

基于相位调制的激光多元相干阵列的远场光强分布研究

赵素贵¹ 柴金华² 王平³

¹陆军军官学院研究生管理大队, 安徽 合肥 230031
²陆军军官学院防空兵系, 安徽 合肥 230031
³陆军军官学院基础部, 安徽 合肥 230031

摘要 根据 Fraunhofer 衍射理论,建立了基于相位调制的二维 $M \times N$ 激光相干阵列的远场光强分布理论模型。结合应用实际,对 5×5 激光相干阵列的远场光强分布进行数值模拟,分析了不同调制相位对远场光强分布的影响。结果表明,远场光强分布的主极大(小)的位置随调制相位变化,相对强度也随之变化;不同阵列结构,光强分布不同,每列(行)相邻两阵元上加载的相位差为 π 时,出现较多的主极大和次极大且对称分布。这些结果可为应用相位调制去控制远场光强分布提供有益的参考。

关键词 激光技术;相干光学;相干阵列;相位调制;远场光强分布

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.031402

Study on Far-Field Light-Intensity Distribution of Laser Multiple-Unit Coherent Array Based on Phase Modulation

Zhao Sugui¹ Chai Jinhua² Wang Ping³

¹ Graduate Management Brigade, Army Officer Academy, Hefei, Anhui 230031, China
² Department of Air Defense Forces, Army Officer Academy, Hefei, Anhui 230031, China
³ Department of Basic, Army Officer Academy, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract According to the Fraunhofer diffraction theory, a theoretical model of far-field intensity distribution of two-dimensional $M \times N$ laser coherent array based on phase modulation is established. Numerical simulation on far-field intensity distribution of a 5×5 laser coherent array aiming at the application practice is made and the influence of different phases on intensity distribution is also analyzed. The results show that the positions of the main maximum or minimum and the value of the intensity distribution change with the phase modulation, and the intensity distribution varies with different array structures. More symmetric main maxima and secondary maxima appear in the simulation results when the phase difference loaded in each column and each row is π . All of these provide a helpful reference for the control of far-field intensity distribution by phase modulation.

Key words laser technique; coherent optics; coherence arrays; phase modulation; far-field intensity distribution

OCIS codes 140.3290; 030.1640

1 引言

激光多元相干阵列可以获得高功率、高质量的光束输出,而且可用于光束方向、强度分布的相干控制,在光电对抗中有着重要的应用前景。当前,对激光相干阵列的远场光强分布特性的研究主要有远场光强分布与阵元间距、填充因子、偏振等因素的关系^[1~5],如文献[1,2]从如何提高相干合成光束质量出发,分析了出射光束的相位、振幅和偏振态的扰动以及占空比对相干合成光束的远场光强分布的影响;文献[3]提出基于

收稿日期: 2012-10-31; 收到修改稿日期: 2012-12-06; 网络出版日期: 2013-01-31

作者简介: 赵素贵(1982—),男,硕士研究生,主要从事光电子技术应用方面的研究。E-mail: 29946511@qq.com

导师简介: 柴金华(1964—),男,教授,主要从事激光理论与技术及光电对抗理论与技术方面的研究。

E-mail: ch120918@sina.com

液晶空间光调制器的纯相位调制,采用纯相位衍射光学元件将一束出射光束控制成二维准连续阵列式光束,然后合成多维光斑(束)。为了实际应用的需要,本文研究相干阵列光束不同相位差的情况,即在每列(行)相邻两阵元上加载相位差恒定的调制单元,通过对调制单元的控制实现对远场光强分布的调节。基于这种设想,首先建立相位调制的激光多元相干阵列的理论模型,推导出远场光强分布公式,然后对 5×5 阵列的远场光强分布进行数值模拟,最后给出结论。

2 理论模型

二维 $M \times N$ 激光相干阵列如图 1 所示,各阵元在出射面上的坐标为 (x_m, y_n) 。在每列(行)相邻两阵元上加载相位差恒定的调制相位,可通过控制调制相位实现对远场光强分布的控制。图 2 为第 m 阵列元相干示意图,设第 m 阵列元上所加载的调制相位为 ϕ_m ,则 $\phi_m - \phi_{m-1} = \Delta\phi$ 为相邻两列上加载的相位差。

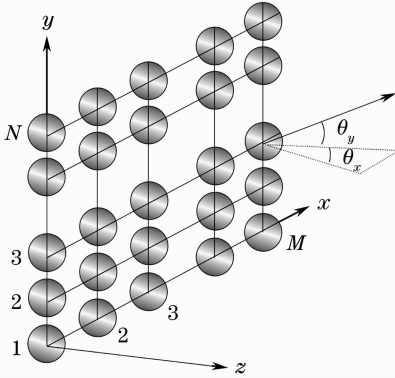


图 1 激光多元相干阵列示意图

Fig. 1 Laser multiple-unit coherent array

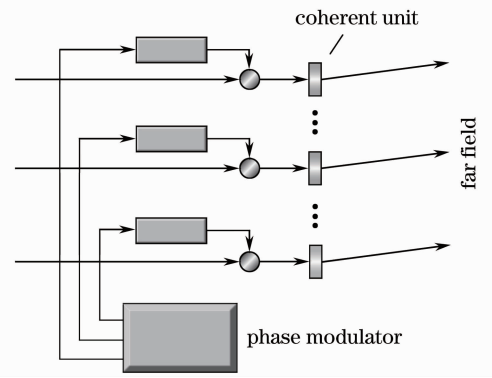


图 2 第 m 阵列元相干示意图

Fig. 2 Coherence of the coherent unit in the m th column

设各子阵元出射光束的振幅均服从理想高斯分布,各阵元初始相位相等。加载在第 m 阵列元与第 $m-1$ 阵列元间的相位差恒为 $\Delta\phi_1$,第 n 行阵元与第 $n-1$ 行阵元间的相位差恒为 $\Delta\phi_2$,则阵元 (m, n) 出射光束的振幅表示为

$$U_{mn}(x, y) = A_{mn} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2} + i(\phi_{mn} + m\Delta\phi_1 + n\Delta\phi_2)\right], \quad (1)$$

式中 A_{mn} 为阵元的轴向振幅, ϕ_{mn} 为阵元的初始相位, ω_0 为阵元输出光束半径。则输出平面的场分布可表示为

$$U(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2} + i(\phi_{mn} + m\Delta\phi_1 + n\Delta\phi_2)\right]. \quad (2)$$

由 Fraunhofer 衍射理论^[6]可知,远场光强分布可用输出平面场分布的傅里叶变换表示,于是

$$I(\theta_x, \theta_y) \propto \left| \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn} \exp\{i[k(x_m\theta_x + y_n\theta_y) + \phi_{mn} + m\Delta\phi_1 + n\Delta\phi_2]\} \right|^2 \times \exp\left[-\frac{k^2\omega_0^2}{2}(\theta_x^2 + \theta_y^2)\right], \quad (3)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, (θ_x, θ_y) 表示光束传播方向角。(3)式由两部分组成,第一项是多孔径远场衍射图样,第二项是单阵元孔径的远场衍射图样,因此阵列远场图样可以看作是单孔径远场衍射因子被多孔径干涉因子调制的结果。由(3)式可以看出,远场光强分布包含了阵列结构和阵元的振幅、相位等信息。

设阵元间距均为 d ,则 $x_m = md, y_n = nd$ 。为方便计算,取 $A_{mn} = 1, \phi_{mn} = 0$,则远场光强分布的表达式为

$$I(\theta_x, \theta_y) \propto \left| \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \exp\{i[kd(m\theta_x + n\theta_y) + m\Delta\phi_1 + n\Delta\phi_2]\} \right|^2 \times \exp\left[-\frac{k^2\omega_0^2}{2}(\theta_x^2 + \theta_y^2)\right] = \left[\frac{\sin \frac{M(kd\theta_x + \Delta\phi_1)}{2}}{\sin \frac{kd\theta_x + \Delta\phi_1}{2}} \times \frac{\sin \frac{N(kd\theta_y + \Delta\phi_2)}{2}}{\sin \frac{kd\theta_y + \Delta\phi_2}{2}} \right]^2 \times \exp\left[-\frac{k^2\omega_0^2}{2}(\theta_x^2 + \theta_y^2)\right]. \quad (4)$$

分析(4)式得出,远场光强分布极大值的位置为

$$\theta_x = \frac{1}{kd} \left[\frac{(2k'+1)\pi}{M} - \Delta\phi_1 \right], \quad \theta_y = \frac{1}{kd} \left[\frac{(2k'+1)\pi}{N} - \Delta\phi_2 \right], \quad k' = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5)$$

极小值的位置为

$$\theta_x = \frac{1}{kd} \left(\frac{2k'\pi}{M} - \Delta\phi_1 \right), \quad \theta_y = \frac{1}{kd} \left(\frac{2k'\pi}{N} - \Delta\phi_2 \right), \quad k' = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (6)$$

从(5)式和(6)式看出,改变 $\Delta\phi_1$ 和 $\Delta\phi_2$ 可以改变 θ_x 和 θ_y ,而 $\Delta\phi_1$ 和 $\Delta\phi_2$ 是外加调制相位,也就是说在阵列结构固定的条件下,远场光强分布与所加载的调制相位有关。这也是通过控制相位改变远场光强分布的依据。

3 数值模拟

针对上述表达式,可以模拟任意 $M \times N$ 相干阵列加载不同调制相位时的远场光强分布情况。本文结合实际,仅考虑 5×5 相干阵列(25个阵元)不同相位调制对远场光强分布的影响,给出极值的具体位置,并在特殊条件下与 2×2 , 3×3 , 4×4 , 5×2 , 5×3 , 5×4 阵列进行比较。仿真所采用的参数为 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $d = 3 \text{ mm}$, $\omega_0 = 1.2 \text{ mm}$ 。

3.1 $\Delta\phi_1 = 0, \Delta\phi_2$ 取不同值的情形

由(5)式可知调制相位 $\Delta\phi_2$ 在 $0 \sim 2\pi$ 内连续变化时,主极大的位置沿竖直方向(y 轴方向)移动,光强也将逐渐变化。图3、图4分别为 $\Delta\phi_2$ 取不同值时的远场光强分布图。图3表示光强分布光斑,图3(a)~(f)清楚地表明光斑的位置随不同调制相位 $\Delta\phi_2$ ($\Delta\phi_2 = 0, \frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}, \pi, \frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}$) 而发生移动的情况。图3中横坐标为 θ_x ,纵坐标为 θ_y 。图4为三维光强分布图,图4(a)~(f)清楚地表明光斑的强度随不同调制相位 $\Delta\phi_2$ 而发生变化的情况。图4中 x 轴为 θ_x , y 轴为 θ_y , z 轴表示光强,这里光强具有相对的意义,因为已假定阵列中每个阵元的振幅为1。表1为 $\Delta\phi_2$ 取不同值时光强远场分布的主极大强度及其位置,主极大的最大值为615.13,这与理想值625(即 25^2)接近。特别地,当 $\Delta\phi_2 = \pi$ 时出现两个主极大,强度值为287.87。另外,本文的理论模型中取初始相位 $\phi_{mn} = 0$,如果 ϕ_{mn} 取任意值,可做同样的数值分析,也可得出相似的结果。

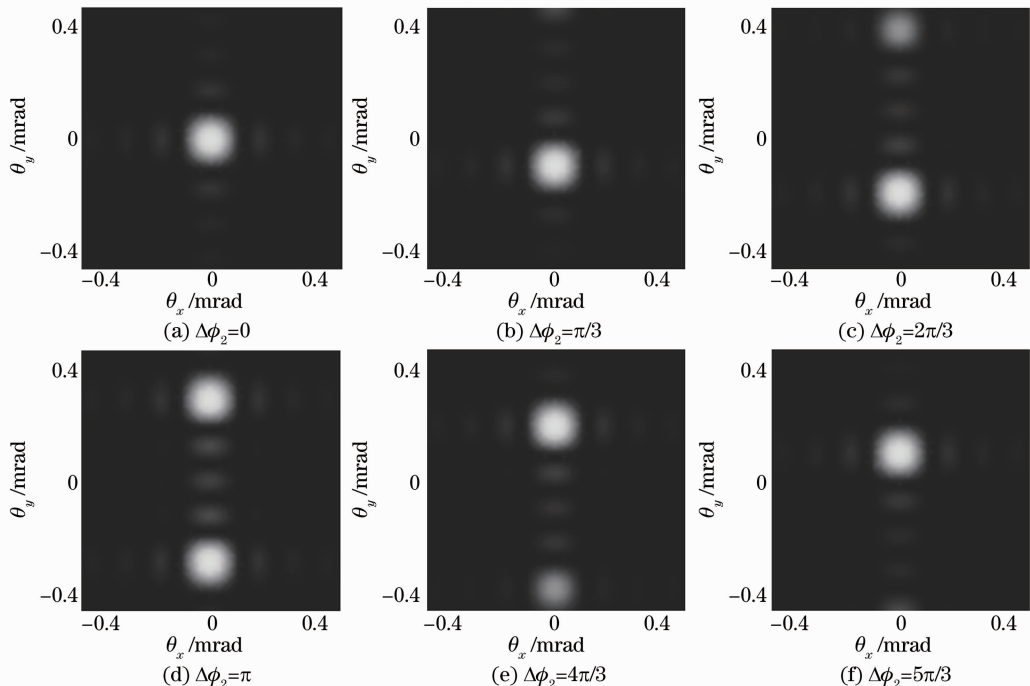
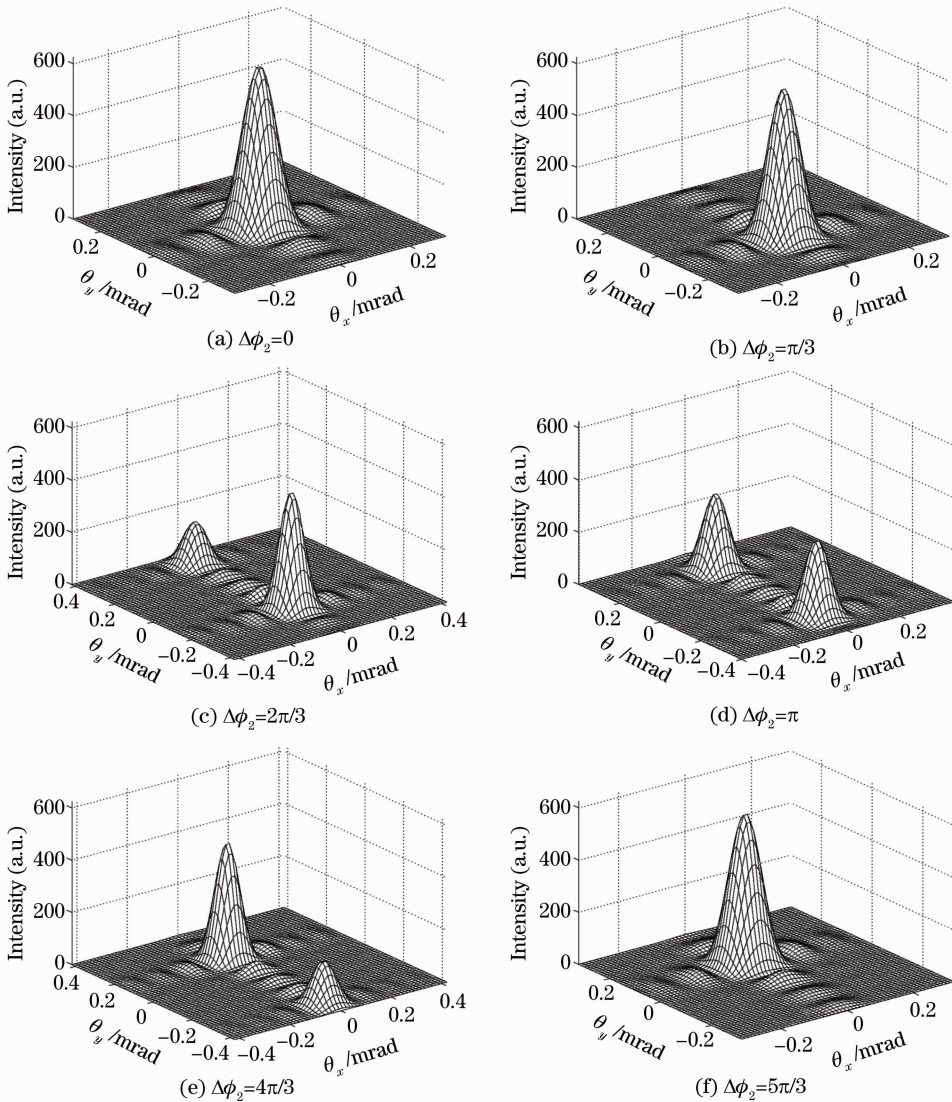


图3 $\Delta\phi_1 = 0, \Delta\phi_2$ 取不同值时的远场光强分布光斑图

Fig. 3 Light spots of far-field intensity distribution with $\Delta\phi_1 = 0$ and different $\Delta\phi_2$

图4 $\Delta\phi_1=0, \Delta\phi_2$ 取不同值时远场光强三维分布图Fig. 4 Three-dimensional distribution of the far-field light intensity with $\Delta\phi_1=0$ and different $\Delta\phi_2$ 表1 $\Delta\phi_1=0, \Delta\phi_2$ 取不同值时光强远场分布的主极大强度及其位置Table 1 Main maximum intensity and their positions in the light intensity distribution with $\Delta\phi_1=0$ and different $\Delta\phi_2$

| $\Delta\phi_2/\text{rad}$ | 0 | $\frac{\pi}{3}$ | $\frac{2\pi}{3}$ | π | $\frac{4\pi}{3}$ | $\frac{5\pi}{3}$ | 2π |
|--------------------------------|--------|-----------------|------------------|-------------------------|------------------|------------------|--------|
| Main maximum intensity (a. u.) | 615.13 | 568.89 | 438.6 | 287.87 | 438.6 | 568.89 | 615.13 |
| Position /mrad | (0,0) | (0, -0.085) | (0, -0.154) | (0, -0.252), (0, 0.252) | (0, 0.154) | (0, 0.085) | (0,0) |

3.2 $\Delta\phi_2=0, \Delta\phi_1$ 取不同值的情形

在这种情形下,远场光强分布变化规律与前一种情况类似,不同的是光强极大值的位置沿水平方向(x 轴方向)移动。

3.3 $\Delta\phi_1=\Delta\phi_2$ 且取不同值的情形

由(5)式可知,此时极大值的位置沿 xy 面的对角线方向移动。图5为 $\Delta\phi_1=\Delta\phi_2$ 分别取不同值时的远场光强分布光斑图,图5(a)~(f)分别为 $\Delta\phi_1=\Delta\phi_2=0, \frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}, \pi, \frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}$ 。调制相位在 $0\sim\pi$ 内连续变化时,主极大的位置由中心沿对角线向左下角移动;在 $\pi\sim 2\pi$ 内连续变化时,由右上角沿对角线向中心移动。不

同调制相位,远场光强分布的极大值也不同。表 2 给出了不同调制相位光强远场分布的主极大强度及其位置。

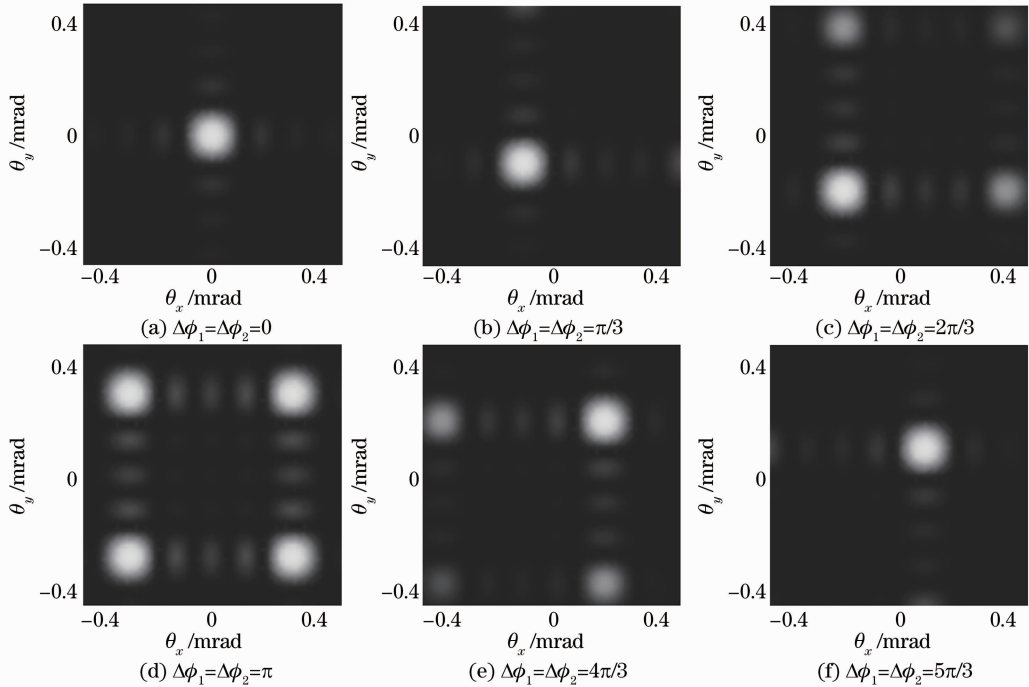


图 5 $\Delta\phi_1 = \Delta\phi_2$ 且取不同值时的远场光强分布光斑图

Fig. 5 Light spots of the far-field intensity distribution with different $\Delta\phi_1 = \Delta\phi_2$

表 2 $\Delta\phi_1 = \Delta\phi_2$ 且取不同值时光强远场分布的主极大强度及其位置

Table 2 Main maximum intensity and their positions in the light intensity distribution with different $\Delta\phi_1 = \Delta\phi_2$

| $\Delta\phi_2/\text{rad}$ | 0 | $\frac{\pi}{3}$ | $\frac{2\pi}{3}$ | π | $\frac{4\pi}{3}$ | $\frac{5\pi}{3}$ |
|--------------------------------|--------|------------------|------------------|--|------------------|------------------|
| Main maximum intensity (a. u.) | 615.13 | 527.29 | 317.56 | 136.85 | 317.56 | 527.29 |
| Position /mrad | (0,0) | (-0.085, -0.085) | (-0.154, -0.154) | (-0.252, 0.252), (0.252, -0.252), (-0.252, -0.252), (0.252, 0.252) | (0.154, 0.154) | (0.085, 0.085) |

模拟发现,当 $\Delta\phi_1 = \Delta\phi_2 = \pi$ 时,光斑的分布出现较多的主极大和次极大且形成 5×5 样式,如图 5(d) 所示。作为比较,分别对 2×2 , 3×3 , 4×4 , 5×2 , 5×3 , 5×4 阵列远场光强分布进行仿真,如图 6 所示,每种阵列均出现 4 个主极大和若干次极大,且对称分布。从图中可直观看出, $M \times N$ 阵列的结构对远场光强分布的贡献就是,将衍射图样按阵列结构调制成 $M \times N$ 的光斑分布。

4 结 论

按照外加相位控制实现远场光强分布的想法,基于 Fraunhofer 衍射理论,建立了二维 $M \times N$ 激光干涉阵列在远场光强分布的理论模型,得到了远场光强分布的表达式。根据实际需要,模拟分析了 5×5 阵列结构的远场光强分布。重点分析了 $\Delta\phi_1 = 0$ 、 $\Delta\phi_2$ 取不同值, $\Delta\phi_2 = 0$ 、 $\Delta\phi_1$ 取不同值以及 $\Delta\phi_1 = \Delta\phi_2$ 且取不同值等情形,分析表明, $\Delta\phi_1 = \Delta\phi_2 = 0$ 时主极大出现最大值 615.13,这与理想值 625 较为相符。因为强度为 I 的光束通过 5×5 阵列结构变成多束光,每束光光强为 $\frac{I}{25}$,通过相位调制成 $\Delta\phi_1 = \Delta\phi_2 = 0$ 的情况,此时远场光强为 $25I$,即实现光强达 25 倍的效果。另一种情况也是十分有趣和有利的,这就是 $\Delta\phi_1 = \Delta\phi_2 = \pi$ 时光斑分布出现较多的主极大和次极大,且形成 5×5 的对称分布。虽然此时主极大的强度只有 136.85,但在实际应用中可以把这种对称结构的光斑分布作为激光信标使用,可在某些情形的激光照明中作为辅助照明的定标。

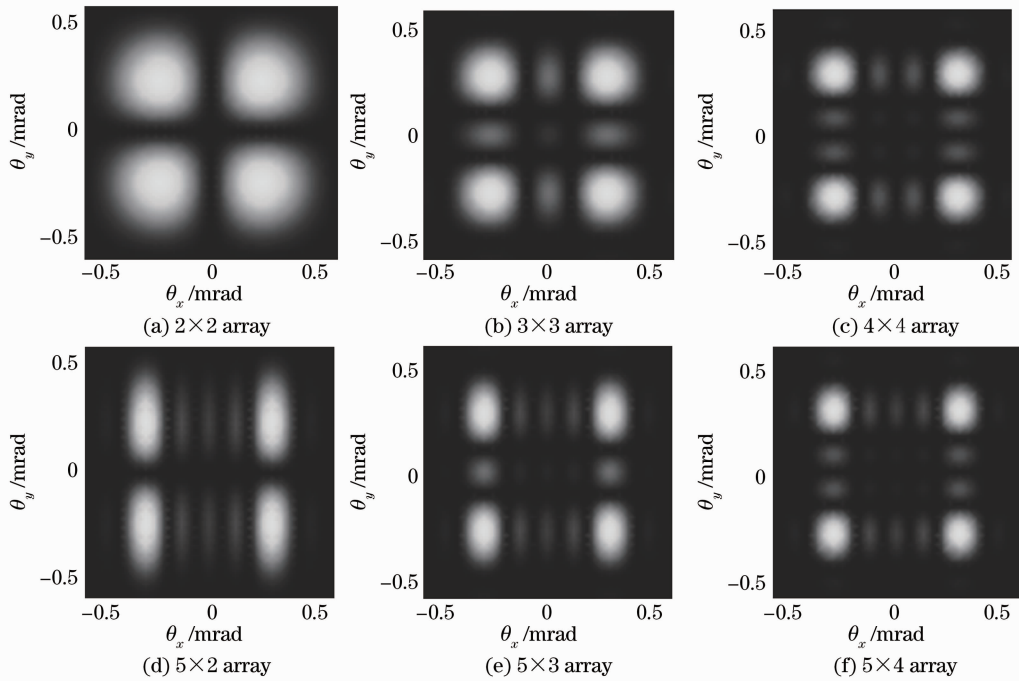


图6 在 $\Delta\phi_1 = \Delta\phi_2 = \pi$ 条件下不同阵列的远场光强分布光斑图

Fig. 6 Facula of the far-field intensity distribution of different arrays when $\Delta\phi_1 = \Delta\phi_2 = \pi$

当然,在实际工程中在特定时刻下实现 $\Delta\phi_1 = \Delta\phi_2 = \pi$ 及 $\Delta\phi_1 = \Delta\phi_2 = 0$ 是有相当难度的,本文仅给出理论上的考虑。另外,本文虽然只数值分析了 5×5 阵列的情形,但对于任意 $M \times N$ 阵列,都可用类似的方法分析,不再赘述。

参 考 文 献

- 1 Wang Wei, He Bing, Zhou Jun *et al.*. Study on far-field intensity distribution of fiber laser used in coherent beam combination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2248~2255
王 炜, 何 兵, 周 军 等. 光纤激光相干阵列远场光强分布的影响分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2248~2255
- 2 Wang Wei, He Bing, Li Zhen *et al.*. Experimental study on coherent beam combination in lasers array in different duty ratios[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1007~1011
王 炜, 何 兵, 李 震 等. 占空比对相干组束影响的实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1007~1011
- 3 Liu Bohan, Zhang Jian. Dynamical laser beams steering with phase-only spatial light modulator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 899~902
刘伯晗, 张 健. 纯相位空间光调制器动态控制光束偏转[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 899~902
- 4 Fan Xinyan, Liu Jingjiao, Liu Jinsheng *et al.*. Theoretical and experimental study of multi-element coherent fiber array[J]. *Acta Physics Sinica*, 2010, **59**(4): 2462~2469
范馨燕, 刘京郊, 刘金生 等. 多阵元光纤相干阵列的理论实验研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(4): 2462~2469
- 5 Tang Qianjin, Shi Xiangchun, Hu Qiquan. Effect of the filling factor on the far field profiles of laser beam combination[J]. *J. Propulsion Technology*, 2007, **28**(5): 566~569
唐前进, 施翔春, 胡企铨. 填充因子对激光组束远场功率分布的影响[J]. *推进技术*, 2007, **28**(5): 566~569
- 6 Huan Wanyun. Fourier Optics Course[M]. Beijing, Beijing Normal University Press, 1985. 41~50, 101~115
黄婉云. 傅里叶光学教程[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1985. 41~50, 101~115