

# 相干合成光束在湍流大气中的传输

周 朴<sup>1</sup> 许晓军<sup>1</sup> 刘泽金<sup>1</sup> 储修祥<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; <sup>2</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 分析了湍流大气对相干合成光束传输的影响, 根据广义惠更斯-菲涅耳原理, 对相干合成光束在不同强度湍流大气中传输进行计算, 对接收平面处的光强分布的统计特性, 如桶中功率 (PIB) 曲线、局部功率曲线进行比较。研究表明, 较弱的湍流大气对相干合成光束的传输影响较小, 接收平面的光强分布以及 PIB 曲线基本不变; 随着湍流强度的增大, 相干合成光束的光强分布和 PIB 曲线产生显著变化, 光斑扩展和能量的弥散速度加快, 光束的能量集中度显著降低。计算了湍流大气传输后光束的空间相干度, 认为空间相干度下降是降低相干合成效果的原因, 对如何降低湍流大气的影响进行讨论。

**关键词** 大气光学; 湍流大气; 相干合成; 光束传输

**中图分类号** TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082811.2051

## Propagation of Coherently Combined Laser Beam in Turbulent Atmosphere

Zhou Pu<sup>1</sup> Xu Xiaojun<sup>1</sup> Liu Zejin<sup>1</sup> Chu Xiuxiang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China

<sup>2</sup> Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** The effect of turbulent atmosphere on the propagation of coherently combined laser beam is studied. Propagation of coherently combined laser beam in turbulent atmosphere is numerically calculated by using generalized Huygens-Fresnel principle. The statistical characteristics, i. e. power in the bucket (PIB) curve and fractional power curve are calculated. It is revealed that the propagation of coherently combined beam suffers less in weak turbulence, and the irradiance distribution and PIB curve in the receiving plane are the same as its counterparts in free space. However, the beam spot will spread faster as the effect of turbulence gets stronger, and the energy centrality reduces evidently. The spectral degree of coherence of laser beam after propagation in the turbulent atmosphere is calculated. It is revealed that degrading in beam coherence causes the declining of coherent combination. The way for eliminating the effect of turbulent atmosphere is discussed.

**Key words** atmosphere optics; turbulent atmosphere; coherent combination; beam propagation

## 1 引 言

对多路光纤激光器输出光束进行相干合成是获得高功率、高光束质量的激光输出的有效方法, 有望在自由空间光通信、定向能量传输等领域得到广泛应用, 近年来成为科研人员的研究热点<sup>[1~3]</sup>。美国诺格公司研究人员已成功实现 4 路百瓦级光纤激光的相干合成<sup>[3]</sup>; 文献[4, 5]对相干合成光束在真空传输时的远场特性进行了详细的数值分析。但在实际

工程中, 相干合成光束的传输与单束光传输一样, 不可避免地受到湍流大气的影响; 文献[6, 7]根据广义惠更斯-菲涅耳原理建立了相干合成光束湍流大气传输的数学模型, 并对相干合成光束在湍流大气中传输时不同接收平面处的光强分布进行数值计算。根据广义惠更斯-菲涅耳原理对相干合成光束在不同强度湍流大气中传输进行计算, 并分析接收平面处的光斑分布的统计特性, 系统地分析湍流大气对

**收稿日期**: 2008-02-23; **收到修改稿日期**: 2008-04-25

**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, 主要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方面的研究。E-mail: zejinliu@vip.sina.com

相干合成光束传输的影响。

## 2 理论模型

假设相干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

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

$E_i(x, y, 0)$  为第  $i$  束光在  $z=0$  平面光场复振幅分

布,光束中心位置为  $(a_i, b_i, 0)$ 。由于光纤激光器容易实现单横模输出,假设子光束复振幅均服从高斯分布,即

$$E_i(x, y, 0) = \exp\left[-\frac{(x-a_i)^2 + (y-b_i)^2}{\omega_0^2}\right]. \quad (2)$$

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<sup>[6,8,9]</sup>

$$\begin{aligned} \langle I(p, q, L) \rangle &= \frac{k^2}{(2\pi z)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y, 0) E^*(\xi, \eta, 0) \times \\ &\exp\left\{\frac{ik}{2L}[(p-x)^2 + (q-y)^2 + (p-\xi)^2 + (q-\eta)^2]\right\} \times \\ &\langle \exp[\psi(x, y, p, q) + \psi^*(\xi, \eta, p, q)] \rangle dx dy d\xi d\eta, \end{aligned} \quad (3)$$

式中

$$\langle \exp[\psi(x, y, p, q) + \psi^*(\xi, \eta, p, q)] \rangle = \exp[-0.5D_\psi(x-\xi, y-\eta)] = \exp\left\{-\frac{1}{\rho_0^2}[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]\right\}, \quad (4)$$

式中  $D_\psi$  为球面波的大气结构函数,  $\rho_0 = (0.545C_n^2 k^2 L)^{-3/5}$ ,  $C_n^2$  为折射率结构函数。

将(4)式代入(3)式,经化简后为<sup>[6]</sup>

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

其中

$$\Gamma_{ii}(p, q, L) = \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \exp\left\{-\frac{2}{\omega^2}[(p-a_i)^2 + (q-b_i)^2]\right\}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Re}[\Gamma_{ij}(p, q, L)] &= \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \exp\left\{-\frac{2}{\omega^2}\left[\left(p - \frac{a_i+a_j}{2}\right)^2 + \left(q - \frac{b_i+b_j}{2}\right)^2\right]\right\} \times \\ &\cos\left\{\frac{k\omega_0^2\tau_1}{2\omega^2 L}[(a_i-a_j)(a_i+a_j-2p) + (b_i-b_j)(b_i+b_j-2q)]\right\} \times \\ &\exp\left\{-\frac{\tau_2}{2\omega^2}[(a_i-a_j)^2 + (b_i-b_j)^2] + \frac{2}{\omega^2}\left[\left(\frac{a_i-a_j}{2}\right)^2 + \left(\frac{b_i-b_j}{2}\right)^2\right]\right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $\omega = \sqrt{1+\tau_1+\tau_2}\omega_0$ ,  $\tau_1 = \frac{4L^2}{k^2\omega_0^4}$ ,  $\tau_2 = \frac{8L^2}{k^2\omega_0^2\rho_0^2}$ 。

$\tau_1$  和  $\tau_2$  的物理意义为衍射和湍流导致的光斑扩展因子。

## 3 数值计算与讨论

根据给出的数学模型,对相干合成光束在不同强度湍流大气中的传输进行数值计算。研究对象为 36 束相干合成的光束,排布成如图 1 所示的环形阵列,各路子光束的波长  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ ,光斑半径  $\omega_0=1 \text{ cm}$ ,子光束与相邻光束中心之间的距离为  $3 \text{ cm}$ ,合成光束的口径为  $18 \text{ cm}$ 。

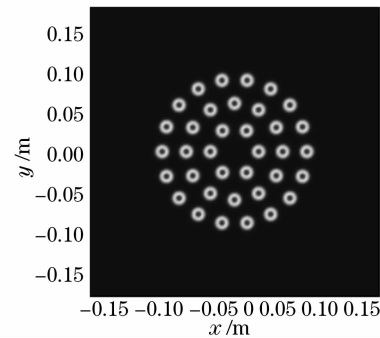


图 1 环形分布的相干合成激光阵列

Fig. 1 Schematic illustration of the radial coherently combined laser array

### 3.1 不同强度湍流大气传输时的光强分布

图 2 为图 1 所示的相干合成光束在不同强度湍流大气中传输时,不同接收平面处(考察  $L=2\text{ km}$ ,  $5\text{ km}$ ,  $10\text{ km}$ ,  $20\text{ km}$  的情形)的光强等高线分布。图 2 分别对应结构常数  $C_n^2=0\text{ m}^{-2/3}$ (相当于在真空中传输)、 $10^{-15}\text{ m}^{-2/3}$  和  $10^{-14}\text{ m}^{-2/3}$  的不同强度的湍流大气。图 2 表明,当湍流强度较弱时[图 2(b)],湍流大气对相干合成光束的传输影响较小,特别是传输距离较小时,光斑图样基本保持不变;随着传输

距离的增大,湍流大气对相干合成光束传输的影响也随之增大。而当湍流强度较强时[图 2(c)],湍流大气对相干合成光束的传输影响很大,此时光强分布已经类似于非相干合成的情形<sup>[7]</sup>。由图 2 还可以得出,与单束激光在真空或湍流大气中传输的情形不同,相干合成光束的光强分布在近场由多个主峰组成,光强分布随着传输距离的变化而变化,随着传输距离的增大,多路光束逐渐通过衍射和干涉收敛到稳定的图样,该图样与湍流强度有关。

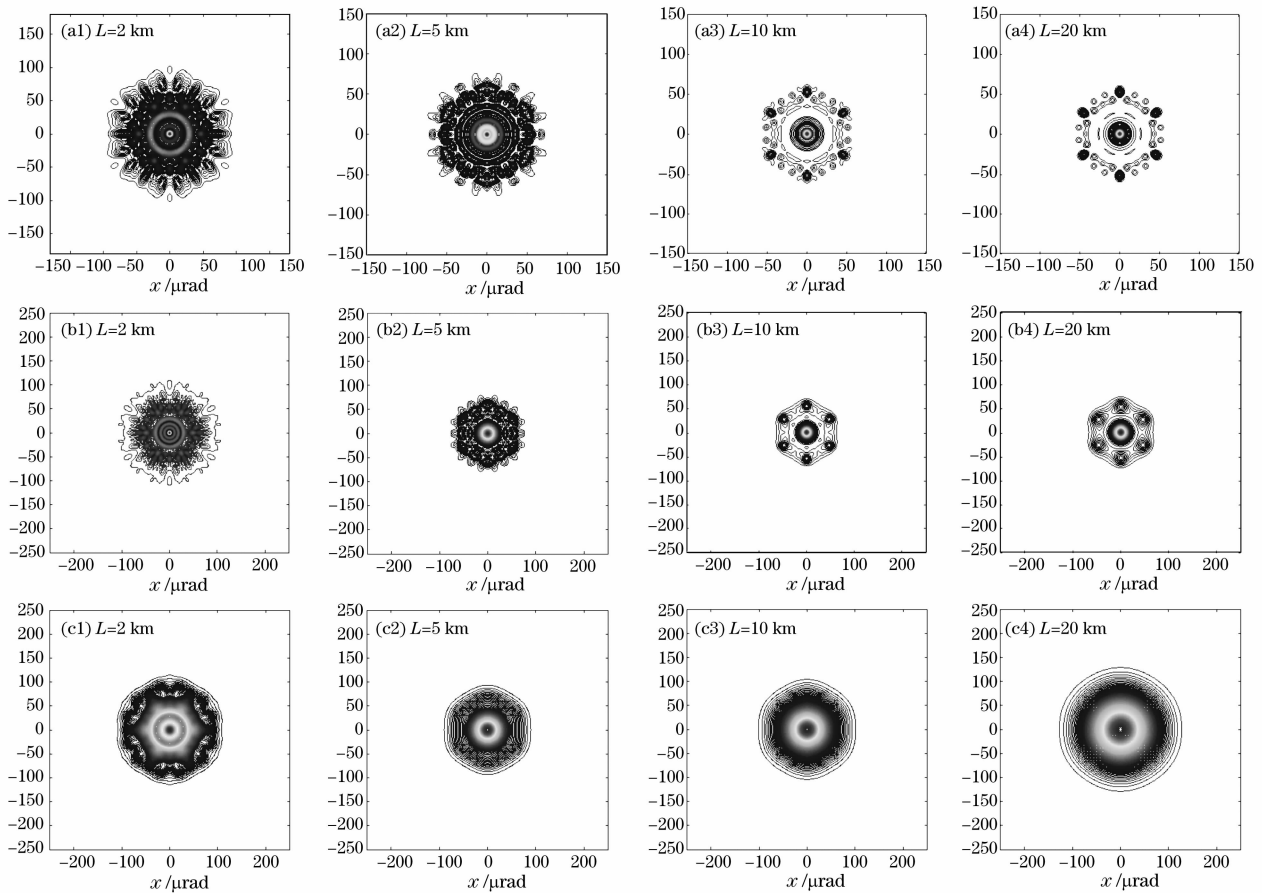


图 2 相干合成光束在不同强度湍流大气中传输的光强等高线分布。

(a)  $C_n^2=0\text{ m}^{-2/3}$ , (b)  $C_n^2=10^{-15}\text{ m}^{-2/3}$ , (c)  $C_n^2=10^{-14}\text{ m}^{-2/3}$

Fig. 2 Contour graph for optical intensity of coherently combined laser beam at several propagation distances in turbulent atmosphere with different structure constant. (a)  $C_n^2=0\text{ m}^{-2/3}$ , (b)  $C_n^2=10^{-15}\text{ m}^{-2/3}$ , (c)  $C_n^2=10^{-14}\text{ m}^{-2/3}$

### 3.2 PIB 曲线

“桶”中功率(PIB)  $P_{\text{PIB}}$  定义为远场给定尺寸的“桶”中包含的激光能量占总能量的百分比,PIB 曲线也经常用于实际激光光束质量的评价。PIB 的计算公式在柱坐标下可以表示为<sup>[10]</sup>

$$P_{\text{PIB}}(r) = \int_0^r I(r, L) r dr / \left[ \int_0^{+\infty} I(r, L) r dr \right], \quad (8)$$

式中  $r = \sqrt{p^2 + q^2}$ 。为定量分析湍流大气对相干合

成光束传输的影响,对不同接收平面处( $L = 2\text{ km}$ ,  $5\text{ km}$ ,  $10\text{ km}$ )光强分布的 PIB 曲线进行计算,如图 3 所示。

图 3 表明,对于不同强度的湍流大气,在传输距离较小( $L=2\text{ km}$ )时,湍流强度对接收面光强分布的 PIB 曲线影响不大;随着传输距离的增加,湍流强度对接收面光强分布 PIB 曲线的影响逐渐增大,在  $L=10\text{ km}$  处,与真空传输的情形相比弱湍流( $C_n^2=10^{-15}\text{ m}^{-2/3}$ )仍旧不会造成 PIB 曲线的变化,

而强湍流 ( $C_n^2 = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ ) 使得相干合成光束的能量集中度显著降低, 此时发散角为  $50 \mu\text{rad}$  对应的

“桶”中功率仅为弱湍流 ( $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ) 情形下的  $1/4$ 。

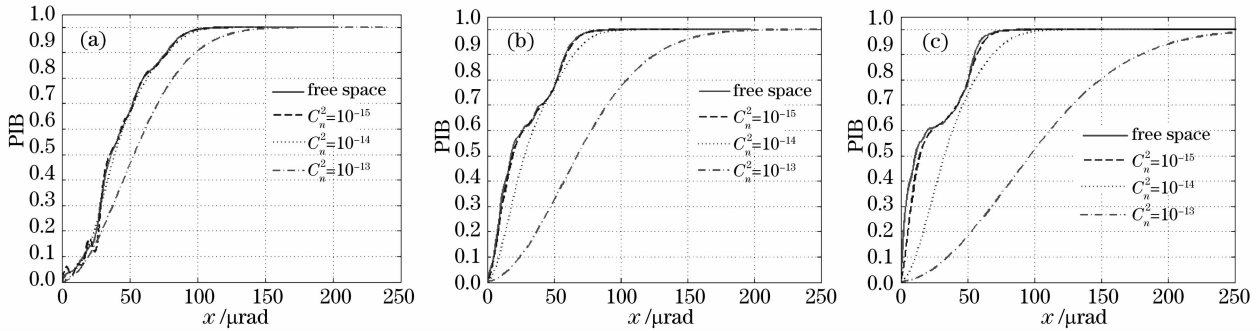


图 3 不同接收平面处光强分布的 PIB 曲线。(a)  $L=2 \text{ km}$ , (b)  $L=5 \text{ km}$ , (c)  $L=10 \text{ km}$

Fig. 3 PIB curve for coherently combined beam at different receiving planes. (a)  $L=2 \text{ km}$ , (b)  $L=5 \text{ km}$ , (c)  $L=10 \text{ km}$

### 3.3 局部功率曲线

计算结果表明, 相干合成光束在湍流大气和真空中传输呈现了与单束激光传输的不同特性, 相干合成光束的光强分布在不断变化并逐渐收敛到稳定的图样, 并且在湍流强度较弱的情形下, 光强分布呈现“花瓣”状的特征, 常用的用于描述单束光束传输特性的光束质量因子在此并不适用。为此, 文献 [11] 提出利用局部功率曲线描述激光光束在湍流大气中的传输。局部功率曲线的横坐标为光束的传输距离, 纵坐标为该接收平面上激光能量占总能量的百分比为特定值  $p$  时对应的“桶”的尺寸, 特定值  $p$

可以取为 80%、90% 不等。具体计算公式为 [11]

$$p(\rho, L) = \int_{\rho}^{\infty} I(r, L) r dr / \left[ \int_{\infty}^{\infty} I(r, L) r dr \right], \quad (9)$$

式中  $\rho$  为传输距离  $L$  处的接收平面上占总能量的百分比为特定值  $p$  时对应的“桶”的尺寸。局部功率曲线可以用于分析计算在不同湍流中传输时, 激光能量占总能量的百分比为特定值  $p$  时对应的“桶”的尺寸随着传输距离的演化关系。根据 (9) 式计算结果可得相干合成光束在不同强度湍流大气中传输的局部功率曲线, 如图 4 所示。

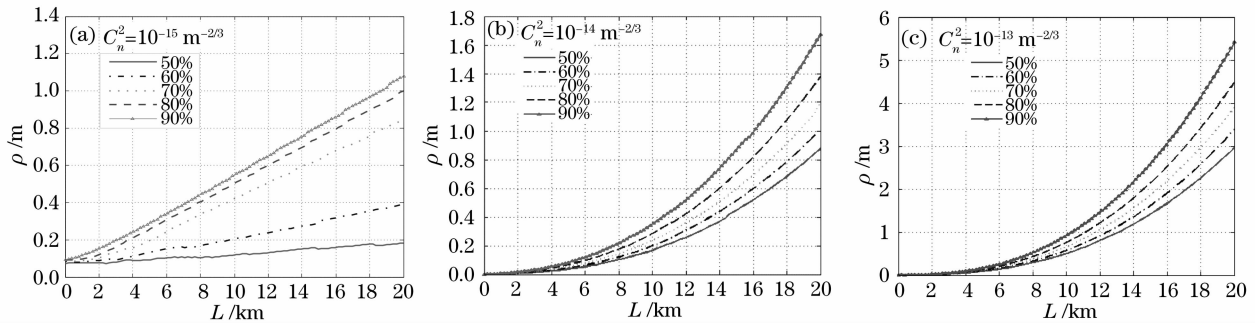


图 4 相干合成光束在不同强度湍流大气中传输的局部功率曲线

Fig. 4 Fractional power curve of the coherently combined beams in the turbulent atmosphere

由图 4 得出, 相干合成光束在较弱的湍流大气中传输时, 局部功率曲线随传输距离的增大呈线性增长; 而在较强的湍流大气中传输时, 局部功率曲线随传输距离的增大呈高次曲线增长。较强的湍流大气加剧了相干合成光束在传输过程中的光斑扩展和能量的弥散速度, 降低了光束的能量集中度。

## 4 湍流强度对空间相干度的影响

计算结果表明, 随着湍流强度的增大, 光斑扩展和能量的弥散速度加快, 光束的能量集中度显著降低。文献 [12] 推导了经过湍流大气后, 接收平面上任意空间两点的相干度及接收平面上光束的有效相干长度的计算公式

$$|\mu(\rho_1, \rho_2, L)| = \exp \left\{ - \left[ \frac{1}{2\sigma_s^2 \Delta^2(L)} + M(1 + \sigma_s^2) - \frac{M^2 L^2}{2k^2 \sigma_s^2 \Delta^2(L)} \right] (\rho_1 - \rho_2)^2 \right\}, \quad (10)$$

$$\bar{\rho} = \left[ \frac{1}{2\sigma_g^2 \Delta^2(L)} + M(1 + \sigma_s^2) - \frac{ML^2}{2k^2 \sigma_s^2 \Delta^2(L)} \right]^{-1/2}, \quad (11)$$

式中  $|\mu|$  为空间相干度的大小,  $(\rho_1, \rho_2)$  为空间任意两点的几何位置,

$$\Delta^2(L) = 1 + \left( \frac{L}{k\sigma_s \delta} \right)^2 + \frac{2ML^2}{k^2 \sigma_s^2},$$

$$M = 0.49(C_n^2)^{6/5} k^{12/5} L^{6/5},$$

$$\delta = \sqrt{\frac{4\sigma_s^2 \sigma_g^2}{4\sigma_s^2 + \sigma_g^2}},$$

$\sigma_g$  与  $\sigma_s$  分别为发射端光束的口径和相干长度, 文中均取为合成光束的口径, 即  $\sigma_g = \sigma_s = 18 \text{ cm}$ 。有效相干长度表示  $\bar{\rho}$  接收面上相干度大小为  $1/e$  的空间

两点的距离<sup>[12]</sup>。根据(10)式计算得到图 1 所示的相干合成光束在不同强度湍流大气中传输时空间相干度的变化曲线如图 5 所示。计算结果表明, 在湍流大气中传输时, 随着传输距离的增大, 光束的空间相干度随之降低。比较图 5(a)和图 5(b)不难发现, 较强的湍流强度会加速空间相干度的下降。图 6 为相干合成光束在不同强度湍流大气中传输时接收平面上光束的有效相干长度。在弱湍流大气中传输 10 km 后, 光束的有效相干长度为 6 cm; 而在中等强度湍流( $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ )中传输 10 km 后, 光束的有效相干长度仅为 2 cm。光束的空间相干度的降低是造成光斑扩展和能量弥散的根本原因。

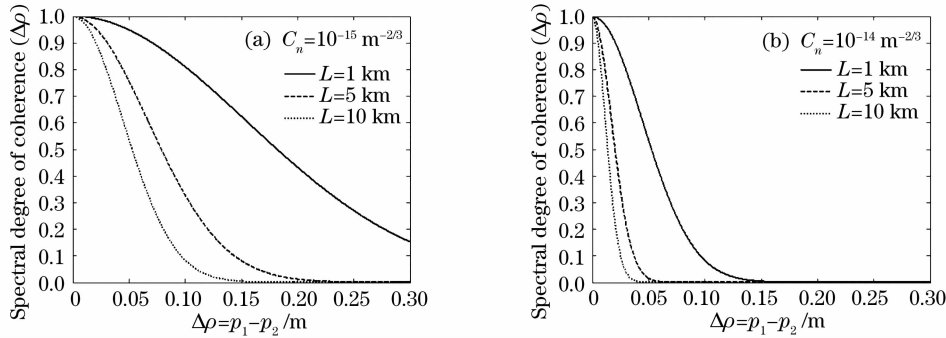


图 5 相干合成光束在不同强度湍流大气中传输空间相干度的变化

Fig. 5 Spectral degree of coherence of coherent combined beam propagating in different turbulent atmosphere

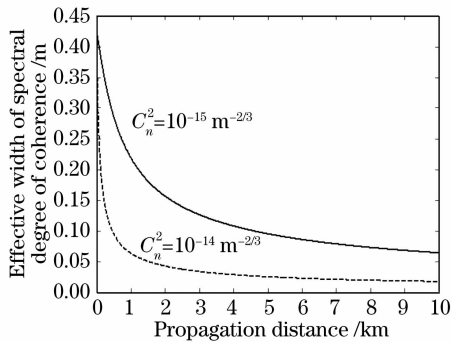


图 6 相干合成光束在不同强度湍流大气中传输的有效相干长度

Fig. 6 Effective coherent length for coherent combined beam propagating in different turbulent atmosphere

计算结果说明, 相干合成光束的远场能量集中度和空间相干度将随着湍流强度的增强而降低。从本质而言, 相干合成的最终目的是实现多路激光之间的相位锁定, 实际上是一种只校正活塞像差的自适应光学技术, 而倾斜项、离焦项等高阶像差并未得到校正。随着传输距离的增大和湍流强度的增强, 合成光束的空间相干度随之下降, 进而影响了相干合成的效果, 为此需要辅以自适应光学技术。现有

的高能激光系统也都要利用自适应光学技术补偿湍流大气等扰动带来的光束质量下降, 可以和相干合成统一考虑。同时具备相干合成和自适应光学系统的高能激光系统才真正具有实用价值。美国研究人员提出的模块化锁相激光器系统<sup>[13,14]</sup>正是基于这样的考虑。

## 5 结 论

根据广义惠更斯-菲涅耳原理, 对相干合成光束在不同强度湍流大气中传输进行了计算; 对接收平面处的光斑分布的统计特性, 如 PIB 曲线、局部功率曲线进行了比较研究, 系统地分析了湍流大气对相干合成光束传输的影响。分析计算结果表明, 较弱的湍流大气对相干合成光束的传输影响较小, 接收平面的光强分布以及 PIB 曲线基本不变; 随着湍流强度的增大, 相干合成光束的光强分布和 PIB 曲线产生了显著变化, 光斑扩展和能量的弥散速度加快, 光束的能量集中度显著降低。计算湍流大气传输后光束的空间相干度, 认为空间相干度下降是降低相干合成效果的原因。

## 参 考 文 献

- 1 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. 113-W in-phase mode output from two ytterbium-doped large-core double-cladding fiber lasers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 412~414
- 2 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Phase-locking and high coherent power output of two fiber lasers[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1153~1158  
何 兵, 楼 祺 洪, 周 军 等. 两个光纤激光器的相位锁定及高相干功率输出[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1153~1158
- 3 Jesse Anderegg, Stephen Brosnan, Eric Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6102**: 261020U-1~61020U-5
- 4 Baida Lü, Hong Ma. Coherent and incoherent off-axis Hermite-Gaussian beam combinations[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(8): 1279~1289
- 5 Yongzhong Li, Liejia Qian, Daquan Lu *et al.*. Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**: 957~963
- 6 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
- 7 Y. Cai, Y. Chen, H. T. Eyyuboglu *et al.*. Propagation of laser array beams in a turbulent atmosphere[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **88**: 467~475
- 8 H. T. Eyyuboglu, Y. Baykal. Analysis of reciprocity of cos-Gaussian and cosh-Gaussian laser beams in turbulent atmosphere[J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(20): 4659~4674
- 9 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
- 10 Lü Baida. *Laser Optics* [M]. third edition, Beijing: Higher Education Press, 2003. 85  
吕百达. *激光光学* [M]. 第三版, 北京: 高等教育出版社, 2003. 85
- 11 Olga Korolkova, Emil Wolf. Beam criterion for atmospheric propagation[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(15): 2137~2139
- 12 Wei Lu, Liren Liu, Jianfeng Sun *et al.*. Change in degree of coherence of partially coherent electromagnetic beams propagating through atmospheric turbulence[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **271**: 1~8
- 13 Mikhail Vorontsov. Adaptive photonics phase-locked elements (APPLE): system architecture and wavefront control concept [C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5895**: 589501-1~589501-9
- 14 Svetlana L. Lachinova, Mikhail A. Vorontsov. Performance analysis of an adaptive phase-locked tiled fiber array in atmospheric turbulence conditions [C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5895**: 58950O-1~58950O-14