

抖动法激光阵列相干合成技术中的性能评价函数研究

马阎星 司磊 董小林 周朴 许晓军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 从理论上分析了抖动法锁相技术中性能评价函数对锁相效果的影响。研究发现,相干合成中获取性能评价函数的针孔光阑大小对锁相效果影响较大,随着针孔尺寸增大,性能评价函数的符号将会改变,取值也会产生较大变化。详细分析了光束阵列占空比、光束数目、单元光束尺寸和波长对最优评价函数的影响。分析表明,光束阵列占空比和阵列光束数目对正值最优评价函数对应的针孔尺寸影响较小,针孔直径取值范围为远场光斑中央主瓣宽度的 0.7~0.8,单元光束光斑尺寸和波长不对最优针孔尺寸造成影响。负值最优评价函数对应的针孔尺寸随光束数目的增大近似呈线性增大趋势,占空比对其影响较小。

关键词 激光技术;激光阵列;相干合成;锁相;抖动法;性能评价函数

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0202003

Study on Cost Function in the Coherent Beam Combination of Fiber Lasers Based on Dithering Technique

Ma Yanxing Si Lei Dong Xiaolin Zhou Pu Xu Xiaojun

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The effect of cost function on phase-locked based on dithering technique is studied. The cost function is often obtained by collecting the energy in a pinhole, and the diameter of the pinhole has a strong effect on the sign and value of the cost function. The effects of the fill factor of laser array, the number of laser beam, the radius of the light spot and wavelength on the best cost function are analysed in detail. It is found that the fill factor of laser array and the number of laser beams have a little effect on the best diameter of the pinhole for positive cost function which is located on 0.7~0.8 of the width of the main lobe of far field pattern. The radius of the light spot and wavelength have no effect on the best diameter of the pinhole. The best diameter of the pinhole for negative cost function will increase along with the number of laser beams increasing, but the fill factor of laser array has no effect on it.

Key words laser technique; laser array; coherent beam combination; phase-locked; dithering technique; cost function

OCIS codes 140.3290; 140.3298; 120.5060

1 引言

光纤激光器或放大器阵列的相干合成技术是当今光电子技术领域中的一个研究热点,它为获得高功率、高光束质量激光输出提供了一条有效途径,抖动法锁相技术是实现相干合成的重要途径之一。多抖动法于 20 世纪 70 年代作为一种自适应光学技术

被提出^[1],但是受限于波前校正器件的响应频率,没有得到广泛使用。随着材料科学、光学、机械加工等科学技术的快速发展,光学相位调制器件的响应频率不断提高,抖动法锁相技术开始应用于光纤激光阵列相干合成领域。2000 年,美国 HRL 实验室采用多抖动法实现了 5 路光纤放大器的相干合成^[2],

收稿日期: 2011-08-10; 收到修改稿日期: 2011-10-30

作者简介: 马阎星(1985—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器及光束相干合成等方面的研究。

E-mail: xm_wisdom@163.com

导师简介: 赵伊君(1930—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: zhaoyiz70@sina.com

2004年他们又实现了7路1W光纤放大器的相干合成^[3,4]。同年,美国空军实验室通过改变相位调制方式,实现了4路光纤激光的相干合成,条纹对比度达到97%^[5],2006年他们又实现了9路光纤激光的相干合成^[6,7],输出总功率达到百瓦量级。2008年,法国空间实验室采用该方法对大气湍流引起的噪声进行补偿,取得了较好的效果^[8]。2009年,美国空军实验室实现了5路百瓦级光纤激光的相干合成,输出总功率达725W^[9]。国内,光纤激光的相干合成技术也得到了蓬勃发展^[10~13],2010年国防科学技术大学光电科学与工程学院提出了单频抖动法锁相技术^[14],并采用该方法于2011年实现了9路百瓦级光纤激光的相干合成,输出总功率达1.08kW^[15]。抖动法相干合成技术正在逐步走向成熟,但是截止目前,还没有关于其性能评价函数的深入研究,为此,本文从理论上对抖动法相干合成技术中的性能评价函数进行深入研究,完善该技术的理论体系。

2 抖动法相干合成系统简介

抖动法相干合成系统的结构如图1所示(以4路光束合成为例),种子源输出激光经光纤分束器后分为4路,每一路经相位调制器后进入光纤放大器进行功率放大,然后经准直器后输出到空间。合成后的空间光束经分束后一部分进入CCD相机,用于诊断合成光束的远场形态;另一部分经针孔后进入光电探测器,其输出电信号经过信号处理器后转换为相位控制信号加载到相位调制器上。抖动法的工作流程简述如下:首先,信号处理器将高频小幅调制信号以并行或串行方式加载到相位调制器上,这些调制信号最终以远场光斑小幅抖动的形式反映出来。经过针孔后,光斑的抖动转换为光强起伏,最终转换为电信号输入到信号处理器中,信号处理器依据上述调制信号解调出各光束间的相位差。据此,生成相位控制信号加载到相位调制器上,最终实现光束阵列锁相输出。

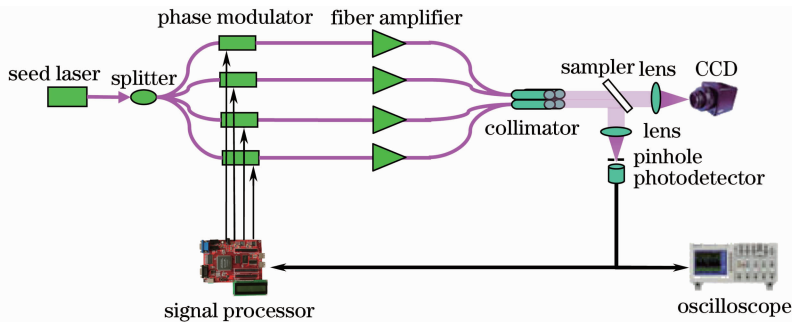


图1 抖动法相干合成系统

Fig.1 Schematic for coherent combination with dithering technique

在上述工作过程中,针孔内搜集的光能量即为抖动法相干合成中的评价函数。评价函数的选取(即针孔的大小)直接影响相干合成的效果。下面从波动光学的基本原理出发推导多抖动法锁相技术的数学模型,以分析系统各参数对最优评价函数的影响。

假设共有 N 路光束采用多抖动法锁相技术实现相干合成,这 N 路光束的发射端以阵列形式摆放在 $z=0$ 的平面上,各光源输出激光均为完全相干的基模高斯光束,且光束的中心坐标为 (a_j, b_j) ,则第 j 路高斯光束光场可表示为(取单位振幅)

$$u_j(x, y, 0) = \exp\left[-\frac{(x-a_j)^2 + (y-b_j)^2}{\omega_0^2}\right] \times \exp(i\phi_j), \quad (1)$$

式中 ω_0 为光束的束腰, k 为波数, ϕ_j 为第 j 路光束的

相位,是时间的函数。在采用多抖动法进行相干合成时,每一路子光束都要进行高频小幅相位调制^[5],在此情形下,调制后的第 j 路光束光场可表示为

$$u_j(x, y, 0) = \exp\left[-\frac{(x-a_j)^2 + (y-b_j)^2}{\omega_0^2}\right] \times \exp[i(\phi_j + \phi_{jm})], \quad (2)$$

式中 ϕ_{jm} 表示相位调制信号,其形式可表示为

$$\phi_{jm} = \alpha_{jm} \sin \omega_{jm} t, \quad (3)$$

式中 α_{jm} 是相位调制信号的调制幅度, ω_{jm} 是相位调制信号的调制频率。

那么发射平面上的总光场为

$$u(x, y, 0) = \sum_{j=1}^N u_j(x, y, 0). \quad (4)$$

根据广义惠更斯-菲涅耳原理,在传输距离 L 后,接收平面处的平均光强分布为^[16]

$$\langle I(p, q, L) \rangle = \frac{k^2}{(2\pi L)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(x, y, 0) u^*(\xi, \eta, 0) \times \exp\left\{\frac{ik}{2L}[(p-x)^2 + (q-y)^2 - (p-\xi)^2 - (q-\eta)^2]\right\} dx dy d\xi d\eta, \quad (5)$$

将(1)、(2)、(3)、(5)式代入(4)式进行积分,得到结果:

$$\langle I(p, q, L) \rangle = \frac{k^2}{(2\pi L)^2} \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(x-a_j)^2}{\omega_0^2} - \frac{(y-b_j)^2}{\omega_0^2} - \frac{(\xi-a_l)^2}{\omega_0^2} - \frac{(\eta-b_l)^2}{\omega_0^2}\right] \times \exp\left\{\frac{ik}{2L}[(p-x)^2 - (p-\xi)^2 + (q-y)^2 - (q-\eta)^2]\right\} \exp[i(\phi_j - \phi_l + \phi_{jm} - \phi_{lm})] dx dy d\xi d\eta = \left[\sum_{j=1}^M \Gamma_{jj}(p, q, L) + 2 \sum_{j=1}^M \sum_{j=l+1}^M \Gamma_{jl}(p, q, L)\right] \exp[i(\phi_j - \phi_l + \phi_{jm} - \phi_{lm})], \quad (6)$$

式中

$$\Gamma_{jj}(p, q, z) = \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \exp\left\{-\frac{2}{\omega^2}[(p-a_j)^2 + (q-b_j)^2]\right\},$$

$$\Gamma_{jl}(p, q, z) = \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \exp\left\{-\frac{2}{\omega^2}[(p-a_j)(p-a_l) + (q-b_j)(q-b_l)]\right\} \times \exp\left\{\frac{ik\omega_0^2\tau_1}{2\omega^2 z}[(a_j - a_l)(a_j + a_l - 2p) + (b_j - b_l)(b_j + b_l - 2q)]\right\},$$

$\omega = \sqrt{1 + \tau_1} \omega_0$, $\tau_1 = \frac{4L^2}{k^2 \omega_0^4}$, τ_1 为衍射导致的光斑扩展因子。在实际实验中,评价函数是通过透镜将合成光束变换成远场获得的,此时 $L \gg k$,因此在 $\Gamma_{jl}(p, q, L)$ 中的第二个 \exp 因子将趋近于 1,于是

$$\Gamma_{jl}(p, q, L) = \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \exp\left\{-\frac{2}{\omega^2}[(p-a_j)(p-a_l) + (q-b_j)(q-b_l)]\right\}.$$

由以上推导结果可知,(6)式结果中的 $\sum_{j=1}^M \Gamma_{jj}(p, q, L)$ 是实数常数项,不携带调制信息,后文可以不予考虑,并将其记为 I_D ,因此,

$$\langle I(p, q, L) \rangle = I_D + \sum_{j=1}^M \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^M \Gamma_{jl}(p, q, L) \exp[i(\phi_j - \phi_l + \phi_{jm} - \phi_{lm})], \quad (7)$$

由于实际探测到的光强只是(7)式的实部,所以

$$\langle I(p, q, L) \rangle = I_D + \sum_{j=1}^M \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^M \Gamma_{jl}(p, q, L) \cos(\phi_j - \phi_l + \phi_{jm} - \phi_{lm}) = I_D + \sum_{j=1}^M \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^M \Gamma_{jl}(p, q, L) \times \cos(\phi_j - \phi_l + \alpha_{jm} \sin \omega_{jm} t - \alpha_{lm} \sin \omega_{lm} t) = I_D + \sum_{j=1}^M \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^M \Gamma_{jl}(p, q, L) \times \left\{ \begin{array}{l} \cos(\phi_j - \phi_l) \cos(\alpha_{jm} \sin \omega_{jm} t) \cos(\alpha_{lm} \sin \omega_{lm} t) + \\ \cos(\phi_j - \phi_l) \sin(\alpha_{jm} \sin \omega_{jm} t) \sin(\alpha_{lm} \sin \omega_{lm} t) - \\ \sin(\phi_j - \phi_l) \sin(\alpha_{jm} \sin \omega_{jm} t) \cos(\alpha_{lm} \sin \omega_{lm} t) + \\ \sin(\phi_j - \phi_l) \cos(\alpha_{jm} \sin \omega_{jm} t) \sin(\alpha_{lm} \sin \omega_{lm} t) \end{array} \right\} = I_D + \sum_{j=1}^M \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^M \Gamma_{jl}(p, q, L) \times \left\{ \begin{array}{l} \cos(\phi_j - \phi_l) \left[J_0(\alpha_{jm}) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\alpha_{jm}) \cos(2n\omega_{jm} t) \right] \left[J_0(\alpha_{lm}) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\alpha_{lm}) \cos(2n\omega_{lm} t) \right] + \\ \cos(\phi_j - \phi_l) \left\{ 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\alpha_{jm}) \sin[(2n-1)\omega_{jm} t] \right\} \left\{ 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\alpha_{lm}) \sin[(2n-1)\omega_{lm} t] \right\} - \\ \sin(\phi_j - \phi_l) \left\{ 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\alpha_{jm}) \sin[(2n-1)\omega_{jm} t] \right\} \left[J_0(\alpha_{lm}) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\alpha_{lm}) \cos(2n\omega_{lm} t) \right] + \\ \sin(\phi_j - \phi_l) \left\{ 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\alpha_{lm}) \sin[(2n-1)\omega_{lm} t] \right\} \left[J_0(\alpha_{jm}) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\alpha_{jm}) \cos(2n\omega_{jm} t) \right] \end{array} \right\}, \quad (8)$$

在(8)式的最后一步推导中用到了三角函数与贝塞耳函数的关系式

$$\cos(x \sin \varphi) = J_0(x) + 2[J_2(x) \cos 2\varphi + J_4(x) \cos 4\varphi + \dots] = J_0(x) + 2 \sum_{i=1}^{\infty} J_{2i}(x) \cos 2i\varphi$$

$$\sin(x \sin \varphi) = 2[J_1(x) \sin \varphi + J_3(x) \sin 3\varphi + \dots] = 2 \sum_{i=1}^{\infty} J_{2i-1}(x) \sin[(2i-1)\varphi].$$

(8)式即为远场某一点处 t 时刻的光强,将(8)式在某一区域 S 内进行积分将得到所要的评价函数 $J(t)$:

$$J(t) = \int_S I(p, q, L, t) ds. \quad (9)$$

由(8)式可知,远场某处光强将会随着各光束间相位差的改变而改变,而且其中包含有相位调制信号,因此将其在区域 S 内积分后即可作为性能评价函数,这里积分区域 S 即对应于针孔大小。当积分面积过大时,几乎整个远场光斑被包含于积分之内, $J(t)$ 将趋于恒值,无法提取相位信息,当积分区域较小时,又无法获得足够的光能量,致使探测系统无法正常工作。本文将通过数值仿真对针孔尺寸的选择进行详细分析,给出最优针孔尺寸的选择方法。

3 理论仿真

下面,对存在小幅相位调制信号时远场合成光斑不同孔径内的光强进行仿真计算,根据计算结果来分析针孔的最优尺寸。这里首先提出两个评价标准:1) 绝对相位调制强度,它是指当远场光斑条纹以小幅抖动时,光斑抖动前后针孔内的绝对能量差值,可用于判断此时针孔内的光能量是否满足光电探测器的灵敏度要求;2) 上述能量差值与孔内总能量的比值,可用于判断当前探测器获得的光信号是否满足后续系统的信噪比要求,称为相对相位调制强度。显然,上述两个指标取最大值时将获得最优针孔尺寸,从而获得最优的性能评价函数。

3.1 两路光束合成时相位调制强度随针孔尺寸的变化关系

为了便于后续讨论,首先来分析两路光束相干合成时相位调制强度随针孔尺寸的变化情况。不失一般性,仿真中设两光束均为峰值光强为 1,波长为 1064 nm 的高斯光束,相位调制深度为 $\lambda/20$,光斑半径为 0.5 mm,占空比为 0.6(占空比定义为光斑直径与两光束间距的比值),针孔中心与远场干涉条纹的中央主瓣重合,此时绝对相位调制强度和相对相位调制强度随针孔尺寸的变化关系如图 2 所示。图中,横坐标是指针孔尺寸与远场光斑中央主瓣宽

度的比值,APMI(即图中实线)表示绝对相位调制强度,RPMI(即图中虚线)表示相对相位调制强度。由图 2 可以看出,随着针孔尺寸的逐渐增大,绝对相位调制强度不断增大,这是由于随着针孔尺寸的增大,孔内能量越来越大,其绝对相位调制强度也随之增大。当针孔尺寸为中央主瓣宽度的 0.825 时,绝对相位调制强度出现最大值。随着针孔尺寸的进一步增大,绝对相位调制强度开始下降,这是由于此时针孔尺寸已接近中央主瓣宽度,光斑抖动对针孔内能量影响逐渐减小引起的。当为 1.5 倍中央主瓣宽度时,绝对相位调制强度开始出现负值,此时针孔尺寸已经大于中央主瓣两侧暗条纹光强最小值间的距离,因此条纹漂移后针孔内的能量大于未漂移时的能量,能量差出现负值,当为 1.825 倍中央主瓣宽度时达到极大值,之后曲线又开始上升,而相对相位调制强度基本上一直处于下降趋势。

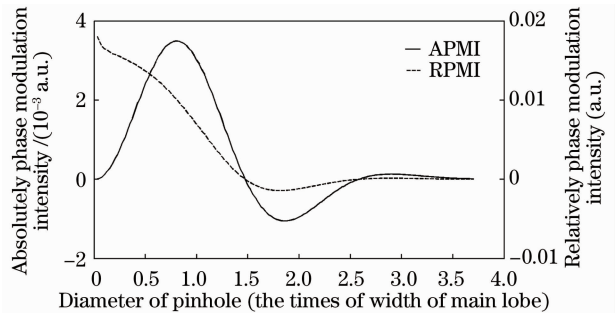


图 2 两路光束合成时绝对和相对相位调制强度随针孔尺寸的变化关系

Fig. 2 Absolutely and relatively phase modulation intensity versus the diameter of pinhole for two beams

需要注意的是绝对相位调制强度的符号直接影响着两光束的锁相情况。当绝对相位调制强度为正值时,若抖动法锁相系统将两光束锁定为同相,那么当其为负值时,锁相系统将会将两光束相位锁定为异相(相位相差 π)。由此可见,抖动法锁相中针孔尺寸的选择非常重要,不同的针孔尺寸将会导致截然相反的锁相效果。

为了便于后续讨论,选择绝对相位调制强度最大值对应的针孔尺寸作为两光束合成时的最优针孔尺寸。

3.2 36 路光束合成时相位调制强度随针孔尺寸的变化关系

36 路光束排列成如图 3 所示的 6×6 方阵。由图可见,1~6 路的光束位置不对称,其相位调制可能对远场光斑造成不同的影响,为此,将对其绝对相位调制强度和相对相位调制强度进行仿真,仿真中光束占空比为 0.6,其他参数同上。而阵列中其余未编号光束均可找到与其对称的编号光束,这些对称位置的光束对远场光斑造成的影响是相同的,因此仅对编号光束进行仿真,仿真结果如图 4 所示。图 4(a)为 1~6 号光束进行相位调制时的绝对相位调制强度随针孔尺寸的变化关系,图 4(b)为相对相位调制强度随针孔尺寸的变化关系。由图可知,光束的不同位置对绝对和相对相位调制强度的影响较大,但是总体趋势和两路光束合成时相同。为了照顾所有光束均有一个较为合适的相位调制强度,这里选取光束 4 和 6 绝对相位调制曲线附近交叉点处的针孔尺寸为最优针孔尺寸。另外,由图 4 还可以看出绝对相位调制强度曲线的最大值随着光束到阵

列中心的距离变大在不断降低,顺序为 1,3,2,6,5,4。另外,当针孔尺寸约为 4 倍中央主瓣尺寸时,某些光束的绝对相位调制强度为正值,而另一些则为负值。这时,所有光束将不能被同时锁定为同相或者异相,而是一些光束为同相,另一些光束与之相差相位 π 。当针孔尺寸确定后,由于不同位置处光束引起的相位调制强度不同,因此在进行相位控制时要针对各光束位置设置不同的增益,以保持最佳的锁相效果。

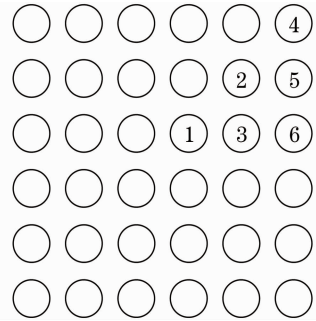


图 3 36 路光束近场排列示意图

Fig. 3 Near field of 36 laser beams array

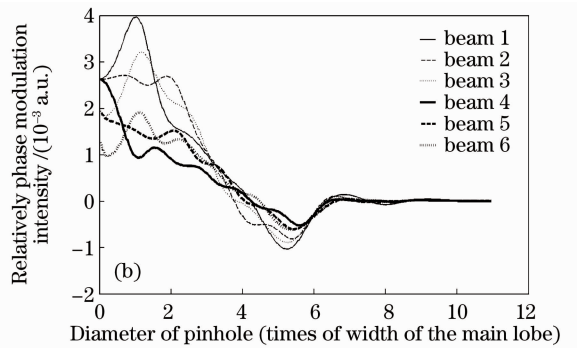
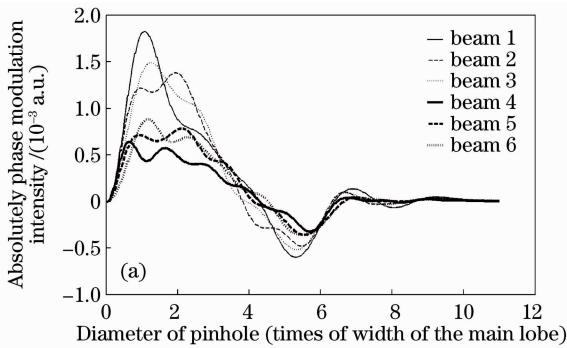


图 4 6×6 光束阵列中不同光束相位调制对绝对(a)和相对(b)相位调制强度的影响

Fig. 4 Effect of different beams in 6×6 beams array on (a) absolutely and (b) relatively phase modulation intensity

3.3 最优针孔尺寸随光束数量的变化关系

为了讨论方便均取方形阵列进行讨论,光束数量分别为 2、4、9、16、25、36 束,其最优针孔尺寸的选取方法及其相关参数设置同上。计算得到最优针孔尺寸随光束数量的变化关系如图 5 所示。由图 5 可见,对于不同的光束数量,最优针孔尺寸变化较小,保持在中央主瓣宽度的 0.7~0.8 之间。

3.4 最优针孔尺寸随光束阵列占空比的变化关系

首先给出两路光束相干合成时,不同光束占空比情况下,相位调制强度随针孔尺寸的变化关系,如图 6 所示,最优针孔尺寸随光束占空比的变化不大,基本保持在中央主瓣宽度的 0.7~0.8。需要注意的是,随着光束占空比的提高,光束的正值绝对相位调制强度在不断增大,负值绝对相位调制强度在不

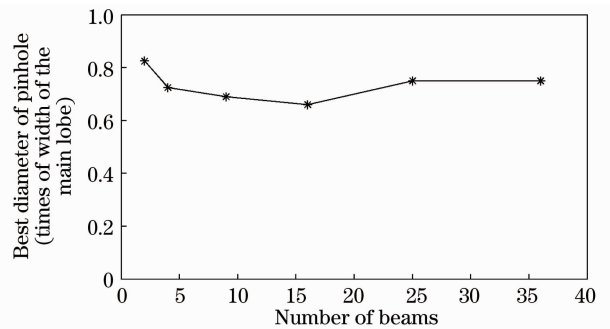


图 5 最优针孔尺寸与光束数量的关系

Fig. 5 Best diameter of pinhole versus the number of laser beams

断减小,当占空比为 1 时,绝对相位调制强度不再有负值。不同占空比下的相对相位调制强度随占空比的变化关系基本相同。因此,对于锁相系统而言,当

光束占空比较小时需要更高灵敏度的探测器来检测相位调制信号,但此时的信噪比没有明显下降(只针

对光信号而言)。

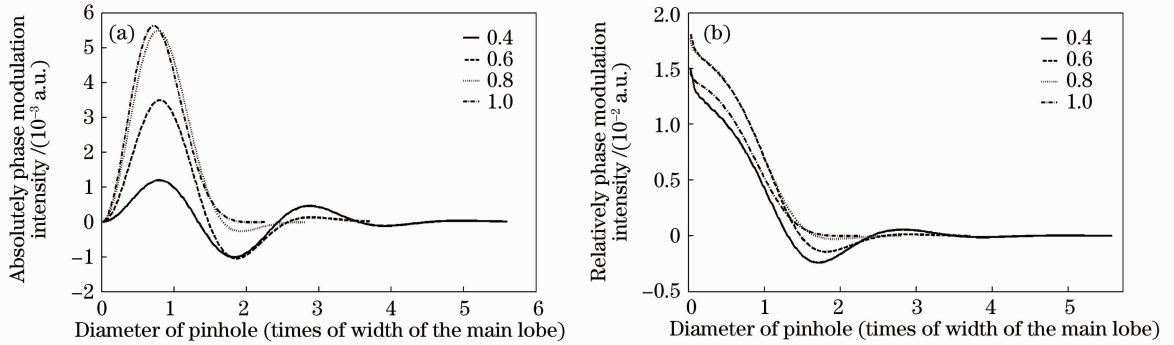


图 6 两路光束不同占空比时绝对(a)和相对(b)相位调制强度随针孔尺寸的变化关系

Fig. 6 (a) Absolutely and (b) relatively phase modulation intensity versus diameter for two beams when the fill factor is different

36 路光束合成时的最优针孔尺寸随占空比的变化关系如图 7 所示,可见随着光束占空比的变化,最优针孔尺寸基本保持在中央主瓣宽度的 0.7~0.8 之间。

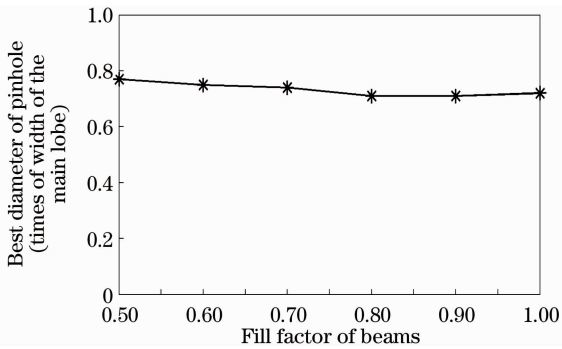


图 7 36 路光束合成时最优针孔尺寸随占空比的变化关系

Fig. 7 Best diameter of pinhole versus the fill factor for 36 beams

综上所述,光束数量和光束阵列占空比基本不影响最优针孔尺寸,该尺寸只与远场光斑中央主瓣宽度有关,为中央主瓣宽度的 0.7~0.8。

3.5 最优针孔尺寸随单元光束光斑尺寸的变化关系

当光束阵列的占空比保持不变时,增大光斑尺寸将会引起阵列周期的增大,此时最优针孔尺寸随光斑尺寸的变化关系如图 8 所示。仿真中,占空比取 0.6,光斑半径由 0.5 mm 增大到 4.0 mm,其余参数同上。由图可见,当光束阵列占空比一定时,单元光束光斑尺寸和排列周期将不会影响最优针孔尺寸。

3.6 最优针孔尺寸随激光波长的变化关系

取光束阵列的占空比为 0.6,光斑半径为 1 mm,当激光波长从 500 nm 增大到 1000 nm 时,

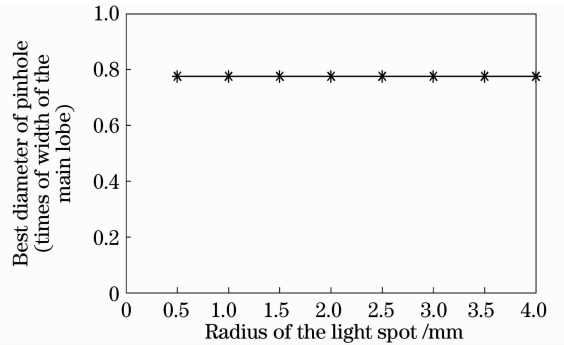


图 8 最优针孔尺寸随单元光束尺寸的变化关系

Fig. 8 Best diameter of pinhole versus the radius of light spot

最优针孔尺寸随波长的变化关系如图 9 所示。可见,随着波长的增大,最优针孔尺寸与中央主瓣的比值并不会随之改变。

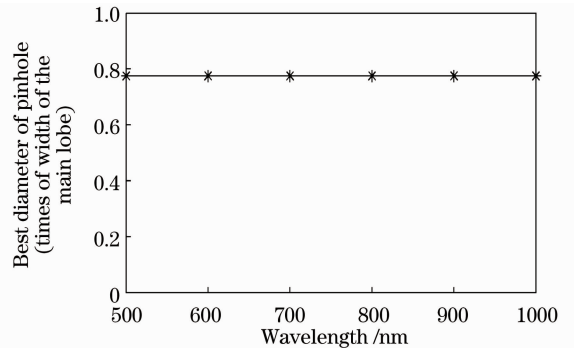


图 9 最优针孔尺寸随波长的变化关系

Fig. 9 Best diameter of pinhole versus wavelength

3.7 最小负值强度随光束数量和占空比的变化关系

图 10 给出了负值绝对相位调制强度对应的最优针孔尺寸随占空比和光束数目的变化关系。由图 10(a)可见,当光束数目确定时,负值最优针孔尺

寸基本不随占空比发生改变；由图 10(b)可见(此时占空比选为 0.6)，随着光束数目的增加，最优针孔尺寸随着光束数目增加不断增大，且近似呈线性关

系。也就是说，随着光束数目的增加，若要通过选择针孔尺寸将远场光斑锁定为异相，针孔尺寸与中央主瓣宽度的比值将增大。

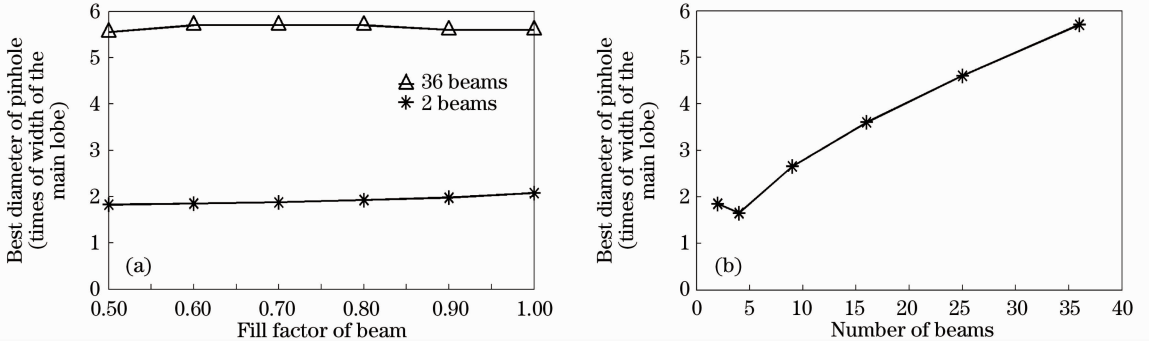


图 10 负值评价函数对应的最优针孔尺寸随占空比(a)和光束数目(b)的变化关系

Fig. 10 Best diameter of pinhole versus (a) the fill factor and (b) the number of beams for the negative cost function

4 结 论

从理论上详细分析了抖动法相干合成技术中性能评价函数随光束占空比、光束数目、光斑尺寸和波长的变化关系。获得了有益结论：1) 随着性能评价函数对应针孔尺寸的变化，性能评价函数的符号和取值也在变化；2) 对于正值性能评价函数而言，光束阵列占空比和光束数目对最优针孔尺寸的影响较小，最优针孔尺寸的取值范围为 0.7~0.8 倍远场光斑条纹中央主瓣宽度；3) 单元光束的光斑尺寸和激光波长不对最优针孔尺寸造成影响；4) 对于负值性能评价函数而言，最优针孔尺寸随着光束数量的增多近似呈线性增大；而占空比对其影响较小。结论进一步完善了抖动法相干合成技术的理论体系，为合成系统中针孔尺寸的选择提供了指导。

参 考 文 献

- 1 T. R. O'Meara. The multidither principle in adaptive optics[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(3): 306~315
- 2 M. Minden. Coherent coupling of a fiber amplifier array[C]. Thirteenth Annual Solid State and Diode Laser Technology Review, SSDLTR 2000 Tech. (Air Force Research Laboratory, 2000)
- 3 Hans Bruesselbach, M. L. Minden, Shuoqin Wang *et al.*. A coherent fiber array based laser link for atmospheric aberration mitigation and power scaling[C]. *SPIE*, 2004, **5538**: 90~101
- 4 Hans Bruesselbach, Shuoqin Wang, Monica Minden *et al.*. Power-scalable phase-compensating fiber-array transceiver for laser communications through the atmosphere[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(2): 347~353
- 5 T. M. Shay, Vincent Benham. First experimental demonstration of phase locking of optical fiber arrays by RF phase modulation [C]. *SPIE*, 2004, **5550**: 313~319
- 6 T. M. Shay, V. Benham, J. T. Baker *et al.*. First experimental demonstration of self-synchronous phase locking of an optical array[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(25): 12022~12027

- 7 T. M. Shay, Vincent Benham, Lt. Justin Spring *et al.*. Self-referenced locking of optical coherence by single-detector electronic-frequency tagging[C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020V
- 8 Pierre Bourdon, Veronique Jolivet, Baga bennai *et al.*. Coherent beam combining of fiber amplifier arrays and application to laser beam propagation through turbulent atmosphere [C]. *SPIE*, **6873**: 687316
- 9 T. M. Shay, J. T. Baker, A. D. Sanchez *et al.*. High power phase locking of a fiber amplifier array [C]. *SPIE*, 2009, **7195**: 71951M
- 10 Zhou Jun, He Bin, Xue Yuhao *et al.*. Study on passive coherent beam combination technology of high power fiber laser arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900129
周 军, 何 兵, 薛宇豪等. 高功率光纤激光阵列被动相干组束技术研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900129
- 11 Su Rongtao, Wang Xiaolin, Zhou Pu *et al.*. Resent research and development of beam combination of high power pulse fiber laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(10): 101401
粟荣涛, 王小林, 周 朴等. 高功率脉冲光纤激光光束合成的最新研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(10): 101401
- 12 Liu Zejin, Zhou Pu, Tao Rumao *et al.*. Analysis of beam combinaiton technology of high-power LD pumped laser array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900113
刘泽金, 周 朴, 陶汝茂等. 高能固态激光阵列光束合成技术浅析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900113
- 13 Tao Rumao, Ma Yanxing, Dong Xiaolin *et al.*. Study of target-in-the-loop fiber laser array adaptive phase locking technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0702012
陶汝茂, 马阎星, 董小林等. 目标在回路光纤激光阵列自适应锁相技术研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0702012
- 14 Yanxing Ma, Pu Zhou, Xiaolin Wang *et al.*. Coherent beam combination with single frequency dithering technique[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(9): 1308~1310
- 15 Yanxing Ma, Xiaolin Wang, Jinyong Leng *et al.*. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(6): 951~953
- 16 Zhou Pu, Xu Xiaojun, Liu Zejin *et al.*. Propagation of coherently combined laser beam in turbulent atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2051~2056
周 朴, 许晓军, 刘泽金等. 相干合成光束在湍流大气中的传输[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2051~2056

栏目编辑: 宋梅梅