

文章编号: 0258-7025(2009)05-1042-05

湍流对相干合成与非相干合成远场光束质量的影响

周 朴 刘泽金 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 根据广义惠更斯-菲涅耳原理,对相干合成和非相干合成光束在湍流大气中的传输进行数值计算,并引入光束传输因子(BPF)用于评价合成光束的光束质量,对湍流大气对相干合成与非相干合成远场光束质量的影响进行定量分析。研究表明,在自由空间及强度较弱的湍流大气中传输时,相干合成光束在远场呈现多旁瓣的非高斯分布特征,与非相干合成光束相比具有峰值强度高的优势。但是随着湍流强度的增大,相干合成光束之间的相干性被破坏,相干合成光束的远场光强分布逐渐演化成与非相干合成的情形一致。定量计算结果表明,对于不同波长、不同数目的激光阵列,在较强的湍流大气中传输时,相干合成的光束质量与非相干合成光束质量相比均不占优势。计算模型和结果为工程实际中合成方案的选择和评估提供了参考。

关键词 大气光学; 大气湍流; 相干合成; 非相干合成; 广义惠更斯-菲涅耳原理; 光束质量

中图分类号 TN012 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093605.1042

Influence of Atmospheric Turbulence on Far-Field Beam Quality of Coherent and Incoherent Combined Laser

Zhou Pu Liu Zejin Xu Xiaojun

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

Abstract Propagation of coherent and incoherent combined laser beams in atmospheric turbulence is numerically calculated by using extended Huygens-Fresnel principle. With beam propagation factor (BPF), the influence of atmospheric turbulence on far-field beam quality of coherent and incoherent combined laser beams is evaluated quantitatively. The investigation reveals that the far-field coherent combining irradiance distribution have the multiple side-lobes pattern of non-Gaussian character while propagating in free space with weak turbulence, and it have the advantage of high peak intensity over the incoherent combining counterpart. With the coherence length decreasing, the far-field coherent combining irradiance distribution gradually evolves into the pattern of its incoherent combining counterpart. The quantitatively calculation shows that for laser arrays with different laser number or different laser wavelength, the coherent combined beam quality is no better than its incoherent combining counterpart when propagating in stronger turbulent atmosphere. The mathematical model and calculation result can offer a reference for choosing and evaluating different combining schemes.

Key words atmospheric optics; atmospheric turbulence; coherent combining; incoherent combining; extended Huygens-Fresnel principle; beam quality

1 引言

将多束激光进行相干合成是获得高功率、高光束质量激光的有效途径^[1]。光纤激光器结构简单、体积小、使用灵活,适于进行相干合成。目前,高功率光纤

激光的相干合成技术研究已经成为激光技术领域的研究热点,国内外研究者已经利用多种方案成功实现小数目中低功率等级光纤激光的相干合成^[2~4]。相干合成依靠多束激光的干涉在远场目标处产生高的

收稿日期: 2008-04-15; 收到修改稿日期: 2008-07-15

基金项目: 国防科技大学研究生创新基金(B070701)资助课题。

作者简介: 周 朴(1984—),男,博士研究生,从事光纤激光器及光束合成等方面的研究。E-mail: jnck621@163.com

导师简介: 刘泽金(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术等领域的研究。E-mail: zejinliu@vip.sina.com

功率密度,它要求精密锁定各束光纤激光的相位,并且要求各束激光偏振匹配、线宽极窄以及好的光束质量^[1,5]。而目前研制成功的商用千瓦级高功率光纤激光器输出光束谱线较宽(10 nm 以上)且随机偏振^[5~7],美国学者研究认为,这种千瓦级光纤激光不能用于相干合成,并提出了利用多路光纤激光非相干合成作为远程定向能使用的方案。非相干合成既不利用主动或被动锁相的方法控制激光器阵元的相位,也不利用光栅等色散元件控制阵元光束的出射方向保持同轴输出,它对激光器阵元光束的相位、波长、偏振态等没有任何要求,只是用光束定向器控制每一个阵元光束的出射方向,使其在目标靶面上汇聚,获得远场高强度分布。文献[5]的计算研究表明,非相干合成不失为一种颇具竞争力的定向能应用系统方案。

无论是相干合成还是非相干合成,对于远程能量传输、自由空间光通信这样的应用场合,激光的光束质量总因大气传输中经受多种线性和非线性效应的影响而降低。在能量型的实际应用场合,特别是战术使用,尽管采用自适应光学技术可以在一定程度上补偿大气的影响,但是会增加系统的成本和复杂性,一般情形下不加以采用。因此有必要研究实际大气环境中相干合成与非相干合成的传输特性,分析它们在不加自适应光学技术补偿的情形下对远

场目标的作用效果。单路激光的大气传输理论与实验研究已经较为成熟和完善,但是对于激光阵列的大气传输的研究直至去年才见报道^[8,9]。文献[8,9]利用广义惠根斯-菲涅耳原理建立了阵列光束的湍流大气传输的数学模型。本文在该模型的基础上对相干合成和非相干合成光束在湍流大气中的传输进行进一步计算,引入光束传输因子(BPF)用于评价合成光束质量的评价因子^[10],对湍流大气对相干合成与非相干合成远场光束质量的影响进行定量分析。

2 理论模型

对于相干合成光束的大气传输,假设共有 M 路激光参与合成,光束发射端位于 $z=0$ 平面,所有子光束沿 z 轴传输。 $z=0$ 平面光场复振幅分布为

$$E(x, y, 0) = \sum_i^M E_i(x, y, 0), \quad (1)$$

式中 $E_i(x, y, 0)$ 是第 i 束光在 $z=0$ 平面的光场复振幅分布,光束中心位置为 $(a_i, b_i, 0)$ 。假设子光束复振幅均服从高斯分布,即

$$E_i(x, y, 0) = \exp\left[-\frac{(x-a_i)^2 + (y-b_i)^2}{w_0^2}\right]. \quad (2)$$

根据广义惠更斯-菲涅耳原理,在传输距离 L 后,接收平面($z=L$)处的平均光强分布为^[8,9,11,12]

$$\langle I_{\text{con}}(p, q, L) \rangle = \frac{k^2}{(2\pi\kappa)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y, 0) E^*(\xi, \eta, 0) \cdot \exp\left\{\frac{ik}{2L}[(p-x)^2 + (q-y)^2 - (p-\xi)^2 - (q-\eta)^2]\right\} \times \langle \exp[\psi(x, y, p, q) + \psi^*(\xi, \eta, p, q)] \rangle dx dy d\xi d\eta, \quad (3)$$

式中

$$\langle \exp[\psi(x, y, p, q) + \psi^*(\xi, \eta, p, q)] \rangle = \exp[-0.5D_\psi(x-\xi, y-\eta)] = \exp\left\{-\frac{1}{r_0^2}[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]\right\}, \quad (4)$$

式中 D_ψ 为球面波的大气结构函数, $r_0 = (0.545C_n^2 k^2 L)^{-3/5}$ 为大气相干长度, C_n^2 为折射率结

构函数。 r_0 和 C_n^2 均可以用于描出湍流的强弱。

将(4)式代入(3)式,经化简后可得^[8]

$$\langle I_{\text{con}}(p, q, L) \rangle = \sum_{i=1}^M \Gamma_{ii}(p, q, L) + 2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=i+1}^M \text{Re}[\Gamma_{ij}(p, q, L)], \quad (5)$$

其中

$$\Gamma_{ii}(p, q, L) = \frac{w_0^2}{w^2} \exp\left\{-\frac{2}{w^2}[(p-a_i)^2 + (q-b_i)^2]\right\}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Re}[\Gamma_{ij}(p, q, L)] &= \frac{w_0^2}{w^2} \exp\left\{-\frac{2}{w^2}\left[\left(p-\frac{a_i+a_j}{2}\right)^2 + \left(q-\frac{b_i+b_j}{2}\right)^2\right]\right\} \times \\ &\cos\left\{\frac{k w_0^2 \tau_1}{2 w^2 L}[(a_i-a_j)(a_i+a_j-2p) + (b_i-b_j)(b_i+b_j-2q)]\right\} \times \\ &\exp\left\{-\frac{\tau_2}{2 w^2}[(a_i-a_j)^2 + (b_i-b_j)^2] + \frac{2}{w^2}\left[\left(\frac{a_i-a_j}{2}\right)^2 + \left(\frac{b_i-b_j}{2}\right)^2\right]\right\}, \quad (7) \end{aligned}$$

式中 $\omega = \sqrt{1 + \tau_1 + \tau_2} \omega_0$, $\tau_1 = 4L^2 / (k^2 \omega_0^4)$, $\tau_2 = \frac{8L^2}{(k^2 \omega_0^2 r_0^2)}$. τ_1 和 τ_2 为衍射和湍流导致的光斑扩展因子。

对于非相干合成的情形,接收平面上光强分布

为各子光束单独传输到接收平面上光强分布的直接叠加,根据广义惠更斯-菲涅耳原理,在传输距离 L 后,接收平面 ($z=L$) 处的平均光强分布为

$$\langle I_{\text{non}}(p, q, L) \rangle = \sum_i^M \left| \frac{k^2}{(2\pi z)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_i(x, y, 0) E_i^*(\xi, \eta, 0) \cdot \exp\left\{ \frac{ik}{2L} [(p-x)^2 + (q-y)^2 + (p-\xi)^2 + (q-y)^2] \right\} \times \langle \exp[\psi(x, y, p, q) + \psi^*(x, y, p, q)] \rangle dx dy d\xi d\eta \right|^2. \quad (8)$$

3 数值计算与讨论

根据理论模型,可以计算相干合成和非相干合成光束大气传输后远场光强的分布。以图 1 所示的环形结构激光阵列为例进行数值计算。阵列中心有一束激光,周围激光束以周期性结构向外排布。由 N 圈的激光组成的阵列共含有 $M=1+3N(N+1)$ 个阵列单元,相邻光束中心距离为 d ,整个阵列的口径为 $D=2Nd$ 。

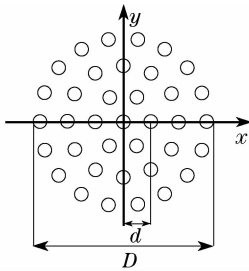


图 1 环形分布的激光阵列

Fig. 1 Schematic diagram of the laser array with ring distribution

假设阵列中排布有 4 圈(共 61 路)激光。各路子光束的波长均为 $\lambda=1 \mu\text{m}$,光斑半径 $\omega_0=1 \text{ cm}$,相邻光束中心距离 $d=3 \text{ cm}$,阵列口径 $D=24 \text{ cm}$,传输距离为 $L=10 \text{ km}$ 。利用(5)式和(8)式计算该激光阵列相干合成和非相干合成时在不同强度湍流大气中传输 10 km 至接收平面处的相对光强分布,如图 2 所示。计算结果表明,在自由空间及湍流强度较弱(如 $D/r_0=2$)的大气中传输时,相干合成光束的远场光斑呈现典型的非高斯分布特性,除了一个峰值功率较高的主峰外,还有若干旁瓣。与非相干合成光束在远场的光强分布相比,相干合成光束具有峰值强度高的优势。但是随着湍流强度的增强和大气相干长度的减小,相干合成光束远场光强分布逐渐由典型的多旁瓣非高斯分布演化成非相干合成情形下的高斯分布。在湍流强度较强时(如 $D/r_0=20$),各路激光之间的相

干性已经完全被破坏,相干合成光束与非相干合成光束在远场的光强分布已经基本没有区别,相干合成光束此时也无峰值强度高的优势。而非相干合成光束在远场的光斑始终呈现高斯分布的特征,这是由大气湍流影响的各向均匀性引起的^[9]。随着湍流强度的增强,光斑半径也在不断增大,光束质量也随之变差。

M^2 因子, β 因子等常被用作评价单束激光的光束质量^[13],对于合成光束而言,文献研究表明^[14],由于合成光束远场光强呈现的多旁瓣、非高斯分布特性,这些因子并不适合用于评价合成光束的光束质量。文献[10]提出了用 BPF 评价合成光束的质量。BPF 定义为

$$\text{BPF} = (P/P_{\text{DL}}), \quad (9)$$

其中 P 定义为远场半径为 $(1.22\lambda L/D)$ 大小的桶中能量; P_{DL} 为激光器阵列输出光束的总能量。实际上,远场半径为 $(1.22\lambda L/D)$ 是从理想均匀平面波的圆孔衍射得到的判据,判断这个半径内远场能量的多少从本质而言就是判断相干合成得到的光束与光纤激光阵列相同口径的理想均匀平面波的差别。BPF 的理想值为 1,非理想的合成光束 BPF 值总是小于 1。在实际情形中,BPF 的值越接近 1,表明光束质量越好。

利用(9)式计算相干合成和非相干合成光束在不同强度湍流大气中传输时的远场光束质量(计算参数为:阵列中激光路数 $M=61$, $\lambda=1 \mu\text{m}$, $\omega_0=1 \text{ cm}$, $d=3 \text{ cm}$, $D=24 \text{ cm}$, $L=10 \text{ km}$),计算结果如图 3 所示。在自由空间传输时,相干合成和非相干合成的 BPF 值分别为 0.280 和 0.040;在湍流强度较弱(如 $D/r_0=2$)时,相干合成和非相干合成的 BPF 值分别为 0.258 和 0.039;而当湍流强度较强(如 $D/r_0=20$)时,相干合成和非相干合成的 BPF 值分别为 0.019 和 0.015,此时相干合成的效果与非相干合成相比已无优势。

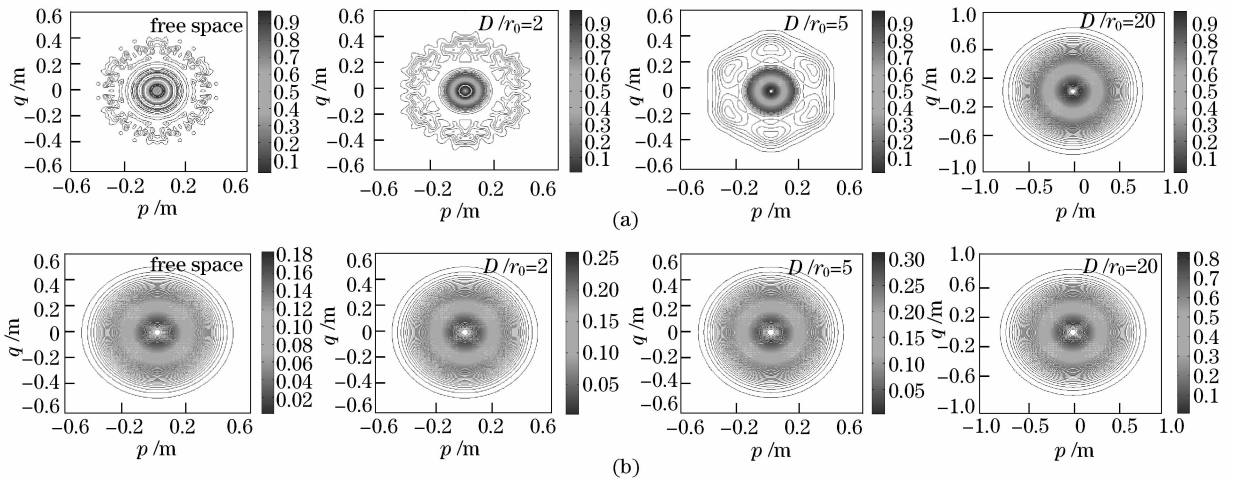


图 2 相干合成与非相干合成光束在不同强度湍流大气中传输至远场处光强分布的等高线图。(a) 相干合成；(b) 非相干合成

Fig. 2 Contour of the far-field irradiance pattern for coherent and incoherent combined beam propagating in atmosphere with different coherence length r_0 . (a) coherent combining; (b) incoherent combining

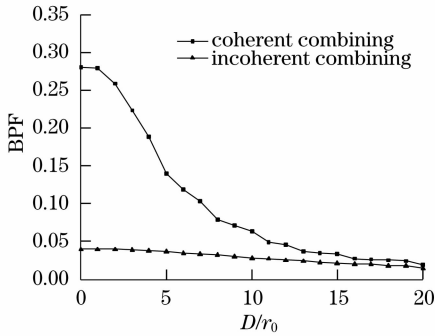


图 3 相干合成与非相干合成光束在不同强度湍流大气中传输的远场光束质量

Fig. 3 Far-field beam quality of coherent and incoherent combined beam propagating in atmosphere with different coherence length r_0

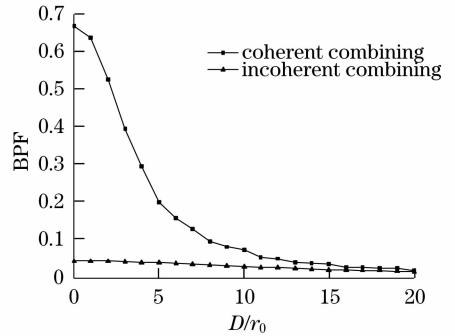


图 4 相干合成与非相干合成光束在不同强度湍流大气中传输的远场光束质量($\lambda=3.8 \mu\text{m}$)

Fig. 4 Far-field beam quality of coherent and incoherent combined beam propagating in atmosphere with different coherence length r_0 ($\lambda=3.8 \mu\text{m}$)

改变阵列激光的波长为 $\lambda=3.8 \mu\text{m}$, 其余计算参数保持与图 3 中采用的参数不变, 此时相干合成和非相干合成光束在不同强度湍流大气中传输时的远场光束质量如图 4 所示。在自由空间传输时, 相干合成和非相干合成的 BPF 值分别为 0.668 和 0.043; 当湍流强度较强(如 $D/r_0=20$)时, 相干合成和非相干合成的 BPF 值分别为 0.020 和 0.016。

改变激光阵列中参与合成的激光路数 M 为 37, 其余计算参数保持与图 3 中采用的参数不变, 此时相干合成和非相干合成光束在不同强度湍流大气中传输时的远场光束质量如图 5 所示。在自由空间传输时, 相干合成和非相干合成的 BPF 值分别为 0.529 和 0.072; 当湍流强度较强(如 $D/r_0=20$)时, 相干合成和非相干合成的 BPF 值分别为 0.022 和 0.020。

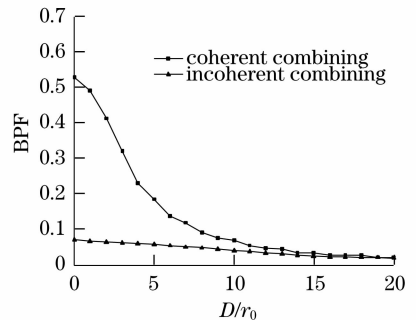


图 5 相干合成与非相干合成光束在不同强度湍流大气中传输的远场光束质量($M=37$)

Fig. 5 Far-field beam quality of coherent and incoherent combined beam propagating in atmosphere with different coherence length r_0 ($M=37$)

图 3~5 表明, 对于不同波长、不同数目的激光阵列, 在较强的湍流大气中传输时, 激光单元之间的相干

性遭到了破坏,在不采用自适应光学技术的情形下,相干合成的光束质量与非相干合成光束质量相比均不占优势。而如果非相干合成的效果也能满足实际需要,它也不失为一种值得考虑的系统设计方案。

4 结 论

根据广义惠更斯-菲涅耳原理,对相干合成和非相干合成光束在湍流大气中的传输进行了数值计算,并引入 BPF 用以评价合成光束的光束质量,对湍流大气对相干合成与非相干合成远场光束质量的影响进行了定量分析,计算模型和结果为工程实际中合成方案的选择和评估提供了参考。在自由空间及强度较弱的湍流大气中传输时,相干合成光束在远场呈现多旁瓣的非高斯分布特征,与非相干合成光束相比具有峰值强度高的优势。但是随着湍流强度的增大,相干合成光束之间的相干性被破坏,相干合成光束的远场光强分布逐渐演化成与非相干合成的情形一致。定量计算结果表明,对于不同波长、不同数目的激光阵列,在不采用自适应光学技术的情形下及较强的湍流大气中传输时,相干合成的光束质量与非相干合成光束质量相比均不占优势。另外,仅讨论了湍流对相干合成和非相干合成光束质量的影响。在实际大气传输过程中,还存在大气吸收、大气散射、热晕及湍流-热晕相互作用等复杂的线性和非线性效应,下一步的工作是建立更加全面的计算模型,在此基础上进行更充分的数值计算,试图找到合成光束质量与大气特征参数的若干定性关系。

参 考 文 献

1 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance

- sources [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11** (3): 567~577
- 2 Jesse Anderegg, Stephen Brosnan, Eric Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays [C], *SPIE*, 2006, **6102**; 61020U
- 3 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Coherent output power of 60 W from two large-core double-cladding fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1279~1280
何 兵,楼祺洪,周 军等. 两根大芯双包层光纤激光器获得 60 W 相干输出[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1279~1280
- 4 Hou Jing, Xiao Rui, Jiang Zongfu *et al.*. Coherent beam combination of three ytterbium fiber amplifiers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(10): 1585~1588
侯 静,肖 瑞,姜宗福等. 三路掺镱光纤放大器的相干合成实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(10): 1585~1588.
- 5 Phillip Sprangle, Joseph Penano, Bahman Hafizi *et al.*. Incoherent combining of high-power fiber lasers for long-range directed energy applications[C]. 2006, *SSDLTR Proceedings*
- 6 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6088~6092
- 7 <http://www.ipgphotonics.com>
- 8 Xiuxiang Chu, Zejin Liu, Yi Wu. Propagation of a general multi-Gaussian beam in turbulent atmosphere in a slant path [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(1): 74~79
- 9 Y. Cai, Y. Chen, H. T. Eyyuboglu *et al.*. Propagation of laser array beams in a turbulent atmosphere [J]. *App. Phy. B*, 2007, **88**: 467~475
- 10 P. Zhou, Z. Liu, X. Xu *et al.*. Numerical analysis of the effects of aberrations on coherently combined fiber laser beams [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**: 3350~3359
- 11 H. T. Eyyuboglu, Y. Baykal. Reciprocity of cos-Gaussian and cosh-Gaussian laser beams in turbulent atmosphere [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(20): 4659~4674
- 12 S. C. H. Wang, M. A. Plonus. Optical beam propagation for a partially coherent source in the turbulent atmosphere [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1979, **69**(9): 1297~1304
- 13 Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. 39
苏 毅,万 敏. 高能激光系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. 39
- 14 A. E. Siegman, How to (Maybe) Measure Laser Beam Quality [C]. *Proc. OSA Annual Meeting*, 1998