

文章编号:1002-2082(2011)01-0149-06

激光空间相干合成效果评价方法的研究

连天虹, 王石语, 过 振, 李兵斌, 蔡德芳, 文建国

(西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘 要: 根据目标上实际最大光强与理想合成效果下最大光强的比值定义了合成效果因子, 用以评价相干合成效果。在此基础上研究了影响相干合成效果的主要因素, 并对合成效果因子的传输特性进行了研究。结果表明: 阵列紧密程度对合成效果影响不大, 在较小的空间占空比下有可能得到较好的合成效果。影响合成效果的主要因素是随机相位差, 当随机相位差增大到一定程度时, 光束合成其实已经由相干合成过渡到了非相干合成, 得不到预期的相干合成效果; 随着传输距离的增大, 空间占空比对合成效果因子的影响将进一步减小, 影响合成效果的主要因素之一是随机相位差。

关键词: 激光器阵列; 相干合成; 合成效果; 影响因素; 传输特性

中图分类号: TN249

文献标志码: A

Evaluation of spatial coherent combination of laser beams

LIAN Tian-hong, WANG Shi-yu, GUO Zhen, LI Bing-bin, CAI De-fang, WEN Jian-guo

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The combination effect was evaluated by combining effect factor defined as the ratio of actual maximum light intensity to the ideal combined light intensity at the target. On this basis, the main factors affecting combination effect and the propagation property of combination effect factor were studied. Good combination effect could be obtained with a small duty ratio, while the main factor influencing the combination effect is the random phase errors, because the beam combination has actually become incoherently combined when the random phase errors are greater than a specific value. With the increase of the propagation distance, the influence of the duty ratio on combination effect becomes smaller, and one of the main factors influencing combination effect is random phase errors.

Key words: lasers array; coherent combination; combination effect; influencing factors; propagation property

引言

多台相干激光器以某种方式在空间相干合成以获得特殊的应用效果, 是近几年的热门技术。对不同的应用目的, 需要确定相应的评价标准, 以判断相干合成的效果。这样的评价标准, 一方面要能体现相干合成的特点和应用的目的, 另一方面好的

参数还必须具备清晰的物理图像, 并且容易通过实验进行测量。目前在以获得高能量光束为目的相干合成中, 已经有许多文献对这个问题进行了研究, 文献[1]引入光束传输因子(BPF)进行评价。它关注的是远场衍射极限内的激光功率, 定义 $F_{BP} = P / (0.838 \times P_{total})$, 其中 P 为远场半径为 $1.22\lambda f/D$

收稿日期: 2010-01-01; 修回日期: 2010-01-01

作者简介: 连天虹(1984-), 男, 甘肃人, 博士研究生, 主要从事激光束相干合成研究工作。

E-mail: tianhongl@126.com

的桶中功率, P_{total} 为输出光束的总功率, D 为光束发射孔径的最小外接圆直径。但是在激光雷达目标探测等应用领域中, 相干合成的直接目的是在目标处获得大的峰值光强。在一些特殊的探测应用中, 例如激光成像扫描雷达, 为了减少扫描维度, 甚至需要通过相干合成的办法在远场目标上获得狭长的长条状激光光斑分布。对于这样的应用目的, BPF 因子并不适用。本文尝试性地定义了一个参数来处理这方面的问题, 该参数命名为合成效果因子 β , 并且在不同的相干激光器排列和各激光器相位差存在一定偏差的情况下, 分别计算了相干合成光强及合成效果因子 β , 也对影响合成效果的主要因素进行了分析。

$$E_n(x, y, z) = A_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left(-\frac{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2}{\omega^2(z)}\right) \times \exp\left(-i\left(k\left(\frac{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2}{2R(z)} + z\right) - \Psi + \varphi_{n0}\right)\right) \quad (1)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$; $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/f)^2}$; $R(z) = z + f^2/z$; $f = \pi\omega_0^2/\lambda$; $\Psi = \arctan(z/f)$, λ 为光波长。

相干合成中光束的叠加为光场的叠加:

$$E_{\text{total}}(x, y, z) = \sum_n E_n(x, y, z) \quad (2)$$

相干合成光强^[3]:

$$I(x, y, z) = \langle E_{\text{total}}(x, y, z) \cdot E_{\text{total}}^*(x, y, z) \rangle_t \quad (3)$$

式中 $\langle \cdot \rangle_t$ 表示对时间求平均。利用(1)式和(3)式, 可以对合成光束在传输过程中任何位置的光强进行计算。

2 合成效果的评价参数

为了对合成效果进行评价, 首先必须给出一个合成效果的评价标准。我们主要是需要对合成光束的主峰进行评价, 主峰即合成光束中光强最大的峰。这里我们提出用合成效果因子 β 来评价合成效果。定义实际合成的峰值光强与理想合成的峰值光强之比为合成的效果因子, 即:

$$\beta = I_{\text{max}}/I_0 \quad (4)$$

式中: I_{max} 为实际合成的峰值光强; I_0 为理想合成的峰值光强。 β 的取值在 0 到 1 之间, β 越大, 合成效果越好。

对 N 束完全相同的激光, 若空间某处各束光的峰值光强为 I , 则 N 束光相干合成后, 该处的理想峰值光强 I_0 为 N^2I , 合成效果因子:

1 理论模型

如图1所示, 激光器单元在 $z=0$ 平面正六边形排列, 光束沿 z 轴传输, 相邻激光器的间距为 d , 光束中心坐标为 (x_n, y_n) , 假设每个激光器出射的光束为基模高斯光束, 束腰半径为 ω_0 , 即^[2]:

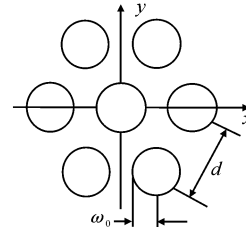


图1 激光器排布阵列

Fig. 1 Scheme of the laser array

$$\beta = I_{\text{max}}/N^2I \quad (5)$$

3 计算结果和讨论

用(1)式和(3)式, 我们对合成光束的光强分布进行计算, 进而由(5)式计算合成效果因子, 对影响合成效果的主要因素进行分析。

3.1 阵列排列紧密程度对相干合成效果的影响

文献[4]研究了填充因子对激光组束光场功率分布的影响, 认为随填充因子的减小, 主峰宽度在减小, 但功率密度不一定减小; 文献[5]研究认为, 占空比的改变不会影响峰值功率及中心光斑的能量密度。我们利用合成效果因子来研究空间占空比 $\tau = 2\omega_0/d$ 对合成效果的影响。暂不考虑初相位的影响, 即在(1)式中, 取 $\varphi_{n0} = 0$, 由于此时没有相位的变化, 所以(3)式中对时间求平均的运算可以不考虑。相关参数取值: $A_0 = 1$, $\lambda = 1\ 064\ \text{nm}$, $\omega_0 = 2\ \text{mm}$, $z = 2\ 000\ \text{m}$ 。图2是占空比取不同值时, 合成光束的归一化光强分布。图3为合成效果因子随空间占空比 τ 的变化关系。

从图3可以看出, 当空间占空比 τ 在一定范围内减小时, 合成效果因子 β 基本保持不变, 所以占空比在一定范围内减小不会造成合成效果的降低。当 τ 小于 0.2 时, β 开始呈周期振荡减小的趋势, 产生这种现象的原因是: 随着 τ 的变化, 中心点与各光束间的相位差周期性变化而产生相长干涉或相消干涉。所以在较小的空间占空比下有可能得到较好的

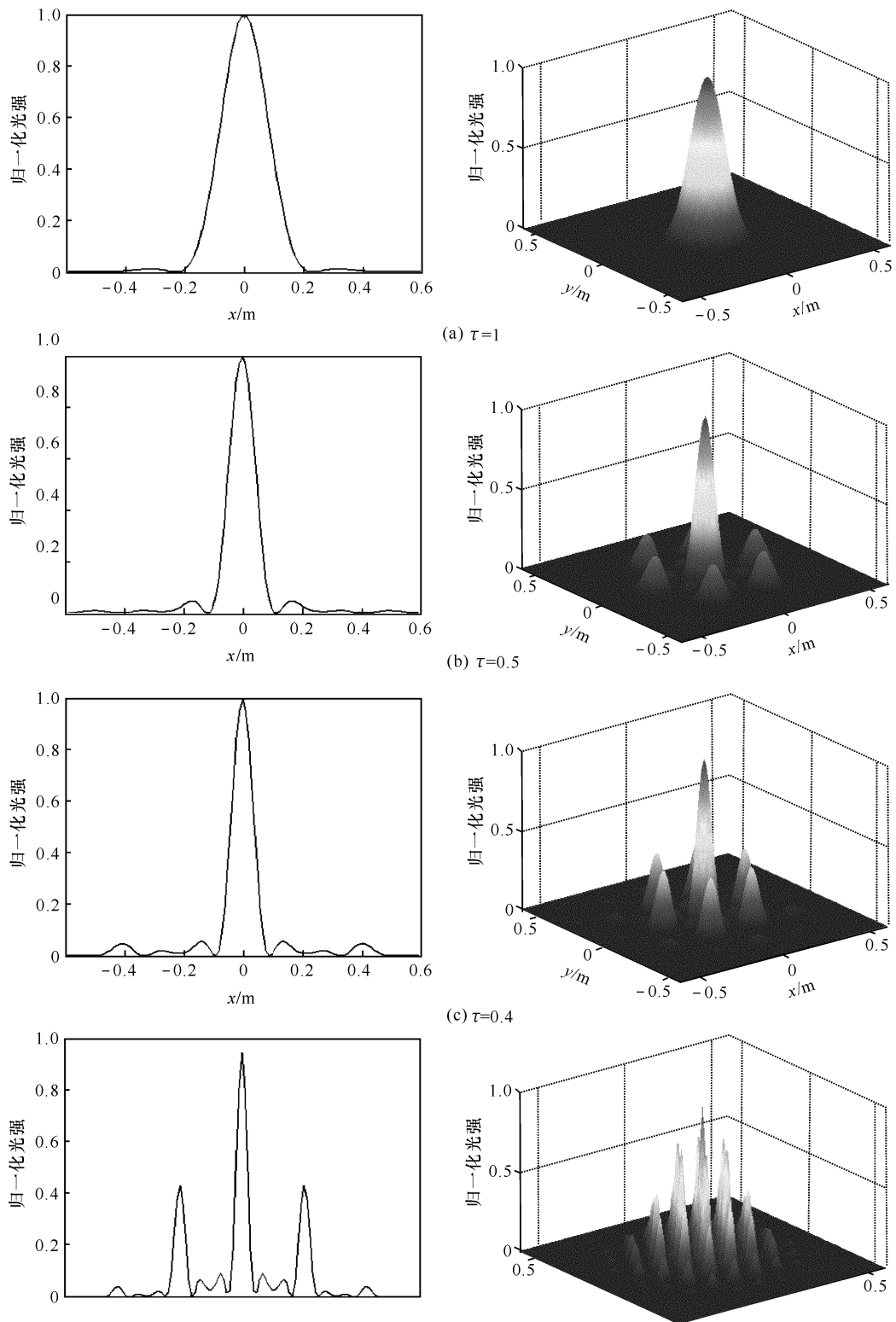


图2 不同占空比下的光强分布($A_0=1, \lambda=1\ 064\ \text{nm}, \omega_0=2\ \text{mm}, z=2\ 000\ \text{m}$)

Fig. 2 Intensity distribution corresponding to different duty ratios

合成效果,而且,从光强分布图可以看出,占空比减小时,侧峰增长很快。例如,当 $\tau=0.2$ 时, β 基本等于1,此时侧峰的归一化峰值光强已经达到了0.5,对7束光而言,为单光束峰值光强的24.5倍。因此,

选择合适的占空比有可能同时得到多个峰值较大的侧峰。类似于光学相控阵技术^[6],这有可能将同一光束同时传给多个接收机,可用于激光通信等领域。

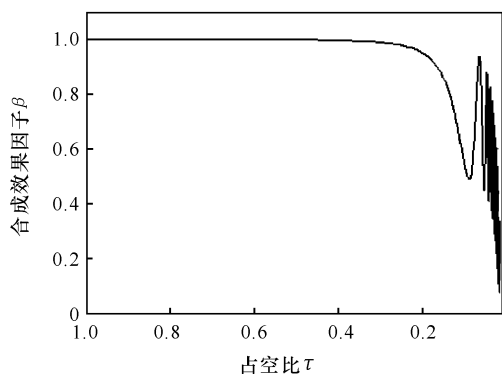


图3 合成效果因子随占空比的变化关系

Fig. 3 Dependence of combination effect factor on duty ratio

3.2 随机相位差对合成效果的影响

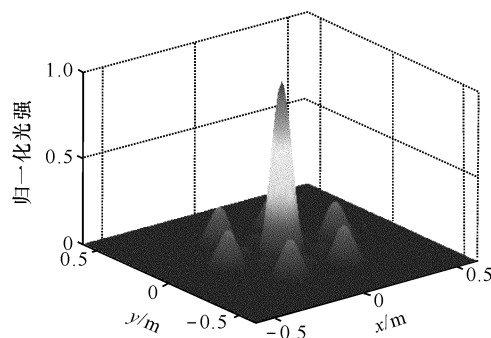
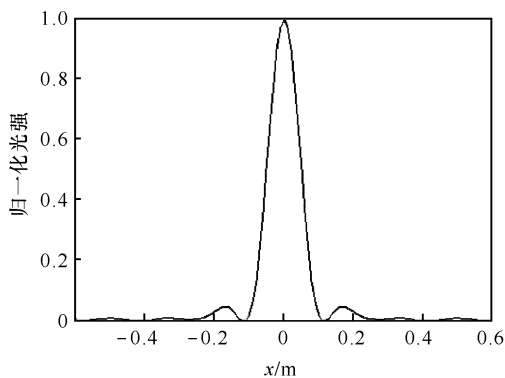
实际激光器由于受到热效应和泵浦不均匀等随机因素的影响,出射激光的相位是随机变化的^[7],

相干合成系统中各种相位控制方案也都会有随机相位误差,有必要分析随机相位误差对合成效果的影响。

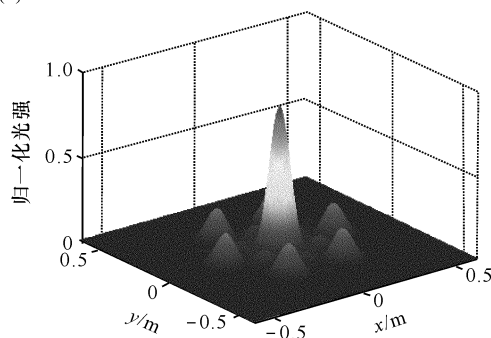
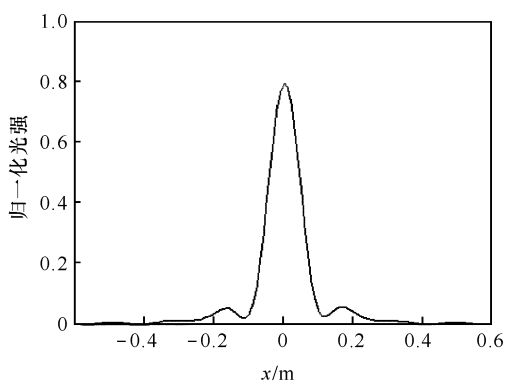
假设每路激光的出射相位相互独立^[8],服从正态分布,即(1)式中:

$$\varphi_{i0} \sim N(0, \sigma^2) \tag{6}$$

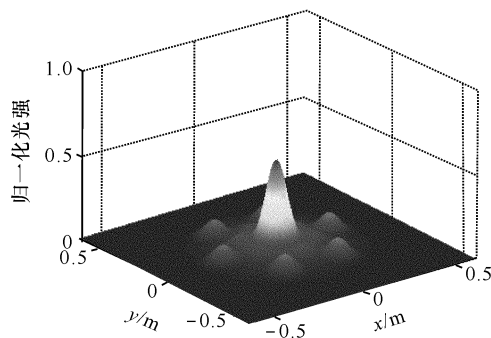
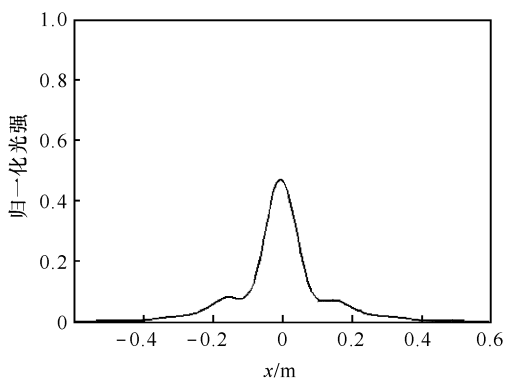
σ^2 为方差。文献[9]中计算了有随机相位差时的合成光强分布,但没有考虑对时间求平均值的运算,认为得到的光强分布仅是众多可能光强分布中的一种。对(3)式中时间取平均值运算,计算在有随机相位差时的光强分布,编程中用对多次随机相位下的光强分布求平均值来实现。图4为空间占空比为0.5时,随机相位方差 σ 取不同值时的光强分布。计算得到的合成效果因子 β 随 σ 的变化如图5所示。



(a) $\sigma=0$



(b) $\sigma=0.5$



(c) $\sigma=1.0$

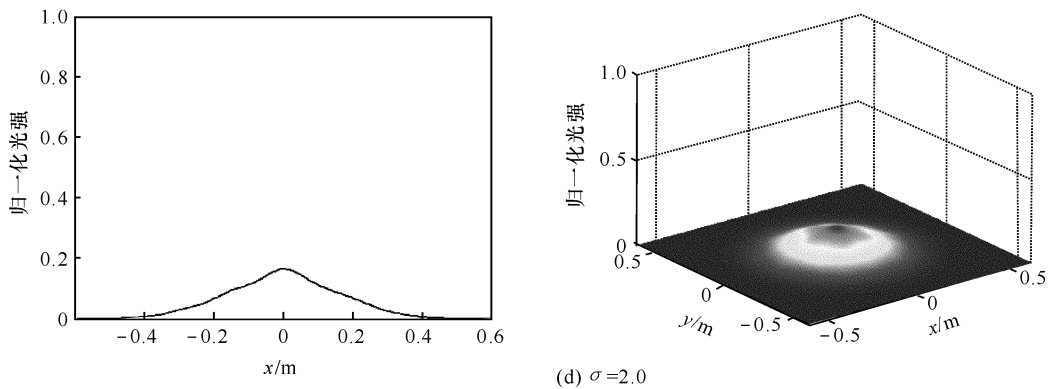


图4 不同 σ 下的光强分布 ($\tau=0.5$)

Fig. 4 Intensity distribution with different σ ($\tau=0.5$)

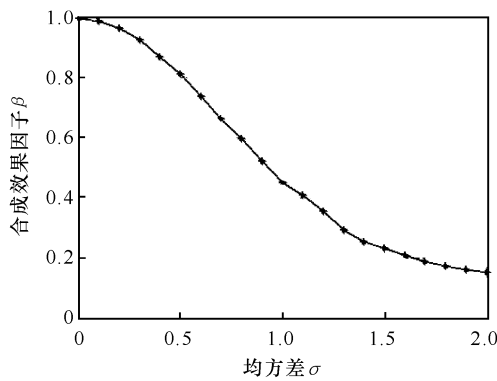


图5 β 随 σ 的变化

Fig. 5 Dependence of β on σ

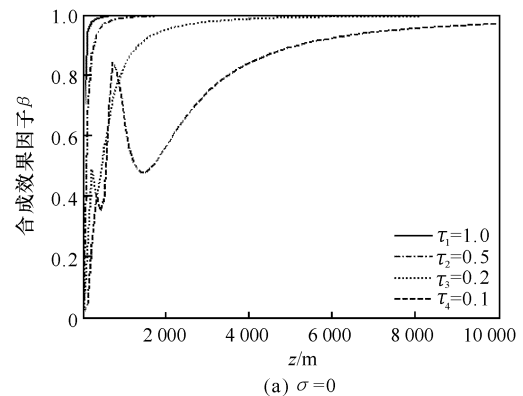
由图5可以看出,随着随机相位均方差 σ 的增大,合成效果因子 β 急剧减小,当 σ 增大至2.0时, β 减小为约0.15,对7束激光而言,在完全非相干叠加后 β 因子也应该为 $1/7$,这说明当 σ 大于2.0后,完全失去了相干合成的效果,从光强分布图上看,也看不到干涉条纹。产生这种现象的物理本质是:随着随机相位差的增大,各光束间的相干效应程度减弱,干涉效果变得不明显,光束叠加已经由相干合成时场的叠加过渡到了简单的光强叠加。所以,要想获得较好的相干合成效果,必须严格控制随机相位差。

3.3 合成效果因子 β 的传输特性

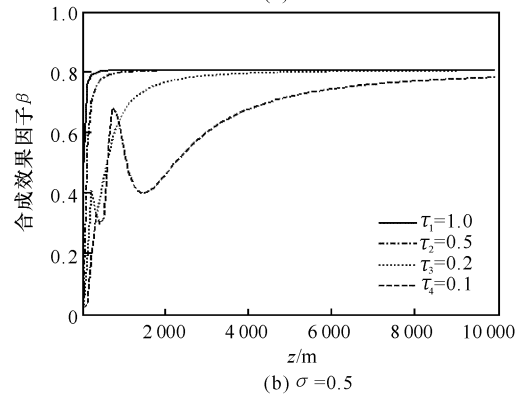
实际应用中,合成光束随传输距离的变化情况是重要的,这里我们通过讨论合成效果因子 β 随传输距离的变化来讨论合成光束随传输距离的变化特性。计算得到当空间占空比和随机相位均方差 σ 取不同值时,合成效果因子 β 随传输距离的变化情况,如图6所示。

由图6可以看出,影响 β 因子传输特性的主要参数仍然是随机相位方差 σ 。在 z 较小的情况下占空比对 β 因子有一定影响,但随 z 的增大,不同占空比 τ 对应的 β 因子最终都趋近于该 σ 下 $\tau=1$ 时 β 因

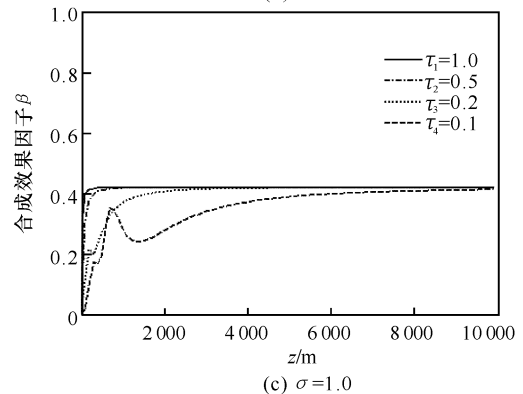
子的值,占空比 τ 对 β 因子的影响随传输距离的增大越来越小。这说明,在远距离使用的情况下,阵列排列占空比对合成效果的影响将变得更小,影响合成效果的主要因素是随机相位差。



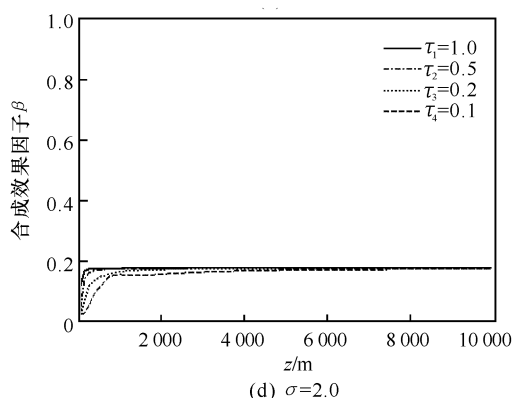
(a) $\sigma=0$



(b) $\sigma=0.5$



(c) $\sigma=1.0$

图6 β 因子的传输特性Fig. 6 Propagation property of β factor

4 结论

我们分别计算了不同阵列排列紧密程度和随机相位差情况下相干合成的光强和合成效果因子,并对合成效果因子的传输特性进行了研究。分析认为,空间占空比在一定范围内不会对相干合成效果产生影响,而且空间占空比取较小的值有可能得到获得好的合成效果,同时得到多个光强较大的侧峰;随机相位差对相干合成效果会产生严重影响,当随机相位差增大到一定程度时,相干合成其实已经过渡到了非相干合成,达不到相干合成效果。随传输距离的增加,空间占空比对合成效果因子的影响会进一步减小,影响合成效果的主要因素之一是随机相位差。

参考文献:

- [1] 周朴,王小林,马阎星,等. 激光阵列部分相干合成的光束质量[J]. 光学学报,2010,30(4):1066-1069.
ZHOU Pu, WANG Xiao-lin, MA Yan-xing, et al. Beam quality of partially coherent combining of laser array [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30 (4): 1066-1069. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 周炳琨,高以智,陈倜嵘,等. 激光原理[M]. 第四版. 北京:国防工业出版社,2004.
ZHOU Bing-kun, GAO Yi-zhi, CHEN Ti-rong, et al. Principles of lasers [M]. 4th ed. Beijing: Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [3] LAUTERBORN W, KURZ T, WIESENFELDT M. Coherent optics-fundamentals and applications [M]. Beijing: World Publishing Corporation, 1998.
- [4] 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.
TANG Qian-jin, SHI Xiang-chun, HU Qi-quan. Effect of filled factor on the far field profiles of laser beam combination [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(5): 566-569. (in Chinese with an English abstract)
- [5] 曹润秋,陆启生,侯静,等. 光纤激光器相干合成系统中组束误差对远场光场的影响[J]. 中国激光,2008,35(3):351-358.
CAO Jian-qi, LU Qi-sheng, HOU Jing, et al. Influence of combining errors in the system for coherent combining of fiber lasers on the far field of output [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(3): 351-358. (in Chinese with an English abstract)
- [6] 董光焰,郑永超,张文平,等. 相控阵激光雷达技术[J]. 红外与激光工程,2006,35(增刊),289-293.
DONG Guang-yan, ZHENG Yong-chao, ZHANG Wen-ping, et al. Technique of phased array lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(sup): 289-293. (in Chinese with an English abstract)
- [7] 王伟,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.
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. (in Chinese with an English abstract)
- [8] NABORS C D. Effects of phase errors on coherent emitter arrays [J]. Applied Optics, 1994, 33 (12): 2284-2289.
- [9] LI Yong-zhong, QIAN Lie-jia, LU Da-quan. Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution [J]. Optics & Laser Technology, 2009, 15(3): 957-963.