

面向大气激光通信的空间光到少模光纤耦合特性研究

何爽^{1,2}, 张鹏^{1,2*}, 魏佳^{1,2}, 伍文韬^{1,2}, 官喜宇^{1,2}, 王超^{1,2}, 佟首峰^{1,2}

¹ 长春理工大学光电工程学院空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022;

² 长春理工大学空间光电技术国家与地方联合工程中心, 吉林 长春 130022

摘要 少模前置光放大分集接收的模式可有效提高接收灵敏度 and 大气激光通信抗湍流能力, 为此有必要研究空间光到少模光纤耦合特性。首先, 基于捕获跟踪对准模型、Von Karman 湍流谱模型推导了大气湍流及跟瞄误差条件下空间光到少模光纤的耦合模型。其次, 基于推导模型分析得到耦合效率与少模光纤参数、湍流强度、跟瞄误差存在凸曲线关系。受到大气湍流强度(大气折射率常量 C_n^2 为 10^{-15} 到 10^{-14})影响, 光纤归一化频率(V 值)在 5 附近可实现最优耦合性能, 最优 V 值随着湍流强度增加而增加。而受到跟瞄误差($0 \sim 4 \mu\text{rad}$)影响, 光纤 V 值也存在最优值, 并随着 V 值增加其抗跟瞄误差能力也增加。最后, 搭建了模拟大气湍流条件下的少模光纤耦合性能实验平台, 实验研究了 V 值分别为 3.8、4.6、4.9、5.1 的少模光纤在不同模拟湍流强度下的耦合特性, 测试结果初步验证了理论研究结果。研究结果为大气激光通信前置放大器设计等研究提供技术参考。

关键词 光通信; 空间激光通信; 耦合效率; 光纤耦合; 少模光纤

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2306001

1 引言

自由空间光通信由于具有信息容量大、传输速率高、抗干扰能力强、系统体积小、功耗低等优点受到了广泛关注^[1,2,3]。其中, 大气激光通信是空间光通信的重要组成部分。大气激光通信接收面临接收能量耦合差和能量抖动大等技术瓶颈问题。为解决这些问题, 通常采用空间耦合和光纤耦合两种方法。在空间耦合方面, 多数研究采用大面积探测器或多探测器拼接, 不过大面积高速探测器及多探测器拼接都存在较大制造难度。而在光纤耦合方面, 多采用多模光纤(MMF)耦合, 不过多模光纤会限制相干通信接收的使用。若使用单模光纤(SMF)耦合, 在大气条件下耦合效率极低, 即便采用单模前置放大, 效果也不太理想。近年来, 通过少模光纤(FMF)或少模多芯光纤前置放大后分集接收, 成为提高大气激光通信接收性能的重要途径^[4,5,6]。

空间光到光纤耦合的研究始于 20 世纪 80 年代。1981 年, Froehly^[7]发表了一篇相关文章。此后, 科研人员先后研究了散斑尺寸与接收孔径的比值、跟瞄误差、大气湍流强度对空间光到单模光纤的耦合效率的影响^[8,9,10]。然而, 由于 SMF 的芯径小且数值孔径小, 空间光耦合进入 SMF 仍然是一个技术挑战。孔径光耦合到 FMF 是一个提高空间光到光纤耦合效率的途径, 因为 FMF 的芯径大于 SMF, 且可以支持多个模式放大分集接收以及多个模式调制接收, 并具有更好的鲁棒性^[11], 所以很多研究考虑将 FMF 耦合用于空间激光通信系统。一些研究人员初步计算了空间光到 FMF 的耦合效率并做了实验验证。2016 年, Zheng 等^[12]通过实验方法研究了大气湍流强度对空间光到 FMF 耦合效率的影响并与 SMF 进行了对比。与 SMF 相比, 在湍流存在下, 三模 FMF 和六模 FMF 的耦合效率分别提高了 4 dB 和 7 dB。2018 年, 王超等^[9]通过理论

收稿日期: 2021-03-22; 修回日期: 2021-04-25; 录用日期: 2021-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(61705019, 61805028)、吉林省科技发展计划项目(20200201010JC)、吉林省科技厅自然科学基金(20180101338JC, 20190201271JC)、吉林省国际科技合作项目(20200801053GH)、吉林省教育厅基金(JJKH20200752KJ, JJKH20190563KG)

通信作者: *zhangpeng@cust.edu.cn

仿真及实验研究了相对孔径、倾斜、离焦及随机抖动等因素对空间光到 FMF 的耦合效率的影响。2019 年, Fardoost 等^[13]基于菲涅耳衍射理论研究了在理想条件下空间光到 FMF 的耦合效率与入射光斑放大倍率和光纤归一化频率(V 值)之间的关系, 为 FMF 应用于空间激光通信提供了参考依据, 但是理想情况下并没有考虑大气湍流对耦合过程的影响。2019 年, Tan 等^[14]通过仿真研究了空间光到 FMF 的耦合效率与耦合系统数值孔径、光斑遮挡等因素之间的规律, 为自由空间光通信系统中基于 FMF 耦合的接收器设计提供了参考; 2020 年, Fan^[15]等基于拉盖尔-高斯模的标度自适应集合, 提出了自由空间光通信链路到 FMF 的理论耦合模型, 仿真分析了湍流和抖动情况下各种空间模式的耦合性能及随机抖动下的通信性能, 证明了 FMF 比 SMF 具有更好的误码率性能, 在高信噪比情况下效果更佳。在实际耦合过程中, FMF 参数、大气湍流强度及跟瞄误差等因素是同时存在的, 目前的研究忽略了跟瞄误差, 也没有考虑综合影响, 对 FMF 参数对耦合效率的影响也缺乏相关实验研究。在上述基础上, 需要进一步建立大气湍流及跟瞄误差下的耦合理论模型, 从理论和实验两方面探索耦合效率与光纤参数、大气湍流强度、跟瞄误差之间的关系。

为此, 本文建立了大气湍流下空间光到 FMF 的耦合模型和跟瞄误差下空间光到 FMF 的耦合理论模型, 在耦合模型下通过计算仿真耦合效率与光纤 V 值、大气湍流强度、跟瞄偏角的变化关系以优化光纤参数。同时, 在大气湍流和跟瞄误差综合考虑的混合模型下, 提出了通过选择合适的光纤 V 值来提高空间光到 FMF 的耦合效率, 并搭建实验进行验证。

2 大气湍流下空间光到少模光纤的耦合模型

2.1 空间光到少模光纤耦合理论模型

通常, 把传输模式介于 SMF 和 MMF 之间, 可以同时传输基模和少数几个(通常低于 10 个)高阶模的光纤称为少模光纤。少模光纤的基本特性参数有光纤纤芯半径 r_0 、纤芯折射率 n_1 、包层折射率 n_2 、数值孔径 NA、归一化频率 V 。

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (1)$$

$$V = \frac{2\pi r_0}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (2)$$

理想情况下, 反射接收光学天线, 可以看作一个

薄透镜。空间光耦合到 FMF 的路径如图 1 所示。在大气湍流的影响下, 空间光经过无像差的理想接收光学天线汇聚到后焦面形成艾里斑, 光能量耦合入放置在后焦面位置的少模光纤纤芯中。激光束离开激光器后, 通过一个较长的空间信道, 可以看作是一个在接收机的孔径平面处具有振幅 A 的理想平面波。接收机孔径直径为 D , 薄透镜的焦距为 f 。光纤端面与透镜焦平面重合, 并且光纤轴线与透镜的中轴对齐。光纤的纤芯半径为 a 。

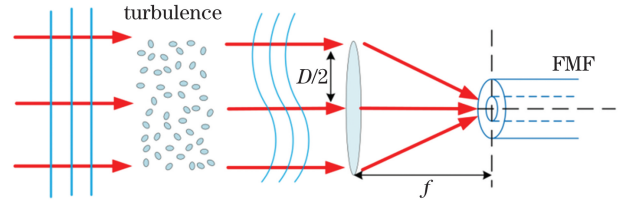


图 1 大气湍流下空间光到少模光纤耦合示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coupling space light to few-mode fiber under atmospheric turbulence

空间光对 FMF 的总耦合效率 η , 可以通过空间光与 FMF 中各模式耦合效率的线性叠加计算^[16,17]

$$\eta = \frac{\left| \iint E^*(r) F(r) ds \right|^2}{\iint |E(r)|^2 ds}, \quad (3)$$

$$\eta_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^m \eta_i, \quad (4)$$

式中: m 表示少模光纤的模场数; η_i 为少模光纤第 i 个模场的耦合效率。通过对亥姆霍兹方程中标量的傍轴解的广泛研究, 自由空间模式的形式是厄米-高斯(HG)或拉盖尔-高斯(LG)光束, 非常适合用于激光腔模式。此处采用 LG 光束作为入射的自由空间光。 $E(r)$ 为入射的 LG 光束在焦平面上的光场分布^[9]

$$E(r) = \exp \left[ik \left(f + \frac{r_0^2}{2f} \right) \right] \frac{\pi D^2}{4\lambda f} \left[2 \frac{J_1(kDr_0/2f)}{kDr_0/2f} \right], \quad (5)$$

式中: i 是虚数; $J_1(X)$ 是一阶贝塞尔函数; k 为波数, 表达式为 $k = 2\pi/\lambda$ 。在计算少模光纤的模场分布时可以忽略偏振模耦合分量, 并对弱导光纤进行计算。根据拉盖尔-高斯分布对阶跃型少模光纤模场进行近似计算, 得到四模光纤的线偏振 LP 模场归一化表达式^[10]

$$F_{l,q}(r, \varphi) = C_{l,q} \left(\frac{r}{\xi} \right)^l L_q^l \left(\frac{r^2}{\xi^2} \right) \cdot \exp \left(-\frac{r^2}{2\xi^2} \right) \begin{cases} \sin l\varphi \\ \cos l\varphi \end{cases}, \quad (6)$$

式中: l, q 为 LP 模式的模场序号; $C_{l,q}$ 为光场归一

化常量; L_q^l 为拉盖多项式; $\sin l\varphi$ 和 $\cos l\varphi$ 分别对应简并模式的两种形态; r, φ 分别为模场轴向和角向坐标; ξ 可表示为

$$\xi = \sqrt{r_0 / (k_0 n_1 \sqrt{2\Delta})}, \quad (7)$$

式中: k_0 为波数, 表达式为 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$; 相对折射率差 $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ 。

由(6)式可得到 $LP_{01}, LP_{11}, LP_{02}, LP_{21}$ 的模场表达式

$$\begin{cases} F_{01}(r, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{r^2}{2\xi^2}\right) \\ F_{11}(r, \varphi) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \cdot |r| \exp\left(-\frac{r^2}{2\xi^2}\right) \begin{cases} \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{cases} \\ F_{02}(r, \varphi) = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{\pi}} \cdot |r|^2 \exp\left(-\frac{r^2}{2\xi^2}\right) \\ F_{21}(r, \varphi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot |r|^3 \exp\left(-\frac{r^2}{2\xi^2}\right) \begin{cases} \sin 2\varphi \\ \cos 2\varphi \end{cases} \end{cases}, \quad (8)$$

将(5)式和(8)式代入(3)式和(4)式可得到空间光与

少模光纤的各个 LP 模式的耦合效率, 线性叠加得到总的耦合效率。线性叠加过程如下:

由(3)式可推导出空间光束第“ i ”个模式耦合进少模光纤的耦合效率可表示为

$$\eta_i = \sum_j \eta_{ij} = \sum_j \frac{1}{\iint_s |E_i(r)|^2 ds} \left| \iint_s E_i^*(r) F_j(r) ds \right|^2. \quad (9)$$

空间光束中第一个模式的耦合效率如下

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \eta_{11} + \eta_{12} + \dots + \eta_{1m} = \\ &= \frac{1}{\iint_s |E_1(r)|^2 ds} \left[\left| \iint_s E_1^*(r) F_1(r) ds \right|^2 + \right. \\ &\left. \left| \iint_s E_1^*(r) F_2(r) ds \right|^2 + \dots + \left| \iint_s E_1^*(r) F_m(r) ds \right|^2 \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

同理, 几个模式耦合进少模光纤的耦合效率可表示为

$$\begin{aligned} \eta_{\text{tot}} &= \frac{1}{\iint_s [|E_1(r)|^2 + |E_2(r)|^2 + \dots + |E_i(r)|^2] ds} \cdot \left\{ \left| \iint_s [E_1^*(r) + E_2^*(r) \dots + E_i^*(r)] F_1(r) ds \right|^2 + \right. \\ &\left. \left| \iint_s [E_1^*(r) + E_2^*(r) \dots + E_i^*(r)] F_2(r) ds \right|^2 + \dots + \left| \iint_s [E_1^*(r) + E_2^*(r) \dots + E_i^*(r)] F_m(r) ds \right|^2 \right\}. \end{aligned} \quad (11)$$

当有六个空间模式存在时, 由于不同模式的对称性, 括号中的每个积分都只有两项存在, 可总结如下:

$$\begin{cases} i = 2, 3, 4, 5 \rightarrow \langle E_i(r), F_1(r) \rangle = \langle E_i(r), F_6(r) \rangle = 0 \\ j = 1, 4, 5, 6 \rightarrow \langle E_j(r), F_2(r) \rangle = \langle E_j(r), F_3(r) \rangle = 0, \\ k = 1, 2, 3, 6 \rightarrow \langle E_k(r), F_4(r) \rangle = \langle E_k(r), F_5(r) \rangle = 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中“ $\langle \rangle$ ”表示两个场分布的内积。

由于自由空间和光纤中的模式都具有 $\sin(m\varphi)$ 或 $\cos(n\varphi)$ 方位角依赖因子, m, n 为非负整数, 而且这些正弦函数是正交的。因此, 存在六个模式时, 耦合效率为

$$\begin{aligned} \eta_{\text{tot-6}} &= \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \eta_i + \frac{1}{6} \left\{ 2\text{real} \left[\iint_s E_1^*(r) F_1(r) ds \iint_s E_6^*(r) F_1(r) ds \right]^* + \right. \\ &2\text{real} \left[\iint_s E_2^*(r) F_2(r) ds \iint_s E_3^*(r) F_2(r) ds \right]^* + 2\text{real} \left[\iint_s E_2^*(r) F_3(r) ds \iint_s E_3^*(r) F_3(r) ds \right]^* + \\ &2\text{real} \left[\iint_s E_4^*(r) F_4(r) ds \iint_s E_5^*(r) F_4(r) ds \right]^* + 2\text{real} \left[\iint_s E_4^*(r) F_5(r) ds \iint_s E_5^*(r) F_5(r) ds \right]^* + \\ &\left. 2\text{real} \left[\iint_s E_1^*(r) F_6(r) ds \iint_s E_6^*(r) F_6(r) ds \right]^* \right\}, \end{aligned} \quad (13)$$

其中, real 为实值函数, 即取复数的实部数值。

2.2 大气湍流下空间光到少模光纤的耦合模型

由湍流引起的大气不均匀性可以看作是不同温度的涡旋, 不同温度的涡旋就像不同折射率大小的棱镜一样。根据 Kolmogorov 假设的物理描述, 最

初的大涡旋会分裂成小涡旋, 直到涡旋的能量与本身动能相等时停止分裂。最小的和最大的涡旋分别称为小尺度 l_0 。涡旋(湍流内尺度)和大尺度 L_0 。涡旋(湍流外尺度), l_0 通常为几毫米, 而 L_0 通常在米级。在研究过程中, 我们选取常见大气尺度谱数

值^[18], 即 $l_0 = 1 \text{ mm}$, $L_0 = 10 \text{ m}$ 。

光束在大气中传播时因大气湍流的作用会出现光斑畸变、到达角起伏、光束扩展和光强闪烁等大气湍流效应, 并且光斑的质心因为大尺度湍流元的不均匀而产生漂移现象, 严重限制了激光在实际工程中的应用。

在与传播方向相垂直的平面上, 高斯光束的光场和光强服从高斯分布, 基模高斯光束在均匀介质中 z 点处的光场和光强分别可以表示为^[19]

$$\begin{cases} u(x, y, z) = u_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left\{-\left[\frac{r^2}{\omega^2(z)} + i \frac{kr^2}{2R(z)}\right]\right\} \\ I(x, y, z) = u_0^2 \frac{\omega_0^2}{\omega^2(z)} \exp\left[-\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right] \end{cases}, \quad (14)$$

式中: $\omega_0 = \sqrt{\lambda f / \pi}$ 表示束腰宽度; $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/f)^2}$ 表示 z 点处的光束宽度; $R(z)$ 表示相位面的曲率半径, 其表达式为

$$\begin{cases} R(z) = z[1 + (f/z)^2] = z + f^2/z \\ f = \pi\omega_0^2/\lambda \\ r^2 = x^2 + y^2 \\ k = 2\pi/\lambda \end{cases}. \quad (15)$$

将光束在大气中的传播过程分成 N 段, 且将每个相位屏划分成网格边长为 Δx 的 $N \times N$ 个网格, 然后光束在真空中的传播用菲涅耳衍射表示, 则高斯光束经距离 z 的传播, 其 z_{j+1} 处的光场为^[19]

$$u(r, z_{j+1}) = \text{IFFT}\left\{\text{FFT}\{u(r, z_j) \times \exp[i\varphi(x, y)]\} \exp\left[-i \frac{\kappa_x^2 + \kappa_y^2}{2k} \Delta z_{j+1}\right]\right\}, \quad (16)$$

式中: FFT 表示傅里叶变换函数; IFFT 表示傅里叶逆变换函数。以适用于弱湍流-强湍流的 Von Karman 湍流谱为基础^[20], 研究湍流对空间光到少模光纤的耦合效率的影响。在 Von Karman 湍流谱模型中, C_n^2 为大气湍流折射率常量, 是表征折射率波动的一个重要参数, 它的 Hufnagel-Valley(H-V) 模型可以表示为^[18]

$$C_n^2(h) = 0.00594(v/27)^2(10 - 5h)10\exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + A \exp(-h/100), \quad (17)$$

式中: 折射率结构参数 C_n^2 的单位是 $\text{m}^{-2/3}$; A 是地面上 $C_n^2(0)$ 的标称值, 单位是 $\text{m}^{-2/3}$; v 是 $5 \sim 20 \text{ km}$ 垂直路径风速均方根(m/s); A 和 v 的典型值分别为 $1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 和 21 m/s ; h 是海拔高度, 单位是 m 。通常认为 C_n^2 的变化范围从强湍流 $10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ 到弱湍流 $10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$, 且 C_n^2 在短时间内水平路径上可以认为是一个均匀分布的常量, 但是斜程或垂直路径必须作为高度的函数处理。

大气温度与折射率的关系如下

$$\begin{cases} n = 1 + 77.6(1 + 7.52 \times 10^{-5} - 3\lambda^{-2})(P/T_e) \times 10^{-6} \\ -dn/dT_e = 7.8 \times 10^{-5} P/T_e^2 \end{cases}. \quad (18)$$

描述温度变化的参数是温度结构参数 C_T^2 , 它与折射率结构参数 C_n^2 有关, 如下^[21]

$$C_n^2 = (dn/dT_e)^2 C_T^2, \quad (19)$$

$$C_n^2 = (7.8 \times 10^{-5} - 5P/T^2)^2 C_T^2, \quad (20)$$

式中: P 是大气压强, 单位是 mPa ; T_e 是绝对温度; λ 是波长, 单位是 nm ; T 是平均绝对温度, 对于两个点之间存在的温度差有

$$D_T = (T_1 - T_2)^2 = \begin{cases} C_T^2 L_P^{2/3}, (L_0 \ll L_P \ll L_0) \\ C_T^2 L_0 - 4/3 L_P^2, (0 \ll L_P \ll L_0) \end{cases}, \quad (21)$$

式中: L_P 为一定条件下的湍流尺度。大气湍流引入的平均相位延迟量可由 Von Karman 湍流谱模型表示^[22]

$$\varphi_{AT}^2 = 0.782 L k^2 C_n^2 L_0^{5/3}, \quad (22)$$

式中: L 为传输距离; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数; L_0 为湍流外尺度; 折射率结构参数 C_n^2 为平均相位延迟量的决定参数。

由(5)式和(22)式推导出入射光经过湍流后在焦平面上的光场分布为

$$E(r) = \exp\left[ik\left(f + \frac{r_0^2}{2f}\right) + \varphi_{AT}\right] \frac{\pi D^2}{4\lambda f} \left[2 \frac{J_1(kDr_0/2f)}{kDr_0/2f}\right]. \quad (23)$$

将(23)式和(8)式代入(3)式和(4)式, 得到大气湍流下空间光到少模光纤的耦合效率, 即为大气湍流下空间光到少模光纤的耦合模型, 表达式为

$$\eta = \sum_{i=1}^m \frac{\left| \iint \exp\left[ik\left(f + \frac{r_0^2}{2f}\right) + \varphi_{AT}\right] \frac{\pi D}{\lambda} \left[\frac{J_1(kDr_0/2f)}{kr_0}\right] F_i(r) ds \right|^2}{\left| \iint \exp\left[ik\left(f + \frac{r_0^2}{2f}\right) + \varphi_{AT}\right] \frac{\pi D}{\lambda} \left[\frac{J_1(kDr_0/2f)}{kr_0}\right] \right|^2}. \quad (24)$$

3 跟瞄误差下空间光到少模光纤的耦合模型

在空间激光通信中,跟踪捕获对准系统存在一个小角度(单位为 μrad)的对准误差^[22],导致入射光

与光纤轴线夹角出现角偏差,在焦平面处空间光模场与光纤模场匹配度下降,进而导致耦合效率下降。APT 系统的跟踪误差使入射光的光场发生变化,因此入射光光场为

$$E(r) = \exp \left[ik \left(f + \frac{r_0^2}{2f} \right) + \varphi_{\text{APT}} \right] \frac{\pi D^2}{4\lambda f} \left[2 \frac{J_1(kDr_0/2f)}{kDr_0/2f} \right], \quad (25)$$

式中 φ_{APT} 为 APT 系统对入射光带来的附加相位量。而 φ_{APT} 的变化由 APT 系统的跟瞄误差角表示,单位为 μrad 。

将(25)式与(8)式代入(3)式和(4)式,得到空间光到少模光纤耦合效率与跟瞄误差角的关系,即为跟瞄误差下空间光到少模光纤的耦合理论模型,表达式为

$$\eta = \sum_{i=1}^m \frac{\left| \iint \exp \left[ik \left(f + \frac{r_0^2}{2f} \right) + \varphi_{\text{APT}} \right] \frac{\pi D}{\lambda} \left[\frac{J_1(kDr_0/2f)}{kr_0} \right] F_i(r) ds \right|^2}{\left| \iint \exp \left[ik \left(f + \frac{r_0^2}{2f} \right) + \varphi_{\text{APT}} \right] \frac{\pi D}{\lambda} \left[\frac{J_1(kDr_0/2f)}{kr_0} \right] \right|^2} \quad (26)$$

4 空间光到少模光纤耦合参数优化分析

4.1 大气湍流下光纤参数优化分析

软件仿真分析空间光经大气湍流后耦合进少模光纤过程。设置参数如下:入射光波长为 1550 nm,透镜焦距 f 为 18 mm。光纤纤芯半径为 8.5 μm ,纤芯折射率 n_1 为 1.4457,包层折射率 n_2 为 1.4378。在大气湍流强度上选择了 $C_n^2 = 10^{-15}$ 、 $C_n^2 = 5 \times 10^{-15}$ 的弱湍流和 $C_n^2 = 10^{-14}$ 、 $C_n^2 = 5 \times 10^{-14}$ 的强湍流^[23]。

在大气湍流下空间光到少模光纤的耦合模型下,空间光到少模光纤的耦合效率为空间光 LG 光束的每个模式与光纤中的每个 LP 模式分别耦合效率的线性叠加。

在 $C_n^2 = 10^{-15}$ 时,根据(9)式、(11)式、(24)式计算出不同 V 值时每个模式耦合进少模光纤的耦合效率,得到如下耦合矩阵:

$V=4.85$ 时,耦合效率矩阵如下:

$$\begin{matrix} & \text{LP}_{01} & \text{LP}_{11} & \text{LP}_{21} & \text{LP}_{02} \\ \text{LG}_{00} & \left[\begin{matrix} 0.825 & 10^{-12} & 10^{-9} & 0.009 \end{matrix} \right. \\ \text{LG}_{01} & \left[\begin{matrix} 10^{-9} & 0.827 & 10^{-10} & 10^{-9} \end{matrix} \right. \\ \text{LG}_{02} & \left[\begin{matrix} 10^{-7} & 10^{-11} & 0.823 & 10^{-9} \end{matrix} \right. \\ \text{LG}_{11} & \left[\begin{matrix} 0.002 & 10^{-11} & 10^{-9} & 0.81 \end{matrix} \right. \end{matrix}$$

$V=5$ 时,耦合效率矩阵如下:

$$\begin{matrix} & \text{LP}_{01} & \text{LP}_{11} & \text{LP}_{21} & \text{LP}_{02} \\ \text{LG}_{00} & \left[\begin{matrix} 0.835 & 10^{-12} & 10^{-9} & 0.027 \end{matrix} \right. \\ \text{LG}_{01} & \left[\begin{matrix} 10^{-9} & 0.827 & 10^{-10} & 10^{-9} \end{matrix} \right. \\ \text{LG}_{02} & \left[\begin{matrix} 10^{-7} & 10^{-11} & 0.824 & 10^{-9} \end{matrix} \right. \\ \text{LG}_{11} & \left[\begin{matrix} 0.019 & 10^{-11} & 10^{-9} & 0.833 \end{matrix} \right. \end{matrix}$$

$V=5.2$ 时,耦合效率矩阵如下:

$$\begin{matrix} & \text{LP}_{01} & \text{LP}_{11} & \text{LP}_{21} & \text{LP}_{02} \\ \text{LG}_{00} & \left[\begin{matrix} 0.825 & 10^{-12} & 10^{-9} & 0.031 \end{matrix} \right. \\ \text{LG}_{01} & \left[\begin{matrix} 10^{-9} & 0.82 & 10^{-10} & 10^{-9} \end{matrix} \right. \\ \text{LG}_{02} & \left[\begin{matrix} 10^{-7} & 10^{-11} & 0.82 & 10^{-9} \end{matrix} \right. \\ \text{LG}_{11} & \left[\begin{matrix} 0.018 & 10^{-11} & 10^{-9} & 0.818 \end{matrix} \right. \end{matrix}$$

同理计算 $C_n^2 = 10^{-14}$ 、 $C_n^2 = 5 \times 10^{-14}$ 、 $C_n^2 = 5 \times 10^{-15}$ 时,不同光纤 V 值所对应的空间光到少模光纤的耦合效率,如图 2 所示。

图 2 为不同大气湍流强度下空间光到少模光纤的耦合效率与 V 值的关系曲线。可以看到,耦合效率随着 V 值的增加而提高,但是在 $C_n^2 = 0$ 时,当 V 值增加到 4.85,耦合效率达到最高值 0.98,再继续增大 V 值,耦合效率会有所下降,这是因为随着光纤 V 值的增大,光纤所支持的空间模式数目也随之增加,较多的模式数目会导致空间光模式有 LP 模式的模式串扰^[24,25,26],从而导致空间光到光纤的耦合效率下降。同时,在 $C_n^2 = 10^{-15}$ 、 $C_n^2 = 5 \times 10^{-15}$ 时,当 V 值增加到 5,耦合效率达到最高为 0.84、0.833;在 $C_n^2 = 10^{-14}$ 、 $C_n^2 = 5 \times 10^{-14}$ 时,当 V 值增加

到 5.2, 耦合效率达到最高为 0.805, 0.79, 即存在一个最佳 V 值使空间光到光纤的耦合效率最高, 而随着湍流强度的增加, 这个最佳 V 值逐渐增大, 当大气湍流折射率常量 C_n^2 分别为 10^{-15} , 5×10^{-15} , 10^{-14} , 5×10^{-14} 时, 所对应的最佳 V 值分别为 5, 5, 5.2, 5.2。同时, 随着 V 值的增加, 因大气湍流造成的耦合效率下降量逐渐减小。

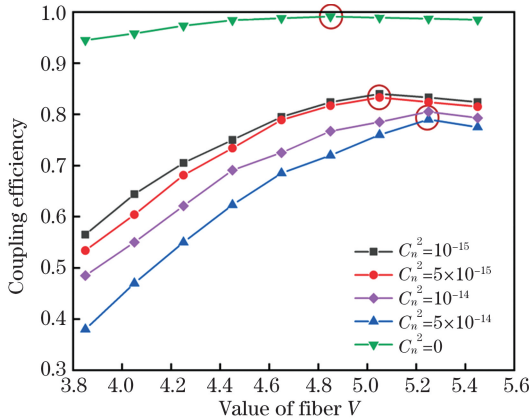


图 2 不同湍流强度下耦合效率与光纤 V 值的关系曲线
Fig. 2 Relationship curve between coupling efficiency and fiber V value under different turbulence intensities

为了进一步探究少模光纤的抗湍流能力, 分别计算仿真 $V=2.405, 3.8, 4.3, 4.8, 5, 5.3$ 时的耦合效率与大气湍流强度的关系曲线, 如图 3 所示。

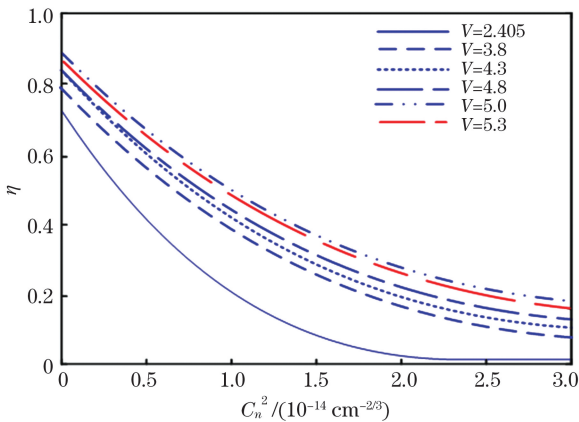


图 3 不同光纤 V 值下耦合效率与大气湍流强度关系
Fig. 3 Relationship between coupling efficiency and atmospheric turbulence intensity under different fiber V values

图 3 为不同光纤 V 值下空间光到少模光纤的耦合效率与大气湍流强度之间的关系曲线, 可以看出大气湍流对空间光到少模光纤的耦合效率有显著影响, 当大气湍流强度增加到一定程度时, 耦合效率几乎为零。相同强度大气湍流下, V 值越大, 耦合效率越高; 但是当 V 值为 5.3 时, 耦合效率有所下降。

这是因为随着 V 值的增加, 光纤内的模式数目越来越多, 导致模式失配, 耦合效率下降, 所以少模光纤抗大气湍流能力是有限的。当 $C_n^2 > 3 \times 10^{-14}$ 时, 单模光纤耦合效率接近 0。

4.2 跟瞄误差下光纤参数优化分析

在跟瞄误差下空间光到少模光纤的耦合模型中, 取光学天线直径 (D) 为 150 mm。根据空间光到少模光纤耦合效率与跟瞄误差角的关系 (16) 式, 仿真耦合效率与跟瞄误差角的关系曲线 ($V=5.2, V=2.405$ 单模光纤), 具体如图 4 所示。

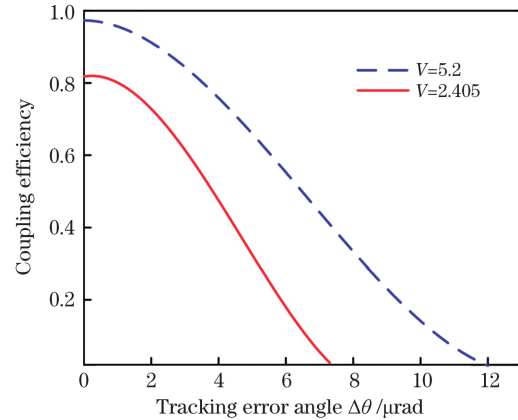


图 4 $V=2.405$ 和 $V=5.2$ 时耦合效率与跟瞄误差角的关系曲线

Fig. 4 Relationship between coupling efficiency and tracking deflection angle at $V=2.405$ and $V=5.2$

由图 4 可看出, 当 $V=5.2$, 不存在跟瞄误差角时, 耦合效率为 0.95; 当跟瞄误差角增加到 $2.5 \mu\text{rad}$ 时, 耦合效率下降为 0.915, 在此区间内耦合效率随跟瞄误差角的增大而缓慢下降; 当跟瞄误差角增加到 $6 \mu\text{rad}$ 时, 耦合效率下降了 0.414, 在此区间内耦合效率随跟瞄误差角的增大而快速下降; 跟瞄误差角增加到 $11.9 \mu\text{rad}$ 时, 耦合效率为 0。由此可知, 空间光到少模光纤的耦合效率对跟瞄误差较为敏感, 设计时应保证耦合系统的跟瞄误差角小于 $2.5 \mu\text{rad}$ 。

另外, 当 $V=2.405$, 不存在跟瞄误差角时, 耦合效率为 0.82; 当跟瞄误差角增加到 $1.5 \mu\text{rad}$ 时, 耦合效率下降为 0.78, 在此区间内耦合效率随跟瞄误差角的增大而缓慢下降; 当跟瞄误差角增加到 $6 \mu\text{rad}$ 时, 耦合效率下降为 0.19, 在此区间内耦合效率随跟瞄误差角的增大而快速下降; 跟瞄误差角增加到 $7.3 \mu\text{rad}$ 时, 耦合效率为 0。由此可知, $V=5.2$ 时对跟瞄误差角的容忍度更高。

为了进一步研究 V 值对跟瞄偏角的容忍度, 计算了跟瞄误差角分别为 $1 \mu\text{rad}, 2 \mu\text{rad}, 3 \mu\text{rad}, 4 \mu\text{rad}$

时,耦合效率随 V 值的变化曲线,如图 5 所示。

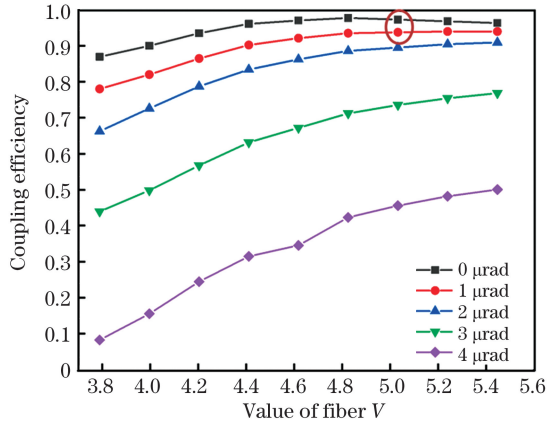


图 5 不同跟瞄误差角下耦合效率与光纤 V 值的关系曲线
Fig. 5 Relationship curve between coupling efficiency and fiber V value under different tracking and aiming angles

由图 5 可知,随着 V 值的增大,耦合效率因跟瞄误差角的降低而逐渐减小。在 $V=5.2$,跟瞄误差角为 $1 \mu\text{rad}$ 时,耦合效率为 0.012。在跟瞄误差角

为 $1 \mu\text{rad}, 2 \mu\text{rad}$ 时,耦合效率随 V 值的增大而提高,在 V 达到 5.2 以后,耦合效率会有一定程度的降低;但是跟瞄误差角为 $3 \mu\text{rad}, 4 \mu\text{rad}$ 时,耦合效率随 V 值的增大而提高,在 V 达到 5.2 以后,耦合效率并没有下降,可能是因为此时跟瞄误差角对耦合效率的影响远大于模式串扰对耦合效率的影响。

4.3 大气湍流及跟瞄误差混合作用下光纤参数优化分析

综合两种耦合模型,同时考虑大气湍流强度和跟瞄误差角对空间光到少模光纤耦合效率的影响,此时入射光的光场分布为

$$E(r) = \exp \left[ik \left(f + \frac{r_0^2}{2f} \right) + \varphi_{AT} + \varphi_{APT} \right] \times \frac{\pi D^2}{4\lambda f} \left[2 \frac{J_1(kDr_0/2f)}{kDr_0/2f} \right]. \quad (27)$$

将(27)式和(8)式代入(3)式和(4)式,可得到大气湍流条件和跟瞄误差下空间光到少模光纤的耦合效率,即为同时考虑大气湍流强度和跟瞄误差角的空间光到少模光纤耦合效率混合模型,可以表示为:

$$\eta = \sum_{i=1}^m \frac{\left| \iint \exp \left[ik \left(f + \frac{r_0^2}{2f} \right) + \varphi_{APT} \right] \frac{\pi D}{\lambda} \left[\frac{J_1(kDr_0/2f)}{kr_0} \right] F_i(r) ds \right|^2}{\iint \left| \exp \left[ik \left(f + \frac{r_0^2}{2f} \right) + \varphi_{APT} \right] \frac{\pi D}{\lambda} \left[\frac{J_1(kDr_0/2f)}{kr_0} \right] \right|^2}. \quad (28)$$

根据(28)式可得到,在大气湍流和跟瞄误差角混合作用的空间光到少模光纤耦合效率混合模型下,耦合效率与大气湍流强度及跟瞄误差角的关系曲线,如图 6~9 所示。

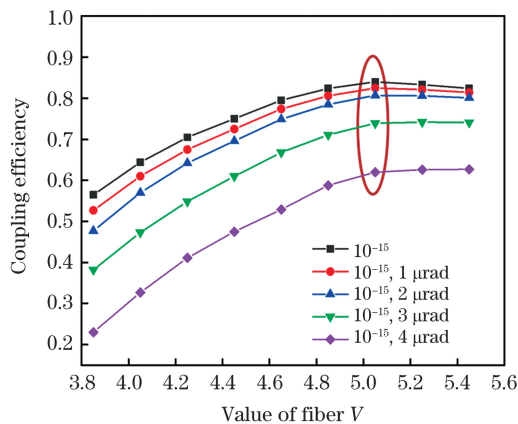


图 6 $C_n^2 = 10^{-15}$ 时不同跟瞄误差角下耦合效率与光纤 V 值的关系曲线

Fig. 6 Relationship between coupling efficiency and fiber V value under different tracking and aiming angles when $C_n^2 = 10^{-15}$

图 6、图 7、图 8、图 9 分别为 $C_n^2 = 10^{-15}, C_n^2 = 5 \times 10^{-15}, C_n^2 = 10^{-14}, C_n^2 = 5 \times 10^{-14}$,跟瞄误差角分别为 $1, 2, 3, 4 \mu\text{rad}$ 时耦合效率与光纤 V 值的关系曲线。由图可知,由于大气湍流强度和模式串扰的

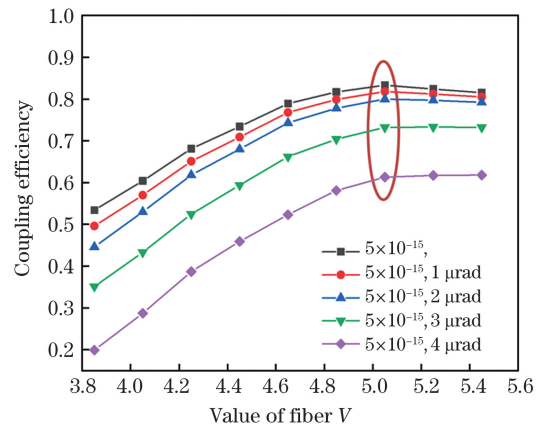


图 7 $C_n^2 = 5 \times 10^{-15}$ 时不同跟瞄误差角下耦合效率与光纤 V 值的关系曲线

Fig. 7 Relationship between coupling efficiency and fiber V value under different tracking and aiming angles when $C_n^2 = 5 \times 10^{-15}$

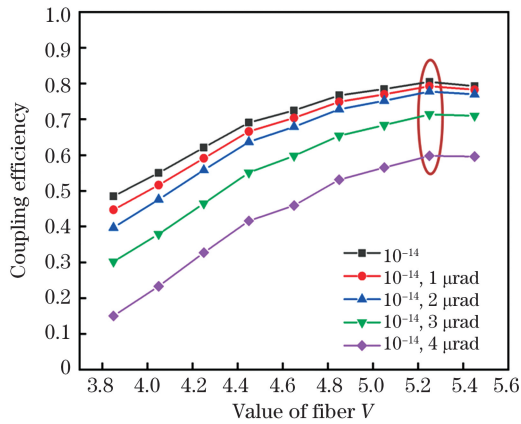


图 8 $C_n^2 = 10^{-14}$ 时不同跟瞄误差角下耦合效率与光纤 V 值的关系曲线

Fig. 8 Relationship between coupling efficiency and fiber V value under different tracking and aiming angles when $C_n^2 = 10^{-14}$

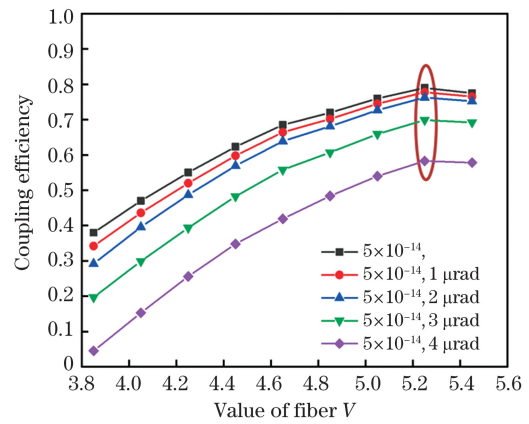


图 9 $C_n^2 = 5 \times 10^{-14}$ 时不同跟瞄误差角下耦合效率与光纤 V 值的关系曲线

Fig. 9 Relationship between coupling efficiency and fiber V value under different tracking and aiming angles when $C_n^2 = 5 \times 10^{-14}$

影响, 光纤 V 值存在最优值使空间光到少模光纤的耦合效率达到最佳; 由于跟瞄误差的影响, 随着光纤 V 值增加其抗跟瞄误差能力也增加。传统空间激光通信系统中, 跟瞄误差角为 $3 \mu\text{rad}$, 此时, 在 $C_n^2 = 5 \times 10^{-15}$, $C_n^2 = 10^{-15}$ 的较弱湍流下, 光纤 V 值为 5 时可以得到较高耦合效率, 分别为 0.74 和 0.732; 在 $C_n^2 = 10^{-14}$, $C_n^2 = 5 \times 10^{-14}$ 的较强湍流下, 光纤 V 值为 5.2 时可以得到较高耦合效率, 分别为 0.715 和 0.7。

5 大气湍流下空间光到少模光纤的耦合实验研究

5.1 实验结构

空间光到少模光纤的耦合效率实验装置主要由激光器、准直器、耦合透镜、少模光纤、空间型光功率计组成。图 10 为大气湍流下空间光到少模光纤的耦合实验原理图, 图 11 为实验装置图。激光器发射出波长为 1550 nm 的激光经准直器准直扩束, 采用

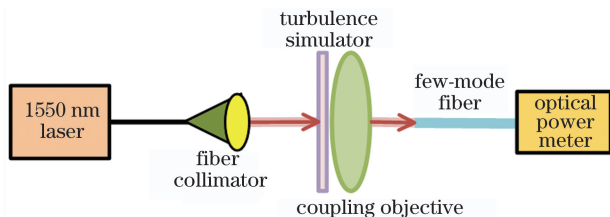


图 10 大气湍流条件下空间光-少模光纤耦合系统实验原理图

Fig. 10 Experimental schematic diagram of space light-few-mode fiber coupling system under atmospheric turbulence conditions

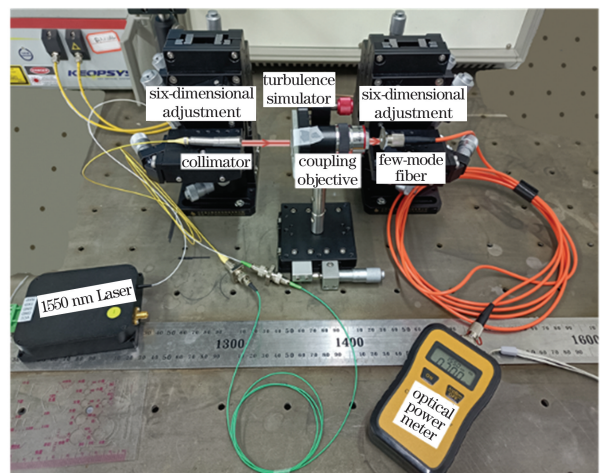


图 11 大气湍流条件下空间光-少模光纤耦合系统实验装置图

Fig. 11 Experimental setup of space light-few-mode fiber coupling system under atmospheric turbulence conditions

焦距为 16 mm 的耦合透镜进行接收, 准直器和少模光纤放置在六维调整架上, 通过调节六维调整架可以改变光纤位置, 观察空间型光功率计 (OPHIR Vega PD300-3W) 示数, 当示数最大时, 视为聚焦光斑与光纤端面对准, 且光纤端面位于耦合透镜的焦平面。记录此时的空间型光功率计的示数。通过旋转固定在耦合物镜前的湍流片模拟不同强度的大气湍流, 测量并记录大气湍流条件下空间型光功率计的示数, 计算大气湍流条件下空间光到少模光纤的耦合效率。

其中, 少模光纤 (2, 4, 6, 9 模) 购自长飞光纤光缆有限公司, 经计算得其光纤 V 值分别为 3.8, 4.6, 4.9, 5.1。旋转图 12(a) 中的玻片自制湍流片来模拟不同强度湍流, 用 COMOS 相机测量激光光

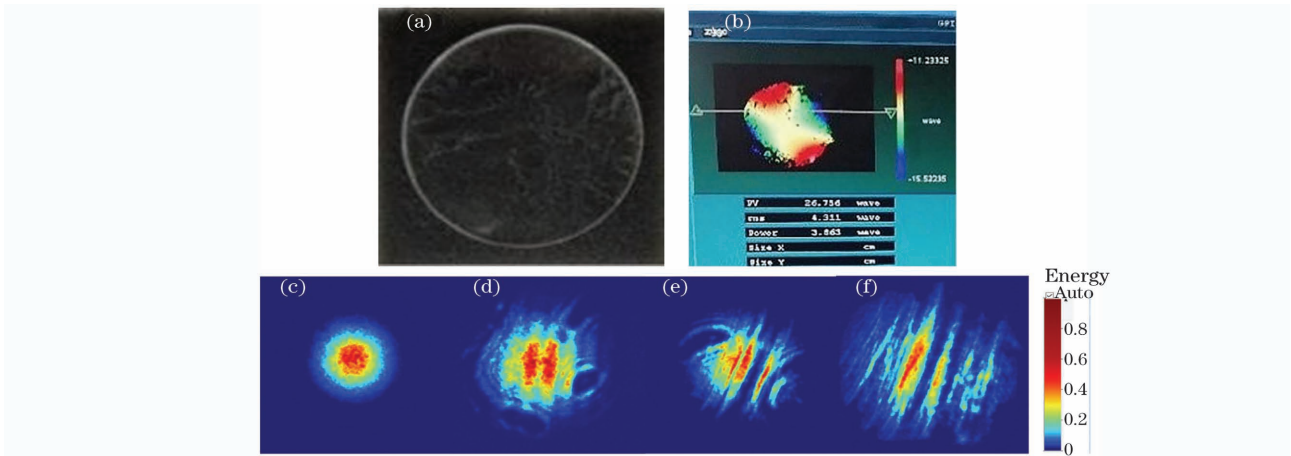


图 12 湍流片及激光束经过不同大气湍流后光斑图像。(a)自制湍流片；(b)湍流片整体相位分布；(c)无湍流；(d)湍流状态 1；(e)湍流状态 2；(f)湍流状态 3

Fig. 12 Image of turbulent sheet and laser beam spot after different atmospheric turbulences. (a) Self-made turbulent sheet; (b) overall phase distribution of the turbulent sheet; (c) no turbulence; (d) turbulent state 1; (e) turbulent state 2; (f) turbulent state 3

束经过不同强度湍流后的光斑图像。图 12(b)为通过 ZEGO 干涉仪测得的自制湍流片整体相位分布图；图 12(b)~(e)为 1550 nm 激光经过不同强度模拟湍流后的光斑图像。

5.2 实验结果及分析讨论

按照图 11 搭建实验,利用空间型光功率计测量耦合进少模光纤前后的光功率,记录如表 1。

表 1 空间光到少模光纤耦合实验结果

Table 1 Experimental results of space light to few-mode fiber coupling

No	Fiber modes	Core diameter / μm	Value of fiber V	Coupling efficiency (no turbulence)	Coupling efficiency (with turbulence 1)	Coupling efficiency (with turbulence 2)	Coupling efficiency (with turbulence 3)
1	2	14.0	3.8	0.4867	0.3413	0.3088	0.2532
2	4	18.5	4.6	0.6467	0.4524	0.3654	0.2778
3	6	16.0	4.9	0.7467	0.5111	0.4487	0.3876
4	9	20.0	5.1	0.8867	0.6016	0.5367	0.4337

根据实验结果,绘出大气湍流条件下空间光耦合进少模光纤耦合效率与光纤 V 值的曲线图,如图 13 所示。

从图 13 可以看出,在不加湍流片的情况下,光纤 V 值为 5.1 时,最大耦合效率为 0.8867;在加入湍流片后,光纤 V 值为 5.1、湍流状态 1 时,最大耦合效率为 0.6016。耦合效率随着光纤 V 值的增加而增大,与图 2 中不同湍流强度下耦合效率与光纤 V 值的关系曲线趋势基本一致,在一定程度上验证了理论仿真结果。考虑到缺乏光纤 V 值大于 5.1 的少模光纤,光纤 V 值大于 5.2 后的实验结果有待于下一阶段实验补充。

由理论仿真结果可知,在少模光纤耦合过程中,耦合效率并非随着模式增加而增加,而是先增加后降低。然而,由经验可知多模光纤耦合效率将比少模光纤耦合效率高,为此可以预测空间光到光纤耦

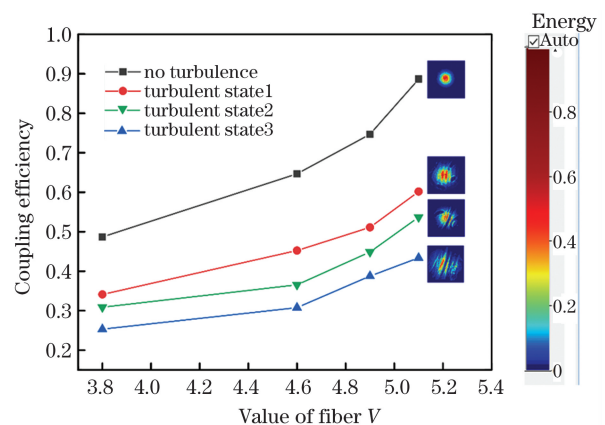


图 13 不同湍流强度下空间光耦合进 2、4、6、9 模少模光纤的耦合效率

Fig. 13 Coupling efficiency of spatial light coupling into 2, 4, 6, and 9-mode few-mode fiber under different turbulence intensities

合效率随着模式增加将出现增加-减少-增加的状态。这可能是由于多个模式的非线性耦合是用广义马纳科夫方程来描述的,对于少模光纤,几个模式在光纤中同时传输,由于模间串扰、非线性效应,存在一定的模间耦合损耗,进而导致耦合效率下降;随着模式数目的进一步增加,多模光纤能够提高纤芯密度和增大有效纤芯面积,有效降低模间非线性效应,减小模间耦合损耗^[26]。

由于实验过程中存在装调误差、实验测量仪器的测量误差等因素,在不加湍流片条件下,实验所得空间光到少模光纤的耦合效率与理论仿真存在一定差异。另一方面,由于光纤 V 值越小,系统对于准直对准精度要求越高,最终的耦合效率测量值偏低。因此,光纤 V 值越小,耦合效率的测量值误差越大。

6 结 论

基于捕获跟踪对准模型、Von Karman 湍流谱模型建立了大气湍流及跟瞄误差条件下空间光到少模光纤的耦合模型。研究表明,在大气湍流强度、非线性效应及模式串扰的影响下,存在一个最佳少模光纤 V 值使耦合效率达到最佳;在跟瞄误差影响下,随着光纤 V 值的增加,其抗跟瞄误差能力也增加。考虑跟瞄误差为 $3 \mu\text{rad}$ 情况下,在 $C_n^2 = 5 \times 10^{-15}$, $C_n^2 = 10^{-15}$ 时,光纤 V 值选择 5,得到最佳耦合效率为 0.74;在 $C_n^2 = 5 \times 10^{-14}$, $C_n^2 = 10^{-14}$ 时,光纤 V 值选择 5.2,得到最佳耦合效率为 0.715。搭建大气湍流条件下空间光到少模光纤的耦合实验,得到实验测量的空间光到少模光纤的耦合效率与仿真结果趋势一致。验证了仿真结果在实际应用中的可行性,为空间激光通信研究提供参考。但是由于实验条件难以达到仿真中耦合系统所需的对准精度,因此实验所测结果与仿真结果有所偏差,可以通过选择参数更加吻合的耦合镜片来提高对准精度,得到更准确的实验结果。后续可进行将研究结果用于空间激光通信接收端的更多研究。

参 考 文 献

- [1] Chan V W S. Free-space optical communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4750-4762.
- [2] Khalighi M A, Uysal M. Survey on free space optical communication: a communication theory perspective [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(4): 2231-2258.
- [3] Cornwell D M, Jr. NASA's optical communications program for 2015 and beyond [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9354: 93540E.
- [4] Fontaine N K, Ryf R, Zhang Y H, et al. Digital turbulence compensation of free space optical link with multimode optical amplifier [J]. *45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019)*, 2019: 1-4.
- [5] Liu C, Pei L, Xie Y H, et al. Design of low crosstalk few mode multi-core fiber based on heterogeneous structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1106004.
刘畅, 裴丽, 解宇恒, 等. 异质结构的低串扰少模多芯光纤设计[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1106004.
- [6] Tu J J, Li Z H. Review of space division multiplexing fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0106003.
涂佳静, 李朝晖. 空分复用光纤研究综述[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0106003.
- [7] Froehly C. Coherent and interferometry through optical fibers [C] // *ESO Conference on Scientific Importance of High Angular Resolution at Infrared and Optical Wavelengths*, March 24-27, 1981, Garching, West Germany. Garching: The European Southern Observatory, 1981: 285-293
- [8] 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.
- [9] Wang C, Fan X B, Tong S F, et al. Coupling efficiency and influence factors of spatial light into few-mode fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(12): 1206001.
王超, 范雪冰, 佟首峰, 等. 空间光到少模光纤的耦合效率及影响因素[J]. *光子学报*, 2018, 47(12): 1206001.
- [10] Horton A J, Bland-Hawthorn J. Coupling light into few-mode optical fibres I: the diffraction limit [J]. *Optics Express*, 2007, 15(4): 1443-1453.
- [11] Gloge D. Optical power flow in multimode fibers [J]. *Bell System Technical Journal*, 1972, 51(8): 1767-1783.
- [12] Zheng D H, Li Y, Chen E H, et al. Free-space to few-mode-fiber coupling under atmospheric turbulence [J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18739-18744.
- [13] Fardoost A, Wen H, Liu H Y, et al. Optimizing free space to few-mode fiber coupling efficiency [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(13): D34-D38.
- [14] Tan L Y, Chen Y H, Zhao L, et al. Optimal coupling condition analysis of free-space optical communication receiver based on few-mode fiber [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 53: 102004.

- [15] Fan X J, Wang D W, Cheng J L, et al. Few-mode fiber coupling efficiency for free-space optical communication [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(6): 1823-1829.
- [16] Qun Q H, Liang D K, Xiong P J. Accurate analysis of coherent beam combining of fiber laser [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(6): 600-603.
- [17] Rowe H E. *Electromagnetic propagation in multi-mode random media* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [18] Kaushal H, Kaddoum G, Jain V K, et al. Experimental investigation of optimum beam size for FSO uplink[J]. *Optics Communications*, 2017, 400: 106-114.
- [19] Zhang M. Study on the performance of free space optical communications systems under turbulence channel[D]. Taiyuan: North University of China, 2018.
张敏. 湍流环境下自由光通信系统性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [20] Jiang S, Zhang M. Research on the performance of free space optical communications systems under weak turbulence [J]. *Information & Communications*, 2019, 32(5): 275-277.
姜松, 张敏. 弱湍流环境下自由空间光通信系统性能研究[J]. *信息通信*, 2019, 32(5): 275-277.
- [21] Sun J, Huang P M, Yao Z S. Performance of satellite-to-ground laser communications under the influence of atmospheric turbulence and platform micro-vibration [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 0301003.
孙晶, 黄普明, 么周石. 大气湍流与平台微振动影响下的星地激光通信性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(3): 0301003.
- [22] Nan H, Zhang P, Tong S F, et al. Performance analysis of free space coherent optical communication in atmosphere turbulence with tracking error [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(8): 0806003.
南航, 张鹏, 佟首峰, 等. 大气湍流下带有跟踪误差的空间相干光通信性能分析[J]. *光子学报*, 2015, 44(8): 0806003.
- [23] Chen M, Ke X Z. Effect of atmospheric turbulence on the performance of laser communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0822009.
陈牧, 柯熙政. 大气湍流对激光通信系统性能的影响研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(8): 0822009.
- [24] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354-362.
- [25] Mecozzi A, Antonelli C, Shtaif M. Coupled Manakov equations in multimode fibers with strongly coupled groups of modes[J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 23436-23441.
- [26] Ferreira F M. Linear and nonlinear features of few-mode fibers with partial coupling among groups of quasi-degenerate modes [C] // 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 8-12, 2020, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 1-3.

Analyses of Coupling Characteristics of Space Light to Few-Mode Fiber for Atmospheric Laser Communication

He Shuang^{1,2}, Zhang Peng^{1,2*}, Wei Jia^{1,2}, Wu Wentao^{1,2}, Gong Xiyu^{1,2},
Wang Chao^{1,2}, Tong Shoufeng^{1,2}

¹*Institute of Space Optoelectronics Technology, College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;*

²*National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract

Objective Free-space optical communication has attracted wide attention due to its advantages, such as large information capacity, high transmission rate, strong anti-interference ability, small system size and low power consumption. Being an important part of the free-space optical communication, atmospheric laser communication is facing technical bottlenecks, such as unsatisfactory reception efficiencies and large energy jitters. Fiber coupling can effectively solve these technical bottlenecks. Coupling with optical fiber is the most common method; however, multi-mode fiber limits the usage of coherent communication reception. Using a single-mode fiber will definitely

reduce the coupling efficiency under atmospheric turbulence conditions. Recently, pre-amplification of few-mode fiber or few-mode multi-core fiber has become essential to improve the reception performance of atmospheric laser communication. However, a turbulent atmosphere will have effects, such as spot distortion, arrival angle fluctuation, beam expansion and light intensity flicker. These effects seriously affect the coupling efficiency between the space light and few-mode fiber. In this study, we first studied the relationship between few-mode fiber parameters, turbulence intensity, tracking error and the coupling efficiency of space light to the few-mode fiber under the conditions of atmospheric turbulence and tracking error. Then, we established a coupling model of the space light to the few-mode fiber under the conditions of atmospheric turbulence and tracking error. Finally, we established an experimental platform under this condition to verify the coupling performance of the few-mode fiber. We hope our results can provide a technical reference for the design of the atmospheric laser communication pre-amplifiers.

Methods Based on the coupling model of space light to few-mode fiber, an approximate calculation of step-type few-mode fiber optical field was performed using the Laguerre-Gaussian (LG) distribution and LG beam as the free-space light. We obtained the optical field distribution of the LP and LG modes. According to the acquisition tracking pointing model and Von Karman turbulence spectrum model, we established the coupling model by superimposing the optical field distribution of the LP and LG modes under atmospheric turbulence and tracking error. We studied the relationship between the coupling efficiency of the few-mode fiber and the intensity of atmospheric turbulence, the angle of aiming error under different fiber V values. A self-made turbulence simulator was used to simulate the atmospheric turbulence of different intensities and experimentally study the relationship between the coupling efficiency and fiber V values under atmospheric turbulence.

Results and Discussions We obtained the relationship between the coupling efficiency and the V value of the fiber under different atmospheric turbulence intensities and different tracking error angles (Fig. 2, Fig. 5) using simulation. The coupling efficiency increases with the increase of the V value. When $C_n^2 = 0$, as the V value increases to 4.85, the coupling efficiency reaches a maximum of 0.98, and any further increase in the V value decreases the coupling efficiency. This is because as the fiber V value increases, the number of spatial modes supported by the fiber also increase. Thus, a large number of modes cause crosstalk between modes. Therefore, there is an optimal V value to maximize the coupling efficiency of space light to the few-mode fiber, and as the turbulence intensity increases, the optimal V value gradually increases. We also obtained the relationship between the coupling efficiency and the V value of few-fiber under different atmospheric turbulence and tracking error angles (Figs.6–9). In the traditional free-space optical communication system, the tracking error angle is 3 μ rad. Currently, under the weak turbulence of $C_n^2 = 10^{-15}$ and $C_n^2 = 5 \times 10^{-15}$, the best coupling efficiencies can be obtained when the fiber V value is 5, which are 0.74 and 0.732, respectively; under the strong turbulence of $C_n^2 = 10^{-14}$ and $C_n^2 = 5 \times 10^{-14}$, the best coupling efficiencies can be obtained when the fiber V value is 5.2, which are 0.715 and 0.7, respectively. The coupling experiment of space light to few-mode fibers under simulated turbulence has been completed, and the results are shown in Table 1 and Fig.13, which is consistent with the simulation results.

Conclusions We have established a coupling model of space light to the few-mode fiber under the conditions of atmospheric turbulence and tracking error, based on the acquisition tracking pointing model and the Von Karman turbulence spectrum model. This study shows the optimal V value of few-mode fiber that makes the coupling efficiency the best under the influence of atmospheric turbulence, non-linear effects and crosstalk between modes. As the V value of the fiber increases, its ability to resist tracking error also increases. Considering that the tracking error is 3 μ rad, for $C_n^2 = 5 \times 10^{-15}$ and $C_n^2 = 10^{-15}$, the fiber V value is 5 and the best coupling efficiencies are 0.74 and 0.732; for $C_n^2 = 5 \times 10^{-14}$ and $C_n^2 = 10^{-14}$, the fiber V value is 5.2 and the best coupling efficiencies are 0.715 and 0.7. The coupling experiment of the space light to the few-mode fibers under simulated turbulence has been completed, the coupling efficiency of the experiment is consistent with the trend of the simulation results. The feasibility of the simulation results in practical applications is verified, providing a reference for the research of free-space optical communication.

Key words optical communication; space optical communication; coupling efficiency; fiber coupling; few-mode fiber

OCIS codes 060.2605;060.2310;060.2320