

# 空间光-多模光纤的单模耦合效率分析

吴世奇<sup>1</sup>, 林贻翔<sup>1</sup>, 牟冉<sup>2</sup>, 陈晶<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司 第十研究所, 成都 610036; 2. 武汉大学 电子信息学院, 武汉 430072)

**摘要:** 在空间光前置放大和外差探测应用中, 单模光纤耦合是空间光通信的关键技术之一。由于多模光纤在短距离内可以实现近似单模传输, 在特定条件下采用多模光纤作为耦合光纤, 可兼顾单模和多模应用, 提高光耦合效率。利用多层相位屏和光束传输法研究多模光纤中的传输特性。采用模式匹配法计算多模光纤耦合光场与基模光场耦合效率  $\eta$ 。仿真结果表明: 大气湍流强度参数  $D/r_0=1, 5, 10$  时,  $\eta$  随多模光纤长度呈周期变化, 峰值可以达到单模光纤直接耦合值的 2~3.5 倍; 控制多模光纤的传输距离, 可以获得最大值  $\eta$ , 使多模光纤适用于相干光通信等单模应用中。

**关键词:** 空间光-多模光纤耦合; 大气湍流; 耦合效率; 光束传输法

**中图分类号:** TN915.62 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)01-0032-05

**DOI:** 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.01.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Analysis of space optical-multimode fiber-single mode fiber coupling efficiency

WU Shiqi<sup>1</sup>, LIN Yixiang<sup>1</sup>, MU Ran<sup>2</sup>, CHEN Jing<sup>2</sup>

(1. The 10th Research Institute of CETC, Chengdu 610036, China; 2. School of electronic information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Single-mode fiber coupling is one of the key technologies in space optical communication for preamplifier and heterodyne detection. Multimode fiber can realize approximately single-mode transmission in a short distance. Under certain conditions, multi-mode fiber is used as coupling fiber, which can take into account both single-mode and multi-mode applications, improves the efficiency of optical coupling. The transmission characteristics of multimode fiber are studied by using multi-phase screen and beam propagation method. The mode coupling method is used to calculate the coupling efficiency between the coupled light field and the mode field of the multimode fiber. The mode matching method is used to calculate the matching efficiency  $\eta$  between the multimode fiber coupled light field and the fundamental mode field. The simulation results show that the  $\eta$  varies periodically with the length of the multimode fiber when the atmospheric turbulence intensity parameter  $D/r_0=1, 5, 10$ , and its peak value can reach 2~3.5 times the peak value of direct single-mode fiber coupling efficiency. When controlling the transmission distance of multimode fiber, the maximum value can be obtained, so that multimode fiber can be applied to single mode applications such as coherent optical communication.

**Key words:** space optical-multimode fiber coupling; atmosphere turbulence; coupling efficiency; beam propagation method

### 0 引言

为实现空间激光的前置光放大和相干解调, 一般通过空间光与单模光纤的耦合实现选模<sup>[1,2]</sup>。然而, 在空间光到单模光纤的耦合过程中, 由于受到大气湍流

效应、对准误差和光学像差等因素的影响, 导致耦合进入光纤中的能量损耗大, 严重影响通信系统的通信效率和通信链路的可靠性<sup>[3,4]</sup>。国内外相关研究主要围绕大气湍流对单模光纤耦合效率的影响和改善单模光纤耦合效率的方法<sup>[5-9]</sup>。通过光束的精密对准可以实现聚焦光斑的准确耦合接收, 但无法解决模式匹配的问题。采用自适应光学技术可纠正波前畸变, 在中弱湍流情况下可以有效地提高单模光纤耦合效率, 但在中强湍流情况下, 耦合效率改善有限<sup>[10-13]</sup>。

多模光纤可以提高空间光耦合效率, 但在实际使

收稿日期: 2018-07-20。

**作者简介:** 吴世奇(1983-), 男, 四川乐山人, 硕士, 高级工程师。主要研究方向为宽带无线通信系统传输组网技术、激光/射频混合通信技术和高速信号处理技术; 共计承担国家级、省部级项目 10 多项, 获省部级科技进步二等奖 1 项, 获发明专利授权 3 项。



用中多模光纤需要通过与单模光纤连接, 而模式的不匹配会影响多模光纤与单模光纤之间耦合效率。为了提高多模光纤到单模光纤的耦合效率, 可以采用自聚焦透镜对从多模光纤出射的光束进行汇聚, 使其半径大小尽量与单模光纤的芯径大小相匹配。实际上光场注入条件不同, 多模光纤传输模式是可变的, 较大的数值孔径光注入会激发较高阶模式, 单模光纤和多模光纤耦合点位置不同, 耦合效率也会不同。

本文主要讨论经过大气湍流后的聚焦光场在多模光纤中的传输问题。对多模光纤的剖面、截面光场进行分析, 计算多模传输光场与单模光场之间耦合效率  $\eta$ 。通过最优化  $\eta$ , 为多模耦合技术在前置放大、相干检测中的应用提供依据。

## 1 空间光-多模光纤-单模光纤耦合理论分析

空间光-多模光纤-单模光纤接收模型如图 1 所示, 它是由一段多模光纤无偏心地连接到一段单模光纤上。受大气湍流影响的空间光耦合进入多模光纤, 在多模光纤中激励起高阶模。光束在多模光纤传输中周期性形成了具有暗中空三维封闭区域的光束, 即局域空心光束。多模光纤的输出场作为单模光纤的输入场, 单模光纤只能传输线偏振模  $LP_{01}$  基模。图 1 中,  $Z$  表示多模光纤中的纵向位置,  $f$  为透镜焦距,  $a$  为多模光纤长度;  $E_i$  为经过大气湍流后的入瞳光场;  $E_1$  为望远聚焦光场, 即多模光纤输入光场;  $E_2$  为多模光纤传输后的光场, 即单模光纤输入光场;  $E_3$  为单模输出光场。由于光场受到光波导传输影响, 若采用图 1 中的单模耦合方法,  $\eta$  数值不能确定。多模光纤对  $\eta$  的影响可以通过数值仿真的方法获取。

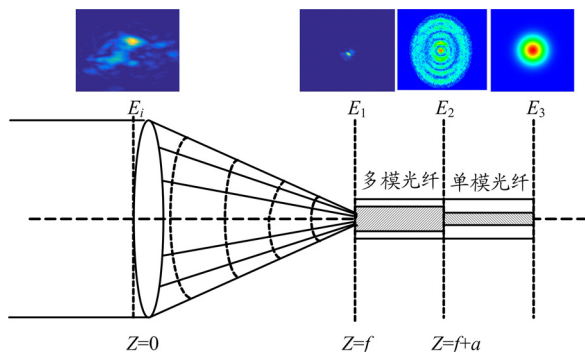


图 1 空间激光到单模光纤耦合示意图

大气湍流中光束传输的数值模拟从光场传播方程出发, 标准抛物线型方程为:

$$\frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{i}{2k} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + i k n_1 U \quad (1)$$

其中,  $U$  为电磁场标量场,  $n_1 = n - 1$ , 大气折射率  $n \approx 1$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ 。

大气湍流对激光传输光束的影响, 其物理本质是湍流引起传输光束波前相位的随机起伏。将导致相位变化足够小的短距离传输路径上的大气湍流等效为满足湍流统计理论的相位屏的影响和光的真空传播, 湍流效应由一随机相位屏来代替。在光束传输方向上从  $Z_{i-1}$  的平面经过厚度为  $\Delta Z$  的大气湍流到达  $Z = Z_{i-1} + \Delta Z$  的平面的解为:

$$U(r, Z_i) \approx \exp \left[ \frac{i}{2k} \int_{Z_{i-1}}^{Z_i} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} dZ \right] \times \exp[i\varphi(r, Z_i)] U(r, Z_{i-1}) \quad (2)$$

其中,  $r$  为平面极坐标系下的径向坐标,  $\varphi(r, Z_i)$  表示大气湍流引起的相位变化。

经过湍流后的空间光场聚焦到多模光纤时会激发出一系列的高阶模。用拉盖尔-高斯光束模型表示高阶高斯光束<sup>[4]</sup>:

$$U_{mn}(r, \theta, Z) = C_{mn} \frac{\omega_0}{\omega} \left( \frac{\sqrt{2}r}{\omega(Z)} \right)^m L_n^{(m)} \left( \frac{2r^2}{\omega^2(Z)} \right) \times \exp[-i(2n+m+1)\varphi(Z)] \exp \left( ikZ + im\theta - \frac{r^2}{\omega^2} - i \frac{kr^2}{2F} \right) \quad (3)$$

其中,  $m, n = 0, 1, 2, \dots$ ,  $\theta$  为平面极坐标系下的方位坐标,  $\omega_0$  为束腰半径,  $\omega(Z)$  为与束腰相距  $Z$  处的光斑半径,  $L_n^{(m)}(2r^2/\omega^2(Z))$  为关联拉盖尔多项式,  $C$  为归一化常数,  $F$  为光束的曲率半径。

多模光纤纤芯中任意位置处的光场可以表示为不同阶本征模式的叠加:

$$E_M = \sum_{n=1}^N c_n J_0(U_n r) \exp(i\beta_n Z), r \leq \alpha \quad (4)$$

其中,  $N$  表示多模光纤中激励的  $LP_{mn}$  模总数,  $U_n, \beta_n$  分别表示多模光纤中  $LP_{mn}$  的横向和纵向传播常数,  $U_n = (n_1^2 k^2 - \beta_n^2)^{1/2}$ ,  $c_n$  表示不同模式的激励系数,  $n_1$  是多模光纤纤芯折射率。

因为高斯激光束经过大气湍流后模式会发生畸变, 激光束可以看成多个模式的叠加, 所以多模光纤到单模光纤的耦合效率, 可以通过单模模式和多模模式进行模式匹配算出。按照模式匹配方法, 经过多模传输后的光场与单模光纤光场的耦合效率  $\eta$  可以表示为<sup>[5]</sup>:

$$\eta = \frac{\langle P_c \rangle}{\langle P \rangle} = \frac{\left\langle \left| \int_A E(r) A^*(r) dr \right|^2 \right\rangle}{\left\langle \int_A |E(r)|^2 dr \right\rangle} \quad (5)$$

其中,  $P_c$  为耦合进光纤中的光功率,  $P$  为光纤端面上的光功率;  $E(r)$  为多模光纤与单模光纤连接端的入射模场,  $A(r)$  为单模光纤模场分布。

## 2 空间光-多模光纤-单模光纤耦合仿真

本文采用多层相位屏法模拟大气湍流对光束传播的影响,同时假设光束在随机相位屏间进行自由传输,即可将相位屏对光束产生的相位变化转化为幅度的变化<sup>[14,15]</sup>。

假设自由光通信过程是高斯激光束从发射端孔径射出,传输  $L$  距离后到达接收端,通过望远物镜耦合至光纤中。考虑到匹配单模光纤的数值口径,望远物镜接收口径为  $0.15\text{m}$ ,焦距为  $0.75\text{m}$ 。通过调整传输距离  $L$  和大气折射率结构常数获得不同湍流强度下的接收光场,以大气湍流强度参数  $D/r_0$  的数值作为评判湍流强弱的标准。多层相位屏法的仿真条件如表 1 所示。

将受湍流影响的光场经过傅里叶变换,获得聚焦光场,以聚焦光场作为多模光纤光波导的输入场。对光波导的分析有两种方法:解析法和数值方法。虽然解析法可以计算出精确的数值结果,但对于复杂结构光波导,只有少量波导可以通过解析法得到表达式,因此更多波导分析应用数值法。本文采用交替方向隐式光束传输法(ADI-BPM)来模拟多模光纤中的光传

表 1 多层相位屏法仿真条件

| 参数类型 | 参数                    | 值                          |
|------|-----------------------|----------------------------|
| 激光参数 | 波长 $\lambda$          | $1.55\mu\text{m}$          |
|      | 束腰半径 $w_0$ (准直光束)     | $30\text{mm}$              |
|      | 传输距离 $L$              | $3000\text{m}$             |
| 环境参数 | 内尺度 $l_0$             | $1 \times 10^{-3}\text{m}$ |
|      | 外尺度 $L_0$             | $10\text{m}$               |
|      | 网格数量 $N_x \times N_y$ | $256 \times 256$           |
| 网格参数 | 网格间距 $\Delta x$       | $0.5 \times 10^{-3}$       |
|      | 相位屏间距 $\Delta Z$      | $20\text{m}$               |
|      | 湍流功率谱                 | Von Karman 谱               |

播情况。ADI-BPM 先将三维结构下的差分格式方程分解为两个可用二维结构下的追赶法求解的差分方程,再依次用追赶法求解<sup>[16]</sup>。

本文根据商用多模光纤的参数进行建模,ADI-BPM 光波导仿真条件如表 2 所示。

表 2 多模光纤仿真参数

| 参数                    | 数值                |
|-----------------------|-------------------|
| 入射光场直径                | $10\mu\text{m}$   |
| 波长                    | $1.55\mu\text{m}$ |
| 光纤折射率分布类型             | 阶跃光纤              |
| 光纤纤芯直径                | $50\mu\text{m}$   |
| 光纤纤芯折射率               | 1.462             |
| 光纤纤包层折射率              | 1.447             |
| 多模光纤长度                | $5000\mu\text{m}$ |
| 网格数量 $N_x \times N_y$ | $256 \times 256$  |

## 3 仿真结果分析

通过 ADI-BPM 仿真,典型的弱湍流( $D/r_0=1$ )多模光纤截面光强分布和剖面光强分布如图 2 所示。光场耦合计算主要是对截面进行计算。图 2(a)中光纤截面光强呈圆对称分布。当光场注入至多模光纤中时,截面光场分布和湍流仿真场近似。当距离达到  $200\mu\text{m}$  时,光场出现多环状分布,光强中心减弱。当距离达到  $1000\mu\text{m}$  时,中心能量有所增强,光场分布仍然呈环状分布。随着传输距离增加,截面光场开始呈周期性变化。在周期中的峰值点,多模光纤纤芯中心出现较强的光强,能量有汇聚的趋势。在周期中的谷值点,多模

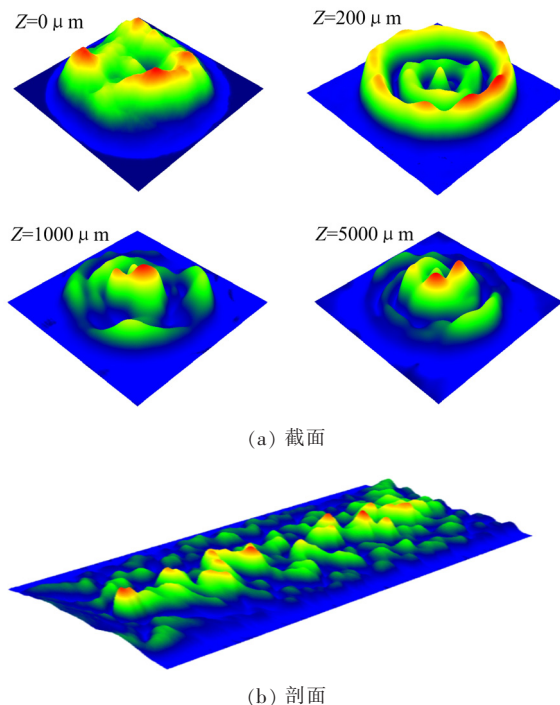


图 2  $D/r_0=1$  时,不同传输距离的光强分布



光纤纤芯中心周围出现较大的空洞, 能量分布不均。从图 2(b)可以看出, 中心最强部分光场并非沿  $z$  轴直线传输, 而是呈  $s$  形传输, 这和单模光传输不同。

典型中等湍流 ( $D/r_0=5$ ) 多模光纤截面光强分布和剖面光强分布如图 3 所示。图 3(a)中,  $Z=0\mu\text{m}$  时图像显示由于受湍流影响, 入射光场相干性被破坏, 光纤截面光强不再呈圆对称分布, 中心位置光强不再是光强最强部分。随着传输距离增加, 截面光场仍然呈周期性变化, 但是环状光场分布不明显。在周期中的峰值点, 多模光纤纤芯中心出现较强的光强, 能量有汇聚的趋势。从图 3(b)可以看出, 中心最强部分光场开始分散, 传输路径出现分化。

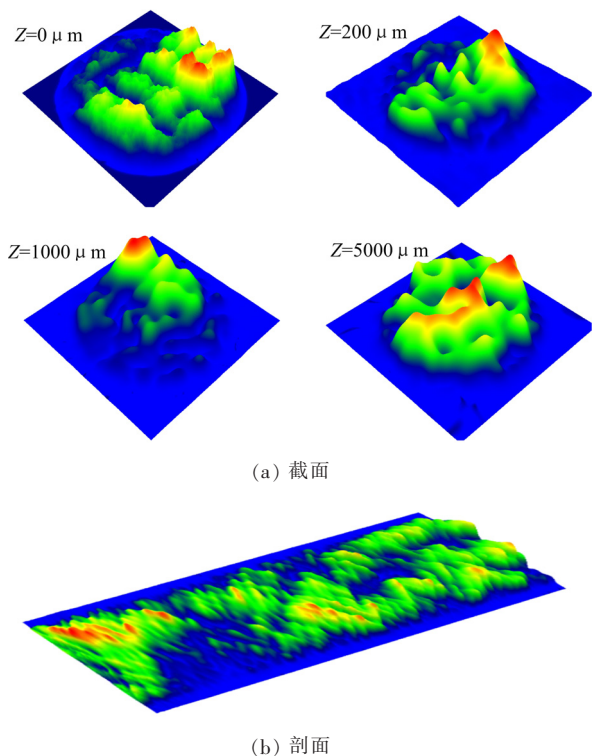


图 3  $D/r_0=5$  时, 不同传输距离的光强分布

典型强湍流 ( $D/r_0=10$ ) 下多模光纤截面光强分布和剖面光强分布如图 4 所示。强湍流下多模传输特性和中等湍流下近似, 只是截面能量更为分散。中心能量的周期性波动不再明显, 说明多模光纤中传输的主要是高阶场。

通过式 (5), 计算不同强度湍流下的  $\eta$ , 结果如图 5 所示。多模光纤传输距离为 0 时, 等效于单模光纤直接耦合情况。经过多模光纤传输之后, 耦合效率呈现周期变化。弱湍流 ( $D/r_0=1$ ) 时, 单模光纤直接耦合效率  $\eta$  约为 0.12, 经过多模光纤传输后, 在  $1950\mu\text{m}$  处  $\eta$  达到最大值 0.37; 在  $700\mu\text{m}$ 、 $2800\mu\text{m}$  处  $\eta$  最小为

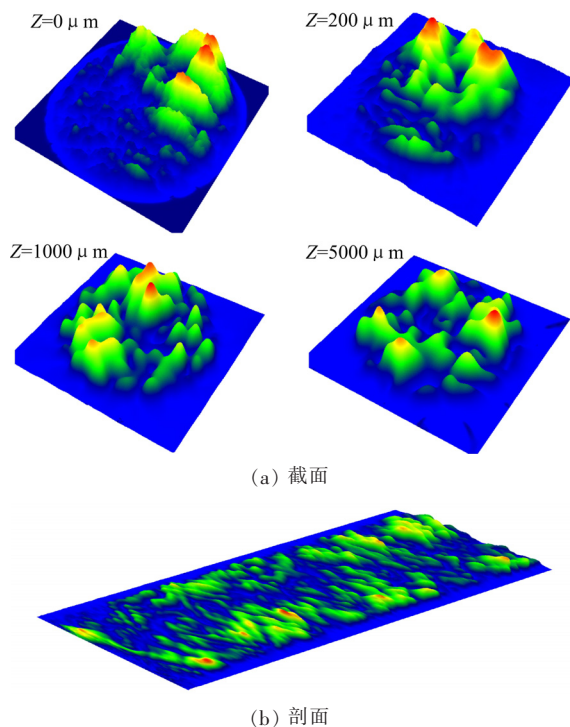


图 4  $D/r_0=10$  时, 不同传输距离的光强分布

0.01。中等强度湍流 ( $D/r_0=5$ ) 下, 在  $500\mu\text{m}$ 、 $2700\mu\text{m}$  处  $\eta$  达到最大值 0.19; 在  $1500\mu\text{m}$ 、 $3600\mu\text{m}$  处  $\eta$  最小为 0.02。强湍流 ( $D/r_0=10$ ) 经过多模光纤传输后, 在  $1800\mu\text{m}$ 、 $3300\mu\text{m}$  处  $\eta$  达到最大值 0.05; 在  $500\mu\text{m}$ 、 $2800\mu\text{m}$  处  $\eta$  最小为 0.005 左右。从以上结果可以看出, 光纤长度和湍流强弱会导致  $\eta$  随机波动。不同强度湍流下, 多模光纤传输之后  $\eta$  极大值相对于单模光纤直接耦合有 2~3 倍的提高, 但是极小值在 0.01 附近, 远低于单模光纤直接耦合效率。将  $\eta$  作为闭环反馈控制量, 通过光纤延迟线等方式改变光场在多模光纤中的传输距离, 可以使  $\eta$  达到极大值点。

空间光入射角的起伏会导致耦合效率降低。以  $\varphi$  表示入射角的起伏角度,  $\varphi$  从  $0\sim 20\mu\text{rad}$  变化对  $\eta$  产生

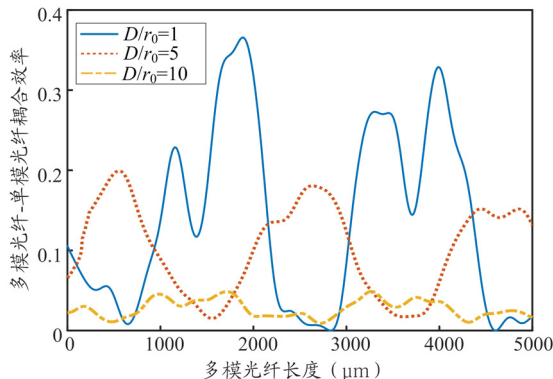


图 5 无角度误差且不同湍流强度下,  $\eta$  随多模光纤长度的变化情况

影响的仿真结果如图 6 所示。仿真条件是中等强度湍流( $D/r_0=5$ ),  $Z$  为 400~5000 $\mu\text{m}$ 。随着  $\varphi$  增加,  $\eta$  逐渐降低。 $\varphi$  在 5 $\mu\text{rad}$  以内,  $\eta$  的变化不明显;  $\varphi$  为 10 $\mu\text{rad}$  时,  $\eta$  峰值减小 50%;  $\varphi$  为 15 $\mu\text{rad}$  时,  $\eta$  峰值减小 67%;  $\varphi$  为 20 $\mu\text{rad}$  时,  $\eta$  的峰值减小 70%。光入射角偏差角为 15 $\mu\text{rad}$  时, 聚焦光束在光纤端面的位移达到 11 $\mu\text{m}$ , 此时如果采用单模光纤耦合,  $\eta$  近似为 0, 而通过多模光纤耦合,  $\eta$  峰值可以达到 0.1。在优化  $z$  轴传输长度的前提下, 采用多模光纤-单模光纤耦合可以有效减小角度偏差对  $\eta$  的影响。

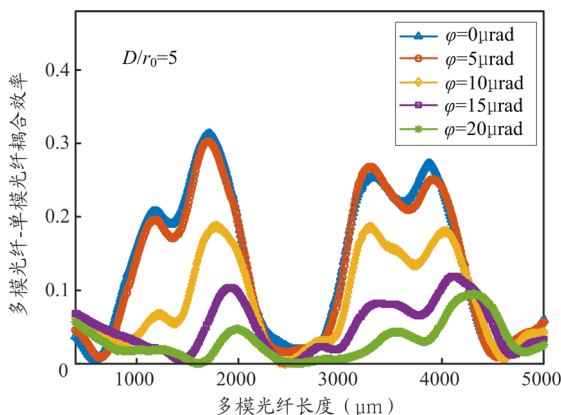


图 6 有角度误差时,  $\eta$  随多模光纤长度的变化情况

在实际应用中, 湍流强弱通常不易获得, 但光纤长度是可测的, 因此分析多模光纤长度和  $\eta$  的关系非常重要。仿真结果表明: 由于大气传输的随机性, 即便在  $D/r_0$  相同情况下,  $\eta$  取极大值时光纤的长度仍然是个变量。空间光耦合条件的随机性表现在光纤端面与聚焦光斑中心的误差、到达角起伏、光注入条件和散斑效应。这些参数很难通过仿真定量确定。为此, 本文通过随机相位屏产生多组数据进行分析, 虽然耦合条件具有随机性, 但多模光纤长度周期性改变  $\eta$  的规律不变。中弱湍流( $D/r_0=1,5$ )下多模光纤长度周期约为 2000 $\mu\text{m}$ ; 中强湍流( $D/r_0=10$ )下多模光纤长度周期性不明显。

## 4 结束语

本文利用随机相位屏仿真大气湍流对光传输的影响, 通过 ADI-BPM 方法仿真光场在多模光纤中的传输特性, 主要研究大气湍流下空间光信号到多模光纤的单模耦合效率  $\eta$ 。

仿真分析结果表明: 湍流强弱( $D/r_0$ )、多模光纤传输距离和空间光入射角都会影响  $\eta$ 。空间光经过多模光纤传输之后,  $\eta$  呈现周期变化。中弱强度湍流下, 多

模光纤传输  $\eta$  的最大值为单模光纤耦合效率的 3 倍; 强湍流下, 多模光纤传输  $\eta$  的最大值为单模光纤耦合效率的 2 倍。空间光入射角的起伏会导致  $\eta$  峰值降低, 但比同等条件单模光纤直接耦合效率高 1~2 倍。如果对光场在多模光纤中的传输距离进行实时控制, 使  $\eta$  达到极大值点, 可以优化多模光纤耦合性能。仿真结果为自由空间光通信系统大气湍流中多模光纤耦合提供了依据。在下一步工作中, 我们将开展外场实验, 将实验数据与模拟仿真相互验证, 进一步获得湍流强弱( $D/r_0$ )、多模光纤传输距离、空间光入射角与  $\eta$  之间关系。

## 参考文献:

- [1] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Laser Beam Propagation through Random Media[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005.
- [2] 张慧颖, 孙浩. 前置放大的空间光 DPSK 自相干接收系统分析[J]. 光通信技术, 2018, 42(5): 50-53.
- [3] 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.
- [4] 陈锦妮, 柯熙政. 弱湍流状态下空间光-多模光纤耦合效率分析[J]. 西安理工大学学报, 2014(3): 326-330.
- [5] WINZER P J, LEEB W R. Fiber coupling efficiency for random light and its applications to lidar[J]. Optics letters, 1998, 23(13): 986-988.
- [6] DIKMELIK Y, DAVIDSON F M. Fiber-coupling efficiency for free-space optical communication through atmospheric turbulence [J]. 2005, 44(23): 4946-4952.
- [7] TAKENAKA H, TOYOSHIMA M, TAKAYAMA Y. Experimental verification of fiber-coupling efficiency for satellite-to-ground atmospheric laser downlinks[J]. Optics Express, 2012, 20(14): 15301-15308.
- [8] 范雪冰, 王超, 佟首峰, 等. 空间光到单模多芯光纤耦合效率分析及影响因素研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(12): 2414-2422.
- [9] 马烈. 大气湍流对空间光至单模光纤耦合效率概率分布影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [10] BELMONTE A, KHAN J. Performance of synchronous optical receivers using atmospheric compensation techniques [J]. Optics Express, 2008, 16(18): 14151-14162.
- [11] 李佳蔚, 陈卫标. 星地相干光通信中的自适应光学系统带宽研究[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 248-253.
- [12] 熊准, 艾勇, 单欣, 等. 空间光通信光纤耦合效率及补偿分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2510-2514.
- [13] 武云云, 陈二虎, 张宇, 等. 自适应光学在光通信中的仿真与实验分析[J]. 光通信技术, 2012, 36(8): 52-55.
- [14] FREHLICH R. Simulation of laser propagation in a turbulent atmosphere[J]. Applied Optics, 2000, 39(3): 393-397.
- [15] 艾勇, 段梦云, 徐洁洁, 等. LC-SLM 激光大气传输湍流模拟及通信实验分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3103-3109.
- [16] WEN Xiang, XU Ke, SONG Qinghai. Design of a barcode-like waveguide nanostructure for efficient chip-fiber coupling [J]. Photonics Research, 2016, 4(6): 209-213.