

光学学报

基于 SPGD 算法的少模光纤耦合解复用系统动态湍流补偿仿真

江杰^{1,2***}, 郭宏翔^{1,2*}, 边奕铭^{1,2}, 李岩^{1,2}, 邱吉芳^{1,2}, 洪小斌^{1,2}, 李蔚^{1,2}, 左勇^{1,2}, 伍剑^{1,2**}

¹北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876;

²北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

摘要 在空间光通信系统中,激光在大气中传输时容易受湍流效应影响,且接收端往往使用模场半径极小的单模光纤进行空间光耦合,导致光纤耦合效率降低,影响通信系统性能。为了提高接收端光纤耦合效率,结合随机并行梯度下降(SPGD)算法和少模光纤耦合解复用系统对动态湍流所引起的波前相位畸变进行补偿校正,并实现了传输距离为 5 km 的空间光通信数值仿真。仿真结果表明:在不同的湍流强度和风速条件下,未经 SPGD 算法校正时,两模光纤的耦合效率比单模光纤提高了 0.5 dB~1.5 dB,相对标准差降低了 0.03~0.4;经过 SPGD 算法校正后,两模光纤的耦合效率比单模光纤提高了 0.4 dB~2.2 dB,中强湍流下,相对标准差降低了 0.1~0.2。因此在空间光通信中,采用少模光纤进行耦合接收比单模光纤具有更好的耦合效果,有利于提高通信系统稳定性。

关键词 大气光学;自由空间光通信;随机并行梯度下降算法;少模光纤;耦合效率;动态湍流

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1901001

Simulation on Dynamic Turbulence Compensation of Few-Mode Fiber Coupling Demultiplexing System Based on SPGD Algorithm

Jiang Jie^{1,2***}, Guo Hongxiang^{1,2*}, Bian Yiming^{1,2}, Li Yan^{1,2}, Qiu Jifang^{1,2},
Hong Xiaobin^{1,2}, Li Wei^{1,2}, Zuo Yong^{1,2}, Wu Jian^{1,2**}

¹School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

²State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract In the space optical communication system, the laser transmission in the atmosphere is easily affected by the turbulence effect, and the single-mode fiber with a minimal mode field radius is frequently used at the receiving end for space optical coupling, resulting in a reduction in fiber coupling efficiency and a decrease in communication system performance. To improve the fiber coupling efficiency of the receiving end, the stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm and the few-mode fiber coupling demultiplexing system are combined to compensate for the wavefront phase distortion caused by the dynamic turbulence. The numerical simulation of the space optical communication with the transmission distance of 5 km is achieved. The simulation results demonstrate that the coupling efficiency of two-mode fiber is 0.5 dB–1.5 dB greater than that of single-mode fiber without SPGD algorithm correction under various turbulence intensity and wind speed circumstances. The relative standard deviation is lowered by 0.03–0.4. After the SPGD algorithm correction, the coupling efficiency of two-mode fiber is improved by 0.4 dB–2.2 dB compared with that of single-mode fiber. The relative standard deviation is reduced by 0.1–0.2 under moderate and strong turbulence conditions. Consequently, using few-mode fiber for coupling in space optical communications has a better coupling effect than using single-mode fiber, which improves the

收稿日期: 2021-03-04; 修回日期: 2021-03-30; 录用日期: 2021-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(61875019,61675034)、国家重点研发计划(2019YFB1803601)

通信作者: *hxguo@bupt.edu.cn; **jianwu@bupt.edu.cn; ***2453977635@qq.com

communication system's stability.

Key words atmospheric optics; free space optical communication; stochastic parallel gradient descent algorithm; few-mode fiber; coupling efficiency; dynamic turbulence

OCIS codes 010.1285; 010.1290; 010.1330; 060.2605

1 引言

自由空间光通信是一种发展迅速的新型无线通信方式,具有传输带宽大、成本低、组网机动灵活等优势,因而广泛应用于卫星通信、军事及地面通信等领域^[1-2]。但是当激光在空间光路中传输时,一方面,由于大气湍流的干扰,会出现信号光光强闪烁、光束漂移、到达角起伏、波前相位畸变等现象^[3-5],降低了到达接收端的信号光功率;另一方面,在空间光通信中通常使用模场半径较小的单模光纤进行空间光耦合,进一步增加了信号光进入接收系统的难度,严重影响通信系统的有效性和可靠性。因此如何补偿大气湍流干扰,提高接收端光纤耦合效率已经成为空间光通信必须解决的问题。目前常用的孔径内湍流补偿技术主要有自适应光学技术^[6]和少模/多模光纤接收技术^[7]。

自适应光学技术是抑制湍流效应的有效方法,该技术分为传统的有波前传感自适应光学技术^[8-10]和基于优化算法的无波前传感自适应光学技术^[11-13]。其中,有波前传感的自适应光学技术需要实时探测波前相位,受器件尺寸影响较大,强湍流条件下补偿效果较差,且系统结构复杂、价格昂贵;基于优化算法的无波前传感自适应光学技术弥补了前者的不足,仅通过对接收端目标函数值不断进行反馈迭代就可以实现对畸变波前的校正,易于实现且应用范围更广,其中最常用的优化算法是随机并行梯度下降(SPGD)算法^[14]。国内外学者针对无波前传感自适应光学技术进行了大量研究。2016年,德国 Fraunhofer 研究所分别对基于 SPGD 算法和 modal version of SPGD (M-SPGD)算法的无波前传感自适应光学系统性能进行了对比分析^[15];2020年,中国科学技术大学在自由空间量子通信中利用 SPGD 算法对大气湍流的影响进行校正,在强湍流条件下将单模光纤耦合效率提高 3.7 dB^[16];2019年,西安理工大学利用图形处理器(GPU)并行计算实现了 SPGD 算法对畸变波前的快速校正,通过外场相干光通信实验证明,波前校正后斯特列尔比达到 0.8 以上,校正时间加速比达到 8.6^[17]。

相较于单模光纤,少模光纤具有模场面积大、可传输空间模式多的优势,模场面积可达单模光纤的

4~25 倍,空间光耦合难度远小于单模光纤,因而从理论上而言采用少模光纤进行耦合接收可有效提高空间光通信系统接收端的光纤耦合效率;而相较于多模光纤耦合,少模光纤模式数量可控,可通过结合模式转换器件实现模式分集,提高相干接收效率^[18]。因此,国内外学者在空间光通信少模光纤耦合方面进行了深入研究^[19-20]。2018年,日本电气公司研究了空间光通信中少模光纤对偏振复用光信号的分集接收性能的影响^[21];同年,长春理工大学系统分析了少模光纤空间光耦合的数学理论模型,并讨论了光束偏移、随机抖动等因素对少模光纤耦合效率的影响^[22];本团队于 2017 年开始对自适应光学技术补偿下的少模光纤耦合效率进行研究,并证明了在中等湍流强度下,自适应光学技术可使单模、两模、四模光纤耦合效率分别提高 16 dB、11 dB、10 dB,湍流校正后两模、四模光纤耦合效率比单模光纤高约 1 dB^[23]。

上述研究主要基于静态大气湍流条件,目前尚未有关于自适应光学补偿下少模光纤耦合在动态湍流中性能的研究报道。因此,本文依据 Taylor 冻结湍流理论,对动态湍流相位屏进行了数值仿真,在不同的动态湍流强度和风速条件下,研究基于 SPGD 算法的自适应光学技术补偿前后的少模光纤耦合特性,并与单模光纤的耦合特性进行了对比分析。仿真结果表明,在不同湍流条件下,两模光纤的耦合效率比单模光纤高 0.4 dB~2.2 dB,且相对标准差小于单模光纤,证明了在动态湍流中利用少模光纤进行空间光耦合更有利于提高接收光功率,保证通信系统的可靠性。

2 基本原理

2.1 自由空间光通信系统仿真模型

自由空间光通信系统仿真结构如图 1 所示,主要由信号发送端、湍流相位屏、变形镜、接收系统和 SPGD 算法组成。仿真中采用传输距离为 5 km 的空间光路,发送端发送波长为 1550 nm、束腰半径为 10 mm 的高斯光;信号光经过动态湍流相位屏后产生波前相位失真,再传输一段距离后被变形镜反射;光最终由直径为 250 mm 的聚焦透镜耦合进单模光纤或两模光纤,在接收端进行光纤耦合效率的计算

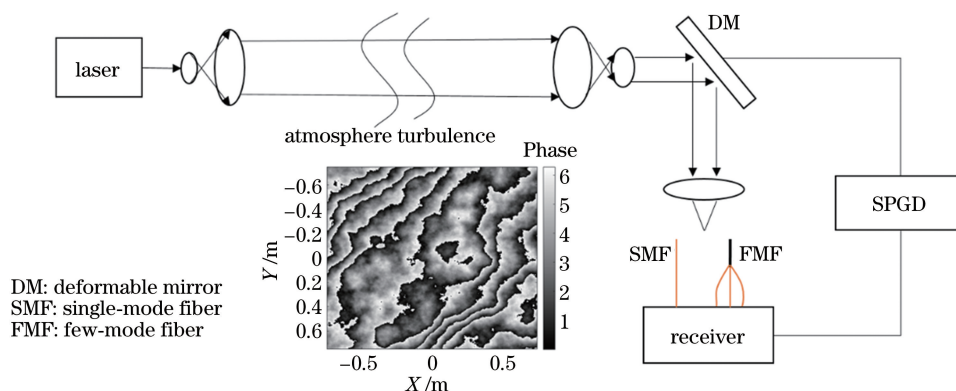


图 1 空间光通信系统仿真原理图

Fig. 1 Simulation schematic of space optical communication system

并反馈给 SPGD 算法,以控制变形镜产生校正波前。其中,变形镜采用 64 单元致动器,单位形变建立时间小于 $200 \mu\text{s}$ ^[24]。

需要注意的是,本实验组在接收端分别对信号光耦合进入单模光纤和两模光纤两种情况进行分析讨论。当激光耦合进两模光纤时,可以得到 LP01、LP11a、LP11b 三种模式,仿真中采用两模光子灯笼的结构进行模式解复用,即信号光进入两模光纤后,可通过模式转换将三种模式解复用为三路基模进行耦合效率计算,只取其中最大值反馈给 SPGD 算法。下文中所描述的两模光纤耦合效率同样均指模式解复用后三路基模耦合效率的最大值。

2.2 动态湍流仿真理论

动态湍流相位屏的仿真主要基于 Kolmogorov 湍流模型^[25] 和 Taylor 湍流冻结理论^[26]。Kolmogorov 湍流模型给出了大气湍流的空间结构,并通过定义大气相干长度、折射率结构常数、功率谱密度等统计量来描述各向同性大气湍流的空间统计特性。本实验组通过谱反演法^[27] 进行湍流相位屏的仿真,以 D/r_0 表示大气湍流强度,其中 D 表示激光传输 2.5 km 后的远场光斑直径,仿真中为 330 mm, r_0 表示大气相干长度。仿真中 D/r_0 值分别为 2, 4, 8, 16, 值越大,湍流越强。不同强度的湍流相位屏如图 2 所示。

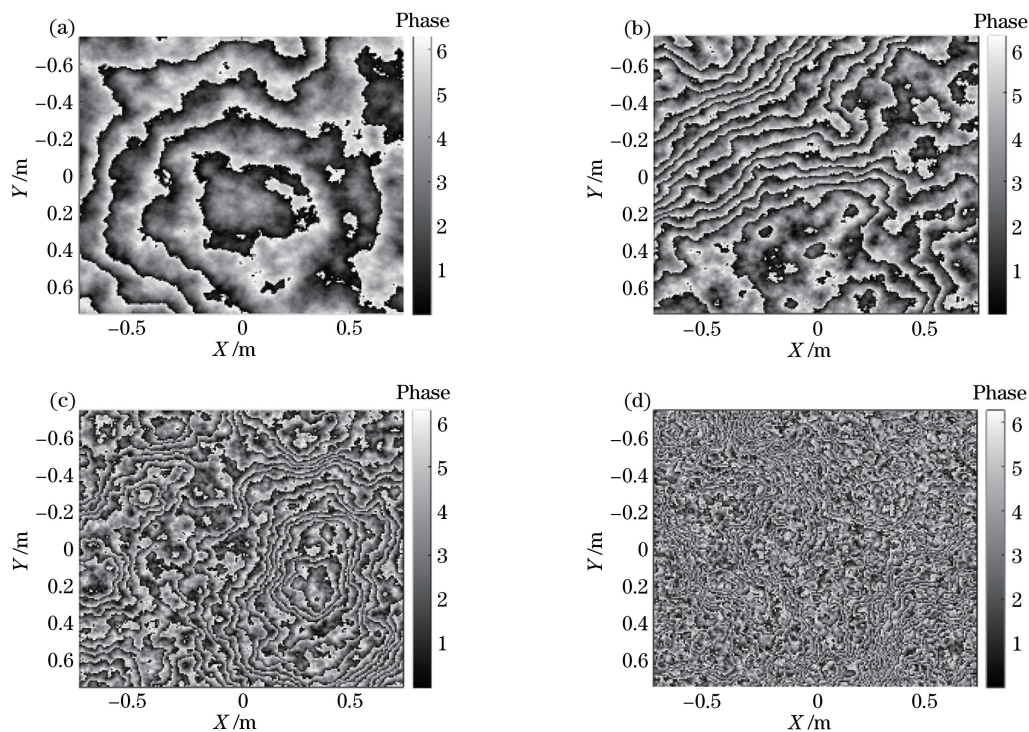


图 2 不同湍流强度的相位屏。(a)~(d)湍流强度分别为 2, 4, 8, 16

Fig. 2 Phase screens with different turbulence intensities. (a)~(d) Turbulence intensity is 2, 4, 8, 16, respectively

Taylor 湍流冻结理论描述了湍流的时间特性,该理论认为,实际的大气湍流随时间和空间不断变化,在时间和空间尺度上均满足一定的统计特性,在较短的时间 t_d 内,湍流的空间特性近似处于“冻结”状态,不会在流向演化中发生变化,即空间某点的湍流空间特性不变,而时间特性随风速变化。这一过程可表示为

$$\varphi(z, t) = \varphi(z - v_h t_d, t - t_d), \quad (1)$$

式中: $\varphi(z, t)$ 表示波前相位; v_h 表示横向风速。实验观测结果表明,满足湍流冻结假设条件的时间尺度为 $10 \sim 20 \text{ ms}$ ^[28], 仿真中每秒经过接收孔径的大气湍流相位屏数目为 400 幅,满足动态湍流的仿真要求。动态湍流的时间特性一般以 Greenwood 频

率(f_G)^[29]为指标,与风速、大气相干长度等参数相关,简易计算公式为

$$f_G = 0.427 \frac{\nu}{r_0}, \quad (2)$$

式中: ν 表示风速。

在动态湍流仿真过程中,首先由谱反演法生成一块大尺寸相位屏,再通过旋转截取的方式得到 400 幅具备相关性的小相位屏,如图 3 所示。 ν 定义为单位时间接收孔径内湍流经过的距离,不同 ν 对应不同的小相位屏截取像素间距,仿真中单位像素间距为 0.00078 m , ν 取 $0.94, 4.69, 9.38 \text{ m/s}$, 由(2)式计算得到不同风速和湍流强度对应的 Greenwood 频率为 $4.79 \sim 383 \text{ Hz}$ 。

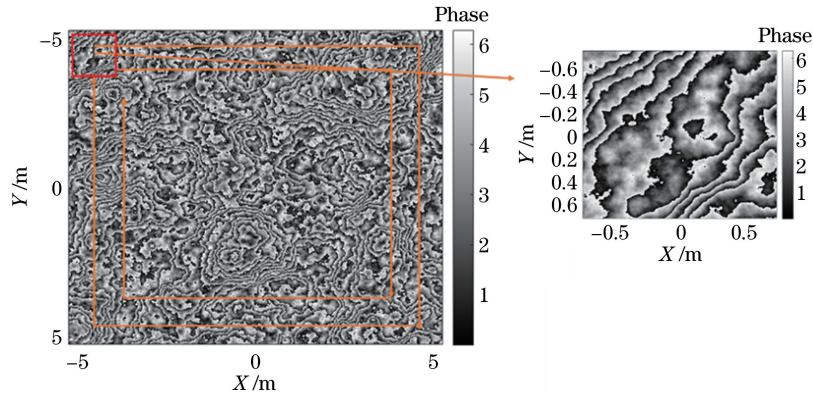


图 3 动态湍流相位屏仿真示意图

Fig. 3 Simulation schematic of dynamic turbulence phase screen

在 $\nu = 9.38 \text{ m/s}$ 时,对接收端单模光纤耦合效率的统计结果进行 log-normal 曲线拟合^[30], 拟合结果如图 4 所示。在湍流强度 D/r_0 为 $2, 4, 8, 16$ 时,拟合结果期望值 μ 分别为 $0.312, 0.204, 0.077, 0.047$, 方差值 σ^2 分别为 $0.509, 0.983, 0.379, 0.155$,证明了动态湍流仿真结果符合大气湍流信道模型,动态湍流相位屏仿真合理。

2.3 光纤耦合效率的计算

接收端光纤耦合效率 η_f 表示耦合至光纤的光功率 P_f 与接收孔径平面的入射光功率 P_i 的比值。根据模式匹配原理,单模光纤耦合效率 η_f ^[31]可表示为

$$\eta_f = \frac{P_f}{P_i} = \frac{\left| \iint E_B(x, y) F_B^*(x, y) dx dy \right|^2}{\iint |E_B(x, y)|^2 dx dy}, \quad (3)$$

式中: $E_B(x, y)$ 表示聚焦光束在焦平面上的光场分布; $F_B(x, y)$ 表示光纤模场。为了简化在数值仿真中的计算,可以通过反向传输光纤模场将(3)式中的重叠积分转换为在孔径平面上的计算,因而单模光

纤耦合效率^[31]进一步可以表示为

$$\eta_f = \frac{P_f}{P_A} = \frac{\left| \iint E_A(x, y) F_A^*(x, y) dx dy \right|^2}{\iint |E_A(x, y)|^2 dx dy}, \quad (4)$$

式中:孔径平面的入射光场 $E_A(x, y) = P \exp[j2\pi \times \varphi(x, y)]$, 其中 $\varphi(x, y)$ 表示大气湍流所引起的光场相位变化。反向传输得到的光纤模场 $F_A(x, y)$ 可以表示为

$$F_A(x, y) = \frac{\sqrt{2\pi} \omega_0}{\lambda f} \exp \left[- \left(\frac{\pi \omega_0}{\lambda f} \right)^2 (x^2 + y^2) \right], \quad (5)$$

式中: λ 表示激光波长; f 表示耦合透镜焦距; ω_0 表示光纤纤芯模场半径。

对于两模光纤,在仿真中取 LP01、LP11a、LP11b 三路模式耦合效率的最大值,各路模式耦合效率^[22]均可表示为

$$\eta_i = \frac{\left| \iint E^*(r) F_i(r) ds \right|^2}{\iint |E(r)|^2 ds}, \quad (6)$$

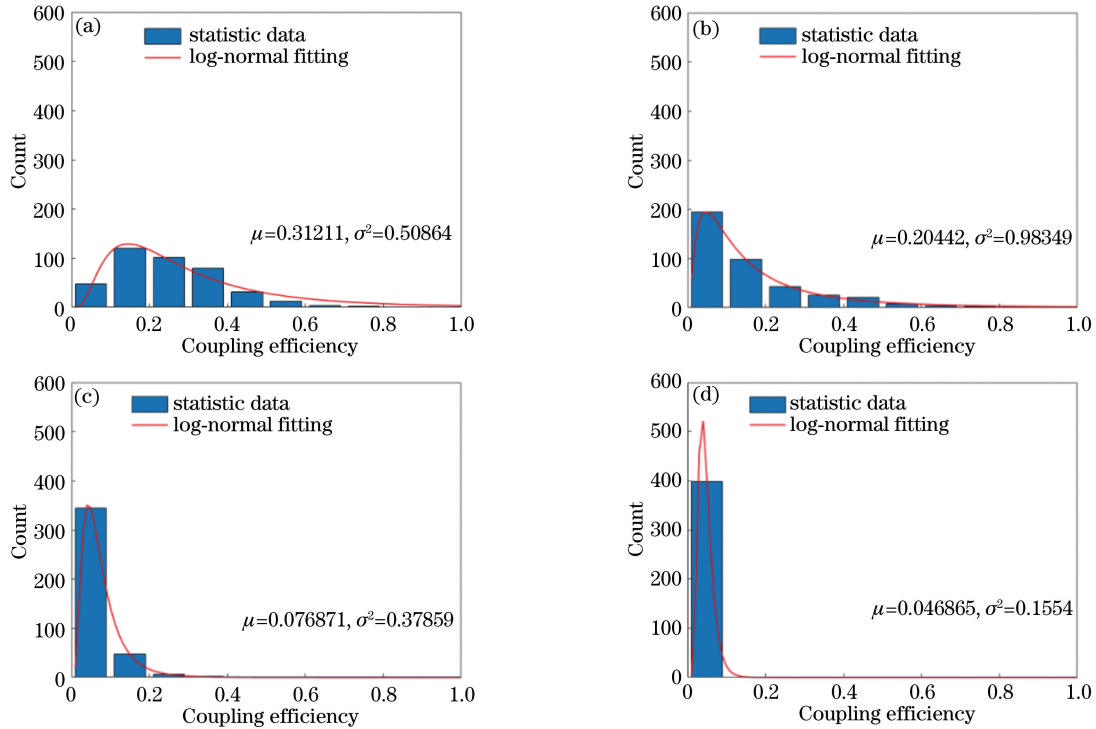


图 4 不同湍流强度下单模光纤耦合效率的 log-normal 曲线拟合。(a)~(d)湍流强度分别为 2,4,8,16
Fig. 4 Log-normal curve fitting of coupling efficiency of single-mode fiber under different turbulence intensities.

(a)~(d) Turbulence intensity is 2,4,8,16, respectively

式中： η_i 表示第 i 个模式的耦合效率； $E(r)$ 表示聚焦平面的入射光场分布。 $F_i(r)$ 表示第 i 个模式在焦平面的模场分布，表达式为

$$F_{01}(r, \theta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-r^2}{2\xi^2}\right), \quad (7)$$

$$F_{11}(r, \theta) = \sqrt{2/\pi} \cdot |r| \exp\left(\frac{-r^2}{2\xi^2}\right) \begin{cases} \sin \theta \\ \cos \theta \end{cases}, \quad (8)$$

式中： $\sin \theta, \cos \theta$ 分别表示 LP11a 模、LP11b 模； r, θ 分别表示模场轴向、角向坐标。 ξ 可以表示为

$$\xi = \sqrt{r_f / (kn_1 \sqrt{2\Delta})}, \quad (9)$$

式中： r_f 表示少模纤芯半径；相对折射率差 $\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$ ，其中 n_1, n_2 分别表示纤芯、包层折射率； k 表示波数。

2.4 随机并行梯度下降算法实现

在空间光通信系统接收端，采用 SPGD 算法实现对动态湍流所引起的波前相位畸变的补偿校正。SPGD 算法的基本思想是对控制变量 μ 并行施加随机微扰 $\Delta\mu$ ，利用目标函数 J 的变化量 ΔJ 估计控制参数的梯度，并沿梯度下降方向对 μ 进行迭代搜索，使目标函数收敛至极值^[32]。

仿真中，以变形镜的控制电压作为 SPGD 算法的控制变量，通过施加不同的控制电压，变形镜产生

相应形变，从而校正大气湍流对波前相位的影响，提高光纤耦合效率。在不同的控制电压下，变形镜镜面形变 $\varphi(x, y)$ 可表示为

$$\varphi(x, y) = \sum_{j=1}^q \mu_j V_j(x, y), \quad (10)$$

式中： q 表示变形镜的致动器个数； μ_j 表示变形镜第 j 个致动器的控制电压。 $V_j(x, y)$ 表示对单个致动器施加单位电压时变形镜的镜面形变函数，具体表示形式为

$$V_j(x, y) = \exp\left\{\left[\frac{\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2}}{d}\right]^a \ln \omega\right\}, \quad (11)$$

式中： (x_j, y_j) 为致动器坐标； d 为致动器间隔距离； a 为高斯指数，仿真中取值为 2.1； ω 为致动器间交连值，仿真中取值为 5%。

根据变形镜的致动器数量 q ，将控制变量 μ 相应设为 q 维向量：

$$\mu = \{\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_q\}. \quad (12)$$

在进行第 $n+1$ 次迭代时，算法执行步骤如下。

1) 生成随机扰动变量 $\Delta\mu$ ，数学表达式为

$$\Delta\mu = \{\Delta\mu_1, \Delta\mu_2, \dots, \Delta\mu_j, \dots, \Delta\mu_q\}, \quad (13)$$

式中：扰动变量 $\Delta\mu_j$ 表示变形镜第 j 个致动器的控

制电压的扰动,各扰动变量相互独立且服从伯努利分布。

2) 分别施加一次正、负向扰动,并计算相应扰动后的目标函数 J^+ 、 J^- , 得到目标函数变化量 ΔJ , 数学表达式为

$$\Delta J = J(\mu + \Delta\mu) - J(\mu - \Delta\mu), \quad (14)$$

式中:目标函数 J 表示接收端光纤耦合效率,具体计算方法如(4)式所示。

3) 根据扰动变量 $\Delta\mu$ 和目标函数变化量 ΔJ , 计算得到更新后的控制参数 μ^{n+1} , 数学表达式为

$$\mu^{n+1} = \mu^n + \gamma \Delta\mu^n \Delta J^n, \quad (15)$$

式中: γ 表示与迭代步长有关的增益系数,若优化方向为极大值,则 γ 为正值,反之为负值。

根据变形镜参数,仿真中设置 SPGD 扰动频率为 5 kHz,在静态湍流情况下,采用 SPGD 算法补偿大气湍流,以湍流强度 $D/r_0 = 16$ 为例,算法迭代曲线如图 5 所示。可以看出,光纤耦合效率随迭代次数的增加而收敛至稳定值。

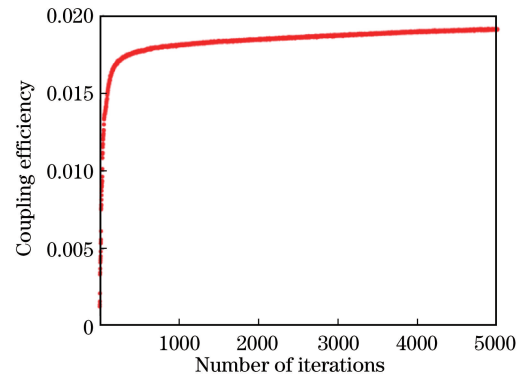


图 5 静态湍流时的 SPGD 迭代曲线

Fig. 5 SPGD iteration curve for static turbulence

的情况下,分别采用单模光纤和两模光纤耦合接收,并由(4)、(6)式计算光纤耦合效率,得到动态湍流情况下的光纤耦合效率抖动曲线,如图 6~9 所示。

由图 6~9 可以看出:未经 SPGD 算法校正时,在不同湍流强度和风速条件下,两模光纤耦合效率最大值均高于单模光纤耦合效率,且在强湍流条件下,两者表现出较大差距;由图 6(a)、图 7(a)、图 8(a)、图 9(a)可以看出,随着湍流强度增加,接收端耦合效率逐渐下降,且耦合效率波动范围逐渐扩大;随着风速增强,光纤耦合效率曲线抖动愈为剧烈。

3 仿真结果分析与讨论

3.1 光纤耦合效率曲线

根据理论模型,在不同湍流强度和风速条件下进行光通信传输仿真。在经过 SPGD 算法校正

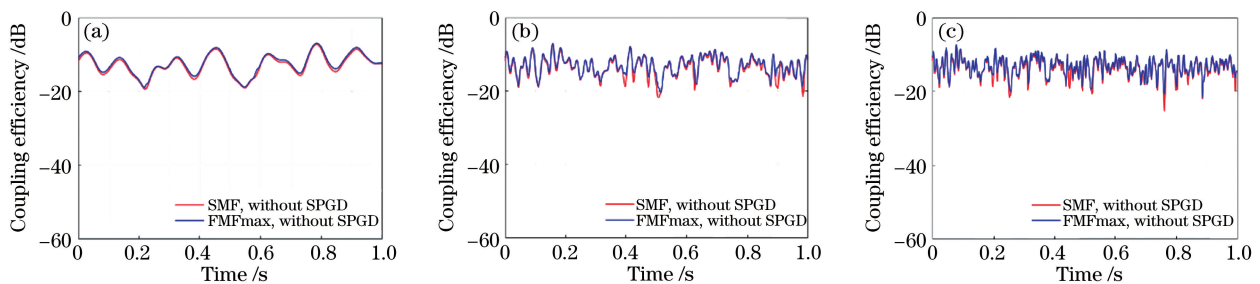


图 6 无 SPGD 算法校正、 $D/r_0 = 2$ 时,单模和两模光纤耦合效率曲线。(a)~(c) 风速分别为 0.94, 4.69, 9.38 m/s

Fig. 6 Coupling efficiency curves of single-mode and two-mode fiber when there is no SPGD algorithm correction,

$D/r_0 = 2$. (a)~(c) Wind speed is 0.94, 4.69, 9.38 m/s, respectively

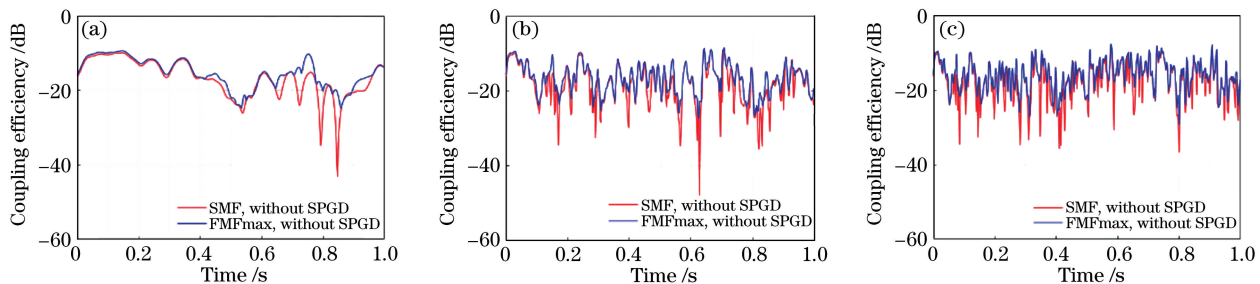


图 7 无 SPGD 算法校正、 $D/r_0 = 4$ 时,单模和两模光纤耦合效率曲线。(a)~(c) 风速分别为 0.94, 4.69, 9.38 m/s

Fig. 7 Coupling efficiency curves of single-mode and two-mode fiber when there is no SPGD algorithm correction,

$D/r_0 = 4$. (a)~(c) Wind speed is 0.94, 4.69, 9.38 m/s, respectively

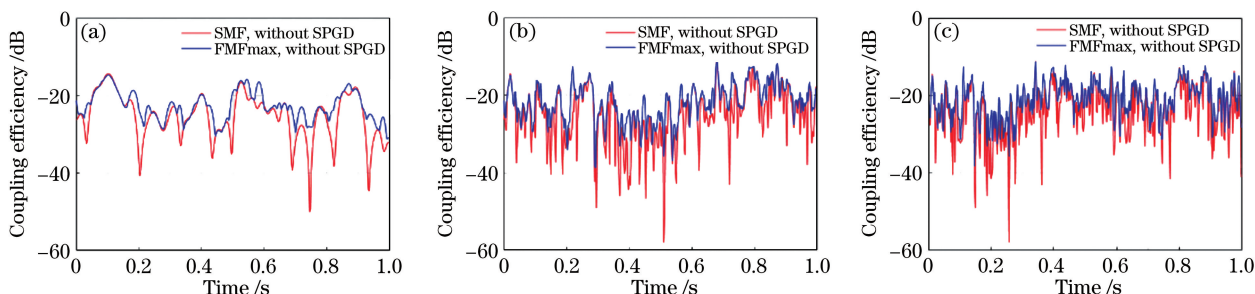


图 8 无 SPGD 算法校正, $D/r_0=8$ 时, 单模和两模光纤耦合效率率曲线。(a)~(c) 风速分别为 0.94, 4.69, 9.38 m/s
 Fig. 8 Coupling efficiency curves of single-mode and two-mode fiber when there is no SPGD algorithm correction, $D/r_0=8$. (a)~(c) Wind speed is 0.94, 4.69, 9.38 m/s, respectively

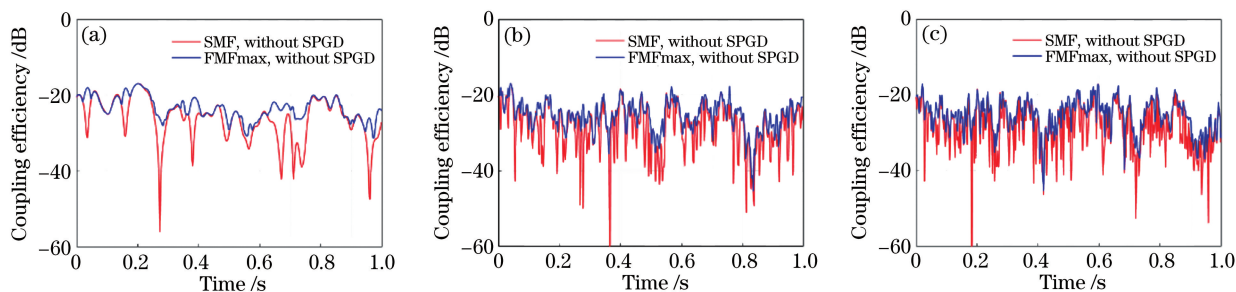


图 9 无 SPGD 算法校正, $D/r_0=16$ 时, 单模和两模光纤耦合效率率曲线。(a)~(c) 风速分别为 0.94, 4.69, 9.38 m/s
 Fig. 9 Coupling efficiency curves of single-mode and two-mode fiber when there is no SPGD algorithm correction, $D/r_0=16$. (a)~(c) Wind speed is 0.94, 4.69, 9.38 m/s, respectively

接着分别在单模光纤和两模光纤耦合接收情况 变进行补偿校正, 补偿后的光纤耦合效率曲线如图 10~13 所示。

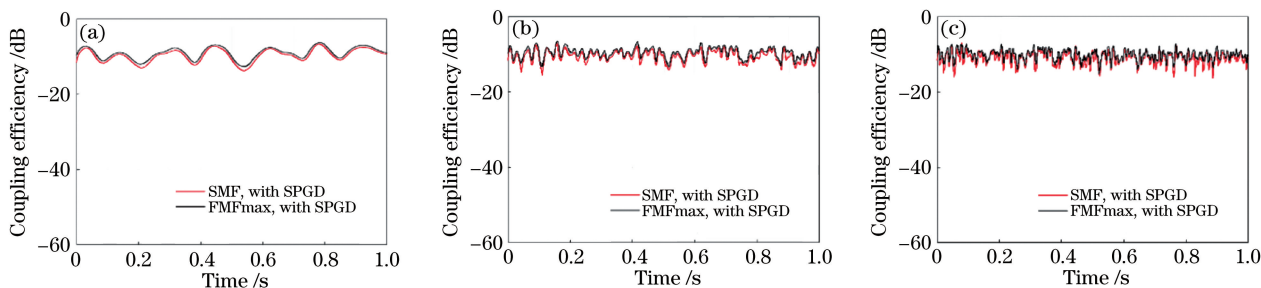


图 10 经 SPGD 算法校正后, $D/r_0=2$ 时, 单模和两模光纤耦合效率率曲线。(a)~(c) 风速分别为 0.94, 4.69, 9.38 m/s
 Fig. 10 Coupling efficiency curves of single-mode and two-mode fiber after correction by SPGD algorithm, when $D/r_0=2$. (a)~(c) Wind speed is 0.94, 4.69, 9.38 m/s, respectively

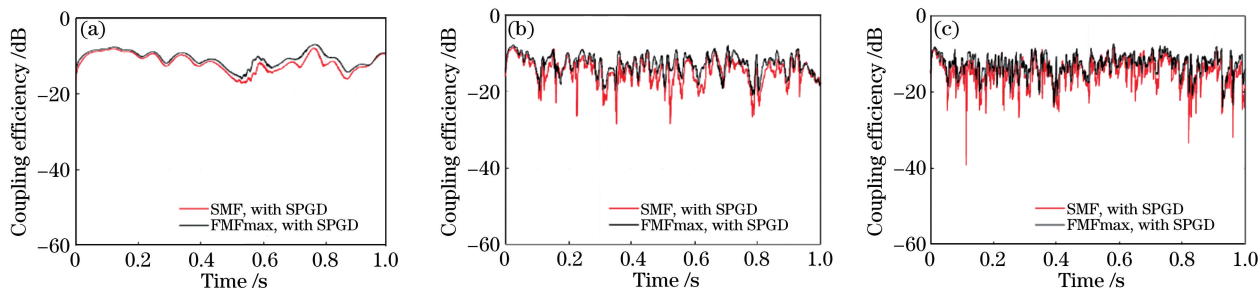


图 11 经 SPGD 算法校正后, $D/r_0=4$ 时, 单模和两模光纤耦合效率率曲线。(a)~(c) 风速分别为 0.94, 4.69, 9.38 m/s
 Fig. 11 Coupling efficiency curves of single-mode and two-mode fiber after correction by SPGD algorithm, when $D/r_0=4$. (a)~(c) Wind speed is 0.94, 4.69, 9.38 m/s, respectively

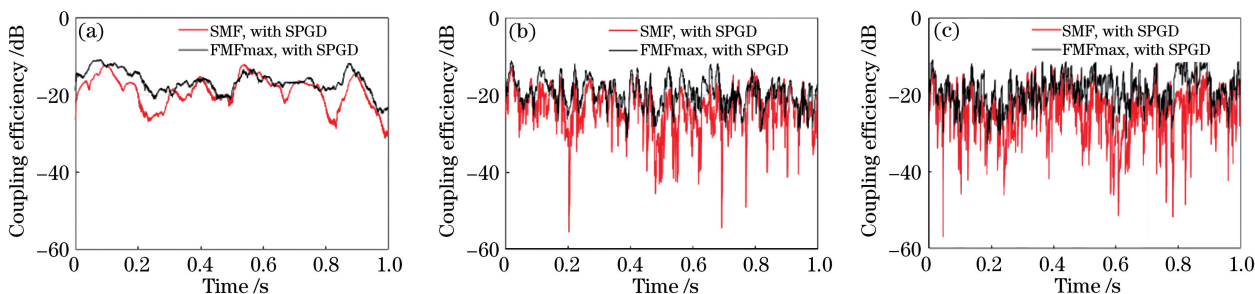


图 12 经 SPGD 算法校正后、 $D/r_0=8$ 时,单模和两模光纤耦合效率曲线。(a)~(c)风速分别为 0.94,4.69,9.38 m/s
Fig. 12 Coupling efficiency curves of single-mode and two-mode fiber after correction by SPGD algorithm, when $D/r_0=8$.
(a)~(c) Wind speed is 0.94, 4.69, 9.38 m/s, respectively

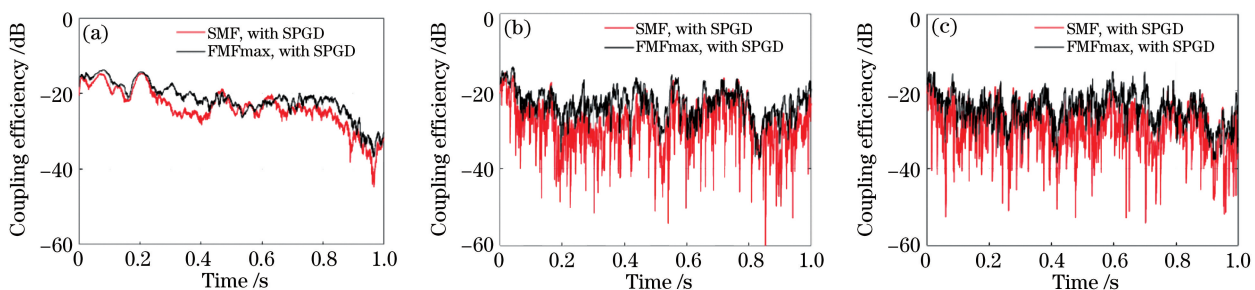


图 13 经 SPGD 算法校正后、 $D/r_0=16$ 时,单模和两模光纤耦合效率曲线。(a)~(c)风速分别为 0.94,4.69,9.38 m/s
Fig. 13 Coupling efficiency curves of single-mode and two-mode fiber after correction by SPGD algorithm, when $D/r_0=16$.
(a)~(c) Wind speed is 0.94, 4.69, 9.38 m/s, respectively

由图 10~13 可以看出,经 SPGD 算法校正后,单位时间内的两模光纤耦合效率明显高于单模光纤。通过对上述耦合效率数据进行统计分析,得到了光纤耦合效率平均值的折线图和相对标准差的折线图。

3.2 光纤耦合效率统计特性

图 14 表示在不同湍流强度和风速条件下,单位时间内单模光纤和两模光纤耦合效率的统计平均值。从图 14(a)~(c)可以看出,在未经 SPGD 算法校正的情况下,两模光纤的平均耦合效率比单模光纤高 0.5 dB~1.5 dB,且随湍流强度增大,差值逐渐增大。由图 14(a)可以看出,在动态湍流风速为 0.94 m/s 时,对应 Greenwood 频率为 4.8~38 Hz,

此时风速较小,无论采用单模光纤还是两模光纤接收,都可以得到较好的补偿效果,在不同的湍流强度下,单模光纤耦合效率比 SPGD 算法校正前提高了 2.7 dB~4.9 dB,两模光纤耦合效率提高了 2.5 dB~5.1 dB;校正后,在湍流强度为 2,4,8,16 时,两模光纤耦合效率比单模光纤分别高 0.37 dB,0.53 dB,1.4 dB,0.79 dB。由图 14(b)、(c)可以看出,随着风速增大和湍流变强,SPGD 算法的补偿效果变差,但是校正后两模光纤的平均耦合效率仍高于单模光纤;在风速为 9.38 m/s,湍流强度为 2,4,8,16 时,两模光纤耦合效率比单模光纤高 0.4 dB,0.8 dB,2.2 dB,2.1 dB。因此,对于动态湍流情况下的自由空间光通信系统,在不同的湍流强度和风

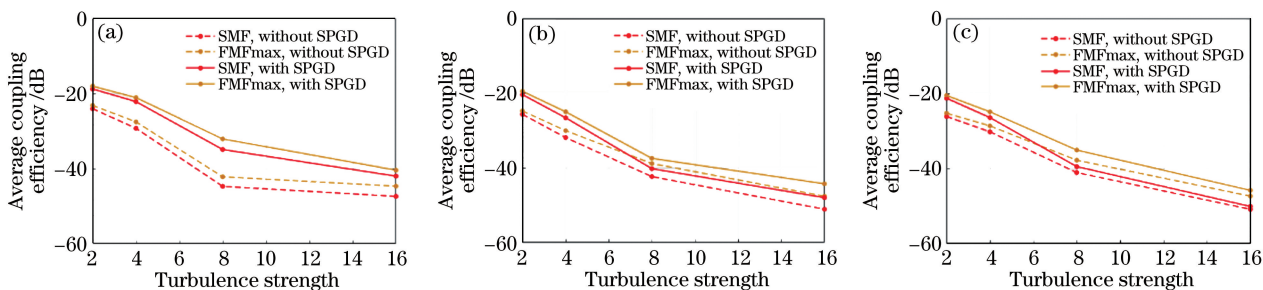


图 14 光纤耦合效率平均值。(a)~(c)风速分别为 0.94,4.69,9.38 m/s
Fig. 14 Average value of fiber coupling efficiency. (a)~(c) Wind speed is 0.94, 4.69, 9.38 m/s, respectively

速条件下,两模光纤耦合效率均要优于单模光纤。

图 15~18 为不同湍流强度和风速条件下,单模光纤和两模光纤耦合效率的统计分布柱状图。可以看出,经过 SPGD 算法校正后,单模光纤和两模光

纤耦合效率均整体向右移动,此时从横坐标来看,两模光纤耦合效率最大值要大于单模光纤,从纵坐标来看,两模光纤统计分布的峰值所对应的耦合效率值同样高于单模光纤。

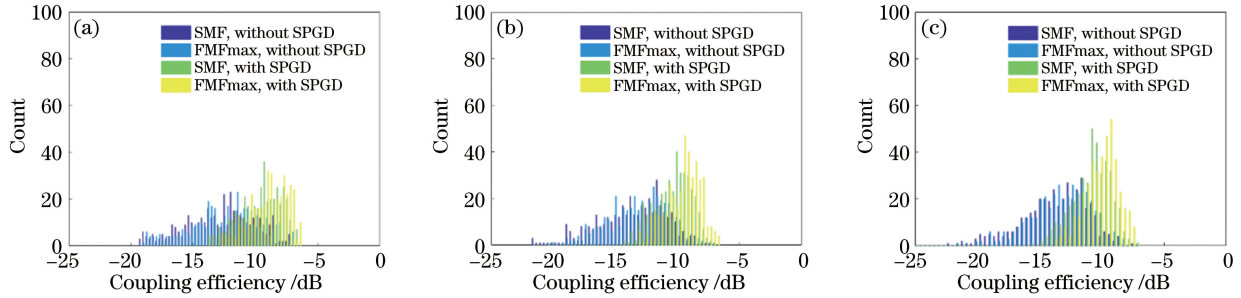


图 15 $D/r_0=2$ 时,光纤耦合效率统计分布柱状图。(a)~(c)风速分别为 0.94,4.69,9.38 m/s

Fig. 15 Histogram of statistical distribution of fiber coupling efficiency when $D/r_0=2$.

(a)~(c) Wind speed is 0.94, 4.69, 9.38 m/s, respectively

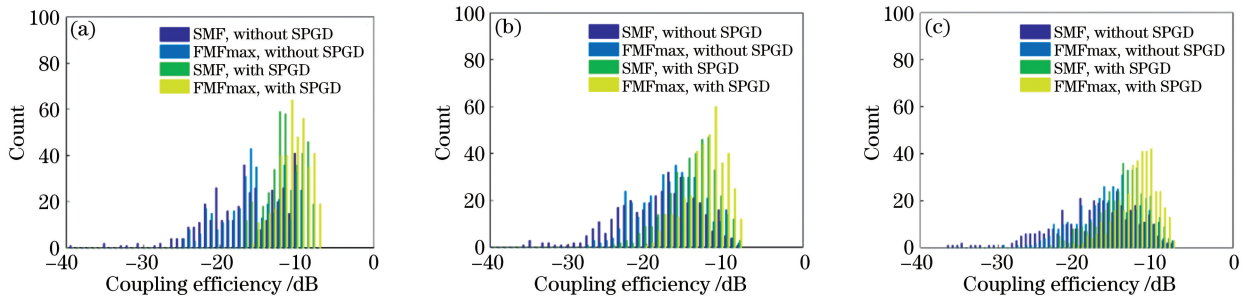


图 16 $D/r_0=4$ 时,光纤耦合效率统计分布柱状图。(a)~(c)风速分别为 0.94,4.69,9.38 m/s

Fig. 16 Histogram of statistical distribution of fiber coupling efficiency when $D/r_0=4$.

(a)~(c) Wind speed is 0.94, 4.69, 9.38 m/s, respectively

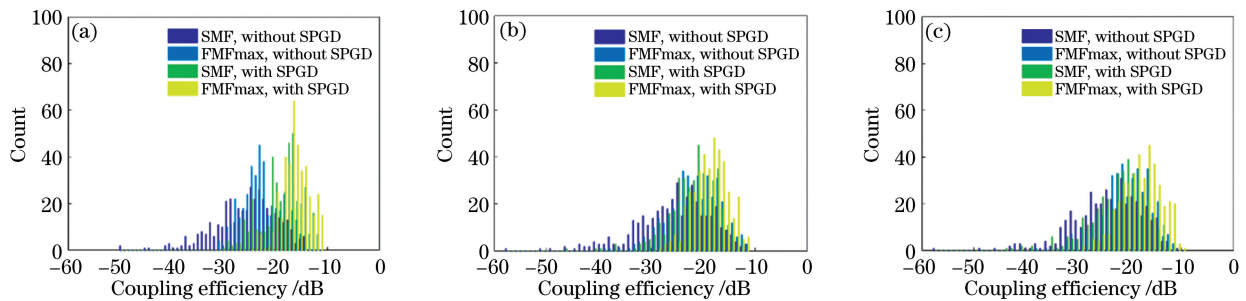


图 17 $D/r_0=8$ 时,光纤耦合效率统计分布柱状图。(a)~(c)风速分别为 0.94,4.69,9.38 m/s

Fig. 17 Histogram of statistical distribution of fiber coupling efficiency when $D/r_0=8$.

(a)~(c) Wind speed is 0.94, 4.69, 9.38 m/s, respectively

3.3 光纤耦合效率相对标准差

$$\text{相对标准差 } D_{\text{RSD}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n (J_m - \bar{J})^2}{n-1}}}{\bar{J}}, \text{ 表征光纤}$$

耦合效率的相对波动情况,其中 J_m 为第 m 个光纤耦合效率。通过对 SPGD 校正前后的单模光纤和两模光纤耦合效率数据进行统计分析,得到相对标

准差折线,如图 19 所示。

由图 19 可以看出:在未经 SPGD 算法校正时,在同一风速条件下,随着湍流强度变大,单模光纤和两模光纤耦合效率的相对标准差值均呈现先增大后减小的趋势;在同一湍流强度下,相对标准差值随风速变化不大,此时两模光纤耦合效率的相对标准差明显低于单模光纤;在湍流强度 $D/r_0=2,4,8,16$ 时,两模光纤相对标准差比单模光纤低 0.03~0.4,

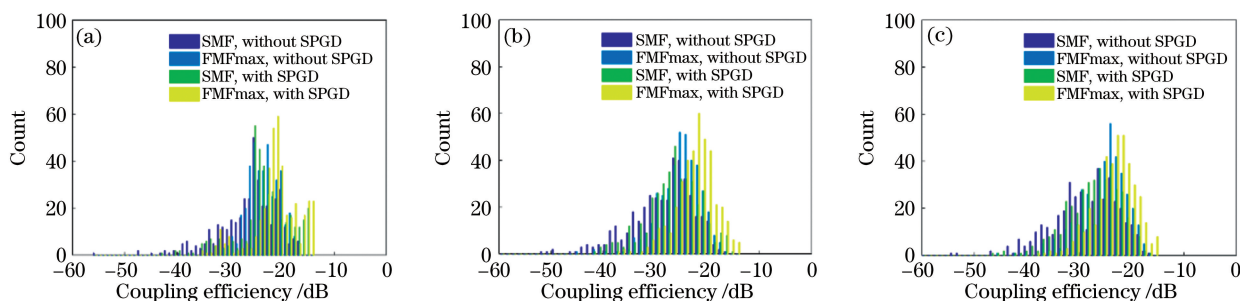


图 18 $D/r_0=16$ 时, 光纤耦合效率统计分布柱状图。(a)~(c) 风速分别为 0.94, 4.69, 9.38 m/s

Fig. 18 Histogram of statistical distribution of fiber coupling efficiency when $D/r_0=16$.

(a)~(c) Wind speed is 0.94, 4.69, 9.38 m/s, respectively

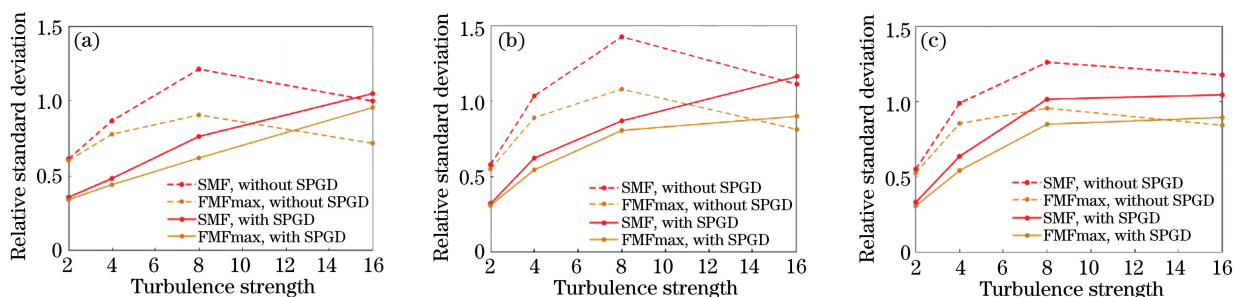


图 19 光纤耦合效率相对标准差。(a)~(c) 风速分别为 0.94, 4.69, 9.38 m/s

Fig. 19 Relative standard deviation of fiber coupling efficiency. (a)~(c) Wind speed is 0.94, 4.69, 9.38 m/s, respectively

湍流强度越大, 差值越大, 说明 SPGD 算法校正前两模光纤耦合效率波动情况明显弱于单模光纤; 在湍流强度 $D/r_0=2, 4, 8$ 时, SPGD 算法校正后的单模和两模光纤耦合效率的相对标准差均明显下降; 在湍流强度 $D/r_0=16$ 时, 两者的相对标准差比校正前有所上升, 但是两模光纤相对标准差均低于单模光纤, 且在中强湍流情况下差距明显, 两模光纤相对标准差比单模光纤低 0.15~0.27。结果证明, 经过 SPGD 算法校正后, 两模光纤耦合效率波动更小, 相较于单模光纤具有更好的稳定性, 且在湍流较强时优势明显。

4 结 论

提出了传输距离为 5 km 的自由空间光通信系统模型, 结合 SPGD 算法和两模光纤耦合解复用接收系统对动态湍流引起的信号光波前相位畸变进行了补偿校正数值仿真, 并在不同的湍流强度和风速条件下, 与单模光纤接收系统进行了对比分析。单位时间内的仿真数据统计结果表明: 在未经 SPGD 算法校正的情况下, 当湍流强度 $D/r_0=2, 4, 8, 16$ 时, 两模光纤耦合效率平均值比单模光纤分别高 0.37 dB, 0.53 dB, 1.4 dB, 0.79 dB, 此时耦合效率平均值受风速影响不大, 两模光纤耦合效率的相对

标准差小于单模光纤; 经过 SPGD 算法校正后, 在风速为 0.94 m/s 时, 算法补偿效果明显, 在不同湍流强度下单模光纤和两模光纤耦合效率相比较校正前提高了 2 dB~5 dB, 两模光纤耦合效率的统计平均值比单模光纤高 0.3 dB~1.4 dB; 当风速为 4.69, 9.38 m/s 时, 对应 Greenwood 频率为 23~383 Hz, 此时由于 SPGD 算法迭代速度不足以有效补偿动态相位畸变, 因而在湍流较强时, 光纤耦合效率涨幅不大, 但两模光纤耦合效率仍要高出单模光纤 2 dB 左右, 且相对标准差远低于单模光纤。因而, 在动态湍流信道中, 两模光纤耦合解复用接收系统在 SPGD 算法校正前后均表现出了更高的耦合效率和更小的相对标准差。采用所提系统进行空间光耦合可进一步提高自由空间光通信系统的稳定性, 保证通信质量。

参 考 文 献

[1] Kaymak Y, Rojas-Cessa R, Feng J H, et al. A survey on acquisition, tracking, and pointing mechanisms for mobile free-space optical communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(2): 1104-1123.
 [2] Hamza A S, Deogun J S, Alexander D R. Classification framework for free space optical communication links and systems [J]. IEEE

- Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(2): 1346-1382.
- [3] Alheadary W G, Park K H, Alfaraj N, et al. Free-space optical channel characterization and experimental validation in a coastal environment[J]. Optics Express, 2018, 26(6): 6614-6628.
- [4] Liu M W, Li Y C. Propagation of OFDM-OAM optical signal in atmospheric turbulence[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0706002.
刘旻雯, 李迎春. OFDM-OAM 光信号在大气湍流中的传输[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0706002.
- [5] Song J X, Chen C Y, Yao H F, et al. Study on probability distribution of single-mode-fiber coupling efficiency distorted by turbulence[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1906002.
宋佳雪, 陈纯毅, 姚海峰, 等. 湍流扰动单模光纤耦合效率概率分布研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1906002.
- [6] Salter P S, Booth M J. Adaptive optics in laser processing[J]. Light, Science & Applications, 2019, 8: 110.
- [7] Zhu L, Wang A D, Deng M L, et al. High efficient modes diversity receive scheme for free space optical communications under random angular jitter[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2020, October 24-27, 2020, Beijing, China. Washington, D.C.: OSA, 2020: M4A. 283.
- [8] Liu C, Chen M, Chen S Q, et al. Adaptive optics for the free-space coherent optical communications[J]. Optics Communications, 2016, 361: 21-24.
- [9] Toselli I, Gladysz S. Improving system performance by using adaptive optics and aperture averaging for laser communications in oceanic turbulence[J]. Optics Express, 2020, 28(12): 17347-17361.
- [10] Baykal Y. Adaptive optics corrections of scintillations of Hermite-Gaussian modes in an oceanic medium[J]. Applied Optics, 2020, 59(16): 4826-4832.
- [11] Dong B, Yu J. Hybrid approach used for extended image-based wavefront sensor-less adaptive optics[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(4): 041101.
- [12] He X, Zhao X H, Cui S Y, et al. A rapid hybrid wave front correction algorithm for sensor-less adaptive optics in free space optical communication[J]. Optics Communications, 2018, 429: 127-137.
- [13] Ren H X, Dong B, Zhang X F, et al. Alignment for active secondary mirror of space telescope using model-based wavefront sensorless adaptive optics[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11570: 115700R.
- [14] Huang G, Geng C, Li F, et al. Adaptive SMF coupling based on precise-delayed SPGD algorithm and its application in free space optical communication[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(3): 1-12.
- [15] Segel M, Anzuola E, Gladysz S, et al. Modal vs. zonal wavefront-sensorless adaptive optics for free-space laser communications[C]//Adaptive Optics: Analysis, Methods & Systems 2016, July 25-28, 2016, Heidelberg, Germany. Washington, D. C.: OSA, 2016: AOW1B. 3.
- [16] Yang K X, Abulizi M, Li Y H, et al. Single-mode fiber coupling with a M-SPGD algorithm for long-range quantum communications[J]. Optics Express, 2020, 28(24): 36600-36610.
- [17] Ke X Z, Zhang Y F, Zhang Y, et al. GPU acceleration in wave-front sensorless adaptive wave-front correction system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(7): 070101.
柯熙政, 张云峰, 张颖, 等. 无波前传感自适应波前校正系统的图形处理器加速[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(7): 070101.
- [18] Chen J K, Hu G J, Han Y Y. Communication experimental system with 3×3 mode division multiplexing based on photonic lantern[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1106009.
陈嘉轲, 胡贵军, 韩悦羽. 基于光子灯笼的 3×3 模分复用通信实验系统[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1106009.
- [19] 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.
- [20] Kumari M, Sharma R, Sheetal A. Performance analysis of long-reach 40/40 Gbps mode division multiplexing-based hybrid time and wavelength division multiplexing passive optical network/free-space optics using Gamma-Gamma fading model with pointing error under different weather conditions[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2021, 32(3): e4214.
- [21] Arikawa M, Ito T. Performance of mode diversity reception of a polarization-division-multiplexed signal for free-space optical communication under atmospheric turbulence[J]. Optics Express, 2018, 26(22): 28263-28276.
- [22] 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.
- [23] Zheng D H, Li Y, Li B B, et al. Free space to few-mode fiber coupling efficiency improvement with

- adaptive optics under atmospheric turbulence [C]// 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 19-23, 2017, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2017: 1-3.
- [24] Aunion Tech. Alpao high speed continuous reflector deformable mirror[EB/OL]. [2021.03.04]. <http://www.auniontech.com/details-471.html>.
昊量光电. Alpao 高速连续反射面变形镜[EB/OL]. [2021.03.04]. <http://www.auniontech.com/details-471.html>.
- [25] Lukin V P, Bol' Basova L A, Nosov V V. Comparison of Kolmogorov's and coherent turbulence[J]. Applied Optics, 2014, 53(10): B231-B236.
- [26] Prasad S. Extended Taylor frozen-flow hypothesis and statistics of optical phase in aero-optics [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2017, 34(6): 931-942.
- [27] Zhai H L, Wang B L, Zhang J K, et al. Fractal phase screen generation algorithm for atmospheric turbulence[J]. Applied Optics, 2015, 54(13): 4023-4032.
- [28] Li Z H, Li X Y. Performance of predictive correction for adaptive optics systems with frozen flow turbulence [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(3): 548-555.
- 李正汉, 李新阳. 冻结大气湍流下自适应光学系统的预测校正性能 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(3): 548-555.
- [29] Liu W, Yao K N, Huang D N, et al. Performance evaluation of coherent free space optical communications with a double-stage fast-steering-mirror adaptive optics system depending on the Greenwood frequency[J]. Optics Express, 2016, 24(12): 13288-13302.
- [30] Vali Z, Gholami A, Ghassemlooy Z, et al. Modeling turbulence in underwater wireless optical communications based on Monte Carlo simulation[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2017, 34(7): 1187-1193.
- [31] Chen M, Liu C, Xian H. Experimental demonstration of single-mode fiber coupling over relatively strong turbulence with adaptive optics[J]. Applied Optics, 2015, 54(29): 8722-8726.
- [32] Cao J T, Zhao X H, Li Z K, et al. Stochastic parallel gradient descent laser beam control algorithm for atmospheric compensation in free space optical communication [J]. Optik, 2014, 125(20): 6142-6147.