

倾斜可控阵列光场的二维扫描技术研究

艾博王^{1,2,3}, 张雨秋^{1*}, 常洪祥^{1,2,3}, 常琦^{1,2,3}, 马鹏飞^{1,2}, 冷进勇^{1,2}, 周朴^{1*}¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073;²国防科技大学南湖之光实验室, 湖南长沙 410073;³国防科技大学高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073

摘要 以 19 路、127 路和 919 路激光相干阵列为模型, 通过倾斜波前调控技术对阵列光场的子阵元施加倾斜相位控制, 对倾斜可控阵列光场的大角度二维扫描特性进行了理论和实验研究。结果表明, 所提出的方法可实现大视场范围内任意位置的单点扫描, 同时得到能量分布均匀的二维连续扫描路径, 实现特殊光场图案定制。此外, 该方法具有扫描范围不受限制、扫描模式准连续以及衍射效率高特点, 在提升输出功率和扫描精度等方面具有优势。

关键词 激光光学; 激光阵列; 相干合成; 倾斜调控; 二维扫描; 光场定制

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230687

1 引言

激光扫描技术在自由空间光通信、激光雷达、激光加工和远距离成像^[1-4]等领域中有着广泛的应用, 是工业生产和先进制造中一种重要的技术手段。目前, 非机械激光扫描技术大多通过硅基光电子、液晶空间光调制器(SLM)、微机电系统(MEMS)、光波导、相干合成^[5-11]等方法实现。其中, 光纤激光相干合成技术近年来在实现高功率、高亮度和高光束质量的激光输出方面具有优异的表现。2020 年德国耶拿大学课题组实现了平均功率为 10.4 kW 的超快激光输出^[12]; 2022 年国防科技大学课题组实现了 397 路光纤激光光束的动态锁相控制^[13], 光纤激光相干合成技术在功率提升和路数拓展方面已经日渐趋于成熟。与此同时, 在光纤激光相干合成技术中, 多阵列数的光源系统、高度灵活的相位控制算法^[14-15]以及高功率激光输出等满足光束扫描的需要, 使得该项技术在实现光束二维偏转、提升非机械激光扫描性能方面具有重要的应用价值。

目前, 激光扫描技术呈现出非机械式、大角度、高精度以及高抗干扰性等发展趋势^[16-19], 大都基于液晶、光波导和微透镜阵列等相控阵平台实现。液晶移相器件在响应速度方面具有局限性, 而电光调控的半导体波导难以满足高功率系统的要求, 但多孔径光纤激光相控阵可突破目前光束快速指向和输出功率方面的限制, 辅助以相位控制模型, 也可实现水平、垂直方向的二维扫描。2020 年, 以色列 Civan 先进技术公司研制了可用于激光加工的动态光束激光器, 输出功率高达

16 kW, 且具备一定的动态光束整形功能^[20]。2022 年, 中国科学院光电技术研究所课题组在相干阵列的相邻孔径间施加 $-\pi \sim \pi$ 的恒定相位差, 利用活塞相位调控的方式在理论上实现了远场的连续扫描^[21]。尽管基于活塞的相位控制方法可以实现激光阵列的二维平面扫描, 相比于倾斜相位调控的方式, 该方法在扫描范围、衍射效率以及光场图案定制等方面都有一定的局限性。中国科学院光电技术研究所课题组还利用微透镜阵列和自适应光纤准直器, 实现了光束的准连续偏转扫描^[22], 并基于压电陶瓷相位调制器件(PZT-PM)和自适应光纤准直器, 通过目标在回路技术实现了远场一定范围内的目标跟踪^[23]。上述两项研究均利用自适应光纤准直器在机械装置上实现了倾斜相位调控的功能, 初步实现了一维光束扫描。总体而言, 已有研究尚未对激光阵列光场定制的可行性进行深入探讨, 大阵列相干阵列实现空间扫描的机理还不明晰。

本文提出了倾斜可控的激光相干阵列的光束扫描方法, 旨在实现二维平面内的连续扫描及光场图案定制。以 19 路、127 路和 919 路的多孔径阵列为例, 通过对单个子阵元施加精细的倾斜相位控制, 实现了二维平面内任意位置的扫描, 并通过连续的相位分布切换定制了特殊光场图案, 通过实验验证了倾斜可控二维光场扫描理论的正确性。

2 倾斜可控相干阵列的二维扫描原理

2.1 阵列排布方式和相位控制模型

正六边形排布是光纤激光阵列普遍采用的方式之

收稿日期: 2023-04-06; 修回日期: 2023-05-06; 录用日期: 2023-05-22; 网络首发日期: 2023-07-04

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3606000)

通信作者: *zhoupu203@163.com; *zhangyq914@163.com

一,子阵元排布紧密,面积填充比得到提高。图 1(a)给出了 N 个子阵元的正六边形排布示意图,分布在第 $n+1$ ($n=1, 2, 3, \dots, m$) 层正六边形环上的子阵元数量为 $6n$, 则 n 层子阵元总数为 $N=3n^2-3n+1$, m 为正六边形环的总层数。每个子阵元的孔径参数均相等,直径为 d , 整个阵列的等效口径为 D_0 , 且 $D_0=d+2d \times (n-1)$ 。

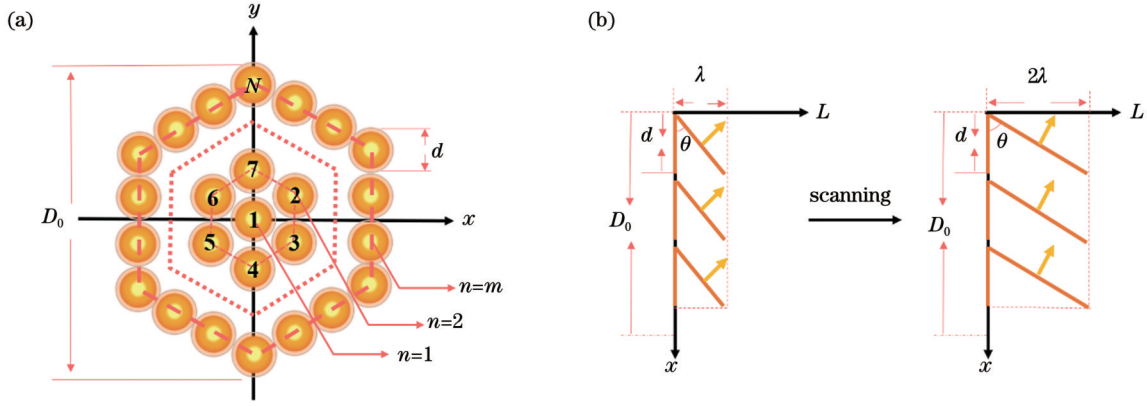


图 1 激光相干阵列的排布方式和相位控制模型。(a)呈正六边形排布的相干阵列结构示意图;(b)锯齿状倾斜相位控制模型
Fig. 1 Arrangement of laser coherent arrays and phase controlling model. (a) Structural diagram of coherent arrays with regular hexagon arrangement; (b) sawtooth tilting phase control model

2.2 倾斜可控相干阵列的光场理论

在 N 个子阵元等间距排列的阵元面上,设子光束束腰半径为 w_0 , 第 i 路子光束的出射振幅为 A_i ($i=1, 2, 3, \dots, N$), 则 N 个子阵元出射的高斯光束在 xoy 发射面上的复振幅分布可表示为

$$U_0(x, y) = \sum_i^N A_i \exp\left[-\frac{(x-a_i)^2 + (y-b_i)^2}{w_0^2}\right] \times \text{circ}\left[\frac{\sqrt{(x-a_i)^2 + (y-b_i)^2}}{d/2}\right], \quad (1)$$

式中: (x, y) 为高斯光束在 xoy 发射面上的坐标; (a_i, b_i) 为单个子阵元的位置坐标; $\text{circ}(\cdot)$ 为圆域函数。对各个子阵元加载锯齿状倾斜相位, 使得单个子阵元内锯齿状倾斜相位对应的最大光程差为 L , 相位差为 $\Delta\varphi$ 。已知 $\Delta\varphi = k_0 L$, $k_0 = 2\pi/\lambda$, 对应的扫描角度为 $\theta = \arcsin(L/d)$ 。为了实现二维平面内任意位置的扫描, 控制单个子阵元的锯齿状倾斜相位, 使得水平 x 轴和垂直 y 轴方向上的光程差分别为 L_x 和 L_y , 可得水平偏转角 (α) 和俯仰角 (β) 分别为 $\alpha = \arcsin(L_x/d)$,

为了在远场实现光束的准连续扫描, 基于上述阵列排布方式, 对各个子阵元设置了锯齿状倾斜相位。如图 1(b) 所示, 该相位调制方式采用闪耀光栅相位控制模型, 其中 λ 为光束波长。当单个锯齿状倾斜相位所对应的最大光程差为 L 时, 相邻子阵元间的光程差也为 L , 所引起的相位差 ($\Delta\varphi$) 将使波前等相位面倾斜一定的角度 (θ), 同时光束在传输过程中也将偏转 θ 。

$\beta = \arcsin(L_y/d)$ 。同时, 也可利用远场的扫描点与 x 轴的距离 (z_x) 和 y 轴的距离 (z_y) 来表示, 即 $\alpha = \arcsin(z_x/\sqrt{z_x^2 + z^2})$, $\beta = \arcsin(z_y/\sqrt{z_y^2 + z^2})$, 其中 z 为远场的扫描点与 o 点的距离。又由于 $z_x \ll z$, $z_y \ll z$, 可近似得到 $\alpha = \arcsin(z_x/z)$, $\beta = \arcsin(z_y/z)$, 那么 $\theta = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$ 。经过倾斜相位调控后, 整个激光相干阵列在发射面出射的光束复振幅分布可表示为

$$U_1(x, y) = \sum_{i=1}^N A_i \exp\left[-\frac{(x-a_i)^2 + (y-b_i)^2}{w_0^2}\right] \times \text{circ}\left[\frac{\sqrt{(x-a_i)^2 + (y-b_i)^2}}{d/2}\right] \times [ik_0(x \sin \alpha + y \sin \beta)]. \quad (2)$$

需要说明的是: 向左偏转时 α 为负, 向右偏转时 α 为正; 向下偏转时 β 为负, 向上偏转时 β 为正。利用 $ABCD$ 传输矩阵对光学传输系统进行参数化处理后, 对式 (2) 进行傅里叶变换, 得到接收面 $x'oy'$ 的频谱, 再进行傅里叶逆变换, 得到远场的复振幅分布为

$$U_2(x', y') = -\frac{i}{\lambda B} \exp(ik_0 Z) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_1(x, y) \times \exp\left\{\frac{ik_0}{2B} [A(x^2 + y^2) + D(x'^2 + y'^2) - 2(xx' + yy')]\right\} dx dy, \quad (3)$$

式中: Z 为发射面到接收面的传输距离; B 和 D 为 $ABCD$ 传输矩阵参数; (x', y') 为阵列光束传输后在接收面 $x'oy'$ 上的坐标。远场的强度分布为

$$I = U_2(x', y') \times U_2^*(x', y'), \quad (4)$$

式中: $*$ 表示取共轭。

2.3 倾斜可控阵列光场的空间扫描特征

为了进一步研究基于阵列光场的动态扫描技术的性能特征, 对其空间扫描特性 (包括扫描精度、扫描角度、衍射效率以及能量集中度) 进行了系统分析, 并进一步阐述了空间扫描特征与阵列排布、阵列特征参数

和相位控制模型之间的关系。

2.3.1 阵列设计与扫描精度的关系

阵列设计的重点一般在于阵列本身的尺寸大小、阵元的数量和阵列排布的紧密程度等方面。首先考虑前两个因素,在保持 D_0 大小一致的情况下,用不同数量的孔紧密填充该阵元面。图 2(a)~(c)所示分别为 19 路、127 路和 919 路光束填充的相干阵列,图 2(d)~(f)为对应的远场光强分布。相干阵列的扫描精度由光束的衍射极限($\delta\theta$)决定($\delta\theta = 1.22\lambda/D_0$,其中波长 λ 为 1064 nm)。由仿真结果可知,当保持 D_0 一致时,对于具有不同阵元数量的阵列,其扫描精度一致。但是,当阵元数量越少时,就需要越多的阵列经历越长的传输距离以达到同样的扫描精度,换句话说,阵元数

量越多,就可在越短的传输距离下达到需要的精度。由此可知,当 D_0 越大时,相干阵列在远场的扫描精度越高。例如:当 19 路、127 路和 919 路阵元面的 D_0 分别为 0.11、0.29、0.77 m 时,对应的扫描精度分别为 1.2×10^{-5} 、 4.5×10^{-6} 、 1.7×10^{-6} rad。该数据显示,阵元数量增加一个数量级,扫描精度也将提升一个数量级,可满足不同应用场合的需求。同时,通过比较图 2(a)~(c)中 19 路、127 路和 919 路相干阵列的远场光斑旁瓣分布特点可知,随着阵元数量的增多,旁瓣与中心主瓣的距离增加,有效避免了旁瓣对后续扫描效果的影响。大阵元的相干阵列在倾斜相位控制模型的作用下,既能提升扫描精度,又能避免旁瓣的影响,因此在动态扫描技术领域具有一定的应用优势。

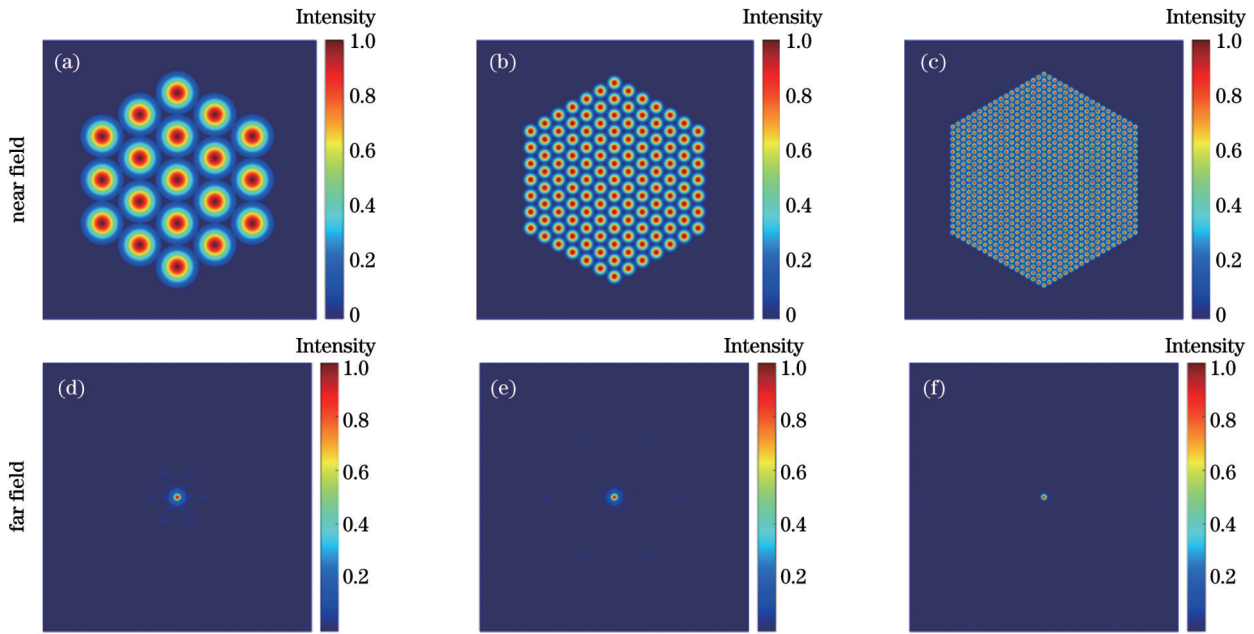


图 2 当 D_0 相同时,具有不同阵元数量的相干阵列的近场和远场的光强分布。(a)(d) 19 路;(b)(e) 127 路;(c)(f) 919 路

Fig. 2 Near-field and far-field light intensity distributions for coherent arrays with different numbers of array elements when D_0 is equal. (a)(d) 19 channels; (b)(e) 127 channels; (c)(f) 919 channels

进一步考虑阵列排布的紧密程度这一因素对扫描精度的影响,可利用面积填充因子(F)进行表征。面积填充因子为平铺子孔面积之和与总发射面面积之比,表达式为 $F = C'Nd^2/D_0^2$, C' 为常数, $C' = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}}$ 。

表 1 给出了具有不同 F (0.019、0.125、0.907) 的相干阵列的参数,分别对应于图 3(a)~(c)中的阵列分布模型,当径向结构参数(R)与 d 相等时,单元光束排布最为紧密。同时,图 3(d)~(f)则表现出旁瓣逐渐减弱的特点,但是扫描精度均保持一致。为了便于比较,保持 D_0 一致。由此可见,阵列排布的紧密程度不会影响扫描精度的大小,但是稀疏化的阵列将导致能量扩散,也降低了合成效率。因此,大阵元的相干阵列兼顾了扫描精度与能量聚焦的需求,提供了可靠的解决方案。

表 1 不同面积填充因子下的相干阵列参数

Table 1 Parameters of coherent array under different area filling factors

N	F	R/m	d/m	D_0/m
19	0.019	0.189	0.022	0.778
127	0.125	0.063	0.022	0.778
919	0.907	0.022	0.022	0.778

2.3.2 阵列设计与能量集中度的关系

为了进一步衡量相同 D_0 下不同路数阵列相干合成的能量集中度,选取光束传输因子(BPF)作为评判参数,定义 $F_{BPF} = 1.19(P/P_{total})$,其中 F_{BPF} 为光束传输因子, P 为远场半径 $1.22\lambda Z/D_0$ 内的桶中功率, P_{total} 为输出光束的总功率。由图 4(a)所示的 BPF 随阵元数量的变化曲线可知,在相同的扫描精度下,大阵元阵列

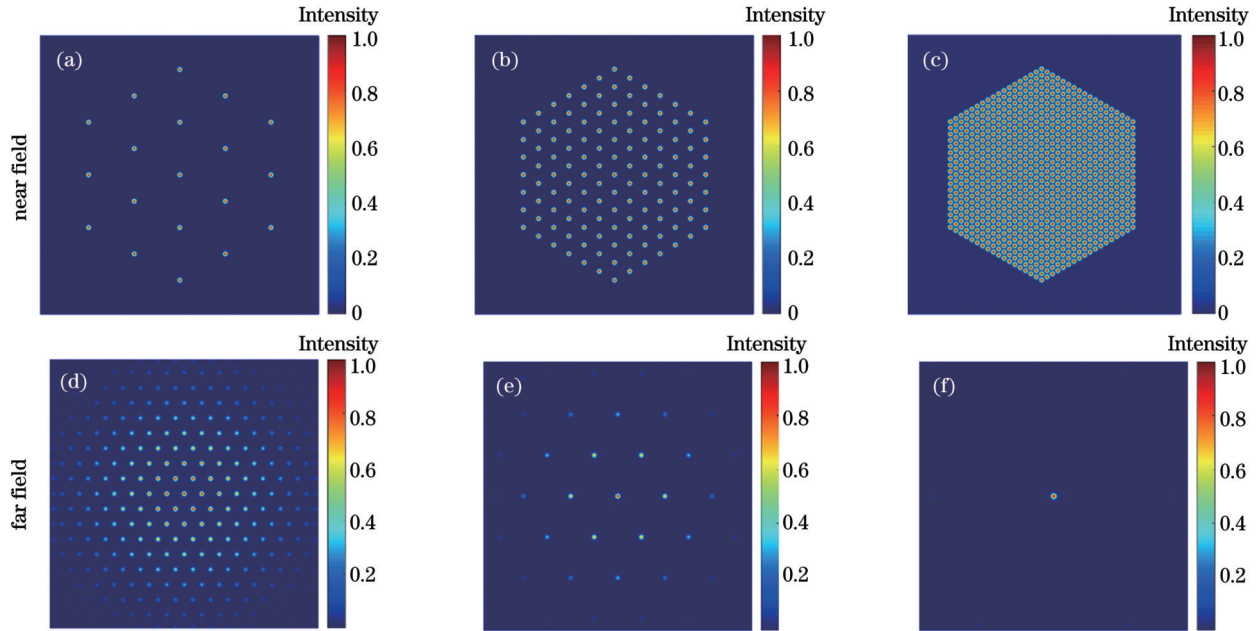


图 3 具有不同面积填充比的相干阵列的近场和远场的光强分布。(a)(d) 0.019; (b)(e) 0.125; (c)(f) 0.907

Fig. 3 Near-field and far-field light intensity distributions for coherent arrays with different area filling factors. (a)(d) 0.019; (b)(e) 0.125; (c)(f) 0.907

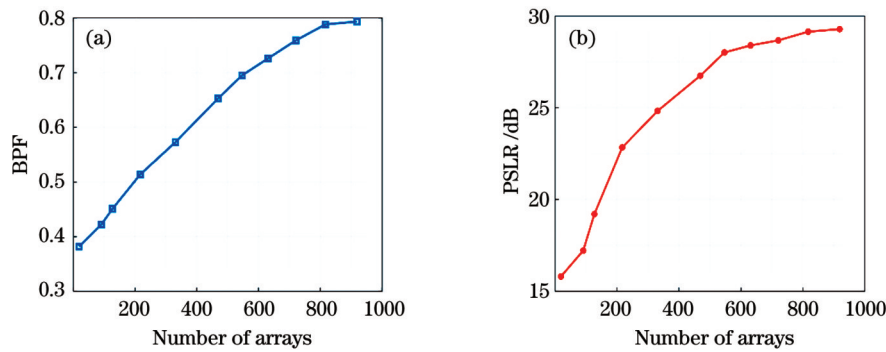


图 4 阵元数量与能量集中度的关系。(a)阵元数量与BPF的关系;(b)阵元数量与PSLR的关系

Fig. 4 Relationship between number of arrays and energy concentration. (a) Relationship between number of arrays and BPF; (b) relationship between number of arrays and PSLR

在远场聚焦光斑的能量集中度更高,其BPF值接近1。同时,利用峰值旁瓣比(PSLR)对能量集中度进行表征,定义 $R_{\text{PSLR}} = 20 \cdot \lg(I_m/I_s)$, 其中 R_{PSLR} 为峰值旁瓣比, I_m 为主瓣峰值能量, I_s 为旁瓣峰值能量。由图 4(b) 所示的 PSLR 随阵元数量的变化曲线可知,大阵元阵列同样表现出更高的峰值旁瓣比,即旁瓣的影响更小。从图 4 所示的两条曲线的变化趋势来看,当阵元数量越多时, BPF 的变化越明显,而 PSLR 的变化趋于平缓。这是因为 BPF 主要衡量的是某一范围内的能量集中度,而 PSLR 主要是对主瓣和旁瓣的峰值进行对比。由此可见,在基于阵列光场的动态光束扫描系统中, BPF 对光束质量和能量集中度的评价更为准确。

2.3.3 倾斜相位控制模型与扫描角度、衍射效率的关系

为了进一步说明阵列光场的扫描空间特征,图 5(a)、(b) 分别给出了远场扫描角度和衍射效率的特点。随

着单个锯齿状倾斜相位对应的最大光程差的增大,波前等相位面的倾斜角度增大,意味着扫描角度增大。图 5(a) 仅给出了最大光程差在 10λ 范围内时对应的扫描角度,理论上该相位调制方式所能达到的扫描角度可以更大。在实际应用中,需要移相器件的分辨率较高,才能获得较大的扫描范围。值得一提的是,在倾斜相位控制模型中,阵元数量和阵元排布方式都不会影响扫描角度。

同时,衍射效率作为评判扫描效果的参数之一,表示某一角度的衍射光强和入射光强的比值。在不考虑大气湍流等外界影响的理想条件下,由图 5(b) 可知,采用倾斜相位调控方式实现的远场光束扫描,其衍射效率接近 1,说明在扫描过程中能量损耗较小。相比之下,活塞相位的衍射效率具有随扫描角度的增加而递减的规律,因此在远场扫描过程中容易造成能量不均匀的问题。

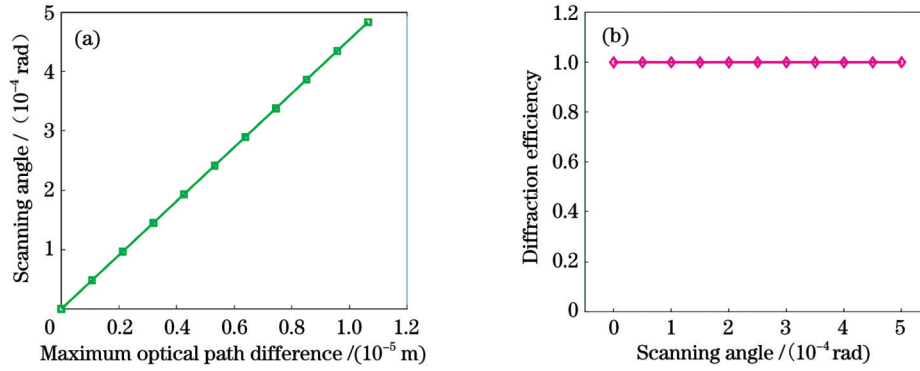


图 5 阵列光场的扫描角度和衍射效率。(a)最大光程差和扫描角度间的关系;(b)理想状态下扫描角度和衍射效率间的关系

Fig. 5 Scanning angles and diffraction efficiencies of array light field. (a) Relationship between maximum optical path difference and scanning angle; (b) relationship between diffraction efficiency and scanning angle under ideal conditions

3 分析与讨论

依据上述倾斜可控相干阵列的正六边形排布方式、相位控制模型及阵列光场的空间扫描特征等理论研究成果,进一步分析了加载倾斜相位后远场任意位置的单点扫描过程、二维准连续扫描过程和后

续定制图案扫描效果,选取了 19 路、127 路、919 路三种典型的相干阵列模型进行对比研究,其对应的近场光强分布如图 6 所示。所选用的阵列参数如表 2 所示, λ 为 1064 nm, w_0 为 0.01 m, d 为 0.022 m, 因此所对应的 19 路、127 路和 919 路的 D_0 分别为 0.11、0.29、0.77 m。

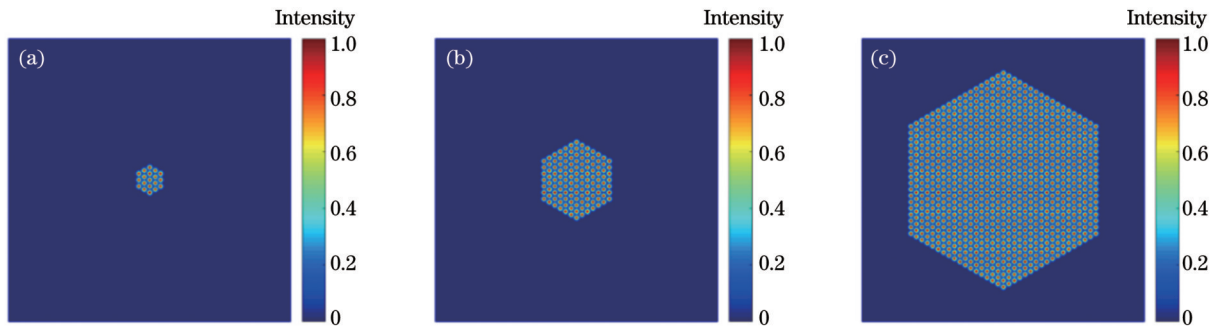


图 6 具有不同阵元数量的正六边形激光相干阵列的近场光强分布。(a)19 路;(b)127 路;(c)919 路

Fig. 6 Near-field light intensity distributions of regular hexagonal coherent laser arrays with different numbers of array elements. (a) 19 channels; (b) 127 channels; (c) 919 channels

表 2 激光相干阵列参数

Table 2 Parameters of laser coherent arrays

N	λ /nm	w_0 /m	d /m	D_0 /m
19	1064	0.01	0.022	0.11
127	1064	0.01	0.022	0.29
919	1064	0.01	0.022	0.77

3.1 倾斜可控相干阵列单点扫描

首先给出 19 路相干阵列的单点扫描过程。根据表 2 给出的 λ 、 w_0 和 d 等具体参数,设定接收面与发射面间的距离为 1000 m,通过在发射面加载不同的倾斜相位来实现光束扫描。图 7(a)~(d)所示分别为不同偏转角度下发射面光场的相位分布,该相位分布对水平偏转角 α 和俯仰角 β 产生影响,从而光斑在目标平面光场内的位置发生变化[图 7(e)~(h)]。图 7 给出了以下四种组合: $\alpha = -1 \times 10^{-4}$ rad, $\beta = 0$; $\alpha = 0$,

$\beta = -1 \times 10^{-4}$ rad; $\alpha = -1 \times 10^{-4}$ rad, $\beta = -1 \times 10^{-4}$ rad; $\alpha = -1 \times 10^{-4}$ rad, $\beta = 1 \times 10^{-4}$ rad。对应二维平面上的光斑沿中心逆时针旋转 $0, \pi/2, \pi/4$ 和 $-\pi/4$, 该旋转角可定义为 $\gamma = \arctan(\beta/\alpha)$ 。根据空间扫描角度的近似式 $\theta = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$ 可知,图 7(e)、(f)中光斑分别沿 x 轴和 y 轴偏转了 -1×10^{-4} rad, 图 7(g)中光斑沿 $y = x$ 轴偏转了 1.41×10^{-4} rad, 图 7(h)中光斑则沿 $y = -x$ 轴偏转了 1.41×10^{-4} rad。图 8 和图 9 分别给出了 127 路和 919 路激光相干阵列的单点扫描过程,其变化规律与 19 路激光相干阵列基本一致。从单个光斑形态来看,当阵元数量增多时,光斑周围的旁瓣逐渐弱化且远离中心主瓣,旁瓣的影响较小,扫描精度得到提升,该结论在 2.3 节中已进行详细讨论。

3.2 倾斜可控相干阵列的二维准连续扫描

上述结果说明,激光相干阵列在加载倾斜相位的情况下可实现任意位置的光束偏转,这也进一步说明,

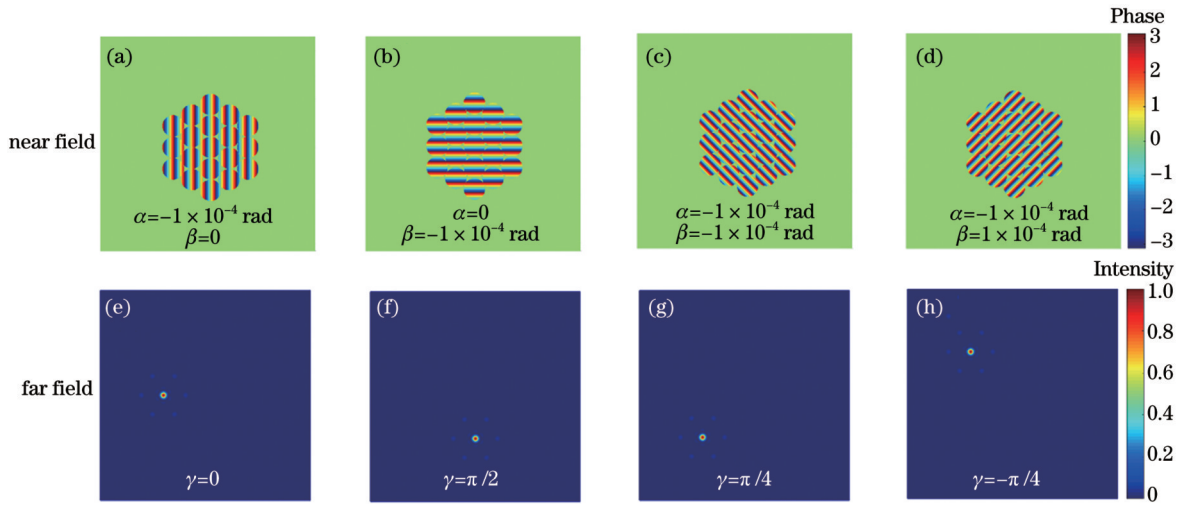


图 7 当 $N=19$ 时相干阵列在不同偏转条件下的近场相位分布图和对应的远场扫描点的强度分布图

Fig. 7 Near-field phase distributions and intensity distributions of corresponding far-field scanning points for coherent array under different deflection conditions when $N=19$

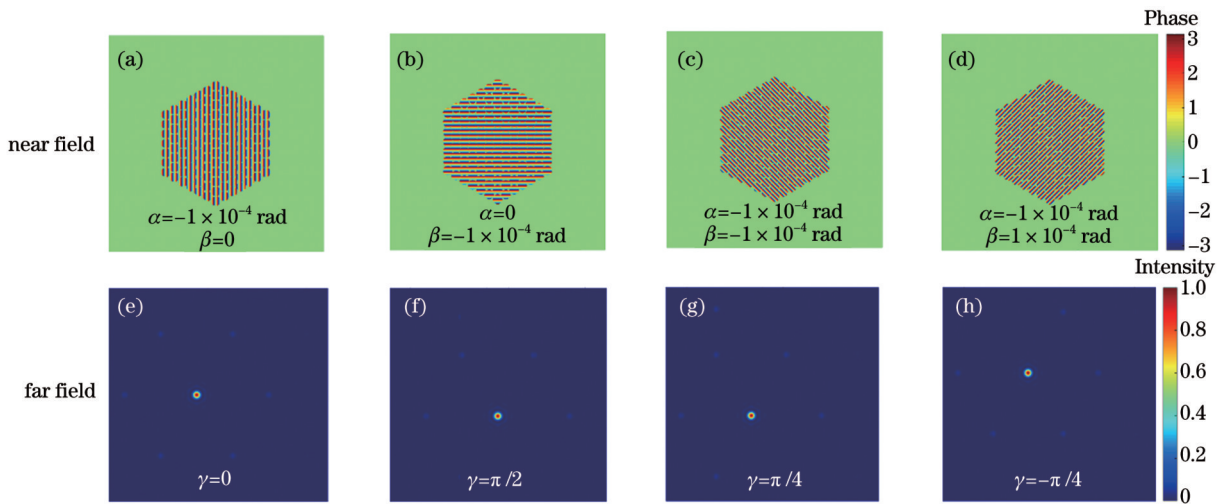


图 8 当 $N=127$ 时相干阵列在不同偏转条件下的近场相位分布图和对应的远场扫描点的强度分布图

Fig. 8 Near-field phase distributions and intensity distributions of corresponding far-field scanning points for coherent array under different deflection conditions when $N=127$

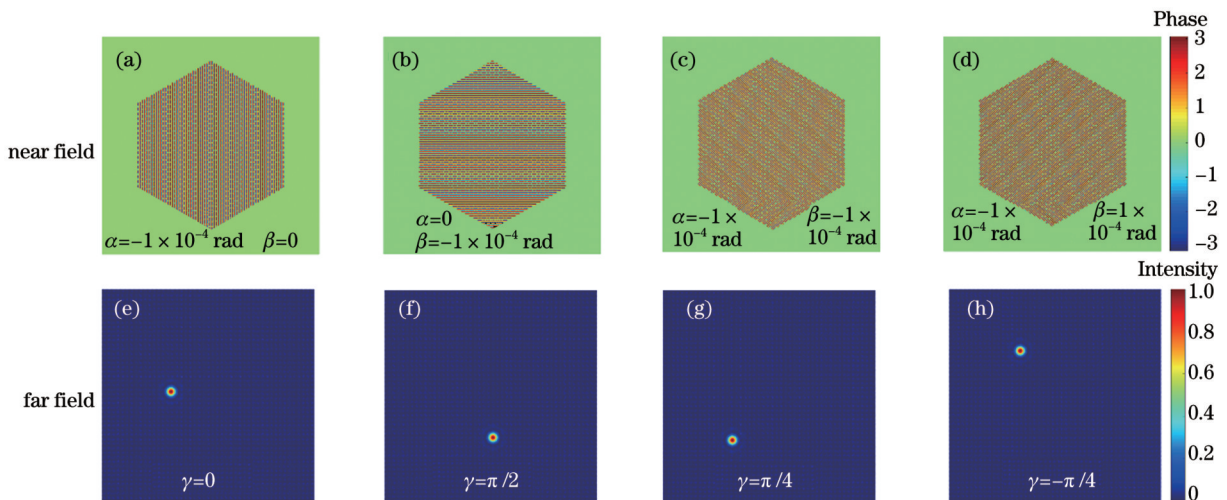


图 9 919 路相干阵列在不同偏转条件下的近场相位分布图和对应的远场扫描点的强度分布图

Fig. 9 Near-field phase distributions and intensity distributions of corresponding far-field scanning points for coherent array under different deflection conditions when $N=919$

如果倾斜相位以一定规律连续变化,那么远场光束的空间扫描角度也可以实现准连续变化,在接收面便能实现二维准连续扫描。由于子孔所加载的倾斜相位与空间扫描角度之间呈现线性关系,而空间扫描角度又可分解为水平偏转角与俯仰角,故通过设置水平 x 轴和垂直 y 轴方向的光程差 L_x 和 L_y ,可对直线形的二维准连续扫描进行控制。图 10 分别展示了 19 路 [图 10(a)~(d)]、127 路 [图 10(e)~(h)] 和 919 路 [图 10(i)~(l)] 相干阵列的远场光斑沿 x 、 y 、 $y=x$ 和 $y=-x$ 轴的准连续扫描图。可以发现,阵元数量

的大小不会影响整个扫描过程中的衍射效率、能量均匀性以及扫描范围,其中能量均匀分布的特点也与衍射效率为 1 的特征相吻合。但随着子阵元数量的增多,远场聚焦的扫描光束能量将变高,这意味着该阵列可在更远的距离下实现较好的扫描效果。同时,为了获得准连续扫描效果,须增加子阵元数量,则需要的采样点更多,同样说明增大阵元面积时对应的扫描精度将提升。虽然中心亮斑周围还有一些旁瓣存在,但相比中心扫描区域的能量,其可以忽略;并且随着阵列内阵元数量的增加,旁瓣与中心亮斑间的距离逐渐增大,降低了旁瓣的干扰程度。

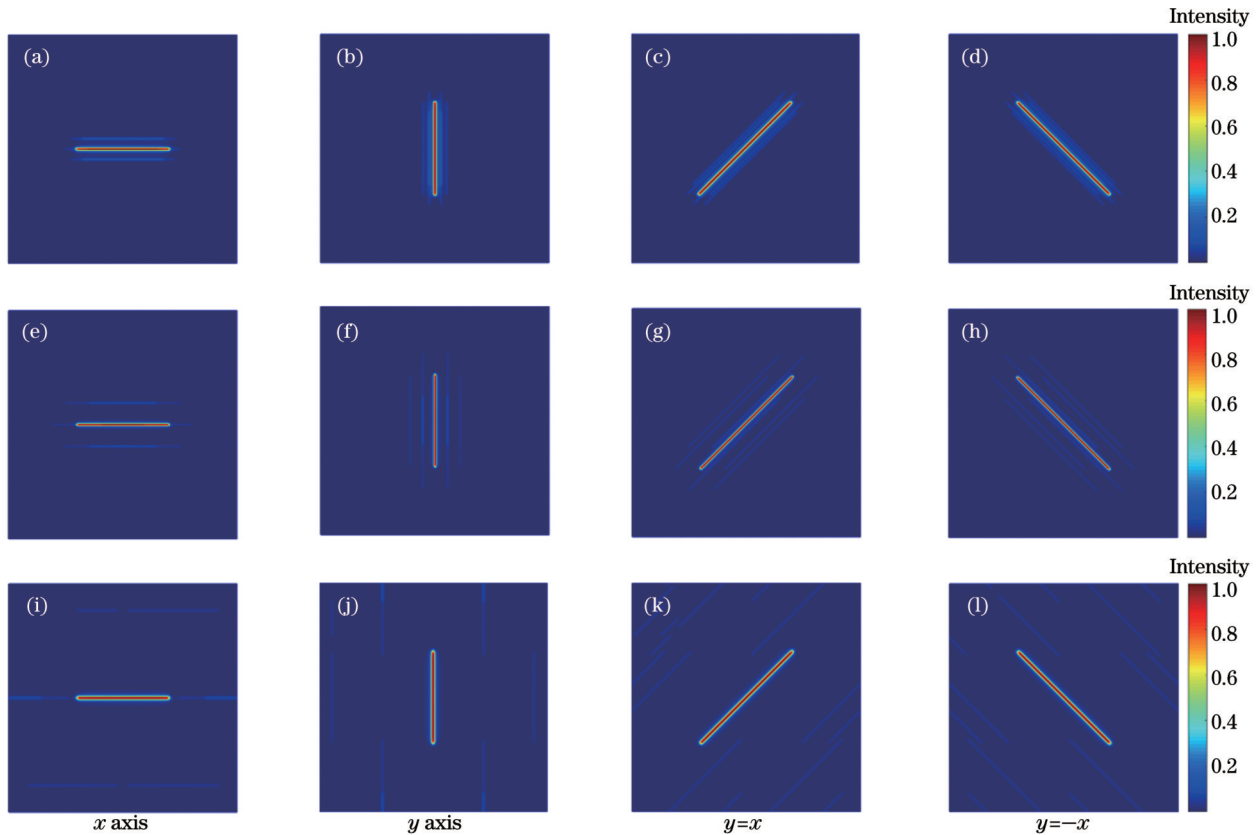


图 10 不同 N 下相干阵列的准连续扫描图案。(a)~(d) $N=19$; (e)~(h) $N=127$; (i)~(l) $N=919$

Fig. 10 Quasi-continuous scanning patterns of coherent array under different N . (a)~(d) $N=19$; (e)~(h) $N=127$; (i)~(l) $N=919$

3.3 倾斜可控相干阵列的光场图案定制

除了直线这类简单的二维准连续光束扫描图案,根据特定光场图案对应的路径,对所需要的倾斜相位进行计算,通过切换计算生成的倾斜相位分布,对每一帧的图像进行积分,便可得到光束扫描的最终效果。以图 11 所示的曲线扫描为例,通过路径设计推算出每个点位的倾斜相位,从而得到不同样式的字母。当利用同一阵列生成不同图案时,规则图形具有均匀的能量分布,表现出光滑的曲线效果(如“S”“W”),而某些不规则的图形由于旁瓣的干扰,出现局部能量偏高的区域(如“B”)。对比由不同阵列生成的相同图案,发现随着阵元数量的增加,旁瓣干扰弱化,总体能量逐渐增强,图案显示出更为清晰的轮廓。

由此可见,相比活塞相位调控的方式,加载倾斜相位在定制复杂光场图案时有比较突出的优势。首先,避免了扫描角度的限制,可在大范围内进行图案定制,具有较大的操作空间;其次,由于衍射效率不随扫描角度变化,故可在远场获得能量分布均匀的扫描图案,光束扫描效果得到优化;最后,在增加阵列元数量的前提下,可实现精度更高的准连续寻址效果,同时减小旁瓣干扰。后续需要继续关注图案拼接交界处的能量叠加、扫描过程中采样点的个数、旁瓣的干扰以及非规则图形的相位设计等,从而进一步优化复杂图案的光场定制效果。

3.4 系统误差对倾斜调控相干阵列扫描性能的影响

根据以上结果可知,通过倾斜相位调控能够实现

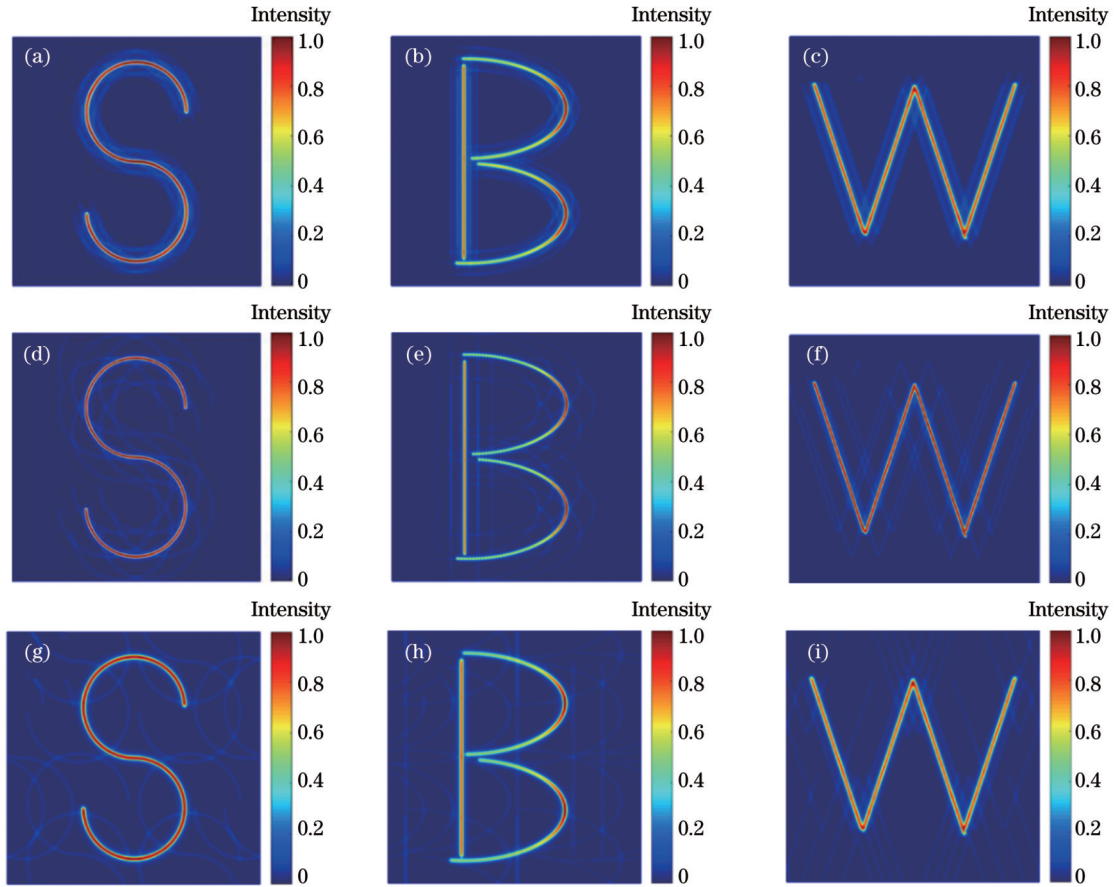


图 11 倾斜可控相干阵列生成的光场图案定制。(a)~(c) $N=19$; (d)~(f) $N=127$; (g)~(i) $N=919$

Fig. 11 Customization of optical filed patterns generated by tilting phase-controlled coherent laser arrays. (a)~(c) $N=19$; (d)~(f) $N=127$; (g)~(i) $N=919$

相干阵列高效的连续扫描与灵活的光场图案定制。然而在实际系统中,系统的相位控制能力和单元光束的相干性难以达到理想水平,这会进一步影响光纤激光阵列的扫描性能,下面将详细分析相位误差和单元相干性对扫描性能的影响。

3.4.1 相位误差对扫描性能的影响

本小节采用方差值 σ_p^2 表示相位误差,研究了不同阵列路数下相位误差对激光阵列光强分布的影响。图 12 为阵元数量分别为 19、127 和 919 时激光阵列在不同相位误差下的光强分布图。可以看出,当相位误差不断增大时,背景噪声逐渐变强,中央主瓣的形态发生了明显的畸变。并且,随着阵元数量的增多,整体单点扫描图中旁瓣的影响减小。图 13 给出了 19 路、127 路和 919 路激光阵列的 BPF 随相位误差 σ_p^2 的变化曲线, BPF 为相同 σ_p^2 取值下 50 组随机相位得到的平均结果。可以发现,当相位误差增大时,光束质量明显呈现下降趋势,同时相位误差对阵元数量大的激光阵列的影响增大。这是因为阵元数量越多,各阵元实现同步相位控制的难度也会越大。

在上述研究基础之上,进一步研究了不同相位误差影响下激光阵列的二维准连续扫描效果。图 14(a1)~(a4) 所示分别为 19 路激光阵列在相位误差 σ_p^2 为 0.3、0.6、1.0、1.5 rad 时的二维准连续扫描图样。随着相位误差的增大,背景噪声逐渐增强并呈现出覆盖信号光强的趋势,而中心主瓣形成的扫描点也逐渐偏离水平直线的位置,能量均匀性进一步降低。图 14(b1)~(b4) 和图 14(c1)~(c4) 分别给出了 127 路和 919 路激光阵列的二维准连续扫描效果,也存在相位误差增大时背景噪声增强的现象。但是,与 19 路激光阵列相比,随着阵元数量的增加,相位误差对整体扫描点的偏移量和能量均匀性的影响较小。由此可以说明,在相位误差的影响下,大阵元相干阵列在保持扫描性能方面具有一定的优势。

3.4.2 单元相干性对扫描性能的影响

为了进一步研究单元相干性对扫描性能的具体影响,首先给出相关理论。根据相位屏法可知,相干合成的部分相干阵列光束在发射平面上的光场分布^[24]为

$$U(x, y, 0; M) = \sum_i^N \sqrt{\frac{2P}{\pi w_0^2}} \exp \left[-\frac{(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2}{w_0^2} \right] \exp [i\xi_n(x, y; M)], \quad (5)$$

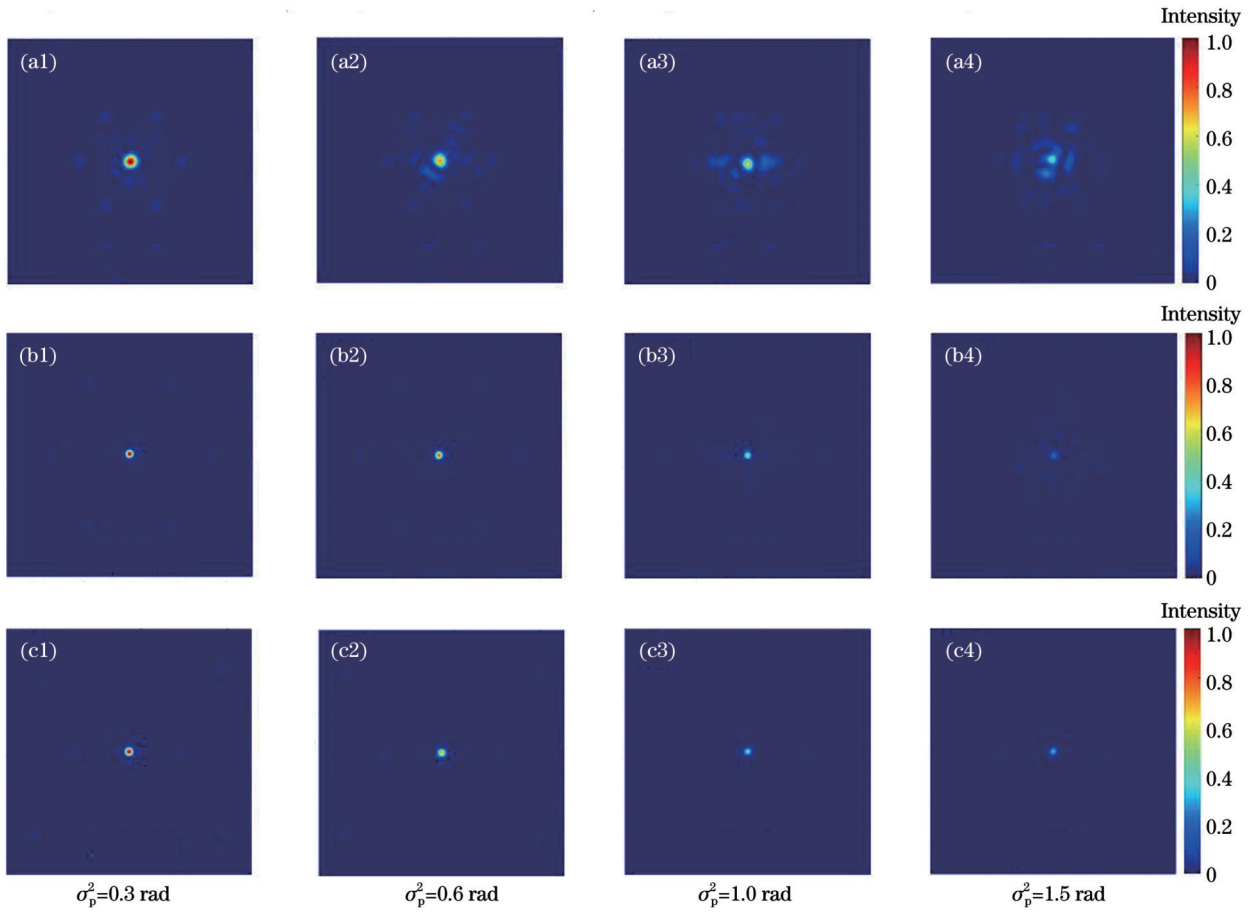


图 12 激光阵列在不同相位误差情况下的远场光斑。(a1)~(a4) $N=19$; (b1)~(b4) $N=127$; (c1)~(c4) $N=919$
 Fig. 12 Far-field light spots of laser arrays under different phase errors. (a1)~(a4) $N=19$; (b1)~(b4) $N=127$; (c1)~(c4) $N=919$

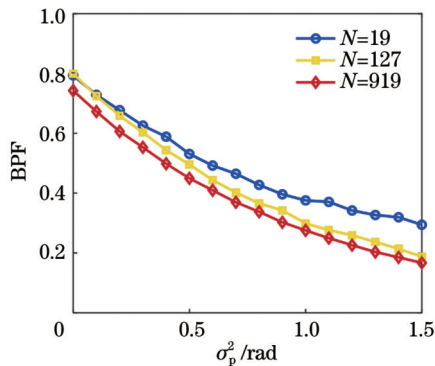


图 13 不同激光阵列的 BPF 和相位误差的关系
 Fig. 13 Relationship between BPF and phase error for different laser arrays

式中: P 为子光束的功率; $\xi_{n'}(x, y; M)$ 为第 n' 个子光束生成的第 M 个相位屏。通过叠加多个随机变化的振幅和相位分布即相位屏, 可以改变整个阵列的相干性。

随机相位屏的模型为 $\xi(x, y; t) = r(x, y; t) \otimes f(x, y)$ 。其中: $r(x, y; t)$ 为空间不相关的随机信号, 标准差为 σ_r ; $f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_f^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_f^2}\right)$ 为高斯函数, 标准差为 σ_f ; σ_r 和 σ_f 满足关系式 $l_c^2 = \frac{16\pi\sigma_f^4}{\sigma_r^2}$, l_c 表示

光场的相干度, l_c 越大, 意味着相干性越好, 完全相干光满足 $l_c \rightarrow \infty$ 。

根据以上理论模型, 图 15(a) 展示了 19 路激光阵列在不同 l_c 取值下 BPF 的变化曲线, 同时给出了相干度 l_c 取值为 0.2、0.3 和 1.6 时的单点偏转扫描仿真结果。随着单元相干性的增强, BPF 呈现增长趋势, 远场光束质量得到提升。当光场相干度 l_c 的取值超过 0.4 时, BPF 的增长趋于平缓, 由此可见单元相干性的影响范围较小。图 15(b) 则给出了 l_c 取值为 0.2、0.4 和 0.8 时 19 路激光阵列在不同扫描角度下的 BPF 曲线, 计算可得三条曲线的变化幅度分别为 0.25%、0.14% 和 0.08%。可以看出, 在相干度较差的情况下, 扫描角度的变化会导致 BPF 出现一定的波动, 但总体变化幅度较小。因此, 单元相干性对于扫描效果的影响较小, 但是整体扫描性能随着单元相干性的增强而得到改善。

3.5 倾斜可控相干阵列扫描效果的验证实验

为了进一步验证倾斜相位控制模型在相干阵列动态扫描技术中的应用效果, 搭建了图 16 所示的验证实验平台。所用种子源激光为线偏振光, 波长为 1064 nm, 输出光功率约为 30 mW, 由准直器准直。在振幅型 SLM (A-SLM) 上加载相干阵列的强度分

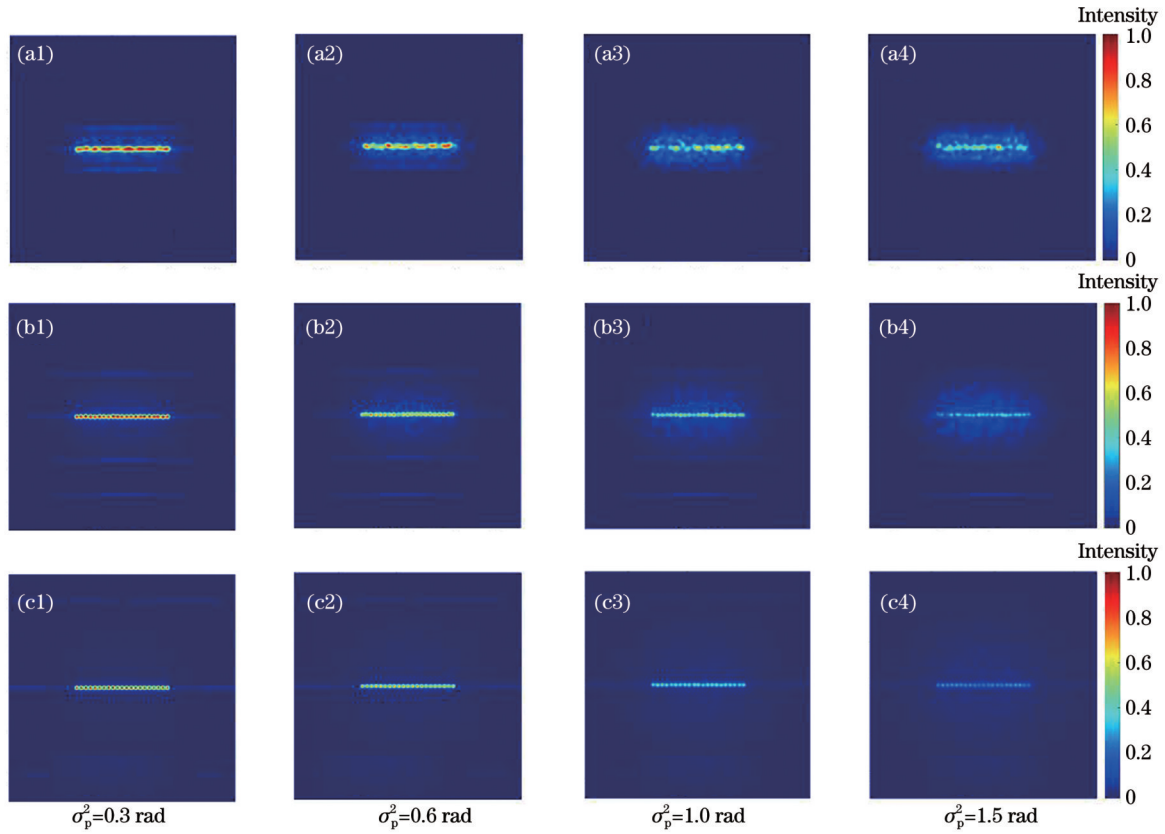


图 14 激光阵列在不同相位误差情况下的二维准连续扫描图样。(a1)~(a4) $N=19$; (b1)~(b4) $N=127$; (c1)~(c4) $N=919$
 Fig. 14 Two-dimensional quasi-continuous scanning patterns of laser arrays under different phase errors. (a1)–(a4) $N=19$; (b1)–(b4) $N=127$; (c1)–(c4) $N=919$

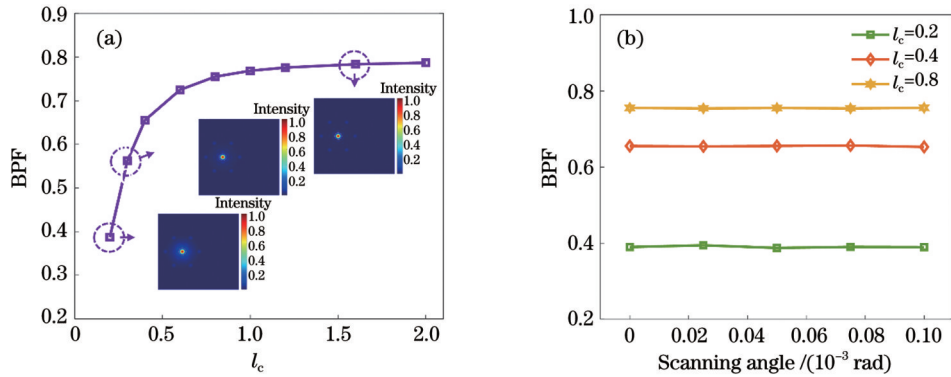


图 15 $N=19$ 时激光阵列单元相干性对扫描性能的影响。(a) 不同 l_c 下的 BPF 曲线; (b) 不同扫描角度下的 BPF 曲线
 Fig. 15 Influence of laser array unit coherence on scanning performance when $N=19$. (a) BPF curves under different l_c ; (b) BPF curves under different scanning angles

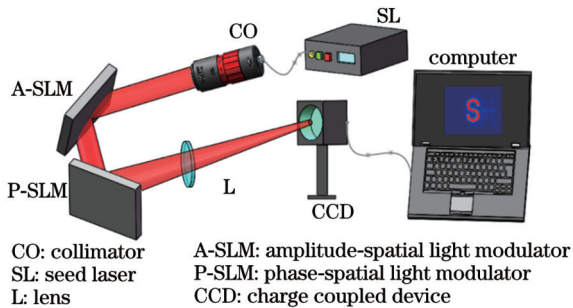


图 16 验证倾斜可控相干阵列扫描效果的实验装置图
 Fig. 16 Experimental device for verifying scanning effects of tilting phase-controlled coherent arrays

布,即 A-SLM 的主要作用是产生相干激光阵列;在相位型 SLM(P-SLM)上加载相应的倾斜相位分布,即 P-SLM 的主要作用是对相干激光阵列进行相位调制。准直后的种子源激光依次经过 A-SLM 和 P-SLM 调制,并被焦距为 1 m 的凸透镜聚焦,置于焦平面的电荷耦合器件(CCD)相机可捕捉到偏转光束形成的光斑。由于二维平面上的每一个扫描点都对应着一种相位分布情况,故为了获得特定的光场图案,需要根据设计路径提前解算出倾斜相位的分布信息,并在 P-SLM 上加载连续切换的相位分布,这样在长曝光模式下可在焦平面上获得积分光斑。由于该方法具有均匀扫描的特

点,故可以获得准连续的扫描图案。

图 17(a)~(d)给出了 19 路相干阵列的二维准连续直线扫描效果,该实验结果与图 10(a)~(d)所示的仿真结果基本一致,均表现出能量均匀分布的特点。由于扫描视场的限制,无法进行大范围的扫描效果验证,但是现有数据基本可以佐证倾斜相位控制模型在相干阵列动态扫描技术中的作用。同时,图 17(e)~

(g)所示的光场图案的实验结果和图 11(a)~(c)所示的理论仿真结果也吻合较好。对于“S”和“W”这类规则的图案,旁瓣对整体扫描效果的影响较小,因此能量分布更加均匀,线条也更为流畅;而“B”这类拐点多、曲率变化大的图案,旁瓣会导致能量分配或者能量叠加的问题,因此会造成局部能量分配不均,但总体上依旧能够保证较好的扫描效果。

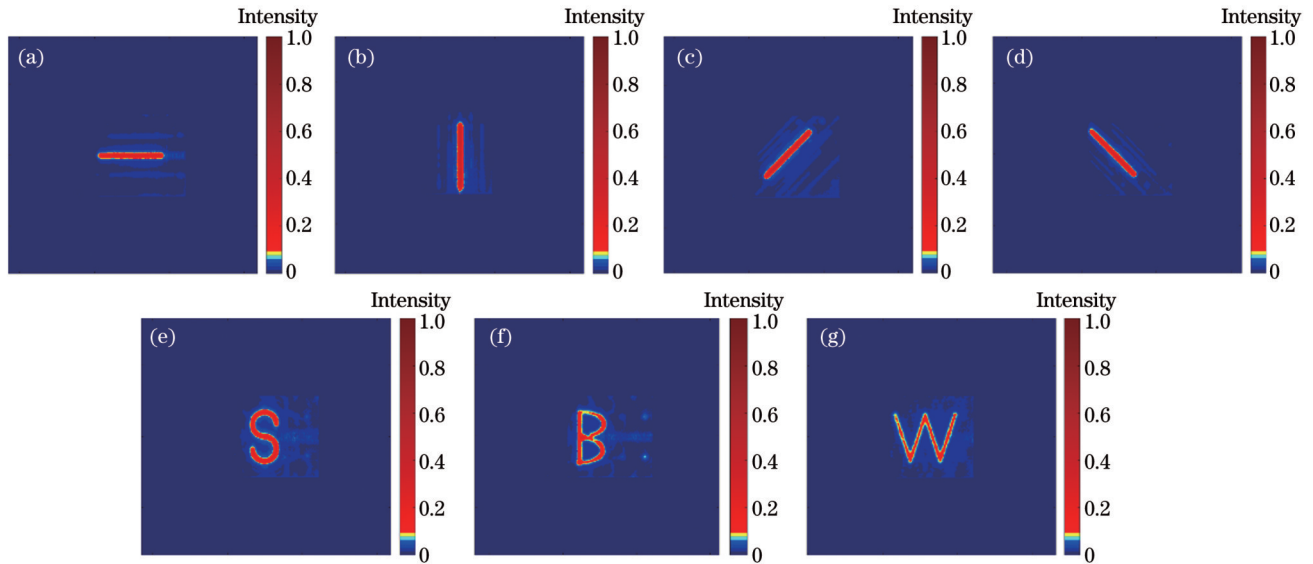


图 17 $N=19$ 时倾斜可控相干阵列扫描效果的验证实验结果

Fig. 17 Verification experiment results of scanning effects of tilting phase-controlled coherent arrays when $N=19$

4 结 论

利用倾斜波前调控的方法,对激光相干阵列的单个子孔加载连续变化的倾斜相位,实现了二维平面内任意位置的单点扫描、准连续扫描以及特殊光场图案的定制。倾斜可控相干阵列在理论上可达到衍射效率为 1、范围不受限的扫描效果,并且大阵元相干阵列能兼顾远场的光斑能量集中度和扫描精度。所提出的方法对非机械激光扫描技术具有的一定参考价值,后续将在减小旁瓣影响、实现任意光场图案定制和拓展相干阵列功能等方面开展进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Wu Y H, Shao S, Li Y X, et al. Multi-beam optical phase array for long-range LiDAR and free-space data communication[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 151: 108027.
- [2] Poulton C V, Byrd M J, Russo P, et al. Long-range LiDAR and free-space data communication with high-performance optical phased arrays[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(5): 7700108.
- [3] Liu D, Wang Y T, Zhai Z S, et al. Dynamic laser beam shaping for material processing using hybrid holograms[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 102: 68-73.
- [4] 马阎星, 吴坚, 栗荣涛, 等. 光学相控阵技术发展概述[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(10): 20201042.
Ma Y X, Wu J, Su R T, et al. Review of optical phased array techniques[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(10): 20201042.
- [5] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, et al. Large-scale nanophotonic phased array[J]. Nature, 2013, 493(7431): 195-199.
- [6] Hutchison D N, Sun J E, Doyle J K, et al. High-resolution aliasing-free optical beam steering[J]. Optica, 2016, 3(8): 887-890.
- [7] Wu L, Wang X R, He X X, et al. Arbitrary multiple beam forming by two cascaded liquid crystal optical phased arrays[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 17066-17077.
- [8] Shang X B, Tan J Y, Willekens O, et al. Electrically controllable liquid crystal component for efficient light steering[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(2): 2600113.
- [9] Zhang X Y, Koppal S J, Zhang R, et al. Wide-angle structured light with a scanning MEMS mirror in liquid[J]. Optics Express, 2016, 24(4): 3479-3487.
- [10] Errando-Herranz C, Le Thomas N, Gylfason K B. Low-power optical beam steering by microelectromechanical waveguide gratings[J]. Optics Letters, 2019, 44(4): 855-858.
- [11] 王晓斌, 刘春波, 刘如愿, 等. 一维光纤相控阵多光束快速扫描[J]. 中国激光, 2021, 48(17): 1705001.
Wang X B, Liu C B, Liu R Y, et al. High-speed multibeam steering of one-dimensional optical fiber phased array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 1705001.
- [12] Müller M, Aleshire C, Klenke A, et al. 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. Optics Letters, 2020, 45(11): 3083-3086.
- [13] Chang Q, Hou T Y, Long J H, et al. Experimental phase stabilization of a 397-channel laser beam array via image processing in dynamic noise environment[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(19): 6542-6547.
- [14] Hou T Y, An Y, Chang Q, et al. Deep-learning-based phase control method for tiled aperture coherent beam combining systems [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2019, 7(4): e59.
- [15] Hou T Y, An Y, Chang Q, et al. Deep-learning-assisted, two-

- stage phase control method for high-power mode-programmable orbital angular momentum beam generation[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(5): 715-722.
- [16] Gozzard D R, Roberts L E, Spollard J T, et al. Fast beam steering with an optical phased array[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3793-3796.
- [17] Geng C, Li X Y, Zhang X J, et al. Coherent beam combination of an optical array using adaptive fiber optics collimators[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(24): 5531-5536.
- [18] Wang X B, Liu C B, Cao Y, et al. High-precision two-dimensional beam steering with a 64-element optical fiber phased array[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(31): 10002-10008.
- [19] Weyrauch T, Vorontsov M, Mangano J, et al. Deep turbulence effects mitigation with coherent combining of 21 laser beams over 7 km[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(4): 840-843.
- [20] Shekel E, Vidne Y, Urbach B. 16 kW single mode CW laser with dynamic beam for material processing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11260: 1126021.
- [21] 周鑫, 邹凡, 姜佳丽, 等. 甚多孔径光纤激光相控阵的光束扫描特性研究[J]. *光电工程*, 2022, 49(7): 210414.
- Zhou X, Zou F, Jiang J L, et al. Research on beam steering of numerous sub-aperture fiber laser phased array[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, 49(7): 210414.
- [22] Yang X Y, Geng C, Li F, et al. High-resolution beam scanning technique with microlens array and adaptive fiber-optics collimator [J]. *Optics Express*, 2020, 29(1): 359-367.
- [23] Yang X, Huang G, Li F, et al. Continuous tracking and pointing of coherent beam combining system via target-in-the-loop concept [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(20): 1119-1122.
- [24] Zhang Y Q, Hou T Y, Chang H X, et al. Thermal blooming effect and the scaling laws of partial spatially coherent beam array propagating through the atmosphere[J]. *Results in Physics*, 2021, 26: 104444.

Two-Dimensional Scanning Technique Based on Light Field in Tilting Phase-Controlled Arrays

Shu Bowang^{1,2,3}, Zhang Yuqiu^{1**}, Chang Hongxiang^{1,2,3}, Chang Qi^{1,2,3}, Ma Pengfei^{1,2},
Leng Jinyong^{1,2}, Zhou Pu^{1*}

¹College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

²Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

³Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract

Objective Laser scanning technologies are applied into numerous fields, such as free space optical communication, LIDAR, laser processing, and remote imaging. Therefore, it is important in military equipment and industrial manufacturing. Currently, most laser scanning technologies are realized by silicon-based photo-electronics, liquid crystal spatial light modulator, micro electro mechanical system (MEMS), and coherent laser arrays, etc. Among them, coherent laser arrays are proved to be an efficient method for generating laser with high power, brightness, and beam quality. Owing to designable coherent laser arrays and flexible phase controlling algorithm, remarkable progress in scanning technologies has been realized. In 2022, Zhou *et al.* utilized constant piston phase differences between $-\pi$ and π to control the positions of far-field light spots, with limited maximum scanning angle and relatively low diffraction efficiency. In 2021, construction of quasi-continuous scanning system with the combination of micro-lens arrays and adaptive fiber optics collimators (AFOCs) was proposed. Such a system realizes controllable tilting-phase mainly by AFOCs. However, only experimental results of one-dimensional quasi-continuous scanning patterns are provided. Thus, it is urgent to study more possibilities in the customization of any light field patterns and determine the detailed scanning characteristics under the condition of huge coherent laser array to satisfy additional application requirements.

Methods The method of two-dimensional continuous scanning is mainly based on the regular hexagonal arrangement of coherent laser arrays. Then, the phase modulation mode is set as the sawtooth titling phase corresponding to maximum optical path differences, which belongs to a type of blazed grating phase-controlling mode. When the maximum optical path differences of adjacent sub-apertures increase, their phase differences increase, i.e., the tilting phase in single sub-aperture can sustain periodic change compared to constant piston phase. Therefore, the beam will deflect an angle of θ during transmission as the wavefront iso-phase surface tilts at a certain angle of θ .

Results and Discussions Using typical coherent laser arrays with 19, 127, and 919 sub-apertures shown in Fig. 6, simulated results of single scanning point locating at $\gamma = 0$, $\gamma = \pi/2$, $\gamma = \pi/4$, and $\gamma = -\pi/4$ are displayed in Figs. 7-9, respectively. Utilizing these single scanning points, two-dimensional quasi-continuous scanning can be realized along x , y , $y=x$, and $y=-x$ axes, as illustrated in Fig. 10. All patterns show clear outlines, evenly distributed energy, and a smooth curved effect. Owing to the advantages of this tilting phase-controlling model, specific scanning patterns (S, B, and W) are constructed by switching the distributed phase calculated in advance (Fig. 11). Barring the scanning patterns achieved by coherent laser arrays, spatial scanning characteristics are further studied. Owing to the linear relationships between the tilting phase and the scanning angles, the steering

angles of far-field beams continuously increase as the tilting phase experiences more periods. Thus, the scanning angles have no limitations under ideal conditions. Moreover, the scanning straight lines with average distributed energy indicate that near-unity diffraction efficiency can be achieved by tilting phase-controlled coherent laser arrays. Most importantly, the number of sub-apertures shows no influence on the diffraction efficiency, energy distribution, and scanning scope. With increasing number of sub-apertures, the scanning precision is improved owing to the larger caliber of coherent laser arrays. Although the grating lobes exist near the central bright spots, the increased sub-apertures can avoid the interferences to some extent because of long distances among them. Notably, the focused energy of far-field spots is higher as the number of sub-apertures increases, which is beneficial in obtaining scanning patterns with better performance.

Conclusions With the regulation of tilting wavefront, coherent laser arrays can realize periodical phase change within a single sub-aperture to achieve single scanning points at any position, quasi-continuous scanning, and customized specific optical field patterns in a two-dimensional plane. Compared to the piston phase-controlling model, the scanning characteristics of coherent laser array with the controlled tilting phase are optimized. First, the diffraction efficiency can reach one theoretically. Second, the scanning range is not limited under the ideal condition. Last, the far-field spot energy and scanning precision can be further improved by increasing the number of sub-apertures. This work can provide significant guidance in terms of fast optical field coverage and target tracking, and scanning technologies will develop towards direction of non-mechanical mode, large steering angle, high precision, and anti-interference. In future, more studies will be performed in this regard, including reducing the influence of gate lobe, realizing the customization of arbitrary optical field pattern, and expanding the function of coherent laser arrays.

Key words laser optics; laser arrays; coherent combination; tilting control; two-dimensional scanning; light field customization