

·测试、试验与仿真·

## 基于 Zernike 多项式大气湍流条件下光纤耦合效率的数值分析

王 钊, 付跃刚

(长春理工大学光电测试分析中心, 吉林 长春 130022)

**摘要:**目前,对光纤耦合效率的数值模拟方面的研究较少,并且主要是运用功率谱反演法即傅里叶变换法进行数值模拟,介绍了大气湍流对激光光束传播的影响,然后采用 Zernike 多项式法对光纤耦合效率进行模拟研究,这种方法对于后续的波前重构和自适应光学系统闭环控制而言,物理概念更清晰,可以选择特定的光学像差进行波前的重构和控制,计算方法较简单。

**关键词:**大气湍流; Zernike 多项式; 光纤耦合效率

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2012)06-0084-04

## Analysis on Values of Optical Fiber Coupling Efficiency Based on Zernike Polynomial in Atmospheric Turbulence

WANG Zhao, FU Yue-gang

(Center of Electro-optic Test and Analysis, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The research on aspects of value simulation of optical fiber coupling efficiency is less currently, and the inverse method of power spectrum such as Fourier transform method is used to perform value simulation. The influence of atmospheric turbulence on laser beam propagation is described. Then Zernike polynomial method is used to simulate and research on optical fiber coupling efficiency. For subsequent wave front reconstruction and adaptive optics system closed-loop control, the method has clearer physical concepts. So special optical aberrations can be selected to perform wave front reconstruction and control. And calculation method is simple relatively.

**Key words:** atmospheric turbulence; Zernike polynomial; optical fiber coupling efficiency

在无湍流的理想情况下,光束波前表面是连续且光滑的,但是,在空间激光通信过程中,光束波前由于受到大气湍流的影响会发生严重的畸变,这种畸变会严重降低通信效率,造成不必要的信息损失。

对于激光通信中信号传输来说,大气是一个极不完美的介质。大气作为光束传输的介质并不均匀而且其性质是动态变化的。大气湍流的状态和特性随高度有明显的变化,据此可以将大气分为对流层、平流层、中间层、热层等。大气对激光通信的影响主要有三种,分别是大气湍流引起的闪烁现象、吸收和散射;云层的影响;飞机附面层的影响。文中主要研究大气湍流引起的闪烁对光纤耦合效率的影响。首先从光束波前的仿真方面分析了大气湍流对激光光

束传输的影响,然后从理论角度运用一种新的方法对湍流波前进行了模拟,重点研究了大气湍流条件下空地激光通信链路中光纤耦合效率的变化情况。

### 1 湍流大气中激光传输特性

在大气湍流中,折射率在不同地点、不同时刻都是变化的。然而,不可能对这些变化作出预测;另一方面,即使已知这些变化,要对所有时刻、所有地点的数值作出描述实际上也是不可能的。折射率结构常数  $C_n^2$  在光传播问题中扮演重要角色,是描述湍流情况下激光传输特性的基本参数之一。根据部分地域有限的测量结果,以下列出了五种具有代表性的

收稿日期: 2011-11-14

作者简介: 王钊(1987-),男,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,主要从事光通信传输与处理方面的研究;付跃刚(1972-),男,满族,吉林东丰人,博士,博士生导师,教授,主要从事空间光通信领域的研究。

$C_n^2$  (单位:  $\text{m}^{-2/3}$ ) 随高度  $h$  (单位:  $\text{km}$ ) 变化的模式, 用这些模式描述五种情况下的大气湍流状况。

(1) A地: 高空无强湍流带

夜间:

$$C_n^2 = 2.1 \times 10^{-15} \exp(-h/0.18) + 5.1 \times 10^{-17} \exp(-h/7.2)$$

白天:

$$C_n^2 = 2.3 \times 10^{-22} h^{10} \exp(-h/0.61) + 4.0 \times 10^{-15} \times \exp(-h/0.3) + 1.8 \times 10^{-17} \exp(-h/7.5)$$

(2) B地冬季: 对流层有冷空气活动, 湍流较强

夜间:

$$C_n^2 = 2.3 \times 10^{-22} h^{10} \exp(-h/0.79) + 3.9 \times 10^{-16} \times \exp(-h/0.19) + 1.2 \times 10^{-16} \exp(-h/3.3)$$

白天:

$$C_n^2 = 5.3 \times 10^{-20} h^{10} \exp(-h/0.61) + 4.0 \times 10^{-15} \times \exp(-h/0.3) + 1.8 \times 10^{-17} \exp(-h/7.5)$$

(3) C地冬季: 高空有强湍流带。

夜间:

$$C_n^2 = 9.68 \times 10^{-23} h^{10} \exp(-1.01h) + 3.1 \times 10^{-16} \times \exp(-h/1.5) + 8 \times 10^{-11} \exp(-h/0.1)$$

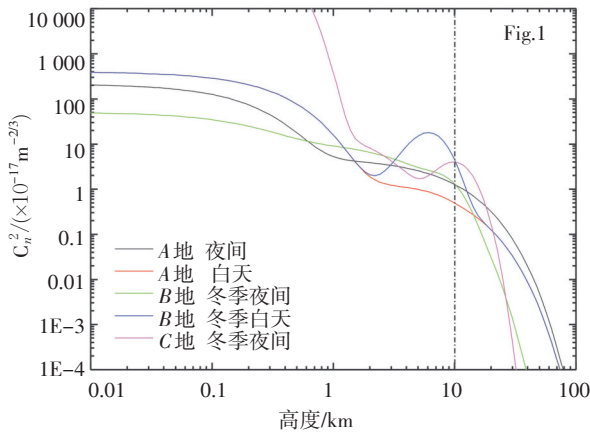


图1 五种模式下大气湍流强度随高度的变化

由图1可知, 当高度大于10 km时, 大气湍流强度一般小于  $1 \times 10^{-17} \text{m}^{-2/3}$ , 并且随高度的增加, 大气湍流强度迅速减小, 因此, 通过图1可以得出在10 km高度以上大气湍流对激光传输的影响很小。

当激光在湍流大气中传播时, 大气湍流折射率场的起伏导致了激光波阵畸变, 破坏了激光的相干性, 而且相干性退化将削弱激光的质量, 主要表现在光束相位的随机起伏、光束的随机漂移、能量在光束截面上的重新分布(畸变、展宽、破碎等)以及由此而引发的光强起伏等。这种光强起伏即为大气闪烁, 此现象可能导致通信突发性错误, 甚至是几毫秒的

通信中断。对于受大气湍流影响的激光光束, 可以利用光传播四维计算软件进行仿真, 通过仿真结果可以清晰地发现, 激光传输过程中受湍流影响十分显著, 下面是以地面发射飞机接收上行链路对湍流影响进行分析计算。

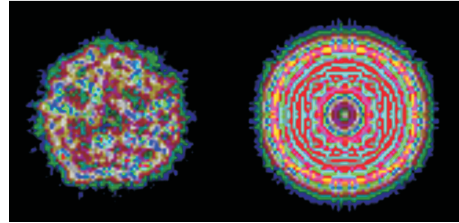


图2 接收面光强分布

图2中, 左侧为有湍流情况下接收面光斑光强分布情况, 右侧为无湍流情况下接收面光斑光强分布情况。

## 2 运用Zernike多项式对大气湍流条件下光纤耦合效率的数值模拟

下面从理论的角度对受湍流影响的光束波前进行描述, 进而和光纤耦合效率建立联系。用正交的Zernike多项式作为基底函数来表示受大气湍流影响的畸变的光波波面, 式(1)中  $\varphi(r)$  表示圆域上的任意波面,  $a_j$  表示所求得第  $j$  项Zernike多项式系数,  $z_j(r)$  表示第  $j$  项Zernike多项式

$$\varphi(r) = \sum_{j=1}^{\infty} a_j \cdot Z_j(r) \quad (1)$$

以下是各项多项式  $Z_j$  的表达式, 可以运用光波通过单位圆内的径向多项式和角向多项式表示

$$Z_j(r) = R_n^m(r) \cdot \Theta^m(\theta) \quad (2)$$

其中, 径向多项式可表示为

$$R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s \cdot (n-s)!}{s! [(n+m)/2-s]! [(n-m)/2-s]!} \cdot r^{(n-2s)} \quad (3)$$

角向多项式可表示为

$$\Theta^m(\theta) = \begin{cases} \sqrt{2(n+1)} \cos(m\theta) & m \neq 0 \\ \sqrt{2(n+1)} \sin(m\theta) & m \neq 0 \\ \sqrt{(n+1)} R_n^0(r) & m = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $(r, \theta)$  为光波通过一定单位圆域的极坐标;  $m, n$  为多项式的角向级次和径向级次。

Zernike多项式可以准确描述畸变光学波前, 每一项系数都具有一定的物理意义, Zernike多项式的

前5项系数列在表1中,第一项为常数,第2~第5项分别对应X向倾斜、Y向倾斜、离焦、像散。

表1 Zernike多项式各项所代表的意义

项数	多项式	含义	系数
1	1	常数	$a_1$
2	$p \cdot \cos \theta$	x向倾斜	$a_2$
3	$p \cdot \sin \theta$	y向倾斜	$a_3$
4	$2 \cdot p^2 - 1$	离焦	$a_4$
5	$p^2 \cos 2\theta$	像散	$a_5$

那么,由上述各项系数所代表的意义就可以和在大气湍流条件下影响光纤耦合效率的因素建立起联系,以下是运用Zernike多项式实现对影响光纤耦合效率因素的数学模型的建立。

$$\Delta z = a_4 \cdot Z_4 \quad \text{轴向偏移} \quad (5)$$

$$\Delta r = \begin{cases} a_2 \cdot Z_2 & x\text{向偏移} \\ a_3 \cdot Z_3 & y\text{向偏移} \end{cases} \quad (6)$$

$$\Delta \varphi = \begin{cases} \arctan\left(\frac{a_4 \cdot Z_4}{a_2 \cdot Z_2}\right) & x\text{向倾斜} \\ \arctan\left(\frac{a_4 \cdot Z_4}{a_3 \cdot Z_3}\right) & y\text{向倾斜} \end{cases} \quad (7)$$

在大气湍流条件下,光纤耦合效率会出现下降,那么影响光纤耦合效率的因素主要有聚焦光斑与光纤端面的纵向间距 $\Delta z$ 、聚焦光束光轴与光纤光轴的横向误差 $\Delta r$ 、聚焦光束光轴与光纤光轴的角度误差 $\Delta \varphi$ 。以下公式表示了各个影响因素和光纤耦合效率之间的关系。

(1)光斑波前畸变导致的光斑在接收面的离焦量与耦合效率的关系

$$\eta_{\Delta z} = \frac{S_f}{S_o} = \left( \frac{\omega}{\omega + \Delta z \cdot \tan \theta_c} \right)^2 \quad (8)$$

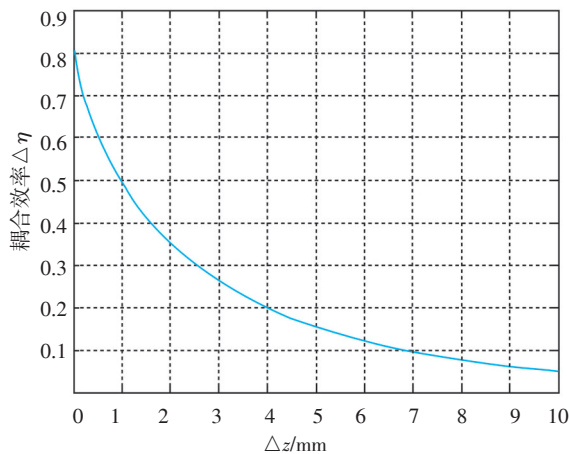


图3 纵向偏移——耦合效率曲线

$$\Delta z = a_4 \cdot Z_4$$

式中, $\theta_c$ 为临界入射角; $\omega$ 为激光焦斑半径。

纵向偏移 $\Delta Z$ 对耦合效果的影响见图3。

(2)光波前畸变导致的光斑在接收面偏移量与耦合效率的关系

$$\eta_{\Delta r} = 1 - \frac{\omega^2(\alpha - \sin \alpha \cdot \cos \alpha) - R^2(\theta - \sin \theta \cdot \cos \theta)}{\pi \omega^2}$$

$$\theta = \arcsin \frac{\Delta r^2 + R^2 - \omega^2}{2 \cdot \Delta r \cdot R}$$

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{R}{\omega} \cdot \sin \theta \right)$$

$$\Delta r = \begin{cases} a_2 \cdot Z_2 & x\text{向偏移} \\ a_3 \cdot Z_3 & y\text{向偏移} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\Delta r$ 为光斑在光纤端面的横向偏移量; $\omega$ 为激光束腰半径。横向偏移 $\Delta r$ 对耦合效果的影响见图4。

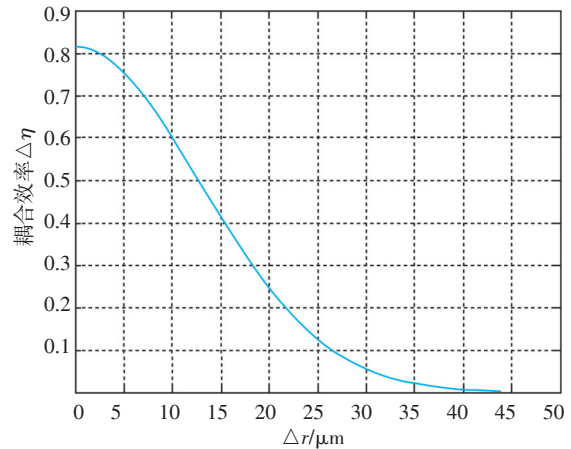


图4 横向偏移——耦合效率曲线

(3)聚焦光斑相对光纤端面倾斜量和耦合效率的关系

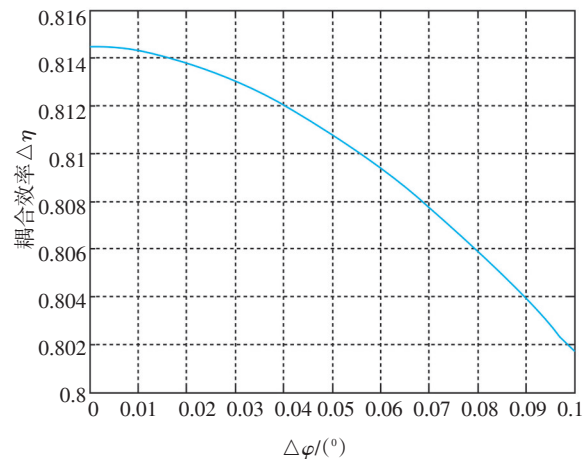


图5 端面倾斜——耦合效率曲线

$$\eta_{\Delta\varphi} = \exp\left(-\left(\frac{\pi n_2 \omega \Delta\varphi}{\lambda}\right)^2\right)$$

$$\Delta\varphi = \begin{cases} \arctan\left(\frac{a_4 \cdot Z_4}{a_2 \cdot Z_2}\right) & x\text{向倾斜} \\ \arctan\left(\frac{a_4 \cdot Z_4}{a_3 \cdot Z_3}\right) & y\text{向倾斜} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\omega$ 为激光束腰半径,  $n_2$ 为包层折射率。端面倾斜 $\Delta\varphi$ 对耦合效率的影响见图5。

### 3 结 论

分析了大气湍流对空间光影响的曲线和大气湍流对光纤耦合效率影响的曲线,得出结论为:大气湍流对空间光到光纤耦合效率的影响主要表现在3个方面:端面倾斜、聚焦光斑横向偏移、聚焦光斑纵向偏移。要想提高光纤耦合效率,可以选择在折射率结构常数较小(高空10 km以上)的情况下发射激光。在分析的同时运用Zernike多项式法对光纤耦合效率进行模拟,该模拟结果可以作为自适应光学成像系统仿真实验的校正对象。

### 参考文献

- [1] ROGGEMANN M C, WELSH B M. Image through Turbulence[M]. New York: CRC Press, 1995.
- [2] FAN E S, HOOKER R B. Tapered polymer single mode waveguides for mode transformation[J]. IEEE journal of Light-wave Technology, 1999, 17(3): 466-474.
- [3] Carbonneau T H, Wisely D R. Opportunities and challenges for optical wireless; the competitive advantage of free space telecommunication links in today's crowded marketplace [C]//Proc. SPIE, 1998, 3232: 119-128.
- [4] Adisorn Tuantranont, Victor M Bright. Introduction to Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) with Emphasis on Optical Applications[J]. Technical Journal, 2000, 1(6): 227-236.
- [5] Hemmati H. Overview of laser communications research at JPL[C]//Proc. SPIE, 2001, 4273: 190-193.
- [6] Pribil K. Laser communication terminals: a key building block for the new broadband satellite networks[C]//Proc. SPIE, 1998, 34: 172-177.
- [7] Nielsen T T, Oppenhauser G.. In orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[C]//Proc. SPIE, 2002, 4638: 1-15.
- [8] 李钰, 张阔海, 李强, 等. 大功率激光光纤耦合技术研究[J]. 应用激光, 2004, 24(5): 276-278.
- [9] 段锦, 王曦泽, 景文博, 等. 基于Zernike多项式的大气湍流相位屏的数值模拟[J]. 长春理工大学学报, 2010, 33(1): 132-135.
- [10] 胡谋法. 受大气湍流影响的光学波前模拟方法[J]. 光学与光电技术, 2003, 1(5): 10-12.
- [11] 马惠军, 朱小磊. 自由空间激光通信最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(3): 7-10.
- [12] 周炳琨, 高以智, 陈家骅. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [13] 向劲松, 陈彦, 胡渝. 大气湍流对空间光耦合至单模光纤的影响[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(3): 377-380.
- [14] 谢木军, 付承毓, 马佳光. 自由空间激光通信及其关键技术[J]. 光电工程, 1999, 26(12): 23-28.

(上接第64页)

- [4] 李弼程, 彭天强, 彭波. 智能图像处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 149-155, 322-324.
- [5] 李俊山, 李旭辉. 数字图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 173-176.
- [6] 夏德深, 傅德胜. 现代图像处理技术与应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 1997: 35-38, 40-44.
- [7] Duminda I, B Randeniya. Automatic Geo-Referencing by Integrating Camera Vision and Inertial Measurements[D]. South Florida: University of South Florida. 2007: 47-50.
- [8] Shinji Umeyama. Least-Squares Estimation of Transformation Parameters Between Two Point Patterns[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 13(4): 376-380.
- [9] Chien-Ping Lu, Gregory D Hager, Eric Mjolsness. Fast and Globally Convergent Pose Estimation from Video Images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 22(6): 610-621.