

· 激光技术 ·

相位控制残差对激光阵列合成的影响

胡奇琪, 黄智蒙, 骆永全, 张大勇

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要:在激光阵列相干合成中,由于相位噪声的影响和相位控制系统带宽的限制,相位控制残差无法避免。文中从理论上推导了存在相位残差时激光阵列相干合成中远场光强分布,并结合光束传输因子BPF(beam propagation factor)作为合成效果的评价标准,分析了相位残差对相干合成的影响。

关键词:激光阵列;相位残差;相干合成;数值模拟

中图分类号:TN249

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2014)-05-0023-03

Influence on Laser Array Combination from Residual Phase Error

HU Qi-qi, HUANG Zhi-meng, LUO Yong-quan, ZHANG Da-yong

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In laser array coherent combination, residual phase error is unavoidable for the influence of phase noise and the limit of phase control system bandwidth. The far-field intensity distribution with residual phase error in laser array coherent combination is deduced on theory. Taking beam propagation factor (BPF) as the assessment standard of combination effect, the influence on coherent combination from residual phase error is analyzed.

Key words: laser array; residual phase error; coherent combination; numerical simulation

作为一种获得高亮度激光的重要手段,主动相干合成一直是当今国内外研究的热点。主动锁相技术现有外差探测法^[1-3]、随机并行梯度下降算法^[4-6]、单抖动法^[7]、多抖动法^[8]、模拟退火算法^[9]等多种实现方法,其主要思路是通过特定的算法使各子光路间相位差稳定。为了获得更高的激光合成输出功率,提高了单束激光的功率,但同时也带来了更大的相位噪声^[10]。另外,不同的控制算法也受到电路带宽的限制。这导致相位控制残差无法避免。文中从理论上推导了激光阵列相干合成中远场光强分布,并结合光束传输因子BPF(beam propagation factor)作为合成效果的评价标准,分析了相位残差对相干合成的影响。

1 理论推导

波长 λ ,束腰半径 ω_0 的基模高斯光的光束中心位于 $z=0$ 面的 (x_0, y_0) 点, $z=L$ 处有一焦距为 F 的聚焦透镜,如图1所示。由傅里叶变换可知,透镜后焦面上光强分布与远场分布一致。根据夫琅禾费衍射系统的位移相移定理,透镜后焦面处的电场分布可以表示为^[11-12]。

$$E(x, y, t) = A_0 \frac{q_0}{q_z} \exp\left[-\frac{jk}{2q_z}(x^2 + y^2)\right] \cdot \exp\left[-\frac{jk}{F}(x_0 x + y_0 y)\right] \exp(j\omega t - jkz) \exp(j\varphi(t)) \quad (1)$$

其中, $q_0 = j\pi\omega_0^2/\lambda$, $q_z = F^2/(F - L - q_0)$,为后焦面处光束的复曲率半径, $\varphi(t)$ 为相位残差。

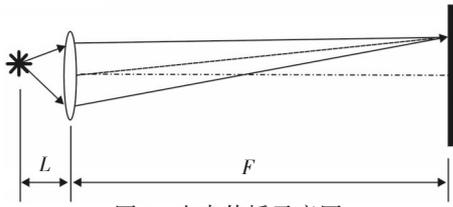


图1 光束传播示意图

在 $z = 0$ 面上有 N^2 光束排布成如图 2 所示阵列, 光束间相互平行且偏振方向一致, 相邻光束中心间距为 D , 则各光束中心坐标可以表示为 (mD, nD) , 可得焦平面上光强分布为

$$I(x, y, t) \propto \exp\left[-2\left(\frac{k\omega_0}{2F}\right)^2(x^2 + y^2)\right] \cdot \left| \sum_{mn} \exp\left[-\frac{jk}{F}(mDx + nDy)\right] \exp(j\varphi_{mn}(t)) \right|^2 \quad (2)$$

假定相干合成中, 相位控制残差 $\varphi(t)$ 满足均值为 0, 方差为 σ^2 的高斯分布, 任意光束有

$$\langle \exp(j\varphi(t)) \rangle = \exp\left(-\frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (3)$$

任意两束光的残差满足

$$\langle \exp(j\varphi_m(t) - j\varphi_n(t)) \rangle = \exp[-\sigma^2] \quad (4)$$

则在长时间曝光的情况下, $\varphi_{mn}(t)$ 各态历经, 后焦面上的光强分布可以取 $I(x, y, t)$ 的期望

$$I(x, y) = \langle I(x, y, t) \rangle \propto \exp\left[-2\left(\frac{k\omega_0}{2F}\right)^2(x^2 + y^2)\right] \cdot \left\{ \left[\frac{\sin N \frac{kx}{2F} D}{\sin N \frac{kx}{2F} D} \right]^2 \left[\frac{\sin N \frac{ky}{2F} D}{\sin N \frac{ky}{2F} D} \right]^2 - N^2 \exp(-\sigma^2) + N^2 \right\} \quad (5)$$

式(5)表明, 当 $\sigma^2 \rightarrow \infty$ 时, $\exp(-\sigma^2) \rightarrow 0, I(0, 0) \propto N^2$, 表明合成为非相干合成, 合成光强正比于参与合成的光束数; $\sigma^2 \rightarrow 0$ 时, $\exp(-\sigma^2) \rightarrow 1, I(0, 0) \propto N^4, I(x, y)$ 的分布符合相干合成的结果。

参考光束传输因子(BPF)的概念^[11], 并结合远场光强分布的特点, 用边长为 $2\lambda L/ND$ 的正方形大小的桶中功率所占总功率的比值作为合成效率的评价标准, 即

$$\eta = \frac{\iint_{\text{BUCKET}} I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy} \quad (6)$$

对于 $\sigma^2 \rightarrow \infty$ 的非相干合成情形, 式(6)可以简化为

$$\eta_1 = \frac{\iint_{\text{BUCKET}} \exp\left[-2\left(\frac{k\omega_0}{2F}\right)^2(x^2 + y^2)\right] N^2 dx dy}{\iint \exp\left[-2\left(\frac{k\omega_0}{2F}\right)^2(x^2 + y^2)\right] N^2 dx dy} = \text{erf}^2\left(\frac{\pi}{\sqrt{2} N} FF\right) \quad (7)$$

其中, $\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$ 为误差函数; $FF = 2\omega_0/D$ 为阵列占空比。对于 $\sigma^2 \rightarrow 0$ 的相干合成情形, 式(6)可以简化为

$$\eta_c = \frac{\iint_{\text{BUCKET}} \exp\left[-2\left(\frac{k\omega_0}{2F}\right)^2(x^2 + y^2)\right] \left[\frac{\sin N \frac{kx}{2F} D}{\sin \frac{kx}{2F} D} \right]^2 \left[\frac{\sin N \frac{ky}{2F} D}{\sin \frac{ky}{2F} D} \right]^2 dx dy}{\iint \exp\left[-2\left(\frac{k\omega_0}{2F}\right)^2(x^2 + y^2)\right] \left[\frac{\sin N \frac{kx}{2F} D}{\sin \frac{kx}{2F} D} \right]^2 \left[\frac{\sin N \frac{ky}{2F} D}{\sin \frac{ky}{2F} D} \right]^2 dx dy} \quad (8)$$

对于任意残差 σ^2 的情况, 则有合成效率

$$\eta = \eta_c \exp(-\sigma^2) + \eta_1 [1 - \exp(-\sigma^2)] \quad (9)$$

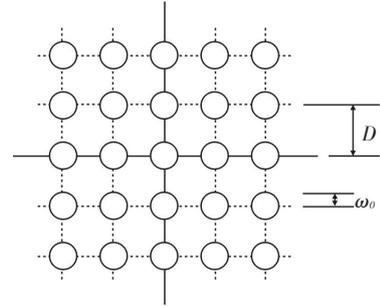


图2 相干合成中光束的正方形排布示意图

2 数值计算

对上述的分析进行数值模拟计算, 假设 $\lambda = 1064 \text{ nm}, \omega_0 = 1 \text{ mm}, D = 5 \text{ mm}$, 透镜焦距 $F = 1 \text{ m}$, 相干阵列由 25 束呈正方形排列的基模高斯光组成。图 3 所示为不同相位残差情况对应的激光阵列远场光斑图样, 计算得合成效率分别为 ① $\sigma^2 = 0, \eta = 20.96\%$; ② $\sigma^2 = 1, \eta = 10.20\%$; ③ $\sigma^2 = 3, \eta = 4.52\%$; ④ $\sigma^2 = 10, \eta = 3.99\%$ 。可见, 相位残差越小, 光束质量越好, 合成效率越高。

对式(8)的数值计算结果表明(如图 4), η_c 可以近似地认为是占空比 FF 的单变量函数, 表示为 $\eta_c(FF)$ 。对于不同占空比 FF 的阵列合成, 需保证合成效率大于残差为 0 的理想情形下的 90%, 也即

$$\frac{\eta}{\eta_c(F F)} = \exp(-\sigma^2) + \frac{\eta_c(F F, N)}{\eta_c(F F)} [1 - \exp(-\sigma^2)] > 90\% \quad (10)$$

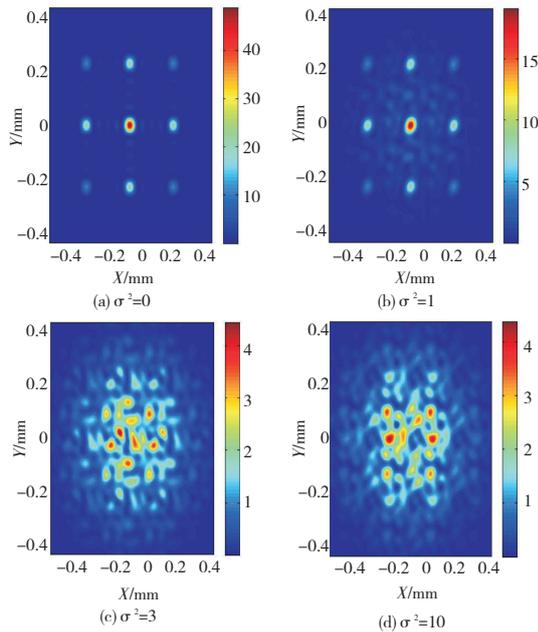


图3 不同相位残差对应的激光阵列远场光斑图样

一般情况下, $\eta_l(F F) \ll \eta_c(F F)$, 要求相位残差 σ 被控制在 $\lambda/20$ 以内。

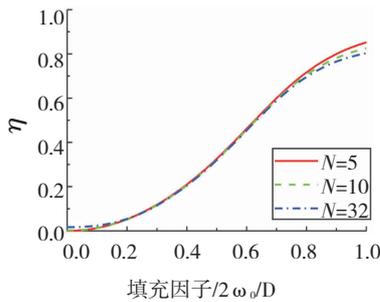


图4 无相位残差时相干合成效率曲线

3 结论

由于激光光路噪声影响和控制算法带宽的限制,激光阵列相干合成存在一定的相位残差。文中

推导了远场光强的分布表达式,并对不同的相位残差情况下的合成进行分析。结果表明,对于不同大小的阵列和不同的占空比,为保证合成效率大于理想情形下的90%,相位残差皆需控制在 $\lambda/20$ 以内。

参考文献

- [1] Anderegg J, Brosnan S, Weber M, et al. 8-watt coherently phased 4-element fiber array[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4974:1-6.
- [2] 范馨燕,刘京郊,王涛涛,等.主动锁相光纤放大器相干合成技术研究进展[J].半导体光电,2008,29(4):461-465.
- [3] Marmo Jay, Injeyan Hagop, Komine Hiroshi, et al. Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman[J]. Proceedings of SPIE7195, (719507):1-6.
- [4] 王小林,周朴,马阎星,等.基于随机并行梯度下降算法光纤激光相干合成的高精度相位控制系统[J].物理学报,2010,59(2):973-979.
- [5] 周朴,王小林,马阎星,等.随机并行梯度下降算法实现16路光纤激光相位锁定[J].中国激光,2010,37(2):367-369.
- [6] LIU Ling, Mikhail A Vorontsov. Phase-locking of tiled fiber array using SPGD feedback controller[J]. Proc. of SPIE 58950P.
- [7] Ma Y, Zhou P, Wang X, et al. Coherent beam combination with single frequency dithering technique[J]. Optical Letter, 2010, 35(9):1308-1310.
- [8] 马阎星,司磊,周朴,等.多抖动法主振荡功率放大器相干合成技术[J].强激光与粒子束,2009,21(11):1639-1644.
- [9] 周朴,马阎星,王小林,等.模拟退火算法光纤放大器相干合成[J].强激光与粒子束,2010,22(5):973-977.
- [10] XIAO Hu, WANG Xiao-lin, MA Yan-xing, et al. Phase noise measurement of high-power fiber amplifiers[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(4):041404-1-041404-4.
- [11] 钟锡华.现代光学基础[M].北京:北京大学出版社,2003.
- [12] 吕百达.激光光学[M].北京:高等教育出版社,1986.