

文章编号: 1001-3806(2010)04-0470-05

在湍流大气中传输时相干系统的抖动对远场的影响

史晓刚¹, 陈建国^{1*}, 窦汝海¹, 王鹏飞¹, 李松柏^{1,2}, 段志春¹, 傅玉青¹

(1. 四川大学 光电系, 成都 610064; 2. 长江师范学院 物理学与电子工程学院, 重庆 408100)

摘要: 为了研究相干合束激光在湍流大气中传输时, 合束系统的抖动对远场的影响, 采用惠更斯-菲涅耳原理推导了系统中单个光源因抖动造成偏离时的远场光强表达式。以正六边形阵列为例, 分析了在不同湍流强度或者传输距离时, 抖动对远场造成的影响, 并分别描绘了峰值光强及桶中功率不低于理想情况下 92% 时的抖动控制曲线。结果表明, 抖动造成了远场的峰值光强和桶中功率的降低; 当抖动范围相同时, 随着湍流强度的减弱或者传输距离的减小, 抖动的破坏更加严重。这一结果对研究湍流大气中的相干合束是有帮助的。

关键词: 大气与海洋光学; 湍流大气; 相干合束; 系统抖动; 峰值光强; 桶中功率

中图分类号: P425.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.04.041

Influence of system jitter on far field of coherently combined beams propagation in turbulent atmosphere

SHI Xiao-gang¹, CHEN Jian-guo¹, DOU Ru-hai¹, WANG Peng-fei¹, LI Song-bai^{1,2},
DUAN Zhi-chun¹, FU Yu-qing¹

(1. Department of Opto-electronics, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. School of Physics or Electron Engineering, Yangze Normal University, Chongqing 408100, China)

Abstract: In order to study the influence of system jitter on far field of coherently combined beams propagating in turbulent atmosphere, the expression for the far field energy distribution, affected by jitter of the system, was deduced based on Huygens-Fresnel principle. Taking a hexagonal-shaped laser array as an example, the influence of jitter on far-field was also analyzed with different turbulent intensity or transmission distance. The restricted phase jitter was depicted under the condition that the maximum intensity and power in the bucket were greater than ninety-two percent of the ideal ones. It is found the maximum intensity and power in the bucket are reduced due to jitter of the system. If the scope of jitter is definite, the effect of jitter will become worse with the decrease of the turbulent intensity or transmission distance. The results are helpful to research of coherent combination propagation in turbulent atmosphere.

Key words: atmospheric and ocean optics; turbulent atmosphere; coherent combination; jitter of the system; the maximum intensity; power in the bucket

引言

对多路光纤激光器输出光场进行相干合束是获得高亮度、高光束质量的激光输出的有效办法, 有望在自由空间光通信定向能量传输等领域得到广泛的应用, 近年对此进行了大量的研究^[1-2]。在实际中相干合束光场的传输不可避免地受到湍流大气的影响。因此, 研究合成光束的传输, 特别是在湍流大气中的远场光束质量, 具有很重要意义。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60578013)

作者简介: 史晓刚(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光在大气中传输方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: optics_lab@163.com

收稿日期: 2009-07-08; 收到修改稿日期: 2009-11-17

原则上讲, 系统的稳定性对相干合束的实现是至关重要的。然而在真实的相干系统中不可避免地会有这样或那样的抖动, 如环境温度、机械振动等, 这些因素都有可能使系统偏离理想状态。以光源端面为例, 理想情况下, 阵列上所有光纤激光器紧密排列, 各个光束之间距离很小并且呈一定的规则分布, 通过运用某些措施, 使得各个光源在列阵所在的公共平面上进行同相位耦合输出来完成合束过程。但是, 系统抖动的存在, 极有可能破坏这种理想情况, 而使得某个光源的端面对于列阵所在的公共端面有一个微小的偏离, 即该光束的输出端面已经偏离了列阵的公共端面, 这将会造成该光源发出的光波与其它的光场失相, 影响合成效果。

本文中运用广义惠更斯-菲涅耳原理推导了在湍

流大气中传输时,系统中单个光源因抖动造成偏离时的远场光强表达式;并以正六边形阵列为例分析了在不同湍流强度或者传输距离时,抖动对远场造成的影响。研究表明:系统抖动使得远场的峰值光强以及桶中能量的衰减,在湍流强度减弱或者传输距离减小时,同样范围的抖动对远场的破坏更加严重,抖动控制需要更严格。另外,分别描绘了峰值光强以及桶中能量不低于理想情况下92%时的抖动控制曲线。

1 理论分析

假设参与相干合束的光源阵列位于 $z=0$ 的平面,所有子光束沿着 z 轴传播, $z=0$ 处平面的光场分布可表示为:

$$E(x,y,0) = \sum_m^N E_m(\vec{r} - \vec{r}_m, 0) \quad (1)$$

式中, $E_m(\vec{r} - \vec{r}_m, 0)$ 和 \vec{r}_m 分别为第 m 个光束在 $z=0$ 平面上的场分布和中心位置,假设各个子光场分布相同并近似为基模高斯光^[3],即:

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

其中:

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

式中, x, y, p, q, η, ξ 分别表示 z 平面处的空间坐标分布。 $\rho_0 = (0.545 C_n^2 k^2 L)^{-3/5}$, C_n^2 为折射率结构函数,它表征湍流的强弱, C_n^2 越大,湍流越强。

假设抖动引起阵列中第 k 个光源的端面对列阵所在的公共端面有一个微小的偏离 Δz_k ,这相当于在 $z=0$ 这个公共参考平面上,该光场与其它光场的相位相差 $\Delta\phi_k$,由激光波长 λ 可知:

$$\Delta\phi_k = 2\pi\Delta z_k/\lambda \quad (5) \quad \text{当 } n \neq k \text{ 时,}$$

$$\begin{aligned} \text{Re}[\Gamma_{mn}(p,q,L)] &= \frac{A_m^2 w_0^2}{w^2} \exp\left\{ -\frac{2}{w^2} \left[\left(p - \frac{a_m + a_n}{2} \right)^2 + \left(q - \frac{b_m + b_n}{2} \right)^2 \right] \right\} \times \\ &\cos\left\{ \frac{k w_m^2 \tau_1}{2 w^2 L} [(a_m - a_n)(a_m + a_n - 2p) + (b_m - b_n)(b_m + b_n - 2q)] \right\} \times \\ &\exp\left\{ -\frac{\tau_2}{2 w^2} [(a_m - a_n)^2 + (b_m - b_n)^2] \right\} + \frac{2}{w^2} \left[\left(\frac{a_m - a_n}{2} \right)^2 + \left(\frac{b_m - b_n}{2} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (8)$$

当 $n = k$ 时,

$$\text{Re}[\Gamma_{mn}(p,q,L)] = \frac{A_m^2 w_0^2}{w^2} \exp\left\{ -\frac{2}{w^2} \left[\left(p - \frac{a_m + a_n}{2} \right)^2 + \left(q - \frac{b_m + b_n}{2} \right)^2 \right] \right\} \times$$

$$E_m(\vec{r} - \vec{r}_m, 0) = A_m \times \exp\left[-\frac{(x - a_m)^2 + (y - b_m)^2}{2w_0^2} \right] \exp(i\phi_m) \quad (2)$$

式中, A_m 表示第 m 个光场的振幅, w_0 表示其束腰半径, ϕ_m 表示第 m 个光场在 $z=0$ 平面处的初始相位, a_m 和 b_m 为 \vec{r}_m 在 x 和 y 方向的投影。在理想情况下,各个子光束同相位, ϕ_m 可取为 0。根据惠更斯-菲涅耳原理,在图 1 所示的坐标系中,光束在湍流大气传输距离

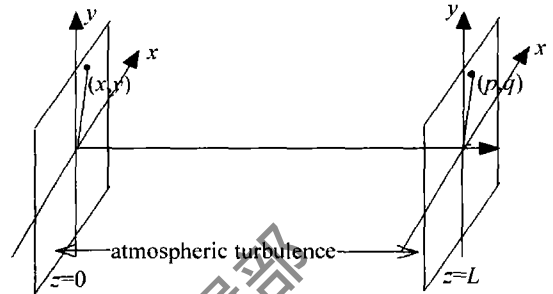


Fig. 1 Propagation in turbulent atmosphere

L 后,接收平面上的平均光强为^[4,6]:

$$\begin{aligned} \langle I(p,q,L) \rangle &= \sum_{m=1}^N \Gamma_{mm}(p,q,L) + \\ &2 \sum_{m=1}^N \sum_{n=m+1}^N \text{Re}[\Gamma_{mn}(p,q,L)] \end{aligned} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Gamma_{mn}(p,q,L) &= \frac{A_m^2 w_0^2}{w^2} \times \\ &\exp\left\{ -\frac{2}{w^2} [(p - a_m)^2 + (q - b_m)^2] \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\cos\left\{\frac{kw_0^2\tau_1}{2w^2L}[(a_m - a_n)(a_m + a_n - 2p) + (b_m - b_n)(b_m + b_n - 2q)] - \Delta\phi_k\right\} \times \exp\left\{-\frac{\tau_2}{2w^2}[(a_m - a_n)^2 + (b_m - b_n)^2]\right\} + \frac{2}{w^2}\left[\left(\frac{a_m - a_n}{2}\right)^2 + \left(\frac{b_m - b_n}{2}\right)^2\right] \quad (9)$$

式中, $w = \sqrt{1 + \tau_1 + \tau_2}w_0$, $\tau_1 = 4L^2/(k^2w_0^4)$, $\tau_2 = 8L^2/(k^2w_0^2\rho_0^2)$ 。 τ_1 和 τ_2 的物理意义为衍射和湍流导致的光斑扩展因子^[4,7]。考虑到很多研究都是针对如图2所示的正六边形阵列^[8,9]进行的,作者也将以此为模型来讨论在湍流大气中传输时抖动对远场影响。

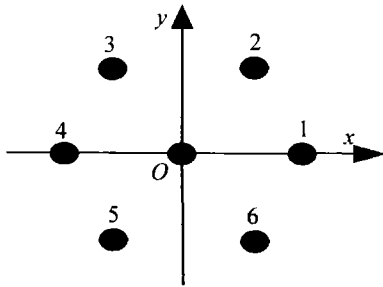


Fig. 2 The distribution of beams in the array

2 分析与讨论

2.1 抖动一定时的远场光强分布曲线

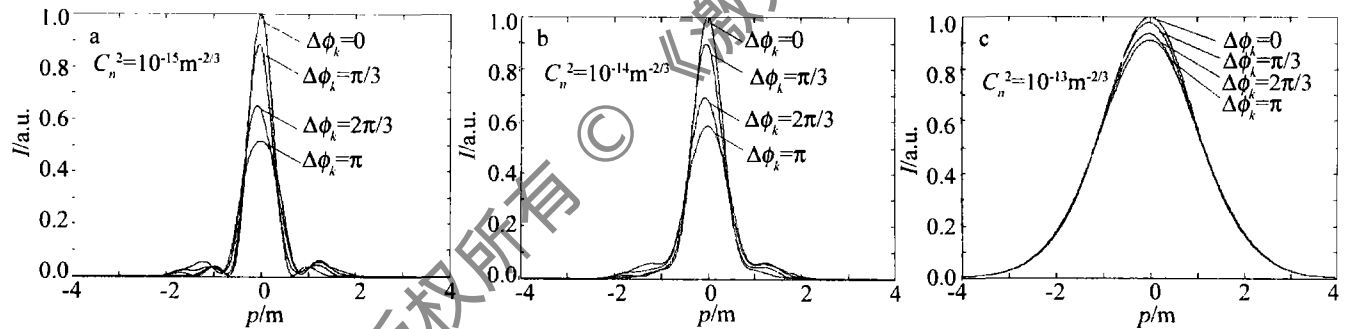


Fig. 3 The far-field energy distribution of far-field with different jitter

2.2 Strehl 比变化曲线

Strehl 比是描述光束最大峰值的重要参量,它的定义为^[11]:

$$S = I_{\max}/I_{0,\max} \quad (10)$$

式中, $I_{0,\max}$ 和 I_{\max} 分别表示理想情况和有抖动情况所对应的峰值光强。为了更好地描述系统的抖动,模拟过程中假设相位差 $\Delta\phi_k$ 在一定的范围内 $(-\delta, +\delta)$ 等

图3中描绘了传输距离 $L = 10\text{km}$ 、不同湍流强度下 ($C_n^2 = 10^{-15}\text{m}^{-2/3}$, $C_n^2 = 10^{-14}\text{m}^{-2/3}$, $C_n^2 = 10^{-13}\text{m}^{-2/3}$) $\Delta\phi_k$ 分别为 $0, \pi/3, 2\pi/3$ 和 π 时的光强分布曲线。参量为 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$, $r = 0.01\text{m}$, $w_0 = 0.003\text{m}$ ^[10] 以及 $k = 4$ (下同)。如图3所示,在不同湍流强度下, $\Delta\phi_k = 0$ 描绘的是理想情况下远场的光强分布曲线,此时在接收面上的 $p = 0$ 位置上峰值光强最大,中心光斑能量也取得最大值。抖动发生后,峰值光强和中心光斑能量开始降低,而且抖动的幅度越大,相干合成的效果就越差。考虑到抖动很微小,以 $\Delta\phi_k$ 为变量的光强表达式又是以 2π 为周期的,因此,后面的讨论中将把抖动限制在 $|\Delta\phi_k| \leq \pi$ 的范围内。

下面将分别引用 Strehl 比和桶中功率 (power in the bucket, PIB) 参量来进一步地研究在湍流大气中传输时系统抖动所带来的影响。

几率地随机变化, $\Delta\phi_k$ 的具体数值则由计算机随机给出,以保证在给范围内的数值都可以被等几率地采到,通过对 $\Delta\phi_k$ 变化 1000 次后的远场做平均,最终描绘出在湍流强度或者传输距离改变时 S 关于 δ 的变化曲线,如图4和图5所示。

由图4可知,在不同强度的湍流空间中,无论传输距离是远还是近, S 均随着抖动范围的增大而减小,即

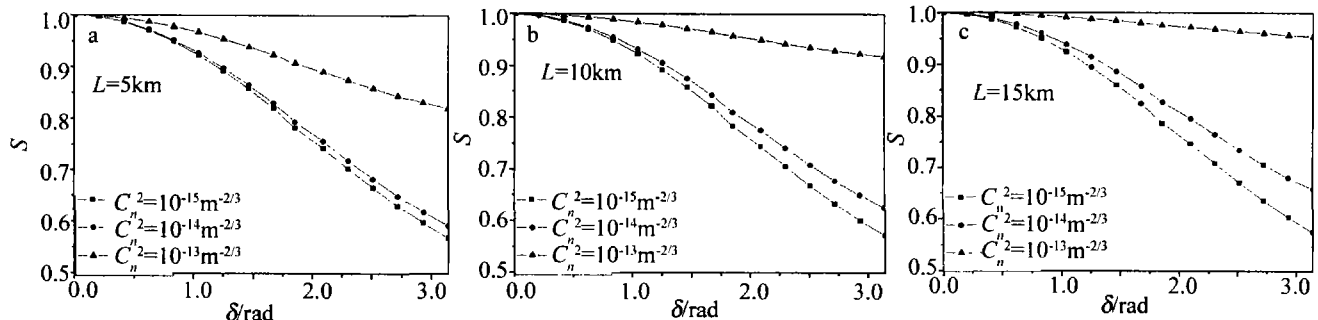


Fig. 4 Variation of S with jitter δ in different turbulent intensity

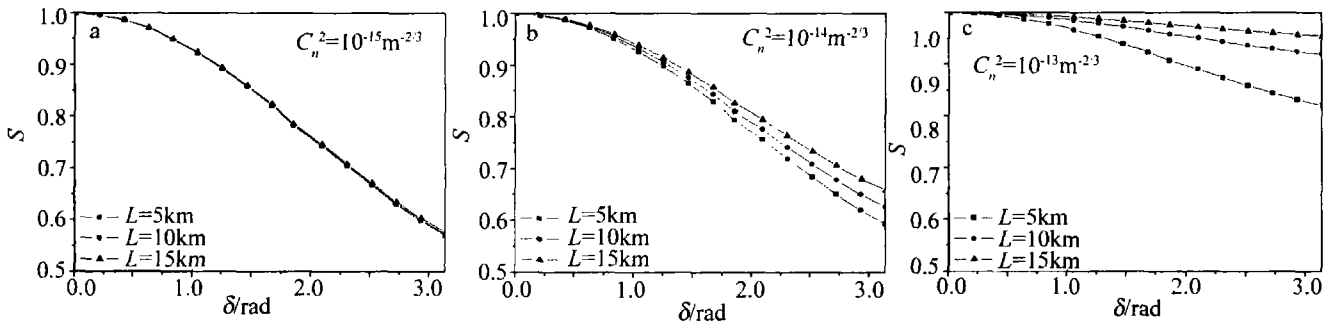


Fig. 5 Variation of S with jitter at different transmission distance

峰值光强越来越小;当传输距离和系统抖动的范围相同时,峰值光强降低的幅度还与湍流的强度有关,传输空间的湍流强度越弱,峰值光强的降低越严重。由图 5 可知,当湍流强度和抖动范围相同时,峰值光强降低的幅度与传输距离的远近也有关系;在中等湍流和强湍流空间传输时,传输的距离越近,峰值光强降低的越严重;在弱湍流空间传输时,抖动的破坏与前两者相比始终是最严重的。

这是可以理解的,由于空间大气是不停地运动的,形成了温度、压强、密度、大小等不同的气体漩涡,这些漩涡的相互交联、叠加就形成了随机的湍流运动。随机的湍流运动导致了子光波在传输时相位产生随机的变化,而使得它们已经成为了部分相干光,而且随着湍流强度和传播距离的增大,这些光波抵达接收面时,彼此之间的相干性会变得更差。因

此,部分相干光合束时,光场相干性的不断恶化使得抖动引入的相位差对远场的影响也随之减小;反之,抖动对合束效果的破坏会比较明显。因此,尽管系统抖动范围相同,但湍流的减弱或传输距离减小却使得抖动的破坏更严重。

2.3 桶中功率变化曲线

PIB 表明某一给定尺寸的“桶”中所围的激光功率占总功率的份额,PIB 从能量集中度的角度描述光束的质量。PIB 的计算公式可表示为^[7]:

$$P = \int_0^\rho I(\rho, L) \rho d\rho / \left| \int_0^\infty I_0(\rho, L) \rho d\rho \right| \quad (11)$$

式中, $\rho = \sqrt{p^2 + q^2}$ 。PIB 数值越大,表示桶中的功率值越高。以接收面 $L = 10\text{km}$ 为例, δ 分别控制在 $0, \pi/3, 2\pi$ 和 π 范围内时的 PIB 变化曲线,如图 6 所示。

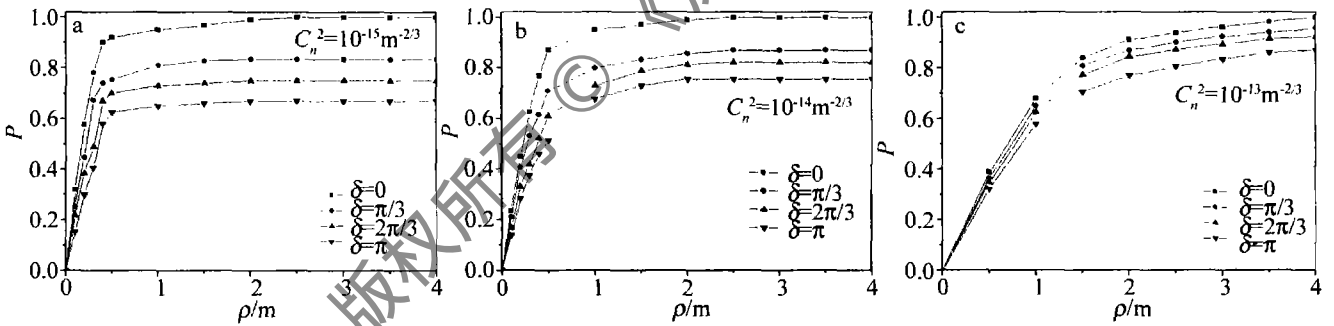


Fig. 6 Variation of PIB with jitter in different scope

由图 6 可知,在湍流空间传输时,系统的抖动使得桶中的功率降低,抖动范围越大,功率降低得越严重。当抖动范围相同时,湍流的强度越强,桶中功率降低的幅度却就越小;这同样是由于部分相干光合束时,光场相干性越来越差而导致的。

需要指出的是:抖动发生时,传输距离或湍流强度的增大,使得远场的峰值光强和特定区域的功率下降的幅度变小,即系统的抖动得到遏制,但这仅仅相对于各自所对应的理想情况下 ($\Delta\phi_k = 0$) 功率而言的。研究还发现:由于湍流的作用,传输距离或湍流强度的增大,均导致理想情况下远场的峰值光强和特定区域的功率,急剧下降^[7],尽管此时抖动得到了一定的遏制,

但最终导致抖动后的远场实际峰值光强和特定区域的功率却随着传输距离或湍流强度的增大而越来越小,不利于相干合束的应用。

2.4 相位抖动控制曲线

以本文中涉及的 7 个光源的系统而言,分别描绘了关于峰值光强以及 PIB 的抖动控制曲线,要求抖动发生后,峰值光强不能低于理想情况下的 92%,以及在 $P = 80\%$ 的桶内的、其功率同样不能低于理想情况下的 92%^[12]。结果如图 7 和图 8 所示。

由图 7 和图 8 可知,随着传输距离的增大,相干系统的最大允许抖动 δ_{max} 明显与空间的湍流强度有关。在弱湍流空间中传输时,峰值光强以及桶中功率分别

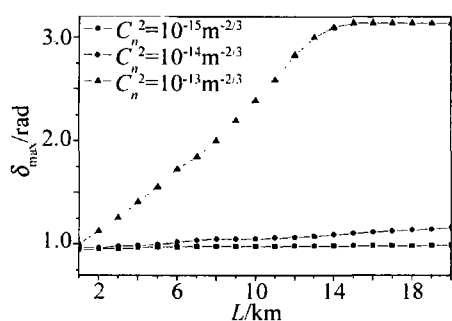


Fig. 7 Variation of the restriction on the jitter about the maximum intensity

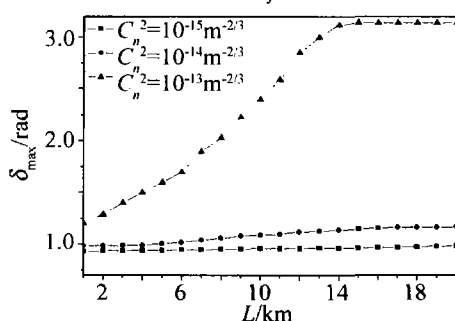


Fig. 8 Variation of the restriction on the jitter about PIB

对应的 δ_{\max} 随着传输距离的增大几乎没有任何变化, 系统抖动均控制在 $\delta = 3\pi/10$ 范围内。在中等湍流空间中传输时, 两者所对应的 δ_{\max} 随着传输距离的增大而略微增大, 当 $L = 20\text{km}$ 时, 系统抖动均约控制在 $\delta = \pi/3$ 范围内。而在强湍流的空间中传输时, δ_{\max} 均随着传输距离的增大而急剧上升, 例如: 当 $L = 5\text{km}$ 时, 系统抖动均约控制在 $\delta = \pi/2$ 的范围内, 当 $L = 10\text{km}$ 时, 系统抖动均约控制在 $\delta = 3\pi/4$ 的范围内, 当传输距离大于 14km 时, 理论上甚至允许抖动控制在 $\delta = 19\pi/20$ 的范围内, 但是基于相干系统的抖动已经较为严格, 此时系统的微小抖动是可以容忍的。

3 结论

运用惠更斯-菲涅耳原理推导了在湍流大气中传输时, 系统抖动造成单个光源偏离时的远场光强表达式。以正六边形阵列为例, 讨论了当 $L = 10\text{km}$, 相位差 $\Delta\phi_i$ 分别等于 $0, \pi/3, 2\pi/3$ 和 π 时, 远场所受的影响。并分析了在不同湍流强度或者传输距离时, 抖动对远

场造成的影响。研究表明: 系统抖动使得远场的峰值光强以及桶中功率的降低, 当抖动一定时, 湍流强度的减弱或者传输距离的减小都使得抖动的破坏越来越严重, 系统抖动需要控制得更加严格。另外, 分别描绘了峰值光强以及桶中功率不低于理想情况下 92% 时的抖动控制曲线。

参考文献

- [1] HE B, LOU Q H, ZHOU J. 113W in-phase mode output from two yttrium-doped large-core double-cladding fiber lasers [J]. Chinese Optics Letter, 2007, 5(7): 412-414.
- [2] ANDEREGG J, BROSNAN S, CHEUNG E, et al. Coherent coupled high power fiber arrays [J]. Proc SPIE, 2006, 6102: 261020U/1-261020U/5.
- [3] LIAO Y B. Fiber optics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 38-42 (in Chinese).
- [4] CHU X X, LIU Z J, WU Y. Propagation of a general multi-Gaussian beam in turbulent atmosphere in a slant path [J]. J O S A, 2008, A25(1): 74-79.
- [5] EYYUBO G LU H, BAYKAL Y. Analysis of reciprocity of cos-Gaussian and cosh-Gaussian laser beams in a turbulent atmosphere [J]. Optics Express, 2004, 12(20): 4659-4674.
- [6] WANG S C H, PLONUS M A. Optical beam propagation for a partially coherent source in the turbulent atmosphere [J]. J O S A, 1979, 69(9): 1297-1304.
- [7] ZHOU P, XU X J, LIU Z J, et al. Propagation of coherently combined laser beam in turbulent atmosphere [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(11): 2051-2056 (in Chinese).
- [8] CAO J Q, HOU J, XU X J. 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).
- [9] WANG Sh Y, LIN D Y, WANG Ch, et al. Recent progress of fiber beams combination [J]. Laser Technology, 2005, 29(6): 657-661 (in Chinese).
- [10] LI Y Zh, QIAN L J, LU D Q, et al. Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution [J]. Opt & Laser Technol, 2007, 39(5): 957-963.
- [11] YAN H Q, LI Sh Sh, ZHANG D L, et al. Numerical simulation of an adaptive optics system with laser propagation in the atmosphere [J]. Appl Opt, 2000, 39(18): 3023-3031.
- [12] SHI X G, DOU R H, JING Sh, et al. Influence of system jitter on far field of coherently combined beam [J]. Laser Technology, 2009, 33(5): 493-496 (in Chinese).