



光电探测噪声对单模光纤自适应耦合装置的闭环性能影响研究

黄冠 耿超 李枫 李新阳 吕国云 樊养余

Influence of photoelectric conversion noise on closed-loop performance of adaptive SMF coupling device

Huang Guan Geng Chao Li Feng Li Xin-Yang Lv Guo-Yun Fan Yang-Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 224212 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210615

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210615>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于软件定义量子通信的自由空间量子通信信道参数自适应调整策略

Parameters adaptive adjustment strategy of quantum communication channel in free-space based on software-defined quantum communication

物理学报. 2019, 68(14): 140302 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190462>

基于混合光模式阵列的自由空间编码通信

Free-space optical communication based on hybrid optical mode array encoding

物理学报. 2017, 66(14): 144102 <https://doi.org/10.7498/aps.66.144102>

自适应非凸稀疏正则化下自适应光学系统加性噪声的去除

Removal of additive noise in adaptive optics system based on adaptive nonconvex sparse regularization

物理学报. 2017, 66(12): 129501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.129501>

基于超导纳米线单光子探测器深空激光通信模型及误码率研究

Model of bit error rate for laser communication based on superconducting nanowire single photon detector

物理学报. 2017, 66(19): 198501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.198501>

耦合含时滞的相互依存网络的局部自适应异质同步

Local adaptive heterogeneous synchronization for interdependent networks with delayed coupling

物理学报. 2018, 67(5): 050504 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171927>

基于袋鼠纠缠跳跃模型的量子状态自适应跳变通信策略

An adaptive quantum state-hopping communication strategy based on kangaroo entanglement hopping model

物理学报. 2019, 68(11): 110301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190163>

光电探测噪声对单模光纤自适应耦合装置的闭环性能影响研究*

黄冠¹⁾ 耿超^{2)3)†} 李枫²⁾³⁾ 李新阳²⁾³⁾ 吕国云^{1)‡} 樊养余¹⁾

1) (西北工业大学电子信息学院, 西安 710129)

2) (中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

3) (中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2021年4月1日收到; 2021年7月10日收到修改稿)

单模光纤自适应耦合装置能够将空间激光高效、稳定的耦合至单模光纤中, 在自由空间光通信领域具有重要的研究意义. 然而, 在长距离、强大气湍流环境下的空间光通信系统中, 装置闭环性能会受到光电探测噪声的严重干扰. 本文针对该问题开展了深入研究, 分析了光电探测噪声的作用机理, 建立了噪声干扰程度评价指标, 同时结合实际的单模光纤自适应耦合装置开展了相应的数值仿真研究. 仿真结果表明, 光电探测噪声会对光纤耦合过程中的闭环平均耦合效率、闭环精度、以及闭环带宽产生严重影响. 根据仿真结果, 本文给出了相应的经验公式, 能够用以计算强噪声干扰环境下光纤耦合过程应满足的光学及电学参数. 本文的理论及仿真结果能够为长距离、强大气湍流环境下的单模光纤自适应耦合装置的设计提供相应的理论依据.

关键词: 自由空间光通信, 单模光纤自适应耦合装置, 随机并行梯度下降算法, 光电探测噪声

PACS: 42.79.Sz, 42.79.Gn, 42.68.Bz, 85.60.Gz

DOI: 10.7498/aps.70.20210615

1 引言

自由空间激光通信 (free space optical communication, FSOC) 具有传输速率高、信息容量大、保密性能好等优点, 在军事和民用领域有着广阔的应用前景^[1-4]. 在 FSOC 系统中, 高效、高稳定的空间光至单模光纤 (single-mode fiber, SMF) 耦合是保证通信系统低误码率的重要前提^[5-7]. 然而, 由于 SMF 的纤芯直径通常非常小, 因此机械调节精度、环境温度、重力、大气湍流等因素都会对 SMF 耦合效率产生严重影响, 继而降低通信系统的性能^[8-10].

自适应光纤耦合器 (adaptive fiber coupler,

AFC) 是为解决该问题而研制的新型主动光学器件, 其概念最早由美国陆军实验室 Carhart 等^[11-13]于 2005 年提出. 2007 年, 美国陆军实验室 Weyrauch 等^[14]将 AFC 与六单元小型变形镜相结合, 在 250 m 近地大气湍流环境中成功实现了空间光至 SMF 的自适应耦合. 2011 年, 中科院耿超等^[15-17]在国内成功研制了 AFC, 并于 2014 年在实验室环境中成功实现了 SMF 的自适应耦合^[18,19]. 2018 年, AFC 与 137 单元自适应光学系统相结合, 在 FSOC 系统中有效补偿了 520 m 近地大气湍流对 SMF 耦合效率的影响^[20]. 同年, AFC 与 357 单元自适应光学系统同时应用在实际的星地激光通信地面站中, 有效保障了星地相干光通信的可靠性^[21]. 2020 年, 中科院耿超等^[22]报道了空间光束至 19 单

* 国家自然科学基金 (批准号: 62005286) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: blast_4006@126.com

‡ 通信作者. E-mail: lvguoyun101@nwpu.edu.cn

元 AFC 阵列的自适应耦合实验, 并且展示了这种基于 AFC 阵列的分布式自适应光学系统在 FSO 中的应用.

在上述基于 AFC 的 SMF 自适应耦合装置 (简称为 AFC 装置) 中, 目前均使用了随机并行梯度下降 (stochastic parallel gradient descent, SPGD) 算法作为控制策略. 作为常见的优化式控制算法, SPGD 需要将耦合进 SMF 内的光功率分出一小部分作为优化性能指标. 在长距离、强湍流环境下的空间光通信系统中, 光端机接收到的光功率非常微弱, 因此性能指标探测过程不可避免的会受到光电探测噪声的严重影响^[23]. 可以预见的是, 在 SPGD 高速迭代过程中, 性能指标的随机振荡将会引起 AFC 装置控制电压的相应振荡, 最终影响其闭环性能. 然而, 现有文章还未仔细分析过光电探测噪声对 AFC 装置的具体影响, 以及如何在强噪声干扰的环境下确定 AFC 装置的光学及电学参数.

本文简要介绍了 AFC 装置及 SPGD 算法的基本原理, 理论分析了光电探测噪声的作用机理, 并针对噪声干扰程度建立了相应的评价指标. 根据现有 AFC 装置的设计参数及被控器件响应特性, 利用数值仿真的方法分析了光电探测噪声对 AFC 装置闭环平均耦合效率、闭环精度、以及闭环带宽的具体影响. 根据数值仿真结果, 本文给出了 AFC 装置中光电探测器的噪声等效功率、光纤分束比、以及入射空间光功率间需要满足的经验公式. 本文的工作能够为长距离、强大气湍流环境下的 AFC 装置的设计及稳定控制提供必要的理论基础.

2 基于 AFC 的 SMF 自适应耦合装置

图 1 展示了基于 AFC 装置的基本结构, 其中 AFC 由耦合透镜以及光纤端面定位器两部分组成.

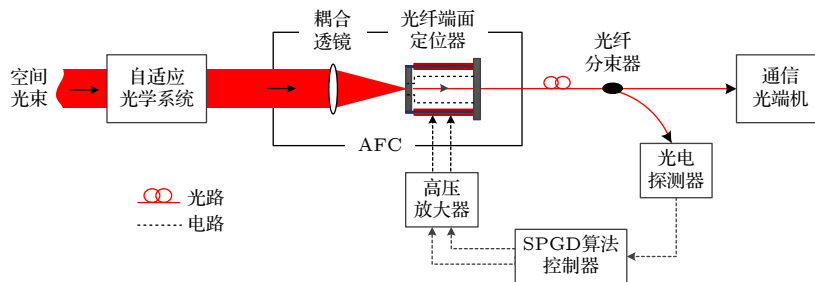


图 1 基于 AFC 的 SMF 自适应耦合装置结构图

Fig. 1. Structure of the adaptive SMF coupling system based on AFC.

在实际的光通信系统中, AFC 装置的前端通常需要放置自适应光学系统, 用来补偿大气湍流引起的通信光束的高阶波前畸变^[14,20,21]. 在装置工作过程中, 空间光束经过耦合透镜后聚焦在 SMF 端面, 同时光功率耦合进 SMF 中. 光纤分束器将 SMF 中的光功率分为两部分, 其中多数被传递至通信光端机, 剩余部分被传递至光电探测器并转换为电压信号, 即性能指标. SPGD 算法控制器将性能指标转换为数字信号, 并据此生成一组二维控制电压至高压放大器, 后者将该电压放大后驱动光电端面定位器带动光纤端面寻找最优耦合位置, 使得光电探测器探测到的电压幅值 (即性能指标幅值) 最大化, 从而间接保证高效、稳定的 SMF 耦合效率.

假设 AFC 的控制电压为 $U^{(n)} = [u_x^{(n)}, u_y^{(n)}]$. SPGD 算法执行步骤描述如下:

- 1) 生成一组满足伯努利分布的二维随机数序列 $\pi^{(n)} = [\pi_x^{(n)}, \pi_y^{(n)}]$;
- 2) 生成一组二维随机扰动电压 $\Delta U^{(n)} = [+ \sigma \pi^{(n)}, - \sigma \pi^{(n)}]$, 其中 σ 为大于 0 常数;
- 3) 将随机扰动电压 $\Delta U^{(n)}$ 施加在 AFC 的控制通道上, 捕获相应的性能指标并分别记为 $[J_+^{(n)}, J_-^{(n)}]$;
- 4) 根据 (1) 式更新控制电压 $U^{(n)} = [u_x^{(n)}, u_y^{(n)}]$, 可得:

$$U^{(n+1)} = U^{(n)} + \gamma \pi^{(n)} [J_+^{(n)} - J_-^{(n)}]. \quad (1)$$

其中 γ 为步长参数.

在 AFC 装置工作过程中, 性能指标会受到光电探测噪声的严重影响, 继而影响梯度估计 $\pi^{(n)} [J_+^{(n)} - J_-^{(n)}]$, 并最终降低 SPGD 算法的闭环性能. 为了便于分析, 使用 $J(t)$ 和 $S(t)$ 来表示理想及实际情况下的连续域性能指标, 两者关系如下:

$$S(t) = J(t) + N(t), \quad (2)$$

其中, $N(t)$ 代表光电探测噪声. 在长距离、强大气湍流环境下的空间光通信系统中, 耦合进 SMF 中的光功率通常非常微弱, 因此性能指标 $S(t)$ 将在探测噪声 $N(t)$ 的影响下产生随机抖动, 最终影响 AFC 装置的闭环性能.

3 光电探测噪声

在光电探测器工作过程中, 性能指标 $S(t)$ 可以表示为

$$S(t) = R_p I_D(t), \quad (3)$$

式中, R_p 为光电探测器前向放大电路的放大增益, $I_D(t)$ 为光电信号电流. 其中, $I_D(t)$ 可以表示为

$$I_D(t) = P_{in} \eta(t) K R + I_s(t) + I_T(t), \quad (4)$$

式中, P_{in} 为通信接收端捕获的空间光功率, $\eta(t)$ 为空间光至 SMF 的耦合效率; K 为光纤分束器的分束比; R 为光电探测器的探测响应度; $I_s(t)$ 和 $I_T(t)$ 分别为散粒噪声电流以及热噪声电流. 将 (4) 式代入 (3) 式, 性能指标 $S(t)$ 可以表示为

$$S(t) = J(t) + N(t) = R_p P_{in} \eta(t) K R + N_s(t) + N_T(t), \quad (5)$$

式中, $N(t) = N_s(t) + N_T(t)$, $N_s(t) = R_p I_s(t)$, $N_T(t) = R_p I_T(t)$. 在 AFC 装置中, SPGD 算法的原理是通过性能指标 $S(t)$ 的迭代优化以使其始终保持在最优值, 从而间接保证 SMF 耦合效率 $\eta(t)$ 处于最优值. 当不考虑噪声 $N(t)$ 时, 耦合效率 $\eta(t)$ 与性能指标 $S(t)$ 间是线性相关的, 对 $S(t)$ 的迭代优化最终会使得 $\eta(t)$ 收敛到自身的最优位置. 然而当考虑噪声 $N(t)$ 时, 耦合效率 $\eta(t)$ 与性能指标 $S(t)$ 间的相关性将会受到严重影响, 从而使得 $S(t)$ 的迭代过程将会产生强烈的振荡 (因为随机变化的噪声 $N_s(t)$ 和 $N_T(t)$ 不具有稳定的收敛位置), 最终反馈回来引起耦合效率 $\eta(t)$ 的强烈振荡.

噪声 $N(t)$ 的干扰程度可以用光电探测器的信噪比 SNR 来表示, 可得:

$$\begin{aligned} SNR &= 20 \lg \left[\frac{J(t)_{\text{rms}}}{N(t)_{\text{rms}}} \right] \\ &= 20 \lg \left[R_p P_{in} K R \cdot \frac{\eta(t)_{\text{rms}}}{N_s(t)_{\text{rms}} + N_T(t)_{\text{rms}}} \right] \\ &= 20 \lg \left[P_{in} K R \cdot \frac{\eta(t)_{\text{rms}}}{I_s(t)_{\text{rms}} + I_T(t)_{\text{rms}}} \right], \quad (6) \end{aligned}$$

式中, 下标 rms 代表信号的有效值. 在实际的

AFC 装置中, 光纤分束比 K 和光电探测响应度 R 都是固定的, SNR 将由空间光功率 P_{in} 直接决定. 可以预见的是, 当 P_{in} 受到光束传输距离以及大气湍流的严重影响而变得非常微弱时, 噪声 $N(t)$ 对 SPGD 算法迭代过程的干扰会直接增大, 进而降低 AFC 装置的闭环性能.

为了使得讨论结果更具一般性, 即对噪声 $N(t)$ 的评价不依赖于空间光功率 P_{in} 、光纤分束比 K 、以及光电探测器灵敏度 R 的具体数值, 本文中使用的耦合效率信噪比 CE_{SNR} 来等效表征光电探测噪声的强弱:

$$CE_{SNR} = 20 \lg [\eta(t)_{\text{rms}} / \sigma_w], \quad (7)$$

式中 σ_w 为高斯白噪声的有效值. 从 (7) 式可以看出, CE_{SNR} 的数值能够反映出理想情况下的 SMF 耦合效率的探测值与噪声 $N(t)$ 所引起的随机抖动的 SMF 耦合效率的探测值之间的比值关系. 由于 $N(t)$ 主要来源于散粒噪声以及热噪声, 这两者都为与频率无关的高斯白噪声, 因此 $N(t)$ 引起的 SMF 耦合效率探测值的随机抖动可以使用高斯白噪声来描述. 可以预见的是, 为了保证 AFC 装置的性能, 仿真结果将会给出 CE_{SNR} 的一个数值下限. 在实际的 AFC 装置中, 根据光纤分束比 K 以及光电探测器的噪声等效功率 (noise equivalent power, NEP), 可以计算出 AFC 装置允许的入射空间光功率 P_{in} 的最小值.

4 数值仿真实验

4.1 仿真模型设置

根据现有 AFC 装置的设计参数及被控器件响应特性, 本文设计了相应的仿真实验, 其基本结构与图 1 相同. 其中, 空间通信光束波长为 1550 nm; 光束直径为 $D = 3.3$ mm; 耦合透镜焦距为 $f = 15$ mm; SMF 的模场半径为 $w_0 = 5$ μm ; 理想情况下, 空间光束在 SMF 端面的光强分布与 SMF 基模光强分布如图 2 所示.

在本小节的仿真中, 假设光通信系统主光学天线的直径为 100 mm (放大倍 30.3 倍), 通信距离 L 为 5 km, 大气折射率结构常数 C_n^2 为固定值 1.0×10^{-13} , 可以计算出湍流引起的光束到达角起伏方差为^[24]

$$\langle \alpha^2 \rangle = 5.675 D^{-1/3} \int_0^L C_n^2(z) dz. \quad (8)$$

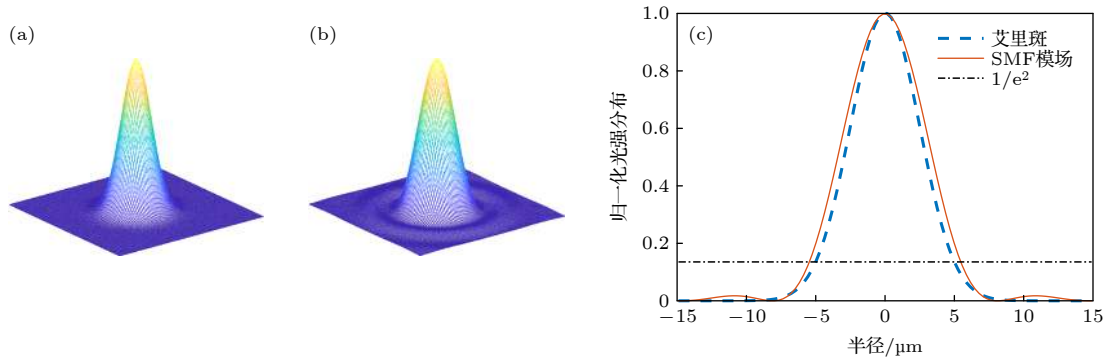


图 2 艾里斑与 SMF 基模光强分布 (a) SMF 基模光强分布; (b) 艾里斑光强分布; (c) 截面光强分布

Fig. 2. Intensity distribution of the airy disk and the SMF's fundamental mode: (a) SMF's fundamental mode; (b) airy disk; (c) intensity distribution of the cross profile.

经计算得, 主光学天线位置的光束到达角起伏方差 $\langle \alpha^2 \rangle$ 约为 6.1×10^{-9} rad. 因此, 耦合透镜位置的光束到达角起伏方差约为 1.9×10^{-7} rad. 将该数值折算到 SMF 端面, 可以得到光纤端面对准偏差大约为 $6.5 \mu\text{m}$. 根据模场匹配原理, 理想情况下空间光束至 SMF 的耦合效率 η 为 81.45%. 当光纤端面存在一定的对准偏差 r_0 时, η 的变化情况如图 3 所示. 可以看到, 当 r_0 为 $6.5 \mu\text{m}$ 时, SMF 的耦合效率 η 下降至 12% 左右. 因此, 实现 SMF 自适应耦合至关重要.

在 AFC 装置中, 光纤端面定位器的驱动器件为双压电陶瓷, 其频率特性能够由双二阶数字滤波器来近似拟合 [25]. 根据现有设备的频率特性测试情况, 在仿真中光纤端面定位器的传递函数如 (9) 式所示, 其中采样频率为 100 kHz. 图 4 展示了对应的波特图. 可以看到驱动器件在 2.7 kHz 左右具有一阶谐振峰.

$$F(z) = \frac{0.6292z^2 - 1.194z + 0.6022}{z^2 - 1.907z + 0.9436}. \quad (9)$$

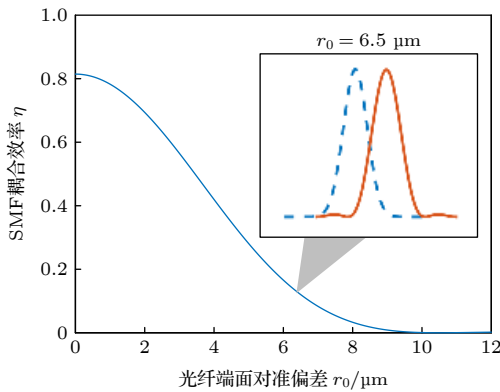


图 3 SMF 耦合效率与光纤端面对准偏差的关系

Fig. 3. Relationship between the SMF coupling efficiency and the position deviation of the fiber tip.

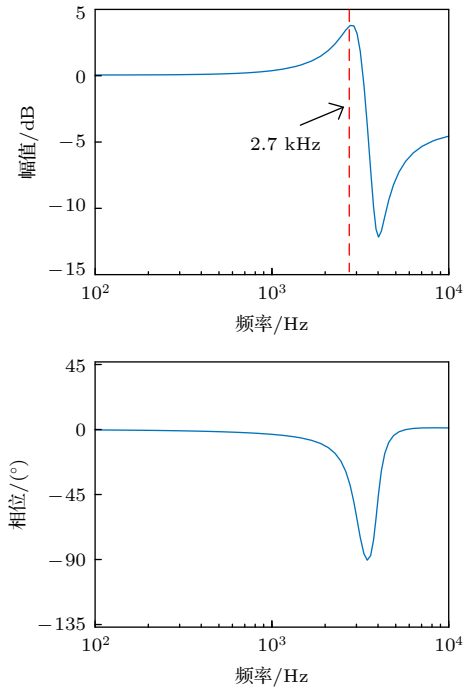


图 4 光纤端面定位器的频率响应特性

Fig. 4. Frequency characteristic of the locator of the fiber tip.

4.2 基于 AFC 的 SMF 自适应耦合实验

在本小节仿真中, SPGD 迭代速率为 2 kHz; 扰动幅值 σ 为 $0.12 \mu\text{m}$ (等效到光纤端面); 实验重复次数为 100 次; 算法闭环前后 SMF 耦合效率及平均耦合效率的迭代曲线如图 5 和图 6 所示.

当迭代次数 n 为 0—40 时, SPGD 算法处于开环状态, 此时 SMF 耦合效率约为 1.1%. 当迭代次数 n 为 40—200 时, SPGD 算法处于闭环状态. 可以看到在理想情况下 (不存在噪声时), SPGD 算法闭环后的 SMF 耦合效率 η 能够接近理论极限 (81.45%), 几乎不存在振荡, 并且收敛的速率最快.

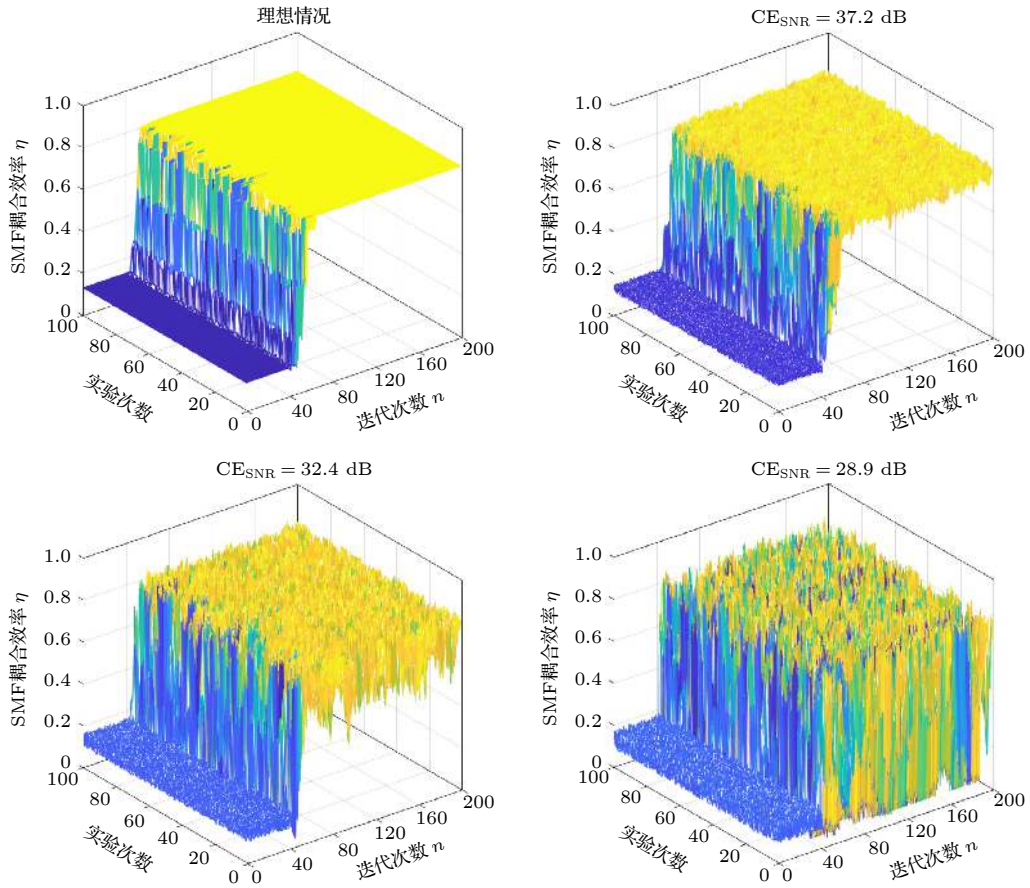


图 5 SMF 耦合效率迭代曲线

Fig. 5. Iteration curves of the SMF coupling efficiency.

随着 CE_{SNR} 的数值减小, 闭环后的耦合效率 η 的均值在不断的减小, 振荡开始增大, 同时收敛速率也在逐渐变慢. 当 CE_{SNR} 减小至 28.9 dB 时, 闭环后 η 的起伏范围几乎涵盖了 0 至 81.45%, 这在通信系统中将会引起大量的误码.

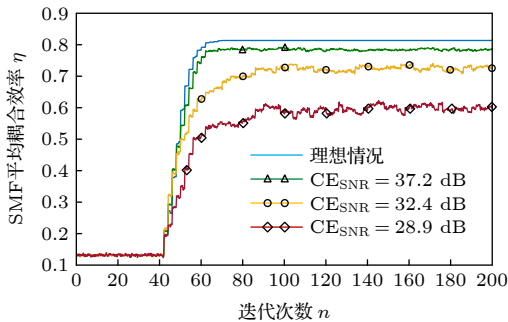


图 6 SMF 平均耦合效率迭代曲线

Fig. 6. Averaged iteration curves of the SMF coupling efficiency.

使用变量 η_{conv} 表示 SPGD 算法闭环后的 SMF 耦合效率, 可以绘制出 η_{conv} 的均值及均方差随

CE_{SNR} 的详细变化曲线, 如图 7 所示. 其中 CE_{SNR} 的变化范围为 68.9—28.9 dB.

图 7 的仿真结果显示: 当 CE_{SNR} 大于 54.9 dB 时, η_{conv} 的均值非常接近 81.45%, 同时均方差也非常接近于 0. 这代表 AFC 装置的闭环性能几乎没有受到影响. 随着 CE_{SNR} 的降低, η_{conv} 的均值开始降低, 同时均方差开始增加. 通常情况下, 要求闭环耦合效率的均值不低于理论极限的 90%, 即 73.26%. 从图 7(a) 可以看出, 该条件对应的 CE_{SNR} 的最小数值为 32.5 dB. 当 CE_{SNR} 小于该数值时, η_{conv} 的均值开始快速下降, 同时均方差开始快速增大.

除上述影响之外, 光电探测噪声还会显著降低 SPGD 算法的收敛速率, 继而降低 AFC 装置的闭环带宽 f_s . 此处, 使用 (10) 式来估算 f_s :

$$f_s \approx \frac{1}{t_{conv}} = \frac{1}{T_{spgd} \cdot n_{conv}}, \quad (10)$$

式中, t_{conv} 为 SPGD 算法收敛时间, T_{spgd} 为 SPGD 算法迭代间隔; n_{conv} 为 SPGD 算法收敛步数, 定

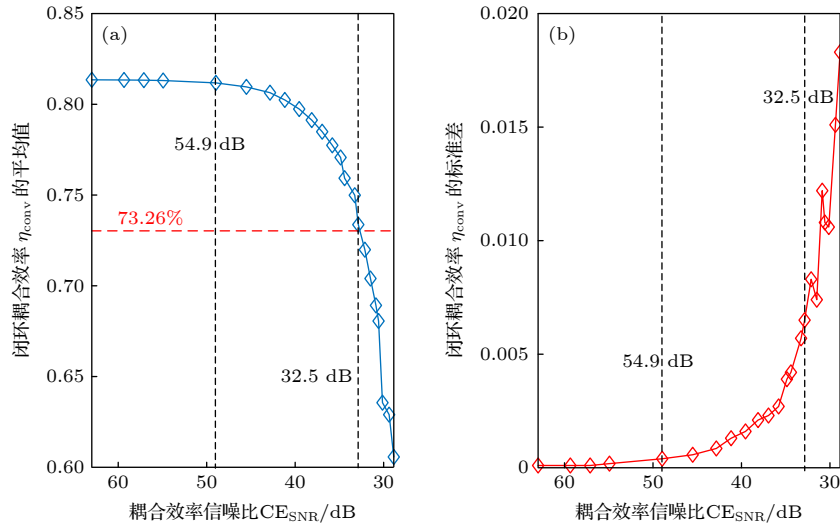


图 7 闭环耦合效率统计特征与耦合效率信噪比的关系 (a) 均值; (b) 均方差

Fig. 7. Relationship between the statistical character of the converged SMF coupling efficiency and the value of CE_{SNR} : (a) Mean; (b) standard deviation.

义为耦合效率首次上升至最优值的 90% (即 73.26%) 所对应的平均迭代次数. AFC 装置的闭环带宽 f_s 随 CE_{SNR} 的变化曲线如图 8 所示, 其中 CE_{SNR} 的数值变化范围为 68.9—32.5 dB.

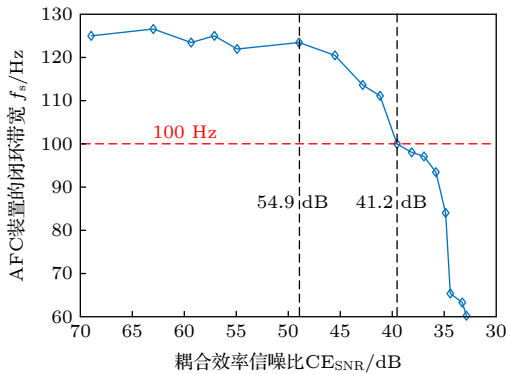


图 8 AFC 装置闭环带宽与耦合效率信噪比的关系

Fig. 8. Relationship between the control band width of AFC system and the value of CE_{SNR} .

理想情况下, η 需要平均迭代 16 次才能上升至最优值的 90%, 对应的闭环带宽 f_s 大约为 125 Hz. 从图 8 中可以看出, 当 CE_{SNR} 大于 54.9 dB 时, f_s 始终在 125 Hz 附近起伏, 这代表着 AFC 装置的闭环带宽几乎没有受到影响. 当 CE_{SNR} 小于 54.9 dB 时, f_s 开始下降. 通常情况下, 大气湍流引起的波前倾斜像差的特征频率在 100 Hz 以内. 根据图中曲线的交点可知, 为了保证 AFC 装置的湍流补偿效果, CE_{SNR} 数值不能低于 41.2 dB.

4.3 实验结果分析

4.2 小节仿真分析了光电探测噪声 (CE_{SNR} 数值) 对 AFC 装置的闭环平均耦合效率、闭环精度、以及闭环带宽的影响. 从结果中可以总结出:

- 1) 当 CE_{SNR} 大于 54.9 dB 时, AFC 装置的闭环性能几乎不受任何影响;
- 2) 当 CE_{SNR} 位于 41.2 dB 和 54.9 dB 之间时, AFC 装置能够对大气湍流引起的动态 SMF 对准偏差进行有效补偿, 同时其闭环平均耦合效率能够达到理论极限的 90% 以上;
- 3) 当 CE_{SNR} 位于 32.5 dB 和 41.2 dB 之间时, AFC 装置无法有效补偿大气湍流的影响, 但是在静态的 SMF 对准偏差下其闭环平均耦合效率仍能够达到理论极限的 90% 以上;
- 4) 当 CE_{SNR} 小于 32.5 dB 时, AFC 装置无法补偿任何 SMF 对准偏差.

在实际的 AFC 装置中, 上述 CE_{SNR} 的数值可以换算至空间入射光功率 P_{in} . 对于光电探测器来说, 其探测噪声水平通常使用噪声等效功率 (NEP) 来描述. 为了使得 CE_{SNR} 大于 54.9 dB, 入射空间光功率 P_{in} 需要满足以下条件:

$$P_{in} \geq 555.9 \times \frac{NEP}{K}. \quad (11)$$

为了使得 CE_{SNR} 大于 41.2 dB, P_{in} 需要满足:

$$P_{in} \geq 114.8 \times \frac{NEP}{K}. \quad (12)$$

为了使得 CE_{SNR} 大于 32.5 dB, P_{in} 需要满足:

$$P_{\text{in}} \geq 42.17 \times \frac{\text{NEP}}{K}. \quad (13)$$

假设光电探测器的 NEP 为 10^{-10} W, 光纤分数比 K 为 0.01. 那么可以计算出上述公式对应的 P_{in} 的最小值分别为 5.559 mW, 1.148 mW, 42.17 mW. 显然的, 上述公式也可以用来根据实际入射空间光功率 P_{in} 来指导 AFC 装置的设计.

5 结 论

AFC 装置能够将空间通信光束高效、稳定的耦合进 SMF 中, 这对 FSOC 系统来说至关重要. 然而, AFC 装置的闭环性能会受到光电探测噪声的严重干扰, 限制了其在长距离、强大气湍流环境下的 FSOC 系统中的进一步应用. 本文理论分析了光电探测噪声的作用机理, 建立了相应的噪声评价指标 (耦合效率信噪比 CE_{SNR}), 同时通过数值仿真的方式详细分析了 AFC 装置闭环性能受到的影响. 实验结果表明: 光电探测噪声会对 AFC 装置的闭环平均耦合效率、闭环精度、以及闭环带宽产生严重影响. 当 CE_{SNR} 的数值大于 54.9 dB 时, 噪声对 AFC 装置的干扰可以几乎忽略不计; 当 CE_{SNR} 的数值位于 41.2—54.9 dB 之间时, AFC 装置能够对大气湍流引起的动态 SMF 对准偏差进行有效补偿; 当 CE_{SNR} 位于 32.5 dB 和 41.2 dB 之间时, AFC 装置仅能有效补偿静态 SMF 对准偏差; 当 CE_{SNR} 小于 32.5 dB 时, AFC 装置无法有效补偿任何 SMF 对准偏差.

在不同的 CE_{SNR} 数值下, 文章给出了入射空间光功率与 AFC 装置的光学及电学参数间的不等式关系. 在实际的 FSOC 系统中, 该式可以用来根据入射空间光功率的范围计算出 AFC 装置中光电探测器的噪声等效功率以及光纤分束比需满足的条件, 也可以根据 AFC 装置的相关参数计算出空间光功率需满足的范围. 值得关注的是, 为了降低 AFC 装置对入射空间光功率的需求, 目前只能通过更换灵敏度更高的光电探测器以及更大分束比的 SMF 分束器来解决. 毫无疑问, 这样做会直接降低光电探测器的有效带宽, 同时减小通信光端机处的光功率. 因此, 为了消除 (或尽可能补偿) 光电探测噪声的影响, 后续工作中需要结合相应的弱信号检测及估计技术, 研究复杂光束传输场景下

的 SPGD 算法的优化梯度提取算法, 从而在根本上保证 AFC 装置的闭环性能.

参考文献

- [1] Hemmati H 2006 *Deep Space Optical Communications* (Hoboken: John Wiley & Sons Press) pp1–5
- [2] Toyoshima M, Leeb W R, Kunimori H, Takano T 2007 *Opt. Eng.* **46** 015003
- [3] Jiang H L, Tong S F 2010 *The Technologies and Systems of Space Laser Communication* (Beijing: National Defense Industry Press) pp1–21 (in Chinese) [姜会林, 佟首峰 2010 空间激光通信技术与系统(北京: 国防工业出版社) 第1—21页]
- [4] Zhao S H, Wu J L, Li Y J, Wang X, Ma L H, Han Z X 2011 *Laser Optoelectron. Prog.* **48** 28 (in Chinese) [赵尚弘, 吴继礼, 李勇军, 王翔, 马丽华, 韩仲祥 2011 激光与光电子学进展 **48** 28]
- [5] Mai V V, Kim H 2019 *IEEE P. J.* **11** 7902213
- [6] Zhao X Q, Hou X, Zhu F A, Li T, Sun J F, Zhu R, Gao M, Yang Y, Chen W B 2019 *Opt. Express* **27** 23996
- [7] Hu Q, Zhen LL, Mao Y, Zhu S W, Zhou X, Zhou G Z 2020 *Opt. Express* **28** 13141
- [8] Dikmelik Y, Davidson F M 2005 *App. Opt.* **44** 4946
- [9] Toyoshima M 2006 *J. Opt. Soc. Am. A.* **23** 2246
- [10] Ma J, Zhao F, Tan L Y, Yu S Y, Han Q Q 2009 *App. Opt.* **48** 5184
- [11] Carhart G W, Vorontsov M A, Beresnev L A, et al. 2005 *Proceedings of SPIE-Free-Space Laser Communications V* Bellingham, USA, September 12, 2005 p589211
- [12] Vorontsov M A 2005 *Proceedings of SPIE-Target-in-the-Loop: Atmospheric Tracking, Imaging, and Compensation II* Bellingham, USA, August 23, 2005 p589501
- [13] Beresnev L A, Vorontsov M A 2005 *Proceedings of SPIE - Target-in-the-Loop: Atmospheric Tracking, Imaging, and Compensation II* Bellingham, USA, August 23 2005 p58950 R
- [14] Weyrauch T, Vorontsov M A, Carhart G W, Simonova G V, Beresnev L A, Polnau E E 2007 *Proceedings of SPIE-Atmospheric Optics: Models, Measurements, and Target-in-the-Loop Propagation* San Diego, CA, September 25, 2007 p67080 R
- [15] Geng C, Luo W, Tan Y, Liu H M, Mo J B, Li X Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 224202 (in Chinese) [耿超, 罗文, 谭毅, 刘红梅, 牟进博, 李新阳 2013 物理学报 **62** 224202]
- [16] Geng C, Zhang X J, Li X Y, Rao C H 2011 *Infrar. Laser Eng.* **40** 1682 (in Chinese) [耿超, 张小军, 李新阳, 饶长辉 2011 红外与激光工程 **40** 1682]
- [17] Geng C, Li X Y, Zhang X J, Rao C H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 034204 (in Chinese) [耿超, 李新阳, 张小军, 饶长辉 2012 物理学报 **61** 034204]
- [18] Luo W, Geng C, Li X Y 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 0606001 (in Chinese) [罗文, 耿超, 李新阳 2014 光学学报 **34** 0606001]
- [19] Luo W, Geng C, Wu Y Y, Tan Y, Luo Q, Liu H M, Li X Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 014207
- [20] Huang G, Geng C, Li F, Yang Y, Li X Y 2018 *IEEE P. J.* **10** 7904212
- [21] Rui D M, Liu C, Chen M, Xian H 2018 *Opto-Electronic Eng.* **45** 170647 (in Chinese) [芮道满, 刘超, 陈莫, 鲜浩 2018 光电工程 **45** 170647]
- [22] Geng C, Li F, Zuo J, Liu J Y, Yang X, Yu T, Jiang J L, Li X Y 2020 *Opt. Lett.* **45** 1906

- [23] Chen M, Liu C, Rui D M, Xian H 2019 *Opt. Comm.* **430** 223
[24] Rao R Z 2005 *Light Propagation in the Turbulent Atmosphere* (Hefei: Anhui Science & Technology Press) p164 (in Chinese)
[饶瑞中 2005 光在湍流大气中的传播 (合肥: 安徽科学技术出版

- 社) 第164页]
[25] Fan M W, Huang L H, Li M, Rao C H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 024209 (in Chinese) [凡木文, 黄林海, 李梅, 饶长辉 2016 物理学报 **65** 024209]

Influence of photoelectric conversion noise on closed-loop performance of adaptive SMF coupling device^{*}

Huang Guan¹⁾ Geng Chao^{2)3)†} Li Feng²⁾³⁾ Li Xin-Yang²⁾³⁾

Lv Guo-Yun^{1)‡} Fan Yang-Yu¹⁾

1) (*School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China*)

2) (*The key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

3) (*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

(Received 1 April 2021; revised manuscript received 10 July 2021)

Abstract

The single-mode fiber (SMF) adaptive coupling device can efficiently and stably couple the space laser into SMF, which plays an important role in the fiber-based free space optical communication (FSOC) technology. Therefore, a novel corrector named adaptive fiber coupler (AFC) is developed and successfully used in the adaptive SMF coupling applications. However, in the FSOC system under long-range turbulent atmosphere, the closed loop performance of AFC will be seriously disturbed by the photoelectric conversion noise. This problem is studied in depth in this paper. The operational principle of the photoelectric conversion noise is analyzed, and the corresponding evaluation index is given. Furthermore, The numerical simulation experiments are conducted to study the specific influence of the photoelectric conversion noise. The results show that the averaged closed-loop coupling efficiency, control accuracy, and control bandwidth of AFC are seriously affected. According to the results, the empirical formula is given. This formula can be used to calculate the optical and electrical parameters that the AFC device should meet under the condition of strong noise interference. The theoretical and simulation results in this paper can provide a theoretical basis for designing the AFC device under long-range turbulent atmosphere.

Keywords: free space optical communication, adaptive SMF coupling device, stochastic parallel gradient descent algorithm, photoelectric conversion noise

PACS: 42.79.Sz, 42.79.Gn, 42.68.Bz, 85.60.Gz

DOI: 10.7498/aps.70.20210615

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62005286).

† Corresponding author. E-mail: blast_4006@126.com

‡ Corresponding author. E-mail: lvguoyun101@nwpu.edu.cn