入射的角度必须满足以下关系式^[8]:

$$\sin \alpha = 2N_2 p_2 / 2f'. \quad (3)$$

结合(1)式和(3)式可以得到

$$\alpha = \arcsin(2N_2 p_2 / 2f') = \arcsin(\lambda / p_1) = 6.0541^\circ.$$

为了实现光瞳衔接,微光学透镜的直径大小为^[18]

$$W = \sqrt{2}N_1 p_1 + N_2 p_2 = 16.3689 \text{ mm}. \quad (4)$$

3 微光学透镜表面相位调制函数的确定

3.1 斜入射坐标理论

系统采用斜入射光路设计,因此采用坐标轴变换有助于确定微光学透镜的相位函数,引入新的坐标系 $x' - y' - z'$,使 z' 和光轴方向一致,如图 3 所示

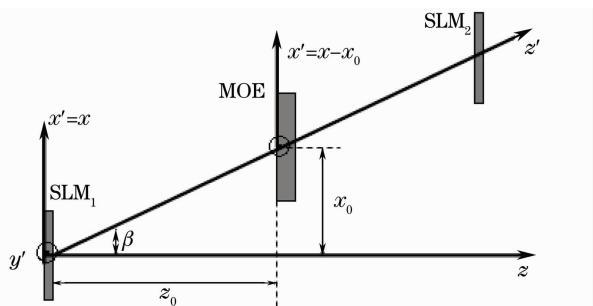


图 3 斜坐标系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the oblique coordinate system

坐标转换对应着以下关系:

$$\begin{cases} x' = x - z_0 \tan \beta \\ y' = y \\ z' = z / \cos \beta \end{cases}, \quad \begin{cases} \nu' = \nu - \sin \beta / \lambda \\ \mu' = \mu \end{cases}, \quad (5)$$

式中 x', y', z' 表示变换后的坐标; ν, μ 表示原坐标的空间频率; ν', μ' 表示坐标换后的空间频率; β 为斜入射的角度。这个坐标系下点扩展函数 $h^{\beta, 0, z_0}(x', y')$ 的表达式为^[20]

$$h^{\beta, 0, z_0}(x', y') = \frac{\cos^2 \beta}{i \lambda z_0} \exp\left(\frac{i 2 \pi z_0}{\lambda \cos \beta}\right) \exp\left[\frac{i \pi \cos \beta}{\lambda z_0}(x'^2 \cos^2 \beta + y'^2)\right]. \quad (6)$$

3.2 微光学透镜组的相位调制函数表达式

为了使 MOE 组前焦面光轴上的点光源透过 MOE 组后能产生平面光波, MOE 组的相位调制函数表达式 $L_{(x', y')}$ 必须满足以下关系^[20]:

$$h^{\beta, 0, z_0}(x', y') L_{(x', y')} = 1, \quad (7)$$

舍去常数项,且 $\cos \beta / z_0 = f'$, 可以得到 $x' - y' - z'$ 坐标系下的 MOE 组函数的表达式为

$$L_{(x', y')} = \exp\left[\frac{-i \pi}{\lambda f'}(x'^2 \cos^2 \beta + y'^2)\right]. \quad (8)$$

4 使用 Zemax 对系统优化设计

典型的范德鲁特光学相关器的视场和孔径角都不大,属于小视场小孔径的光学系统,各种像差不大,不必消除高阶像差。应用平面光学结构设计光学相关器需要采用斜入射光路设计,从而使系统的光束相对于光瞳面失去旋转对称性,像散增大,系统的性能降低。通过扩展 MOE 相位函数表达式并对其进行优化,以校正系统像差,使系统达到衍射极限。

4.1 系统的像差分析

系统主要存在球差、彗差、像散、场曲和畸变。通过把系统设计成关于光阑面中心对称的结构以消除系统的彗差和畸变;采用(8)式的形式,通过给 x' 增加 $\cos \beta$ 因子,修正斜入射造成的像散^[21];系统的其他像差可以在 Zemax 软件中自定义优化函数修正 MOE 相位函数表达式的各项系数来消除,使系统获得比较好的成像质量。MOE 相位函数表达式展开式为^[21]

$$\varphi_{(\rho)} = \frac{2\pi}{\lambda}(A_1 \rho^2 + A_2 \rho^4 + A_3 \rho^6 + \dots), \quad (9)$$

式中 φ 表示 MOE 相位函数; ρ 表示透镜面归一化的径向坐标; A_1, A_2, A_3 为对应项的系数。对于小像差系统来说, (9) 式的前两项就足以消除斜入射系统的各种像差。其中(9)式的二次方项由(8)式表征,由于系统的非旋转对称性,作 $\rho^2 = x'^2 + y'^2$ 的展开,为补偿像散给 x'^2 项增加 $\cos^2 \beta$, (9) 式中的四次方项用以消除系统的残余像差。可以得到微光学透镜函数的表达式

$$L'_{(x', y')} = \exp\left\{\frac{-i \pi}{\lambda f'_1}[(x'^2 \cos^2 \beta + y'^2) + A_{2x} \frac{x'^4}{\rho_N^4} + A_{2xy} \frac{x'^2 y'^2}{\rho_N^4} + A_{2y} \frac{y'^4}{\rho_N^4}]\right\}, \quad (10)$$

式中 $\rho_N = W/2 = 8.1845 \text{ mm}$ 为 MOE 的半径。

4.2 初始结构参数的确定

根据上述参数确定微光学透镜元件的初始结构参数,光源波长为 632.8 nm,输入面大小为 6.144 mm × 6.144 mm,滤波面大小为 7.68 mm × 7.68 mm, MOE 的直径为 16.3689 mm,焦距为 289.7690 mm,入射角度为 6.0541°,为了利用 Zemax 软件对系统进行优化设计,还需要给定初始量 A_{1x}, A_{1y} , 通过(9), (10) 式之间对应项的关系得到

$$\frac{-\pi}{\lambda f_1'} = \frac{A_{1y}}{\rho_N^2}, \quad (11)$$

得到 $A_{1y} = -1147$, 从而有 $A_{1x} = A_{1y} \cos^2 \beta = -1134$ 。

4.3 优化后的微光学透镜参数及其成像质量分析

在 Zemax 软件中微光学透镜的面型设置为

表 1 优化后微光学透镜函数的各项系数

Table 1 Coefficients of the optimized micro-optics lens function

Coefficient	A_{1x}	A_{1y}	A_{2x}	A_{2xy}	A_{2y}
Value	-1133.896	-1146.677	0.0041	-0.0192	-0.0198

将表中各项系数的数值代入(10)式得到

$$L(x', y') = \exp(-16.9275x'^2 - 17.1183y'^2 + 0.00000911x'^4 - 0.000004271x'^2y'^2 - 0.000004415y'^4). \quad (12)$$

在系统像差的分析优化过程中,对输入面的五个视场进行分析,一个中心视场(0, 0),四个边角视场(-3.072, 3.072)、(3.072, 3.072)、(-3.072, -3.072)、(3.072, -3.072)。

Binary1, 相位调制函数展开式展开到 14 项, 并且各项系数设置为可变量, 限制单个微光学透镜的焦距为 289.7690 mm。系统优化后得到的微光学透镜函数中的各项系数如表 1 所示。

图 4(a)、4(b)为各个视场处的点光源在输出面成像的像质评价图, 其中图 4(a)为光程差图, 横坐标 P_x, P_y 表示归一化的光瞳坐标, 纵坐标表示光程差; 图 4(b)为点列图, 黑圈范围为艾里光斑范围; 图 4(c)、图 4(d)分别是对图 4(a)、图 4(b)中视场(-3.072, 3.072)的放大展示图。

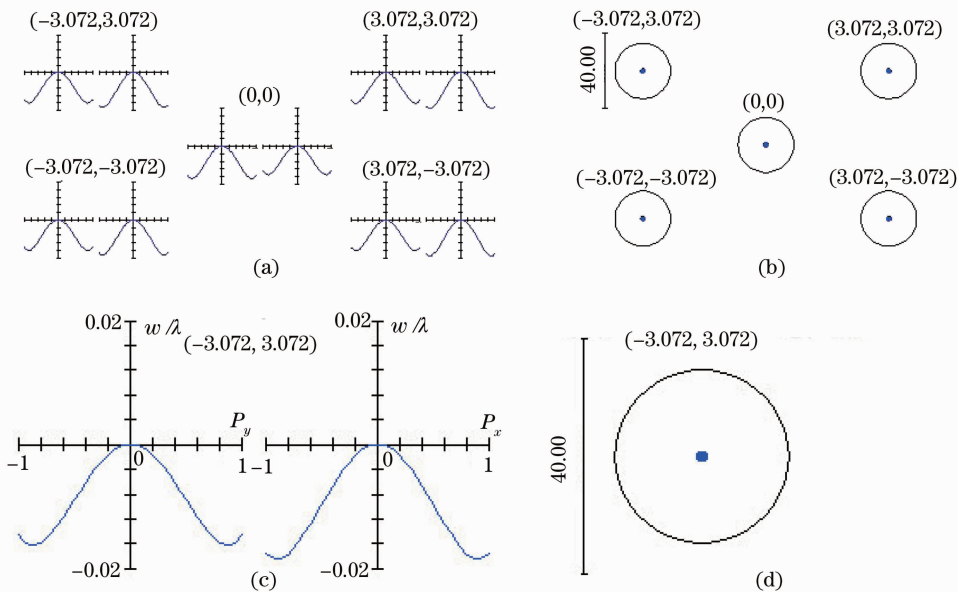


图 4 系统输出的像差评价图

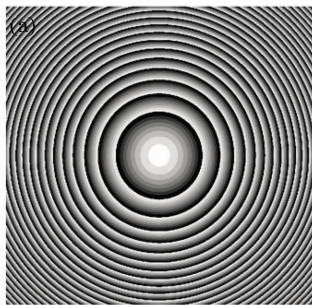
Fig. 4 Evaluation of the system output aberration

由图 4(b)可以看出各视场的光线均聚焦在比艾里光斑小得多的范围内, 且各视场的弥散斑大小均匀, 表明优化后的系统达到了衍射极限且各视场的像差分布均匀。比较图 4(c)中 P_x 和 P_y 方向的光程差图, 它们的形状和大小都很接近, 其中光瞳面 y 方向光线的最大光程差为 -0.016171λ , x 方向的最大光程差为 -0.018514λ , 两者的差值为 0.002343λ , 约为 y 方向最大光程差值的 $1/8$, 说明优化后系统的像散很小, 表明该透镜函数 x 方向增加的倾斜因子起到了消像散的作用。图 4(d)为与图 4(c)对应视场点的点列图, 该视场的 GEO 为 $0.769 \mu\text{m}$ (Zemax

用 GEO 来表示弥散斑的最大半径, 它描述同一光源发出的所有光线中与主光线偏离最大的那根光线与主光线在接收面上的距离, 单位为 μm), 约为艾里光斑半径 ($14.65 \mu\text{m}$) 的 $1/19$ 。系统最大光程差为 -0.0185λ , 其绝对值小于 $\lambda/4$, 表明优化后的系统达到了衍射极限, 即 $0.012 \mu\text{m}$, 与 CCD 的像素大小 $10 \mu\text{m}$ 相比, 可以忽略不计。优化结果表明 MOE 相位调制函数 x 方向增加的倾斜因子起到了消像散的作用, 函数中的高阶项起到了校正其它像差的作用。

采用二元光学工艺制作该微光学透镜, 把该透

镜的相位调制函数进行八台阶量化处理^[23], 量化后得到的表面中心处的相位调制深度分布如图 5 所示, 图 5(a) 是透镜中心处 $3.072 \text{ mm} \times 3.072 \text{ mm}$ 区域内的相位调制分布图, 在此处采用灰阶表示透镜的蚀刻深度, 从黑到白的灰阶表示台阶高度从零到



2π 的变化; 图 5(b) 为图 5(a) 对应的三维效果图, 以弧度为单位表示台阶高度, 最大值为 2π 。该透镜的焦距为 289.7690 mm , 孔径为 16.3689 mm , 因此可通过计算得到八个台阶化处理后的最小线宽为 $2.8 \mu\text{m}$ ^[21]。

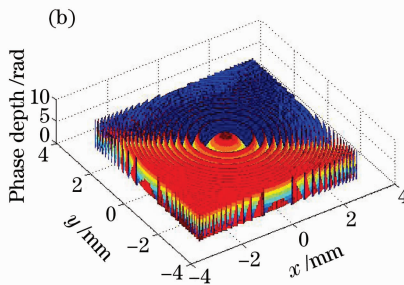


图 5 微光学透镜中心处相位调制深度分布图(a)和三维形貌图(b)

Fig. 5 Depth distribution of the MOE's phase modulation in the center (a) and 3D profile (b)

5 Matlab 模拟系统的相干识别

利用 Matlab 软件可以仿真系统的相关识别过程, 有助于在理论上分析系统的可行性及其性能^[24]。采用卷积法模拟菲涅耳衍射可以提高运算速度^[25], 为此需要先求得 $x' - y' - z'$ 坐标系下传递函数的表达式。对(6)式做傅里叶变换, 可得到该坐标系下传递函数的表达式为^[9]

$$H_{(v', \mu')}^{\theta, \rho, z} = \exp\left(\frac{i2\pi z \cos \theta}{\lambda}\right) \cdot \exp\left\{\frac{i2\pi z}{\lambda \cos \theta} \left[v'^2 \left(1 + \frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \theta}\right) + \mu'^2 \right]\right\}, \quad (13)$$

采用卷积法模拟菲涅耳衍射的运算过程可用下式表示

$$u(x', y') = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} [u_{\text{SLMI}}(x'_0, y'_0) \cdot u_0(x'_0, y'_0)] \cdot H_{(v', \mu')}^{\theta, \rho, z} \right\}, \quad (14)$$

式中 $u_0(x'_0, y'_0)$ 为斜入射的平行光波场分布, 在斜坐标系下满足 $u_0(x'_0, y'_0) = 1$; $u_{\text{SLMI}}(x', y')$ 为输入图像分布; $\mathcal{F}, \mathcal{F}^{-1}$ 为分别表示快速傅里叶变换和快速傅里叶逆变换。

当(13)式中的 $z = f' \cos \theta$ 时, $u_{(x', y')}$ 表示到达透镜前表面的光场分布。把这个新得到的光波场分布作为下一次菲涅耳衍射的入射光场取代 $u_0(x'_0, y'_0)$, 透镜函数作为新的输入函数取代 $u_{\text{SLMI}}(x'_0, y'_0)$, 再利用(14)式得到滤波器前表面的光波场分布。重复上面的方法模拟系统后半部分的光学过程, 最终得到系统输出面的光强分布。

待识别图像和目标图像如图 6 所示。图 7 为用 Matlab 软件仿真得到的模拟结果, 其中图 7(a) 和 (b)

分别对应着优化后的系统对目标相关识别的模拟结果, 图 7(c) 为未优化的系统对目标相关识别的模拟结果。比较图 7(b) 和 (c) 两图可以看出, 优化后系统的抗干扰能力更强。采用峰值旁瓣比 (SNR) 来对优化前后系统的识别能力进行量化对比分析^[26], SNR 定义为主瓣峰值强度与最强旁瓣峰值强度之比。图 7 (b) 中输出相关峰值为 24.6630, 最大旁瓣峰值为 2.1692, 优化后系统的 SNR 为 11.4028; 图 7 (c) 中输出相关峰值为 12.0692, 最大旁瓣峰值为 1.8796, 未优化系统的 SNR 为 6.421153。优化后系统的 SNR 值约为未优化系统的 1.8 倍, 表明优化后系统的识别能力提高了约 0.8 倍。

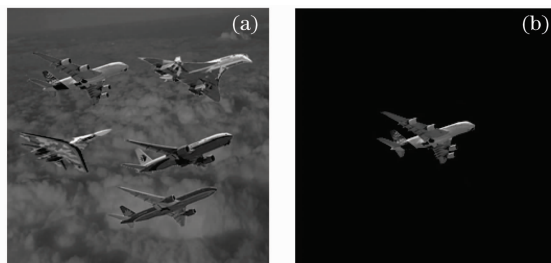


图 6 (a) 待识别图像和 (b) 目标图像

Fig. 6 (a) the under image recognition, (b) the target image

6 结 论

通过分析优化后系统的像质评价图, 系统在 x, y 方向的光程差的最大偏差约为 y 方向最大光程差的 $1/8$, 表明优化后系统的像散很小; 系统的最大光程差约为 $0.012 \mu\text{m}$, 小于 $\lambda/4$, 表明优化后的系统达到了衍射极限。以上分析表明 MOE 的相位调制

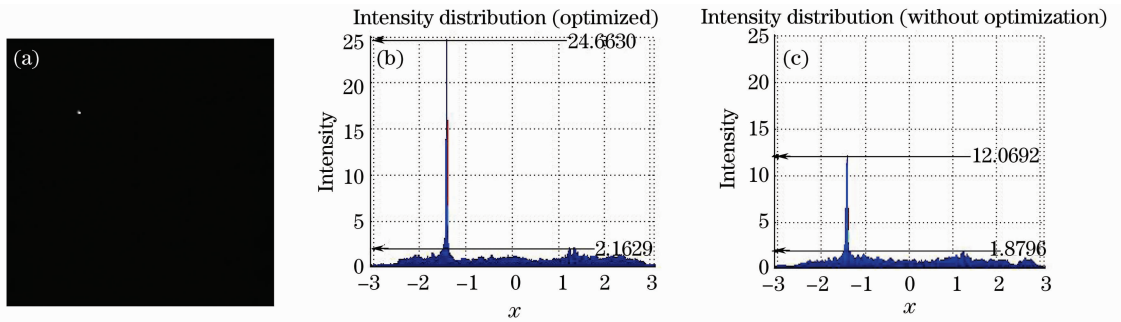


图 7 模拟输出结果。(a)为系统优化后二维的模拟输出图;(b)为(a)图的强度分布图;

(c)图为系统未经优化时模拟探测结果的强度分布图

Fig. 7 Simulation results. (a) The output plane of the optimization system; (b) the intensity distribution corresponding to (a); (c) the intensity distribution of the output of the system without optimization

函数在 x 方向增加的倾斜因子起到了消像散的作用,函数中的高阶项起到了消像差的作用。从系统模拟分析的结果可以看出,优化后系统的 SNR 值约为优化前的 1.8 倍,说明优化后系统的识别能力提高了约 0.8 倍。

该研究克服了应用平面光学结构设计光电混合相关器带来像差增大的问题,对光电混合相关器的集成化、微型化发展是很有参考价值的。同时也体现了微光学技术在设计平面光学系统时的优势。

参 考 文 献

- 1 Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu *et al.*. Design of a new type interleaver[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1424~1428
张娟,刘立人,周煜等.一种新型的光交错复用器的设计[J].*光学学报*,2003,**23**(12):1424~1428
- 2 J. P. Karins *et al.*. Miniature ruggedized optical correlator for flight testing[C]. *SPIE*, 1994, **2237**: 48~53
- 3 J. P. Karins. Second generation miniature ruggedized optical correlator[C]. *SPIE*, 1997, **3073**: 128~137
- 4 J. P. Karins *et al.*. Third generation miniature ruggedized optical correlator (MROCTM) module[C]. *SPIE*, 1998, **3386**: 38~44
- 5 Tien-Hsin Chao. Portable 512X512 grayscale optical correlator [C]. *SPIE*, 2005, **5816**: 23~31
- 6 Hu Wengang, Wang Yongzhong. The development and military application of optical correlator[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(s1): 179~181
胡文刚,王永仲.光学相关器的研究进展及军事应用[J].*光学技术*,2006,**32**(s1):179~181
- 7 Liu Jiayong, Xu ping, Xu Haidong. Design and analysis of novel planar integrated optical correlator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1375~1379
刘加勇,徐平,徐海东等.新型平面集成光学相关器设计与分析[J].*光学学报*,2008,**28**(9):1375~1379
- 8 Michael J. O' Callaghan. Highly integrated, compact, optical correlators using FLC-VLSI spatial light modulators and diffractive optics[C]. *SPIE*, 1998, **3289**: 60~67
- 9 Ping Xu, Haixuan Huang. Realization of optical perfect shuffle with microoptical array element [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(3): 809~816
- 10 Xu Ping, Li Jingzhen. The even device fabricated by the deep etched binary optics technology for the exposure system of the quasi-molecule laser [J]. *Science in China (Series E)*, 2002,

- 45(1): 1~9
- 11 Xu Ping, Li Jingzhen. Fabricate uniform device of excimer exposure system using deep-etched binary optics technology produced[J]. *Science in China (series E)*, 2000, **30**(6): 510~518
徐平,李景镇.深蚀刻二元光学技术制作准分子曝光系统均匀匀器[J].*中国科学(E辑)*,2000,**30**(6):510~518
- 12 Ping Xu, Xiang Zhou, Xiaochun Zhang *et al.*. Optical perfect shuffle interconnection using computer-generated blazed grating array[J]. *Optical Review (Japan)*, 1995, **2**(5): 362~365
- 13 Xu Ping, Zhang Xiaochun, Guo Lürong *et al.*. Fabrication errors analysis and simulation of binary optical element[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(6): 833~838
徐平,张晓春,郭履容等.二元光学元件制作误差分析与模拟[J].*光学学报*,1996,**16**(6):833~838
- 14 Xu Ping, Tang Jiyue, Guo Lürong *et al.*. Deep etch binary optics element[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(12): 1276~1281
徐平,唐继跃,郭履容等.深蚀刻二元光学元件[J].*光学学报*,1996,**16**(12):1276~1281
- 15 Xu Ping, Tang Jiyue, Guo Lürong *et al.*. Diffraction analysis on deep-etch continuous phase relief microoptical elements [J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **23**(9): 819~823
徐平,唐继跃,郭履容等.深刻蚀连续浮雕微光学元件衍射分析[J].*中国激光*,1996,**23**(9):819~823
- 16 Xu Ping, Tang Jiyue, Guo Lurong *et al.*. Fabricaion errors simulation of deep etched binary optics elements[J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **24**(6): 536~542
徐平,唐继跃,郭履容等.深刻蚀二元光学元件制作误差模拟[J].*中国激光*,1997,**24**(6):536~542
- 17 Xu Ping, Li Jingzhen, Bu Guixue *et al.*. Fabrication error analysis of 4 step binary optic elements[J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(5): 415~420
徐平,李景镇,卜桂学等.4阶二元光学元件制作误差的解析分析[J].*中国激光*,1998,**A25**(5):415~420
- 18 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. China Machine Press, 2001, **1**: 27~28
郁道银,谈恒英.工程光学[M].机械工业出版社,2001,**1**:27~28
- 19 Michael J. O' Callaghan. Compact optical processing systems using off-axis diffractive optics and FLC-VLSI spatial light modulators[C]. *SPIE*, 1996, **2824**: 72~80
- 20 Markus Testorf. Paraxial theory of planar integrated systems [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1997, **14**(7): 1569~1575
- 21 Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. Binary Optics [M]. National Defense Industry Press, 1998. 108~112
金国藩,严瑛白,邬敏贤.二元光学[M].国防工业出版社,1998.108~112
- 22 ZEMAX Development Coporation. ZEMAX Optical Design

- Program User's Guide[P]. Version January, 2002, 6 213~214
- 23 Liu Jiayong. Research of microoptical planar integrated correlator [D]. Master's degree thesis of Shenzhen University, 2008, 26~28
刘加勇, 微光学平面集成光学相关器研究[D]. 深圳大学硕士学位论文, 2008, 26~28
- 24 Guo Chengshan, Li Chuantao. Suitability of different sampling methods for digital simulations of the optical diffraction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 443~446

- 国承山, 李传涛. 光衍射数值模拟中不同抽样方法的适用性分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 443~446
- 25 Ding Dawei. The research of computer-generated hologram and digital reproducibility[D]. Master's Degree Thesis of Anhui University, 2004. 11~14
丁大为, 计算全息图及其数字重现的研究[D]. 安徽大学硕士学位论文, 2004. 11~14
- 26 Tien-Hsin Chao. System issues of developing grayscale optical correlator for ATR applications[C]. *SPIE*, 2007, **6574**: 657405

Call for Papers

Special Issue on *Enabling Science and Technology for High-Speed Optical Communications*

Chinese Optics Letters (COL) invites original manuscript submissions for a Special Issue on *Enabling Science and Technology for High-Speed Optical Communications* to be published in September, 2010.

Fiber optics underpin the communications infrastructure for the information society today. Cables consisting of hair-like fibers speed data around the globe in the form of rapid pulses of light. Modern telecom infrastructure facilitating high-speed broadband internet would not be possible without it. Rapid progress of advanced modulation formats, coding, optical amplification, coherent detection, and digital signal processing has made significant impact in the field of optical communications. Transmission speeds beyond 100 Gb/s are being explored. This special issue will include comprehensive review articles and original contributions covering the rapid advances and broad scope of these technologies in optical fiber communications.

Following is a representative and non-exclusive list of areas in which papers are solicited.

- Advanced modulation formats
- Advanced coding technologies
- Coherent detection techniques
- High-speed optoelectronics devices
- New fiber for long-haul and submarine applications
- Performance monitoring for optical transmission

Invited papers include:

- Allan Willner (University of South California), High-speed transmission and optical monitoring
 Jianjun Yu (NEC Labs America), High-capacity DWDM transmission systems
 Xiang Liu (Bell labs), Fiber nonlinear impairments and their mitigation in coherent optical OFDM
 Christophe Peucheret (Technical University of Denmark), Ultra-high speed optical transmission
 Xiang Zhou (AT&T Labs), Digital signal procession for multi-level modulation format
 Chongjin Xie (Bell labs), Nonlinear polarization effects and mitigation in polarization multiplexed transmission
 Benyuan Zhu (OFC labs America), New fiber for optical signal transmission over long-haul and submarine distance

Feature Editors:

- Tingye Li (厉鼎毅) (AT&T, retired), Member, National Academy of Engineering; Foreign Member, Chinese Academy of Engineering, Fellow, OSA and IEEE
 Ziseng Zhao(赵梓森) (WRI, Fiberhome), Member, Chinese Academy of Sciences
 Jianjun Yu(余建军) (NEC Labs America), Fellow, OSA

Submission deadline: May 10, 2010

Submission format:

Authors should use the Latex or MS-Word style files. Please upload the submission online at the website of COL: <http://www.col.org.cn> (with marks of "submitted to optical fiber communications issue"). And please send email to col@mail.shcnc.ac.cn if there is any problem. Publication is partly supported by the National Basic Research Program of China (No. 2010CB328300).