

多阵元光纤相干列阵的理论实验研究

范馨燕^{1)†} 刘京郊¹⁾ 刘金生¹⁾ 武敬力²⁾

1) (哈尔滨工业大学可调谐激光国家重点实验室 哈尔滨 150001)

2) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2009 年 5 月 3 日收到; 2009 年 7 月 28 日收到修改稿)

基于 Fraunhofer 衍射理论, 建立了六角形相干列阵远场分布的理论模型, 采用 Strehl 比和能量集中度作为评价参数, 分析了列阵排列方式、振幅、填充因子对远场分布的影响. 并由爬山法相位控制技术和六棱台合束器, 构建了七阵元光纤相干列阵实验系统. 在 0.66 填充因子情况下, 获得了 Strehl 比为 0.70、能量集中度为 0.40 七阵元合成光束, 以及获得了能量集中度分别为 0.45 和 0.18 的二阵元线阵和四阵元矩形阵合成光束.

关键词: 相干合成, 填充因子, 能量集中度, Strehl 比

PACC: 4230K, 4255N

1. 引 言

将多台激光器进行相干合成输出是目前获得高功率、高亮度激光输出的主要技术途径. 相比于波长合成, 相干合成可同时实现功率和亮度的扩展. 光纤激光器的相干合成技术可分为主动式和被动式两大类. 主动式相干合成需要相位反馈控制电路, 以主振荡放大 (master oscillator power amplifier, 简记为 MOPA) 结构为代表^[1, 2]; 被动式相干合成有干涉仪合成、自组织合成、自 Fourier 腔合成以及倏逝波耦合合成等表现形式^[3]. MOPA 式结构的主动锁相相干合成由于易于实现输出功率和合成路数的扩展, 越来越受到研究者的关注.

主动式相干合成的理论模型主要有远场 Fraunhofer 衍射理论^[4]和 Gauss 光束传输理论^[5], 但都集中在二维线阵和二维方阵^[6]的理论分析上, 对远场相干特性也大都研究一维二路^[7]或三路线阵^[8]. 本文采用远场 Fraunhofer 衍射理论, 推出了二维六角形列阵的远场分布, 并分析了列阵排列方式、振幅、填充因子及相位差对远场分布的影响. 采用爬山法相位控制技术和六棱台合束器构建了七阵元光纤相干列阵, 由填充因子 0.66, 获得了能量集中度为 0.40 的远场合成光束. 并研究了两阵元一维线阵和四阵元二维方阵的远场分布, 远场能量集

中度分别为 0.45 和 0.18.

2. 相干合成系统的评价方法与相关参数

目前对相干合成系统的输出光束的评价参数主要有 Strehl 比^[9]、桶中功率^[10]、光束传输因子^[11]、能量集中度. 其中, Strehl 比定义为实际相干合成列阵的远场中心峰值光强与相同总功率、均匀分布相同孔径时的中心峰值光强的比值. 设半径为 R 的圆形激光器列阵 A 的复振幅分布为 $\hat{a}(r, \theta) = a(r, \theta) \exp[j\phi(r, \theta)]$, 该列阵的总功率为

$$P = \int_0^{2\pi} \int_0^R |a(r, \theta)|^2 r dr d\theta. \quad (1)$$

则相同功率 P 、均匀分布相同孔径的激光器列阵 B 的振幅分布为

$$\bar{a} = \sqrt{\frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R |a(r, \theta)|^2 r dr d\theta}. \quad (2)$$

列阵 A 和 B 的光强分布为

$$\begin{aligned} I_A(r=0, z) &= \frac{1}{(\lambda z)^2} \left| \int_0^{2\pi} \int_0^R a(r, \theta) \exp[j\phi(r, \theta)] r dr d\theta \right|^2, \quad (3) \\ I_B(r=0, z) &= \frac{1}{(\lambda z)^2} \\ &\times \left| \int_0^{2\pi} \int_0^R \sqrt{\frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R |a(r, \theta)|^2 r dr d\theta} \right|^2 \end{aligned}$$

† E-mail: fanshong_02@yahoo.com.cn

$$\times \rho d\rho d\varphi \Big|^2. \quad (4)$$

这样 Strehl 比 S 可表示为

$$S = \frac{I_A(r=0, z)}{I_B(r=0, z)} = \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^R a(r, \theta) \exp[j\phi(r, \theta)] r dr d\theta \right|^2}{\pi R^2 \int_0^{2\pi} \int_0^R |a(r, \theta)|^2 r dr d\theta}. \quad (5)$$

另外, 定义振幅分布的均值为

$$\overline{\hat{a}(r, \theta)} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R \hat{a}(r, \theta) r dr d\theta, \quad (6)$$

均方为

$$\overline{|\hat{a}(r, \theta)|^2} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R |\hat{a}(r, \theta)|^2 r dr d\theta. \quad (7)$$

则 Strehl 比也可表示为

$$S = \overline{|\hat{a}(r, \theta)|^2} / \left| \overline{\hat{a}(r, \theta)} \right|^2. \quad (8)$$

桶中功率 (power in bucket, 简记 PIB) 定义为在远场给定尺寸的“桶”中围住的激光功率占总功率的百分比. 可表示为

$$r_{PIB} = \frac{\int_0^b I(r, z) r dr}{\int_0^\infty I(r, z) r dr}, \quad (9)$$

其中 $I(r, z)$ 为远场 z 处的光强分布, b 为“桶”的半径. $0 \leq r_{PIB} \leq 1$, r_{PIB} 越大, 表征光束质量越好.

光束传输因子 (beam propagation factor, 简记为 BPF) 定义为给定远场孔径内所含的光功率与合成光束的有效近场孔径内总功率的比值. 远场孔径定义为 $A_{DL} = (\pi/4) (\theta_{DL})^2$, 其中 $\theta_{DL} = 2.44\lambda/D$, D 是合成光束的有效孔径. BPF 反映了给定尺寸内 (通常是主瓣) 所含的能量.

能量集中度定义为远场主瓣所含能量与总能量之比, 表示为

$$\text{能量集中度} = \frac{E_{\text{主瓣}}}{E_{\text{总}}} = \frac{\int_{-\omega_c}^{\omega_c} I(r, z) r dr}{\int_{-\infty}^{+\infty} I(r, z) r dr}, \quad (10)$$

其中, ω_c 为远场中心主瓣宽度, 主瓣宽度定义为中心点峰值光强的 $1/e^2$ 处两点的光斑直径.

以上四个参数从不同角度对相干合成效果进行了评价. 光束传输因子和桶中功率反映了远场光束中能量分布的比例, “远场孔径”的理论公式就是远场主瓣宽度, 常用的“桶”也是远场主瓣宽度, 两者都关注于中心主瓣所含能量的百分比, 但在实际相干合成系统中, 实际中心主瓣并非理想“远场孔

径”公式计算的结果. 更重要的是, 在 MOPA 结构的相干合成系统中, 输出光束仅在远场平面, 即透镜焦平面上才体现相干合成效果, 在实验中很难精确测量出“桶”或“远场孔径”中的功率. 而能量集中度明确指出了“远场中心主瓣”占总能量的比值, 通过对远场光束的 CCD 图样进行灰度处理即可得出主瓣能量占总能量的比值, 在理论分析和实验系统中均具有可操作性, 可以更客观、更科学地评价相干合成效果. Strehl 比侧重描述中心点的峰值光强, 很好地反映了整个合成光学系统的像差及相位控制精度等. 因此, 本文采用“能量集中度”参数来分析阵列排列方式和填充因子对远场分布的影响, 在分析振幅和相位的影响时, 则采用“Strehl 比”这个评价参数.

3. 多阵元相干合成阵列参数对合成效果的影响分析

3.1. 六角形相干阵列

六角形光纤阵列排列结构如图 1 所示. 六角形阵列是最接近于圆形阵列的二维阵列, 相比于其他排列方式阵列, 在相同的区域内能容纳最多的阵元数. 图 1 中的阵列含有 N 个阵元, 子阵元的光束半径为 ω_0 , 阵元间距为 d . 设 m 为六角形阵列的环数, n 是第 m 层环上的阵元数. 由阵列理论可以得出

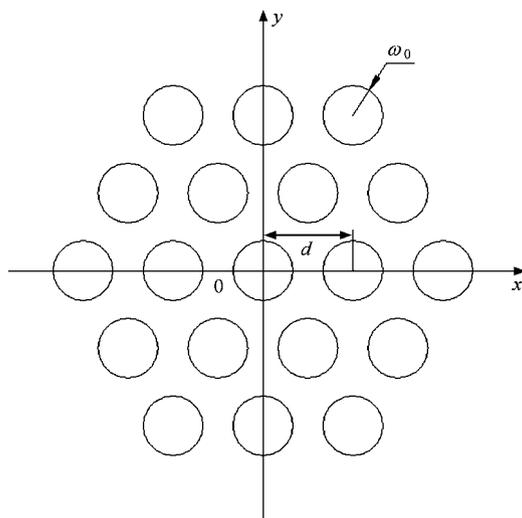


图 1 六角形阵列分布图

阵元的坐标 (x_{mn}, y_{mn}) 为

$$x_{mn} = md \cos \left[(n-1) \frac{2\pi}{6m} \right],$$

$$y_{mn} = md \sin \left[(n-1) \frac{2\pi}{6m} \right]. \quad (11)$$

阵元数可以表示为

$$N = 1 + \sum_{m=1}^M 6m. \quad (12)$$

设各子阵元出射光束的振幅均服从理想 Gauss 分布, 则输出平面的场分布可表示为

$$U(x, y) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=1}^{6m} A_{mn} \exp \left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2} + i\phi_{mn} \right) \times \delta(x - x_{mn}, y - y_{mn}), \quad (13)$$

其中 A_{mn} 为振幅, ϕ_{mn} 为初始相位, $*$ 为卷积算符.

由 Fraunhofer 衍射理论可知, 远场场分布可用输出平面场分布的 Fourier 变换表示^[4, 6, 12], 于是有

$$I(\theta_x, \theta_y) \propto \left| \sum_{m=0}^M \sum_{n=1}^{6m} A_{mn} \times \exp \{ j [k(x_{mn}\theta_x + y_{mn}\theta_y) - \phi_{mn}] \} \right|^2 \times \exp \left[-\frac{k^2 \omega_0^2}{2} (\theta_x^2 + \theta_y^2) \right], \quad (14)$$

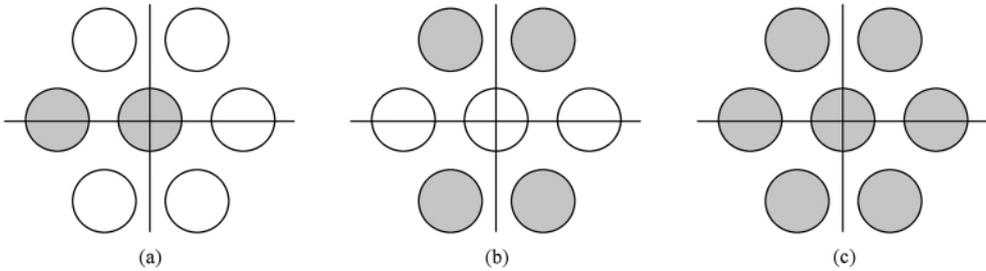


图 2 不同排列结构的列阵 (a) 二阵元一维线阵, (b) 四阵元二维矩形阵, (c) 七阵元六角形阵

$$I(\theta_x, \theta_y) \propto \left| \exp \left[ik \left(d \cos \frac{\pi}{3} \theta_x + d \sin \frac{\pi}{3} \theta_y \right) \right] + \exp \left[ik \left(-d \cos \frac{\pi}{3} \theta_x + d \sin \frac{\pi}{3} \theta_y \right) \right] + \exp \left[ik \left(-d \cos \frac{\pi}{3} \theta_x - d \sin \frac{\pi}{3} \theta_y \right) \right] + \exp \left[ik \left(d \cos \frac{\pi}{3} \theta_x - d \sin \frac{\pi}{3} \theta_y \right) \right] \right|^2 \times \exp \left[-\frac{k^2 \omega_0^2}{2} (\theta_x^2 + \theta_y^2) \right], \quad (16)$$

七阵元六角形阵的远场分布为

$$I(\theta_x, \theta_y) \propto \left| 1 + \sum_{n=0}^5 \exp \left\{ ik \left[m d \cos \left(n \frac{2\pi}{6} \right) \theta_x + m d \sin \left(n \frac{2\pi}{6} \right) \theta_y \right] \right\} \right|^2 \times \exp \left[-\frac{k^2 \omega_0^2}{2} (\theta_x^2 + \theta_y^2) \right]. \quad (17)$$

由上式可以看出, 远场光强分布包含了阵元的振幅、相位以及列阵的填充因子等信息. 因此, (14) 式可用来分析这些参数对远场分布的影响. 本文进行计算机仿真所用参数为, $\lambda = 1064 \text{ nm}$, $\omega_0 = 0.5 \text{ mm}$.

3.2. 多阵元列阵排列方式对合成效果的影响

不同列阵排列方式有不同的远场分布, 图 2 为三种典型列阵: 二阵元一维线阵、四阵元二维矩形阵和七阵元六角形阵. 设各子阵元振幅服从 Gauss 分布, 不考虑填充因子和相位的影响, 来分析这三种列阵的远场分布和能量集中度.

二阵元一维线性列阵的远场分布可以表示为

$$I(\theta_x, \theta_y) \propto \left| 1 + \exp(-ikd\theta_x) \right|^2 \times \exp \left[-\frac{k^2 \omega_0^2}{2} (\theta_x^2 + \theta_y^2) \right], \quad (15)$$

四阵元二维矩形阵的远场分布为

图 3 给出了上述三种列阵的远场分布, 并在图中标出了远场能量集中度. 仿真所选参数为, $\lambda = 1064 \text{ nm}$, $\omega_0 = 1.2 \text{ mm}$, $d = 3.6 \text{ mm}$. 由图中可以看出, 远场旁瓣的分布结构与近场分布结构相同; 一维线阵主瓣所含能量最大, 具有最高的能量集中度; 六角形列阵的能量集中度次之. 虽然四种列阵的阵元数略有不同, 但是阵元数越多, 远场能量集中度越低, 在阵元数最多的情况下, 七阵元列阵仍有较高的远场能量集中度, 也因此将六角形列阵作为本文的主要研究列阵类型.

3.3. 振幅对合成效果的影响

对于均匀型振幅分布的六角形列阵, 设阵元直径为 $2\omega_0$, 阵元间距为 d , 阵元光束的复振幅为常量 A , 并且每个子阵元的相位均一致. 则振幅的均值为 $\overline{a(x, y)} = A(4\omega_0^2/d^2)$, 均方为 $|\overline{a(x, y)}|^2 =$

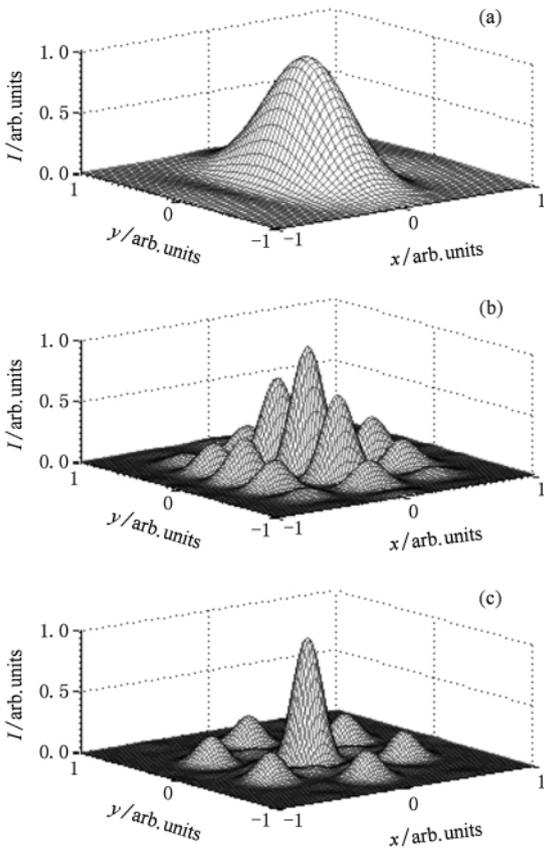


图3 三种阵列的远场分布 标示为能量集中度 (a)二阵元线阵, (b)四阵元矩形阵, (c)七阵元六角形阵

$A^2(4\omega_0^2/d^2)$. 则由(8)式可得出, 均匀型振幅分布阵列的 Strehl 比 S 为

$$S = \frac{|a(x, y)|^2}{|a(x, y)|^2} = 4\omega_0^2/d^2, \quad (18)$$

(18)式表明, 对于均匀型振幅分布的阵列, 远场光束的 Strehl 比只与近场填充因子有关.

对于正弦型振幅分布的阵列, 设阵元光束振幅分布为半正弦函数, 由概率论基础理论可知, 正弦函数的均值为 $2/\pi$, 均方为 $1/2$, 则远场分布的 Strehl 比为 0.81. 倏逝波耦合的相干合成阵列就是基于这种耦合原理.

对于 Gauss 型振幅分布的阵列, 远场光束的场分布在 3.2 节中已经推导得出, 下面分析填充因子和相位对远场分布的影响.

3.4. 填充因子对合成效果的影响

填充因子定义为阵元直径与阵元间距的比值, 即 $f = 2\omega_0/d$. 为了获得尽可能高的远场中心主瓣能量, 相干合成系统的阵元间距要尽可能小, 以获得尽可能高的填充因子.

(15)~(17)式给出了二阵元一维线阵、四阵元二维矩形阵以及七阵元六角形阵的远场分布. 以七阵元六角形阵列为例, 分析(17)式得出远场衍射光强分布的主极强条纹间距为

$$\Delta\theta_{xm} = \frac{2\pi}{kd\cos(\pi/3)},$$

$$\Delta\theta_{ym} = \frac{2\pi}{kd\sin(\pi/3)}, \quad (19)$$

零点位置为

$$\theta_{x0} = m \frac{\lambda \arccos\left(\frac{1}{2}\sqrt{2} - \frac{1}{2}\right)}{\pi d},$$

$$\theta_{y0} = m \frac{\sqrt{3}\lambda \arccos(-3/4)}{3\pi d}, \quad (20)$$

(20)式表明, 远场分布的条纹间距和主瓣宽度只与阵元数和近场阵元间距有关. 也就是说, 只要阵元间距和排列方式一定, 仅增加一环阵元数, 远场主瓣和旁瓣的分布结构保持不变, 即条纹间距不变, 但主瓣宽度会随着阵元数的增多而减小; 阵元间距增大会使得主瓣宽度和条纹间距减小. 总之, 随着填充因子的降低, 能量集中度会降低^[9].

图4给出了3种阵列填充因子与能量集中度的关系曲线, 由图中可以看出, 能量集中度随着填充因子的增大平滑上升, 近似呈线性关系. 将图中3条曲线分别拟合为

$$y_2 = -1.03x^3 + 1.05x^2 + 0.95x - 0.22,$$

$$y_4 = -1.12x^3 + 2.06x^2 - 0.18x + 0.01, \quad (21)$$

$$y_7 = -1.57x^3 + 2.74x^2 - 0.33x + 0.03,$$

其中 y_2 , y_4 , y_7 分别表示二阵元、四阵元和七阵元的能量集中度, x 表示填充因子. 上式可用来估算不同填充因子的理论能量集中度.

3.5. 相位误差的影响

在相干合成系统中, 要求对每个阵元的相对相位进行精确控制, 以使其相位差保持恒定. 对于光纤激光器的相干合成, 由于抽运电流以及环境温度、振动等都会带来相位扰动, 功率增大后, 相位噪声还会进一步恶化. 因此光纤激光器的相位噪声 ϕ_{ij} 是一个统计随机量, 假设其服从均值为零的 Gauss 统计分布^[13]

$$f(\phi_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\phi} \exp\left(-\frac{\phi_{ij}^2}{2\sigma_\phi^2}\right), \quad (22)$$

其中 σ_ϕ 表示均方根. 则远场分布可表示为^[12]

$$I(\theta_x, \theta_y) \propto \{7(1 - \exp(-\sigma_\phi^2))\}$$

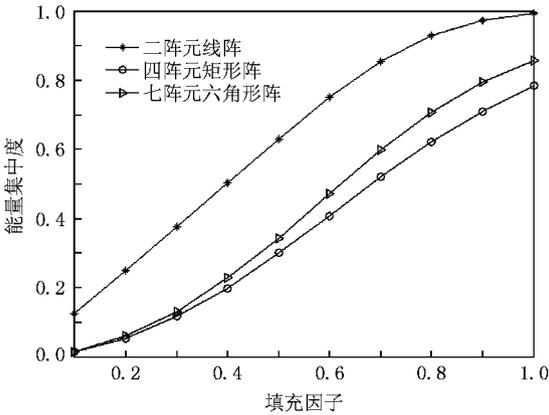


图4 3种列阵的能量集中度与填充因子的拟合曲线

$$\begin{aligned}
 & + \exp(-\sigma_\phi^2) |1 + 2\cos(kd\theta_x) \\
 & + 4\cos\left\{kd\left[\cos\left(\frac{\pi}{3}\right)\theta_x + \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)\theta_y\right]\right\}^2 \Big\} \\
 & \times \exp[-k^2\omega_0^2(\theta_x^2 + \theta_y^2)]. \quad (23)
 \end{aligned}$$

图5是七阵元六角形列阵的相位误差与Strehl比的关系曲线.随着阵元之间相位差的增大,Strehl比迅速降低,同时由图中可以看出,为保证Strehl比在0.8以上,相位差应控制在 $\lambda/12$ 以内.

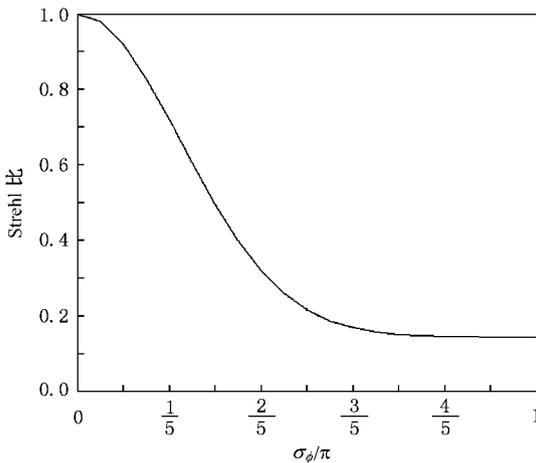


图5 相位误差与Strehl比的关系曲线

4. 实验系统及结果

4.1. 六角形相干列阵实验系统

七阵元光纤相干列阵的实验系统如图6所示.主振荡源(maser oscillator)是二极管抽运的Nd:YVO₄单纵模非平面环型激光器(non-planar ring

oscillator,NPRO)输出激光波长1064 nm,功率1000 mW,线宽<5 kHz.MO经过 1×8 的分束器后分为一路参考光和七路信号光,信号光路是芯径6.6 μm ,10 m长的保偏光纤,每路信号光的输出功率为100 mW.七路信号光经过准直器、铌酸锂相位调制器后,由一个六棱台合束器,变换为六角形圆形排列的列阵.参考光准直扩束后分别与七路信号光进行干涉采样,再用一个六棱台分束器将七束光分别照射到七个光电探测器上进行相位探测,相位控制电路反馈控制信号到七路信号光路中的相位调制器上,从而实现七路信号光的相位锁定.输出光束经过一个Fourier透镜后将远场分布成像在焦平面上,用CCD相机对远场图样进行监测.

六棱台合束器基于列阵的六角形排列结构,由一个中心通孔和六个 45° 角、镀有金反射膜的反射面($R > 99.9\%$)构成.呈圆周分布的六束光分别以 45° 角入射到六个反射面后,以平行方向出射,中心光束直接从中心通孔射出.这样,七束不同方向的光经过该棱台后就变成一束具有一定填充因子的七阵元平行光束.同理,七束平行光射向六棱台后将分成七个不同方向的光束.相比于V型槽列阵^[1],六棱台有易于实现精确对准、探测精度高等优点,而且将不同通孔直径的棱台组合在一起,或增加圆周反射面,可实现阵元数的扩展.本系统中准直光束直径为2.4 mm,阵元间距为3.6 mm,填充因子达到0.66.

相位控制电路采用爬山法控制技术^[14].首先在相位调制器上施加三角波调制信号,扫描数个周期后,得出干涉光强对应的极大值,再由软件设置90%的光强为控制点.实时探测光强信号,与控制点比较得出相应的控制电压反馈给光路的相位调制器实现闭环控制.这种控制方法相对简单,但每次实现一次相位校正都需要花费时间自动寻优,系统的工作频率有限.控制精度决定于阈值选取点,阈值越小,精度越高,同时自动寻优过程也越长,系统工作频率又会降低.

需要指出的是,在经费有限的条件下,七阵元光纤相干列阵中的光纤放大器是用10 m单模保偏光纤替代的,在相位变化特性上,两者存在一定的差别,但大多集中在10 kHz以内^[15].尽管如此,本系统所建立的六棱台合束器可获得高达0.66的填充因子,而且整个系统在光路布局和相位控制技术等方面都与放大器列阵等同,因此对构建光纤放大

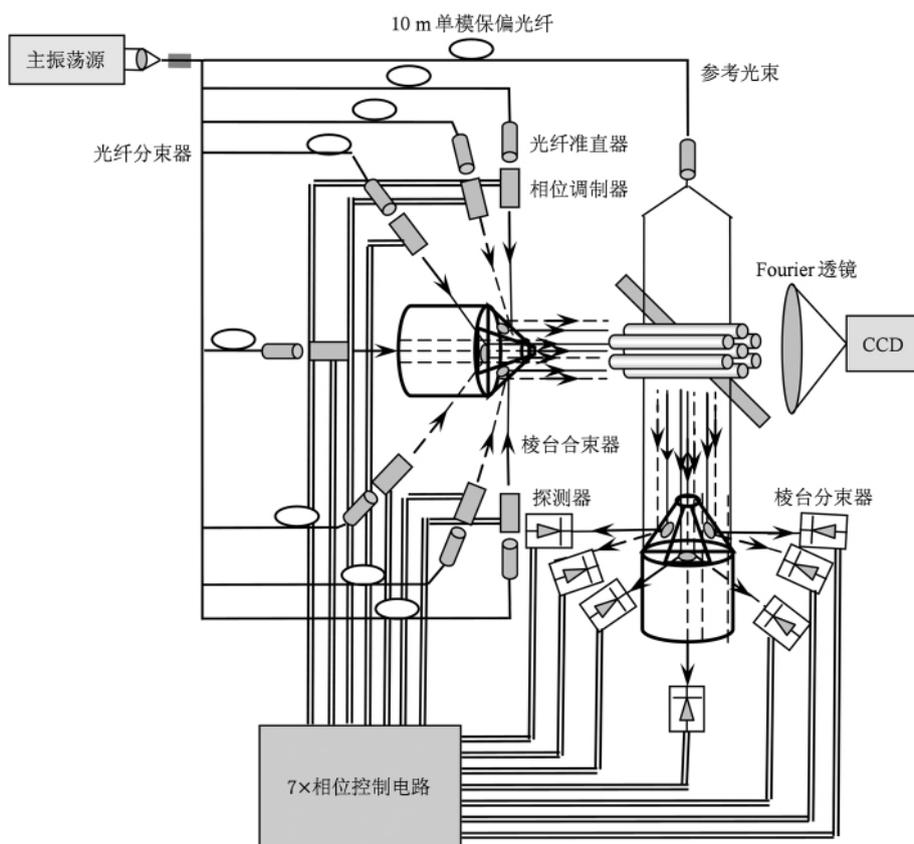


图6 七阵元光纤相干阵列原理图

器阵列仍有一定的借鉴意义.

4.2. 实验结果

图7为爬山法对两路相干合成光束的控制效果,可以看出,爬山法可以控制 kHz 频率左右的相位噪声,控制精度达到 $\lambda/10$. 本文设计的爬山法相

位控制系统的带宽为 10 kHz.

由图6的实验装置,获得七阵元六角形阵的远场图样如图8所示,由灰度值得出,相干合成的远场中心光强相比非相干合成提高了4.9倍,Strehl 比为 0.70. 相干合成和非相干合成的总输出功率为 620 mW,合成效率为 89%.

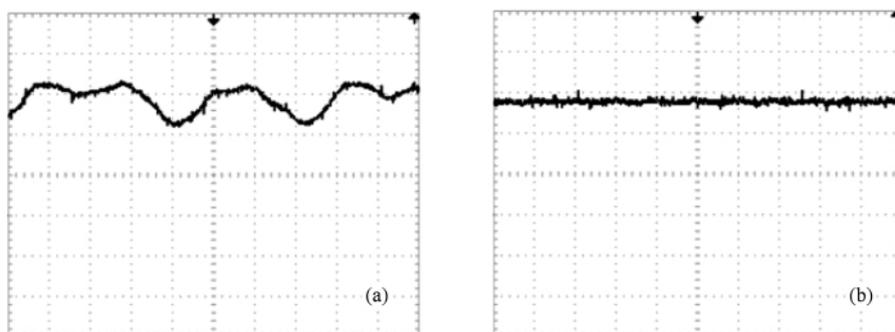


图7 爬山法相位控制效果 其中横轴和纵轴每一刻度分别为 5 ms 和 200 mV (a) 相位未锁定,(b) 相位锁定

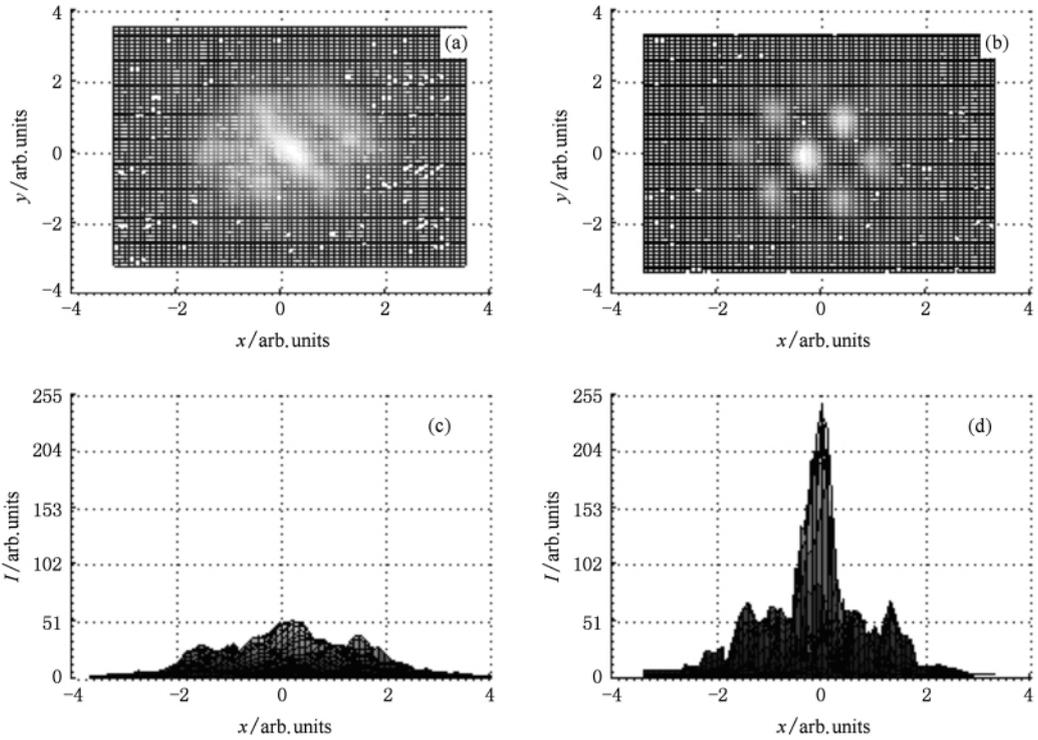


图 8 七阵元六角形阵的远场分布 (a)和(b)为非相干合成远场分布 ,(c)和(d)为相干合成远场分布

三种列阵的远场图样如图 9 所示,对 CCD 图样进行灰度处理得出,二阵元线阵的能量集中度为 0.45,四阵元矩形阵的能量集中度为 0.18,七阵元

六角阵的能量集中度为 0.40. 比较线阵、矩形阵和六角阵的远场分布可以看出,六角形列阵可以获得较高的远场能量集中度. 这也是本文研究七阵元六

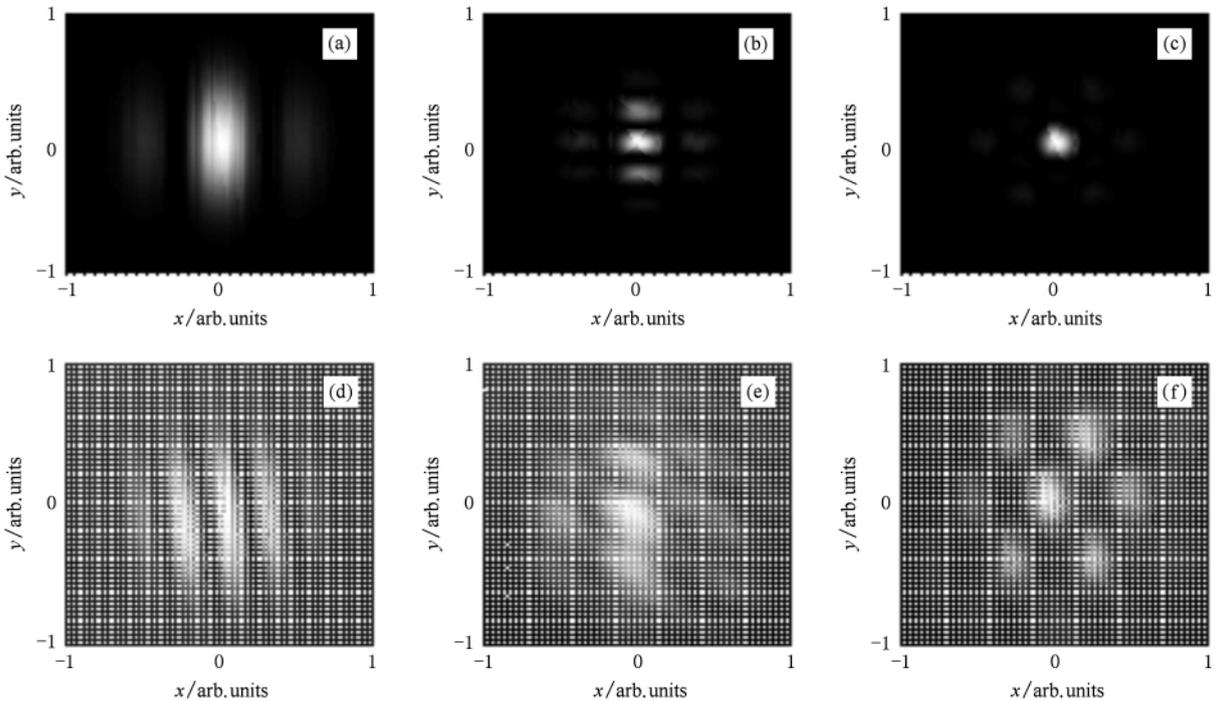


图 9 三种列阵的理论和实验远场分布 (a)和(d)为二阵元线阵的理论和实验远场分布 ,(b)和(e)为四阵元矩形阵的理论和实验远场分布 ,(c)和(f)为七阵元六角形阵的理论和实验远场分布

角形列阵的意义所在.

远场能量集中度的实验值与理论值稍有不同,分析原因有如下几个:合成子阵元之间的输出光束不可能达到严格的平行光束,而且光纤准直器的输出光束也有一定的发散角,这些都会使远场中心峰值光强降低、旁瓣能量增强^[16],从而使得远场能量集中度降低;相位控制电路有一定的控制精度,如对七阵元合成光束远场中心峰值光强只相对于非相干合成提高了 4.9 倍,只是理论值(7 倍)的 70%.

5. 结 论

基于 Fraunhofer 衍射理论,建立了六角形光纤相干列阵的理论模型,采用 Strehl 比和能量集中度作为评价参数,分析了排列方式、振幅、填充因子和

相位差对七阵元光纤列阵远场分布的影响. 并采用六棱台作为合束及分束元件和爬山法相位控制技术,构建了七阵元光纤相干列阵实验系统,获得填充因子为 0.66,远场合成光束的 Strehl 比为 0.70,能量集中度为 0.40. 并研究了两阵元线阵和四阵元矩形阵的远场分布,分别获得了 0.45 和 0.18 的远场能量集中度. 爬山法相位控制精度达到 $\lambda/10$. 该七阵元光纤相干列阵具有填充因子高、易于扩展等优点. 爬山法的相位控制技术虽然工作频率提高有限,但对于小功率、多路数的相干合成系统仍不失为一种简单有效的控制方法. 上述对六角形相干列阵远场分布的理论分析,可获得高填充因子的六棱台合束元件以及爬山法的控制效果对构建光纤放大器相干列阵具有一定的指导意义,下一步将构建光纤放大器相干列阵.

[1] Anderegg J, Brosnan S, Weber M 2003 *SPIE* **4974** 1

[2] Anderegg J, Brosnan S, Cheung E 2006 *SPIE* **6102** 6102U

[3] Fan T Y 2005 *IEEE J. Quantum. Electron.* **11** 567

[4] Jones D C, Scott A M, Clark S 2004 *SPIE* **5335** 125

[5] Li Y Z, Qian L J, Lu D Q 2007 *Opt. Laser Tech.* **39** 957

[6] Xiao R, Hou J, Jiang Z F 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4550 (in Chinese) [肖 瑞、侯 静、姜宗福 2007 物理学报 **56** 4550]

[7] Liu Y, Cheng Y, Xu L X, Zheng R, Wang X B, Wang H S, Lu C Y, Sun B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3929 (in Chinese) [刘 洋、程 勇、许立新、郑 睿、王小兵、王会升、卢常勇、孙 斌 2009 物理学报 **58** 3929]

[8] Xiao R, Hou J, Jiang Z F, Liu M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6464 (in Chinese) [肖 瑞、侯 静、姜宗福、刘 明 2006 物理学报 **55** 6464]

[9] Gary A E 1993 *Surface Emitting Semiconductor Lasers and Arrays* (Boston: Academic Press)

[10] Lü B D 2003 *Laser Optics* (Beijing: High Education Press) (in Chinese) [吕百达 2003 激光光学(北京:高等教育出版社)]

[11] Zhou P, Liu Z J, Xu X J, Chen Z L 2008 *Appl. Opt.* **47** 3350

[12] Fan X Y, Liu J J, Liu J S, Wu J L 2009 *Opt. Laser Technol.* **42** 274

[13] Nabors C D 1994 *Appl. Opt.* **33** 2284

[14] Xiao R, Hou J, Jiang Z F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 184 (in Chinese) [肖 瑞、侯 静、姜宗福 2006 物理学报 **55** 184]

[15] Fan X Y, Liu J J, Liu J S, Wu J L *Chin. Opt. Lett.* **8** 48

[16] Cao J Q, Lu Q S, Hou J, Xu X J 2008 *Chin. J. Lasers* **35** 350 (in Chinese) [曹润秋、陆启生、侯 静、徐晓军 2008 中国激光 **35** 350]

Theoretical and experimental study of multi-element coherent fiber array^{*}

Fan Xin-Yan^{1)†} Liu Jing-Jiao¹⁾ Liu Jin-Sheng¹⁾ Wu Jing-Li²⁾

1) (*National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

2) (*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

(Received 22 January 2009; revised manuscript received 31 March 2009)

Abstract

The theoretical model of the hexagonal fiber array is established based on Fraunhofer diffraction theory. The far field distribution of the hexagonal fiber array is presented. Energy contained in the central lobe and Strehl ratio are taken as the two evaluation parameters of coherent combined system. The effects of arrangement, amplitude, filling factor and phase errors on far field distribution are analyzed and simulated. A seven-element hexagonal fiber array with a hexagonal prism is experimentally constructed. The hill climbing method is employed to detect and lock the element phase. The filling factor of the coherent array achieves 0.66. The combined beam of Strehl ratio of 0.70 and energy contained in the central lobe of 0.40 is experimentally obtained. And the energy contained in the central lobe of two-element linear array and four-element square array are 0.45 and 0.18, respectively.

Keywords: coherent combining, fill factor, energy contained in the central lobe, Strehl ratio

PACC: 4230K, 4255N

† E-mail: fanshong_02@yahoo.com.cn