



·激光大气传输技术·综述·

西安理工大学无线光通信系统自适应 光学技术研究进展*

柯熙政^{1,2}, 杨尚君¹, 吴加丽¹, 钟禧瑞¹

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048; 2. 陕西理工大学 物理与电信工程学院, 陕西 汉中 723001)

摘 要: 总结了国内外自适应光学技术在无线光通信系统应用中的研究进展和技术分类, 同时介绍了西安理工大学在该领域的工作, 包括有波前测量的自适应光学系统、无波前测量的自适应光学系统、液晶空间光调制器波前校正、偏摆镜和变形镜组合的波前校正、空间光光纤耦合自适应光学波前校正等。自适应光学技术可有效修正无线光通信系统中由大气湍流引起的畸变波前, 提高耦合效率和通信性能。虽然这些方法在理论分析和工程实际中尚不完善, 但不失为人们在该领域进行的有益探索。

关键词: 无线光通信; 自适应光学; 大气湍流; 波前畸变; 波前校正

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210167

Research progress of adaptive optics in wireless optical communication system for Xi'an University of Technology

Ke Xizheng^{1,2}, Yang Shangjun¹, Wu Jiali¹, Zhong Xirui¹

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. College of Physics and Electronics, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China)

Abstract: In chronological order, this paper summarizes the research progress and technical classification of adaptive optics technology in the application of wireless optical communication system at home and abroad. Then it introduces the work of Xi'an University of Technology in this field, including adaptive optics system with wavefront measurement, adaptive optics system with wavefront-less measurement, wavefront correction of liquid crystal spatial light modulator, wavefront correction of the combination of tilt mirror and deformable mirror, spatial optical fiber coupling adaptive optical wavefront correction, etc. The adaptive optics technology can effectively correct the distorted wavefront caused by atmospheric turbulence and improve the coupling efficiency and communication performance in wireless optical communication. Although these methods are not perfect in theoretical analysis and engineering practice, they can be regarded as useful exploration in this field.

Key words: wireless optical communication; adaptive optics; atmospheric turbulence; wavefront distortion; wavefront correction

自适应光学是一门集光机电为一体的综合科学, 可以抑制激光信号在大气湍流传输中的扰动^[1], 是研究实时改善光波波前质量的理论、系统、技术和工程, 它涵盖了光学、通信、控制、计算机、机械等多门学科的知识, 旨在实时校正光束在传播过程中由于外部环境改变所造成的随机波前畸变, 实现光束质量自动改善。自 1953 年 Babcock 提出自适应光学概念以来^[2], 该技术已经在天文观测^[3]、人眼成像及视觉研究^[4]、惯性约束核聚变^[5]等领域得到了广泛的应用。

无线光通信是以激光为载体进行音频、视频、图像等信息传输的新型光通信技术。它具有体积小、抗电磁干扰能力强等优点, 可有效打破传统微波通信中传输速度的限制, 实现海量数据的同步传输。无线光通信以大气为

* 收稿日期: 2021-05-01; 修订日期: 2021-07-25

基金项目: 陕西省科研计划项目 (18JK0341); 陕西省重点产业创新项目 (2017ZDCXL-GY-06-01); 西安市科技计划项目 (2020KJRC0083)

作者简介: 柯熙政 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事无线光通信方面的研究。

通信作者: 杨尚君 (1991—), 男, 博士研究生, 主要从事无线光通信方面的研究。

传输介质,通信质量会受到大气湍流的影响。激光信号传播过程中,其波前受湍流影响产生随机起伏,引起光束扩展、到达角起伏、光束弯曲及漂移等现象,严重干扰了接收光信号的质量,从而导致通信误码率增加,通信稳定性降低。此外,随着通信距离的增长,激光器输出功率也逐步提升,激光器腔镜会发生热变形,从而引起激光波前产生相位畸变,导致光束质量下降,即通信质量降低。因此,寻找一种抑制大气湍流影响提高激光通信质量的方法,将自适应光学技术应用于无线光通信系统^[6],对抑制大气湍流的影响具有极大的潜力。

1 国外研究进展

早在1972年,美国光学科学公司Fried等人便已成功将自适应光学技术引入无线光通信系统中,自适应光学单元可以实时校正大气湍流引起的波前畸变^[7]。

1996年,美国北卡罗来纳大学Tyson分析了强度调制/直接检测(IM/DD)模式下光强起伏与误码率之间的关系^[8-9],在大气湍流强度 $D/r_0=0.8$ 时,系统误码率由波前相位校正前的 2.3×10^{-3} 降至校正后的 5.5×10^{-4} ^[10]。

2002年,美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室Wilks等人进行了传输速率为10 Gbps,传输距离为28.2 km的光通信数值仿真,波前经校正后,由空间光到光纤的耦合效率由20%提高到55%^[11]。该实验平台采用400单元的微机械(MEMS)变形镜和采样频率为1 kHz的波前探测器,分别进行了水平链路和斜程链路的地面空间激光通信实验,经校正后波前均方根值(RMS)残差为 0.75λ ^[12]。

2004年,美国马里兰大学Thomas等人利用倾斜镜校正倾斜像差,用132单元MEMS变形镜校正其余像差,高阶像差校正后,接收到的信号强度比仅校正倾斜像差时提高2倍^[13-14]。

1990年起,喷气推进实验室(JPL)Wright等人用1064 nm波长的激光器搭建了基于自适应光学的无线光通信实验平台,当系统传输速率为100 Mbps时,接收端接收到的信号经波前校正后增益大约增大6 dB^[15]。2006年,JPL的Hemmati等人采用变形反射镜对接收到的波前畸变进行主动自适应光学补偿。接收孔径为0.3 m,入射光束波长为632 nm,波前畸变均方根误差从 1.4λ 减小到 0.05λ ,斯特列尔比(SR)从0.08%提高到89%^[16]。2010年,JPL的Wilson等人进行了火星深空激光通信演示实验,通信波长为1064 nm,通信调制方式为脉冲位置调制。该通信系统中的自适应光学系统采用635 nm波段作为信标进行波前探测和校正,通信速率为100 Mbps,经校正后误码率降低了3 dB^[17-18]。

2013年,美国国家航天局Stewart等人开展了地球和月球间的激光通信实验验证,该系统利用MEMS变形镜获得了SR为0.6的校正结果^[19]。

2015年JPL的Wright等人在光通信望远镜地面观测站测试了自适应光学系统,该系统与国际空间站实现了下行50 Mbps的视频传输,卫星接收到的光束经校正后SR从0.03提升至0.66^[20]。

2008年,约翰斯霍普金斯大学应用物理实验室和AOptix技术公司合作演示了147 km的长距离双向射频和无线光相结合的通信实验,采用强度调制,传输速率达10 Gbps,采用发射端预校正和接收端校正的方式提高了SR和单模光纤(SMF)的耦合效率。该系统包括一个35个驱动器的可变形反射镜,以提供大于1 kHz的高带宽,除了倾斜和聚焦项外,还提供30个Zernike像差的闭环校正^[21]。

2010年5月,欧洲航天局Heine等人完成了星地激光通信地面站自适应光学系统的安装及调试,工作波长为1064 nm,传感器为88子孔径哈特曼传感器,12×12单元微机械式变形镜控制单元,使用高速红外相机采集后,最大子孔径图像的采样频率可达20 kHz^[22-24]。

2011年欧洲航天局Gregory等人使用西班牙1 m口径的光学地面站进行了星地激光通信自适应光学校正实验,该自适应光学系统使用的通信波长为1064 nm,校正后SR可提高到0.4以上^[25]。

1995年,日本邮政省Arimoto等人开展了地面到国际空间站的激光通信研究,利用地面端自适应系统补偿信号光的波前畸变后,下行链路的耦合功率由-58.9 dBm提升至-51.9 dBm^[26]。

1999年,日本邮政省Kudielka等人进行了空间站和地面间的激光通信实验。在完成倾斜等低阶像差的校正后,光功率与校正前相比提升约2.3 dB的增益^[27]。2016年, Petit等人使用地面光学接收端、小型光通信终端和卫星激光通信终端进行了含自适应光学校正的激光通信实验,误差抑制带宽不足60 Hz^[28]。

2014年,巴基斯坦国立科学技术大学Hashmi等人在实验室进行了星间自适应光学通信数值模拟实验,在中等背景噪声、强湍流条件下,经过自适应光学修正后,SR从0.30提高到0.75^[29]。

2016年印度坦哈维尔国王工程学院Pasupathi等人进行了传输距离为940 m的无波前探测通信自适应校正实验,利用成像光斑的SR为评价指标,经1364次迭代后,波前相位的均方根值由校正前的 10^1 降至 10^{-6} ^[30]。

2019年,德国航空航天中心 Carrizo 等人通过迭代更新单个焦平面散斑的相位来校正波前相位,从而使耦合到单模光纤中的功率最大化。实验结果表明:在强湍流条件下,在不到 60 次功率测量的迭代情况下提供了大约 4 dB 的功率增益^[31]。

2019年,德国夫琅禾费应用光学与精密工程研究所 Brady 等人对大视场角下的自适应光学预补偿进行了实验研究。计算出平均等平面角为 0.16 mrad,而在 0.13~0.27 mrad 的范围内,通过预补偿可以提高接收光功率^[32]。

2020年,土耳其坎卡亚大学 Baykal 等人将自适应光学技术应用于脉冲相位调制的海洋无线光通信系统用于修正畸变波前降低误码率,计算表明:温度与盐度之比对折射率谱和均方温度耗散率的贡献减小,单位质量流体动能耗散率增大,即海洋湍流减弱,这将导致自适应光学校正更加有效^[33]。

2020年,德国夫琅禾费光电研究所 Toselli 等人从理论上研究了海洋湍流对高斯光束自适应光学校正的有效性,当校正前 15 个模式,并且收发器的孔径足够大以捕获海洋湍流影响光束的 4~5 个散斑时,光强闪烁因子减少了 7 倍^[34]。

2020年,巴黎萨克雷大学 Paillier 等人针对采用自适应光学技术和数字锁相环结构的空地相干光链路建立了精确的数值模型,将自适应光学技术和数字锁相环相结合,是解决星地相干无线光通信链路中载波频率和相位跟踪问题的一种简单、可靠的方法^[35]。

2021年,土耳其奥斯汀科技大学 Ata 等人将自适应光学技术引入自然湍流的水下光通信领域,理论计算表明:即使采用自适应光学技术,水下无线光通信系统仍会受到区域和季节平均值以及水体折射率波动的严重影响^[36]。

2021年,英国杜伦大学 Osborn 等人对采用自适应光学进行预补偿的自由空间光通信上行链路针对地轨道和同步轨道卫星通信进行了研究,计算结果表明:除了小发射孔径和极低信噪比情况下,自适应光学对上行链路进行预补偿后可降低衰落和误码率^[37]。

自适应光学研究从 1953 年开始至今,研究方向从最初的激光传输和天文观测扩展到人眼成像、惯性约束聚变、激光加工等多个方面。研究重点也从天文成像观测转至激光通信。校正效果评价指标从单一的图像分辨率极限、波前峰谷值(PV)、波前均方根值等光学指标向耦合功率、通信误码率等通信指标方面扩展。而将自适应光学技术应用于无线光通信领域,在理论方面由最初的简单数值计算^[10-11],如倾斜像差校正^[13],发展到如今的复杂数值计算,如与数字锁相环相结合^[36]、水下光通信波前校正^[33]、星地激光通信上行链路的预校正^[37-38];实验方面,由最初的近距离波前校正^[7,30],远距离近地面波前校正^[21],发展到星地激光通信下行链路^[19-20]、上行链路等实验研究^[25];而对于传输介质方面,最初的校正通常采用模拟湍流的方法^[15-16],发展到实测大气湍流进行校正^[26-28,39],逐步发展到如今的海洋湍流波前校正^[36]。

2 国内研究进展

1979年,中国科学院光电技术研究所姜文汉院士为代表的科研团队,在我国首先开拓自适应光学方向,建立整套基础技术并研制多代具有国际先进水平的系统。该团队在自适应光学和光束控制两方面均作出重大贡献:用于“神光”高功率激光装置的“19 单元波前校正系统”是国际同类装置中最先实用的;“21 单元自适应学系统”使我国成为世界上第三个实现星体目标实时校正成像的国家;与北京天文台合作建立的“2.16 米望远镜红外自适应光学观测系统”使我国拥有了世界上为数不多的实用近红外波段的自适应光学观测系统;37 单元和 61 单元两套自适应光学系统已分别实现水平和斜程大气湍流补偿^[40-42]。

2008年,中国科学院光电技术研究所杨慧珍对采用随机并行梯度下降算法(SPGD)的自适应光学系统进行了理论分析,远场光斑的灰度值由校正前的 20 提升至校正后的 230。但受相机采样频率的制约,仅能校正静态或缓慢变化的像差^[43]。

2008年,长春理工大学李欢等人分析了自适应光学系统中时间带宽与空间带宽的匹配问题。当 $D/r_0=6$ 时,补偿后光强可达到衍射极限的约 50%,在 $D/r_0=2$ 时,光强衍射极限可达到约 90%。在强湍流大气中要获得满意的补偿效果就必须大量增加执行元件的数目^[44]。

2010年,电子科技大学夏利军等人在相同实验条件下,在保持链路误码率为 1×10^{-6} 时,自适应光学技术使发射功率减小了 50%^[45]。

2011年,中国科学院自适应光学重点实验室武云云等人采用自适应光学技术校正波前像差,通信方式采用 IM/DD,使用芯径为 62.5 μm 的多模光纤(MMF)时,经校正后误码率由 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 降至 10^{-6} 以下;使用芯径为 10 μm 的 SMF 时,可以很明显地观测到接收端信号的深度衰落现象,且衰落程度与误码率相关。自适应光学闭环后,深

度衰落得到了抑制,系统的误码率由开环的 10^{-3} 降至 10^{-12} [46]。

2010年,哈尔滨工业大学韩立强等人针对 Gamma-Gamma 分布的大气湍流模型,采用自适应光学进行畸变波前补偿的仿真分析,在仅校正前 5 阶 Zernike 系数情形下,误码率就可由校正前的 10^{-1} 降至校正后的 10^{-6} [47]。

2012年,中国科学院自适应光学重点实验室武云云等人根据理论计算,在同种湍流条件下,发射端采用预校正自适应光学校正相比于接收端校正,校正后的接收光功率分别为 0.56 dBm 和 0.34 dBm,起伏方差分别为 0.022 dBm 和 0.042 dBm。实验结果表明,接收端自适应光学校正后,平均误码率由校正前的 10^{-2} 降至 10^{-5} ;发射端自适应光学校正后,平均误码率由校正前的 10^{-3} 降至 10^{-9} [48]。

2013年,中国科学院上海光学精密机械研究所李佳蔚等人探讨了强湍流条件下自适应光学技术在无线相干光通信链路中应用的最优闭环带宽。当每比特探测到的光子数大于 100 时,Greenwood 频率(畸变波面上高于该频率的位相功率谱的 RMS 值为 1 rad,用于表示湍流的频率特性)足以满足自适应光学系统的伺服带宽。然而,如果每比特光子数小于 70 时,Greenwood 频率仅满足于弱闪烁条件下的闭环带宽。当闪烁指数大于 0.7 时,必须至少将伺服带宽增加到 Greenwood 频率的两倍,才可以满足可接受的误码率指标[49-50]。

2013年,吉林大学刘伟等人计算了激光信号的像差。像差经修正后,空间光到光纤的平均耦合效率由 10.32% 提高到 63.82%,无线光通信系统的平均误码率由 10^{-5} 降低到 10^{-13} ,由于该结果仅仅是模拟仿真,实际中的效果有待进一步验证[51]。

2013年,中国科学院自适应光学重点实验室武云云等人研究了不同大气湍流条件下的波前畸变对于二进制移键控(BPSK)零差相干检测系统的误码率影响。结果显示,大气湍流所引起的像差可以独立于电噪声对误码率产生直接影响。随着信噪比(SNR)的降低,对波前的 PV 值要求更高,当波前相位 PV 值为 1.01 λ 时,系统混频效率仅为 0.17;当波前相位 PV 值为 0.53 λ 时,系统混频效率可达到 0.65[52]。

2014年,吉林大学刘伟等人分析了大气的时域特性对基于自适应光学的无线相干光通信系统混频效率和误码率的影响。仿真结果表明,基于全息等新型波前传感技术能适应弱大气湍流,其残余像差的均方根值小于 0.04 λ ,峰谷值小于 0.25 λ ,光纤耦合效率由近 30% 提高到 70% 以上[53]。

2014年,吉林大学李兆坤等人研究了组合变形镜自适应光学系统以修正波前像差提高耦合效率。仿真结果表明,耦合效率由未校正的 0.05% 提升至单独变形镜分别校正的 77.69% 和 74.42% 以及联合校正的 80.97%[54]。

2014年,吉林大学刘伟等人分析了倾斜和高阶像差对混频效率和误码率的影响。利用倾斜像差的均方根值来估计混频效率的变化。首先通过数值模拟验证了理论分析的正确性,其次设计了双级快速转向镜和 97 单元连续曲面变形镜的实验校正系统。随着 Greenwood 频率的增加,要保证通信质量就需要较高的闭环带宽。当 Greenwood 频率为 160 Hz 时,在具有双级快速反射镜单元的自适应光学系统中,误码率降到了 10^{-9} 以下[55]。

2014年,南加州大学任永雄等人提出了一种采用自适应光学同时补偿多轨道角动量光束在大气湍流中的传输。实验结果表明,湍流影响对相邻模式的串扰降低了 12.5 dB,补偿后系统损失功率提高了 11 dB[56]。

2014年,吉林大学曹景太等人采用 SPGD 算法校正由大气湍流引起的畸变波前,采用无波前探测控制算法修正波前,单模光纤耦合效率由 12% 提高到 80% 以上[57]。

2014年,中国科学院光电技术研究所刘超等人分析了不同大气湍流条件下的无线相干光通信系统的误码率性能。在弱湍流条件下,无线相干光通信系统的误码率主要受指向性误差影响。而在强湍流情况下,高阶像差对通信质量的影响愈发严重,自适应光学系统对高阶波前像差的校正效果也更加明显。以 1550 nm 波长作为通信波段,自适应光学可以使大气湍流强度 D/r_0 由校正前的 1 提升至校正后的 6.5 左右。同时混频效率应大于 0.4,校正后波前残余误差应小于 $\lambda/6$ [58-59]。

2015年,中国科学院光电技术研究所黄健等采用自适应光学系统对无线相干光通信链路中大气湍流引起的波前畸变进行补偿,当 Fried 相干长度为 $r_0=16$ cm 时,接收孔径上的振幅起伏可使平均 SNR 降低 24% 左右[60-61]。

2015年,北京邮电大学李明等人利用自适应光学补偿大气湍流,在具有相同湍流强度的情况下,海上的链路信道相比于陆地会产生更大的误码率[62-63]。

2015年,中国科学院光电技术研究所陈莫等用 137 单元变形镜补偿强湍流引起的波前畸变。当相位均方根值为 0.3 λ 时,SMF 耦合效率由无相位畸变时的 81% 下降到 10%。在强湍流 $D/r_0=15$ 的情形下校正前后系统 SMF 耦合效率由 1.3% 提升至 46.1%[64]。

2016年,南京邮电大学赵胜美等将自适应光学技术和信道编码相结合,利用波前校正的方法来校正相位失

真,并使用信道编码来进一步校正每个轨道角动量(OAM)模式中的误差。仿真结果表明,在大气折射率结构常数约为 $C_n^2=4.5\times 10^{-14} \text{ m}^{-23}$ 时,误码率由原来的 10^{-1} 提升至经编码和波前校正后的 10^{-3} [65]。

2018年,中国科学院光电技术研究所陈莫等在137单元连续曲面变形镜自适应光学单元的SMF耦合系统设计的基础上,分析了大气湍流对无线相干光通信系统具有严重的影响,采用自适应光学补偿后,相干通信的误码率低于 10^{-6} ,与未经校正的误码率相比有明显下降[66]。

2018年,中国科学院自适应光学重点实验室芮道满等报道研发多套不同口径的自适应光学地面站,实现了根据链路特性设计自适应光学系统的规模、排布形式和探测校正模块性能,在较强大气湍流下保证信号光至单模光纤的高效耦合[67]。

2019年,中国科学院长春光学精密机械研究所杨乐强等人研究了相干无线相干光通信系统的性能改进,使用了一个大规模的高速自适应光学系统和一个349单元连续表面变形镜。在相干无线光通信系统中采用更大规模的高速自适应光学技术后,当Greenwood频率在70 Hz时,采用349单元变形镜自适应光学闭环后误码率可接近 10^{-9} ,而97单元变形镜误码率仅能达到 10^{-6} [68]。

2019年,北京邮电大学常欢等人提出了一种基于自适应光学的相位恢复算法校正方法,以补偿海洋湍流引起的轨道角动量光束畸变。仿真结果表明,在海洋信道中,基于相位恢复算法的自适应光学技术可以有效地补偿轨道角动量波束的畸变,提高系统的误码率性能[69]。

2020年,中国科学院自适应光学重点实验室芮道满等研究了在不同湍流强度下,自适应光学补偿下的SMF耦合效率的统计分布。在湍流强度 $D/r_0=7$ 时,光束波前均方根值由0.42减小到0.04。同时,耦合效率平均由2.2%提高到35.4%。此外,自适应光学校正有助于大概率地提高SMF的耦合效率[70]。

2020年,北京邮电大学常欢等人提出了一种基于单光强测量相位恢复算法的自适应光学技术来补偿轨道角动量光束的波前畸变。计算结果表明:单强度测量相位恢复算法相比于双强度测量相位恢复算法在基于自适应光学的轨道角动量无线光通信领域具有更好的鲁棒性[71]。

2020年,吉林大学顾海军等人将卷积神经网络与随机并行梯度下降算法相结合提高空间光到光纤的耦合效率,计算结果表明:当斯特列尔比为0.9,SPGD算法需要迭代数百次,而卷积神经网络与随机并行梯度下降算法的结合算法只需要迭代十几次甚至几次。SPGD算法所需的收敛时间几乎是混合算法的8倍[72]。

2021年,长春理工大学蒋伦在1 km实验链路上开展了采用自适应光学技术提高单模光纤耦合效率,实验结果表明:SMF耦合效率由自适应光学开环状态下的5%提升至闭环后的10%~25%[73]。

2021年,苏州大学张深等人为了避免湍流振幅引起的波前畸变超过Shack-Hartmann波前传感器的测量范围,提出了无波前传感器和Shack-Hartmann波前传感器相结合的方法来扩大探测范围。在校正之后,通信误码率从 10^{-1} 降至 3×10^{-6} ,点图的相关性从0.6提高到0.94[74]。

国内方面,有关自适应光学的技术研究通常依托于大型课题项目,然而针对独立的自适应光学技术缺乏全面深入的研究,相比于国际水平略有差距。国内将自适应光学技术应用于无线光通信领域,通常以数值计算仿真为主,数值计算方面主要涉及了光纤耦合[56]、闭环带宽[49-50]、预校正[48]、多校正器组合[54]、海洋湍流等方面[69],受实验器材以及实验场地等诸多条件的限制,仅有为数不多的科研单位开展了相关实验,如中国科学院光电技术研究所等[58-59, 64, 75],实验规模相比于发达国家也具有一定的差距[76]。同时大气湍流的不确定性、系统自身的复杂度、信号捕获追踪精度、研究时长等都是制约我国自适应光学发展的重要因素。

3 西安理工大学无线光通信领域自适应光学技术研究进展

近年来,西安理工大学在激光在大气湍流中的传输特性[77-78]、无线激光通信系统的编解码[79]、无线光副载波调制、信道估计与均衡[80]、对准跟踪捕获技术、外差相干探测技术及光学收发系统的设计、光正交频分复用调制和光多输入多输出体制研究[81-82]、复杂环境和复杂系统下无线光传输理论与技术[83]等空间光通信关键技术领域进行了深入的理论和实验验证,并取得了令人欣慰的成绩[84-85]。2016年,已成功研制出基于IM/DD的调制和探测方式的整机重量不超过8 kg的FSO通信系统终端,该终端具有标准以太网数据接入能力,能完成双工数据、语音和图像的可靠传输。

从2017年开始,西安理工大学开展了超远距离传输的无线光通信系统研究[86],进行了差分BPSK调制相干探测系统实验[87-92]。图1为西安理工大学无线光通信100 km实验链路,图2为相干光通信接收天线实物图。



Fig. 1 Diagram of 100 km of Xi'an University of Technology wireless optical communication experimental link

图 1 西安理工大学无线光通信 100 km 实验链路图



Fig. 2 Photo of internal structure of wireless coherent optical communication

图 2 无线相干光通信内部结构实物图

基于外差探测的空间相干光通信实验链路位于青海湖两端,发射端位于青海湖二郎剑南山,接收端位于青海湖泉吉乡。发射端由激光光源、电光调制器、光纤放大器、发射天线、粗瞄准平台和微瞄准平台等器件构成。发射天线为开普勒透射式光学天线。粗瞄准平台、微瞄准平台和光学天线调焦系统构成复合轴连动焦距调节结构实现光束的对准跟踪捕获。接收端主要由接收天线、自适应光学系统、以及相干检测系统等器件组成。其中接收天线为卡塞格林反射式接收天线。偏摆镜、变形镜和波前传感器构成自适应光学系统完成光信号的修正。激光经波前修正后,经光纤耦合进入混频器和平衡探测器,与本振光混频后完成电信号的恢复。

激光波前经远距离的传输后,受青海湖上空大气的湍流使得光斑完全破碎,强湍流引起光强闪烁使得采样点不完整导致波前重建困难,直接导致数据采集并非具有连续性。波前相位畸变量大且变化速率快,依据所采集的波前数据,通过哈特曼波前测量法,计算得到大气相干长度为 1.3 cm。

当发射端采用 0 dBm 的功率进行光束发射时,接收端耦合进入单模光纤的功率约为 -40.33 dBm,其隔离度约为 40 dB。随着光纤放大器输出功率的增大,耦合进入光纤的功率增大,且双重发射的耦合光功率要高于单独发射的光功率,同时在相同功率输出的情况下,双重发射情况下的耦合功率的方差值要小于单独发射耦合功率方差值,说明采用多发的结构能够有效地抑制大气湍流所引起的光强闪烁以及耦合功率的起伏。

针对无线光通信系统的自适应光学领域,西安理工大学开展了有波前测量的自适应光学系统、无波前测量的自适应光学系统、液晶空间光调制器波前校正、偏摆镜和变形镜组合的波前校正、空间光光纤耦合自适应波前校正等方面的研究,其研究内容结构如图 3 所示。

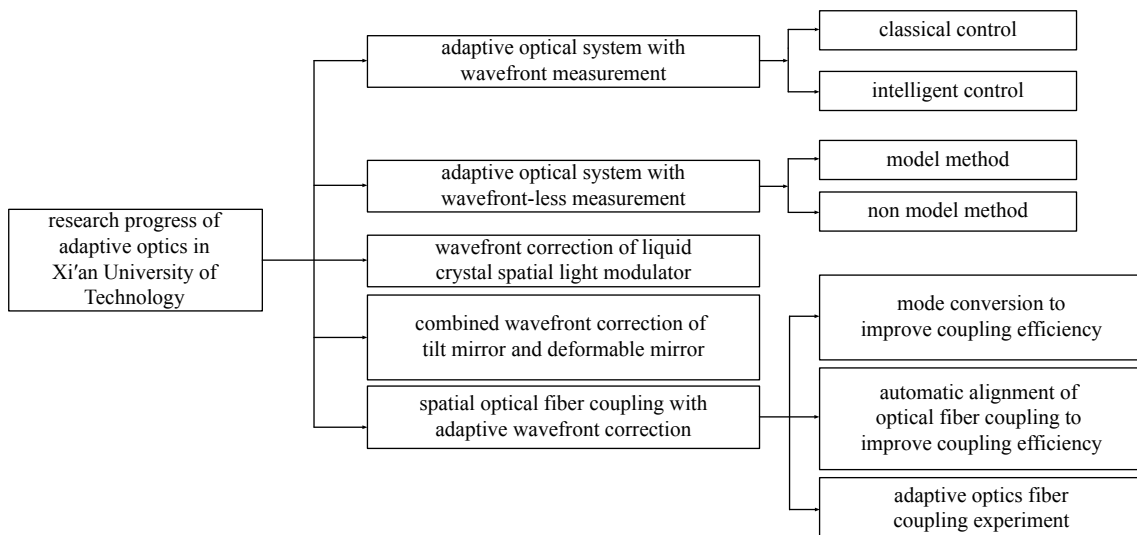


Fig. 3 Structure of adaptive optics research content

图 3 自适应光学研究内容结构图

3.1 有波前测量的自适应光学系统

自适应光学系统主要可分为无波前测量型和有波前测量型。图4为有波前探测型自适应光学系统原理图。其中，波前传感器实时测量波前误差，并把测量到的波前误差传送给波前控制器；波前控制器接收来自波前传感器的畸变光束信息，并通过一定算法计算、获取波前校正器的控制电压；波前校正器接收来自波前控制器的控制电压，校正波前畸变，提升通信质量。图5为西安理工大学所设计的有波前自适应光学系统光路图。

推拉法作为传统的标定方法，依次对变形镜施加推和拉的指令，完成响应矩阵(IM)计算^[93]。图6为在推拉法求解响应矩阵过程中驱动第10个驱动器驱动下变形镜产生的面型图形以及波前传感器采集的斜率图形。图7(a)为传统推拉法所计算的响应矩阵。

通过Hadamard矩阵构建发送电压矩阵作用于变形镜，虚拟若干个驱动器，实现基于Hadamard矩阵的响应矩阵计算^[94]。图7(b)为采用Hadamard转化法所计算的响应矩阵。

根据线性子空间系统辨识的方法对自适应光学系统进行预测模型的建立^[95]，根据控制理论求出自适应光学系统的直流增益，即系统的响应矩阵。图7(c)为采用系统辨识法计算得到的响应矩阵。

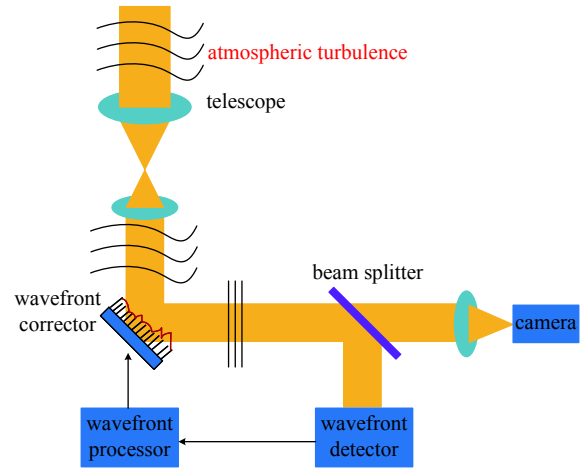


Fig. 4 Schematic diagram of adaptive optics system
图4 自适应光学系统原理图

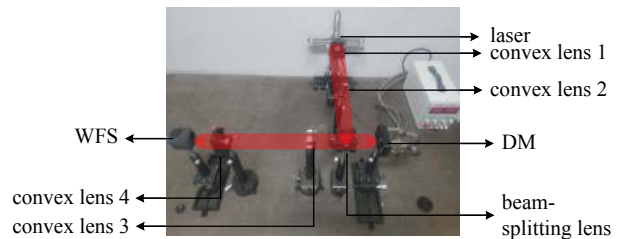


Fig. 5 Structure diagram of adaptive optics system with wavefront
图5 有波前自适应光学系统结构图

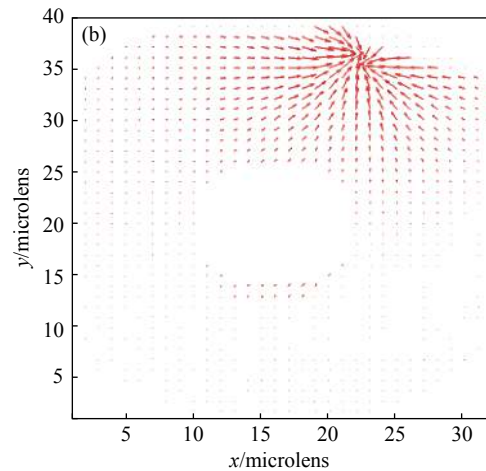
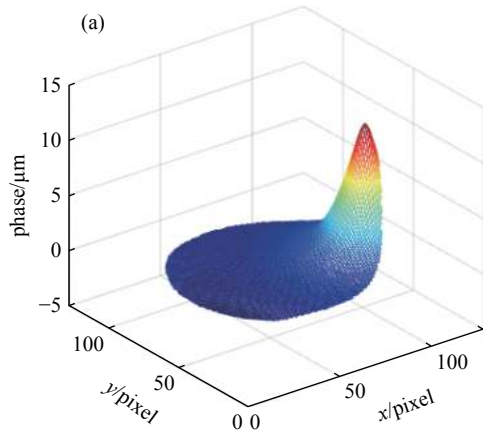
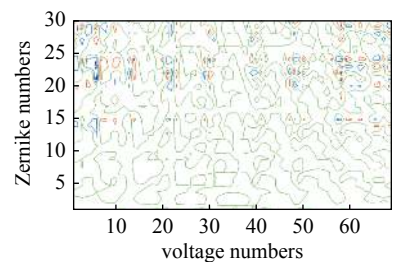
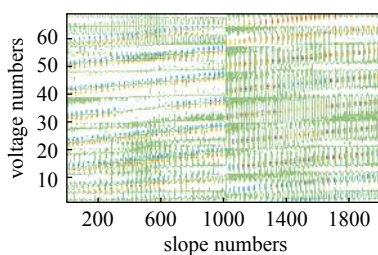
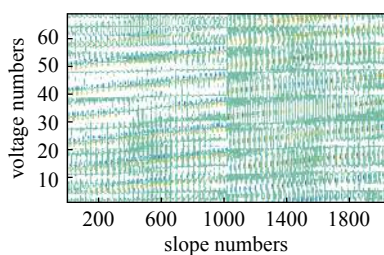


Fig. 6 Push-pull method driving the 10th driver (a) deformable mirror shape diagram (b) wavefront slope diagram
图6 推拉法第10个驱动器驱动下(a)变形镜面形图(b)波前斜率图



(a) push-pull method

(b) Hadamard method

(c) system identification method

Fig. 7 Interaction matrices
图7 响应矩阵

3.1.1 经典控制

比例积分微分(PID)控制算法是自适应光学闭环控制应用最为广泛的算法,图8为自适应光学系统PID控制算法原理图。其中 S_{tar} 代表目标斜率, S_{mea} 代表采集斜率, S_{err} 代表误差斜率, V_{out} 代表变形镜输出电压, $CM_{slope2cmd}$ 代表斜率到电压的命令矩阵。误差斜率经命令矩阵转化为误差电压后,将采用PID算法计算后的电压施加给变形镜以修正畸变波前,波前传感器再次采集波前斜率完成迭代实现闭环控制。

图9和图10为分别改变 k_p 和 k_i 参数情况下波前相位修正的波前PV曲线和相位图,经校正后波前相比初始状态已十分趋近平面波形态,凹凸程度及表面不平整度均大幅度减小。

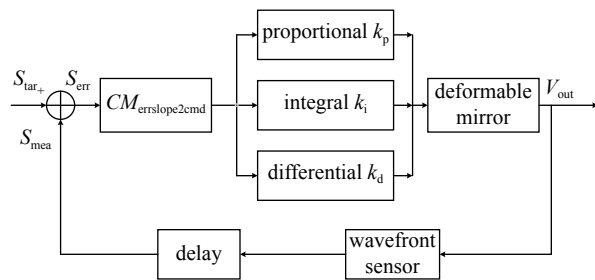


Fig. 8 Schematic diagram of adaptive optics PID control algorithm

图8 自适应光学PID控制算法原理图

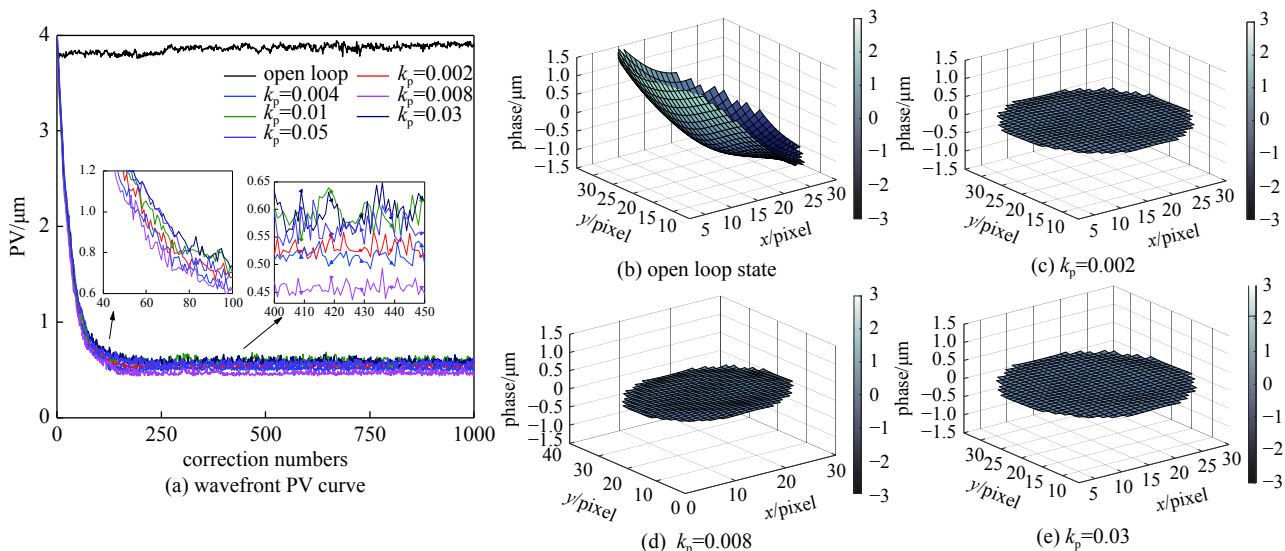


Fig. 9 Wavefront correction under different k_p parameters^[96]

图9 不同 k_p 参数下波前校正^[96]

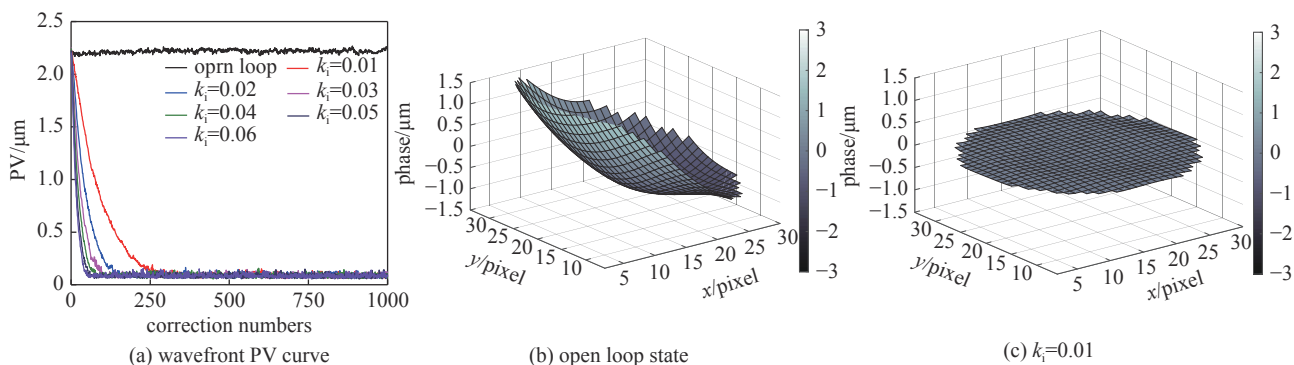


Fig. 10 Wavefront correction under different k_i parameters^[96]

图10 不同 k_i 参数下波前校正^[96]

在不仅限于针对变形镜电压到波前传感器斜率的响应矩阵情况下,建立变形镜所产生的任一量与波前传感器所采集的任一量之间的IM,采用PID控制,均可实现有波前自适应光学系统的闭环控制。

3.1.2 智能控制

由于自适应光学系统是一个典型的多输入多输出线性系统,因此可采用迭代运算通过求解线性方程组的近似解,实现自适应光学系统的闭环控制。Jacobi迭代和 Gauss-Seidel 迭代为常用的线性方程组的迭代求解法,其中 Gauss-Seidel 算法在自适应光学领域的校正效果受控于迭代误差精度的大小。图11为不同收敛值校正后波前相位图。选择适合的收敛值是 Gauss-Seidel 迭代算法实现闭环控制的关键步骤。

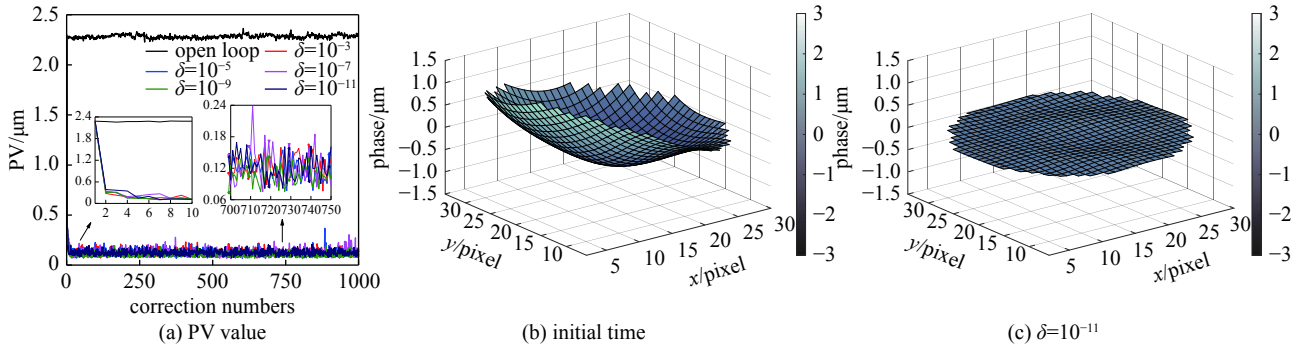


Fig. 11 Different convergence values δ corrected wavefront phase^[96]

图 11 不同收敛值 δ 校正后波前相位^[96]

迭代学习控制(ILC)从波前 Zernike 多项式与校正器控制电压之间的线性关系出发,构造迭代关系式。选择合适的 γ 值和 β 值可使迭代控制算法达到最优的收敛效果^[97-98]。图 12 和图 13 为不同参数下采用 ILC 算法波前闭环收敛曲线及波前相位图。该算法最大的优点是在参数选择合适的情形下,算法具有较快的收敛速度。

在 PID 算法的基础上,西安理工大学设计了自适应光学系统双重模糊自适应 PID 控制^[99]。模糊控制主要包含

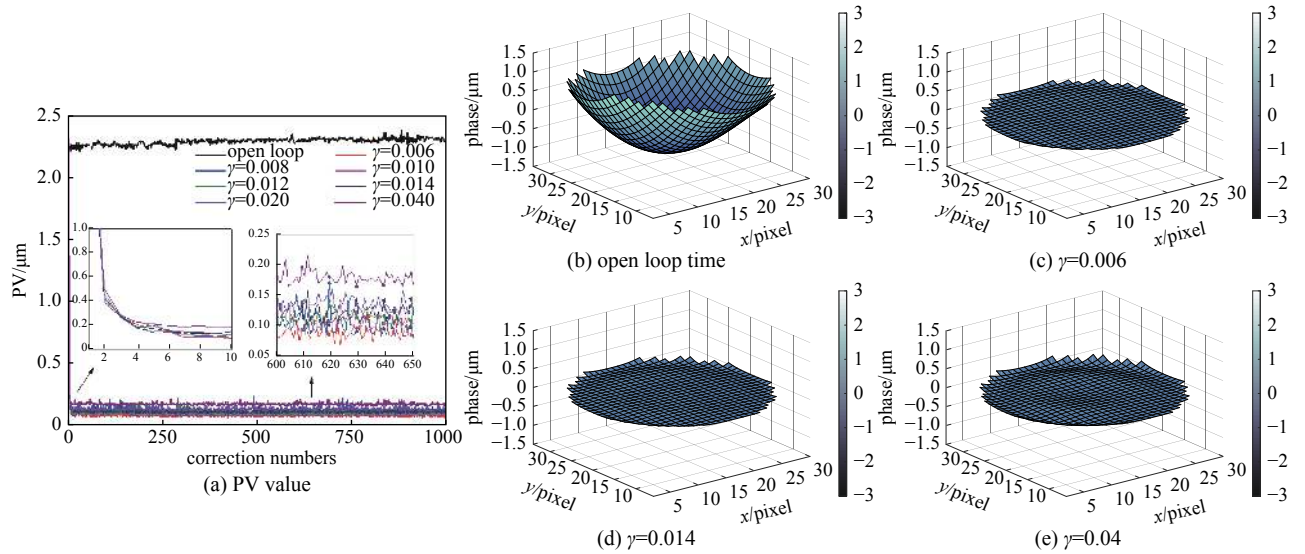


Fig. 12 Different γ value corrected wavefront phase^[96]

图 12 不同 γ 值校正波前相位^[96]

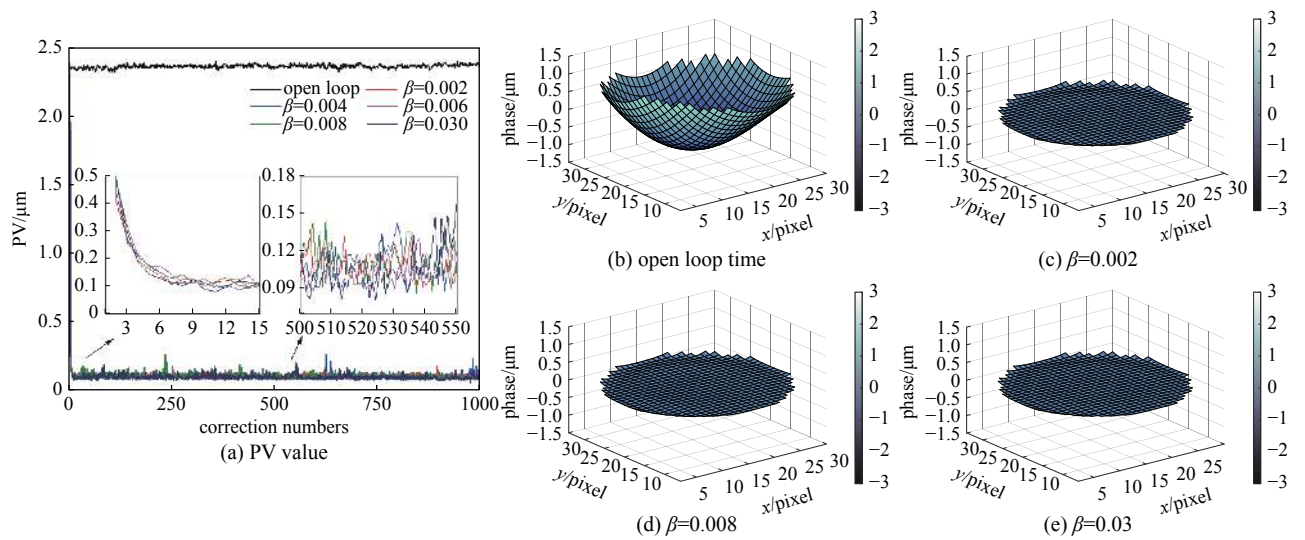


Fig. 13 Different β corrected system wavefront phase^[96]

图 13 不同 β 校正后系统波前相位^[96]

四部分: 模糊器, 规则库, 模糊推理机以及解模糊器。图 14 为不同参数情况下采用模糊控制波前校正的波前 PV 收敛曲线图。仿真和实验均表明, 模糊 PID 方法可有效校正波前畸变信号, 提高系统响应速度, 降低参数调整难度, 满足激光通信对于波前修正的要求。

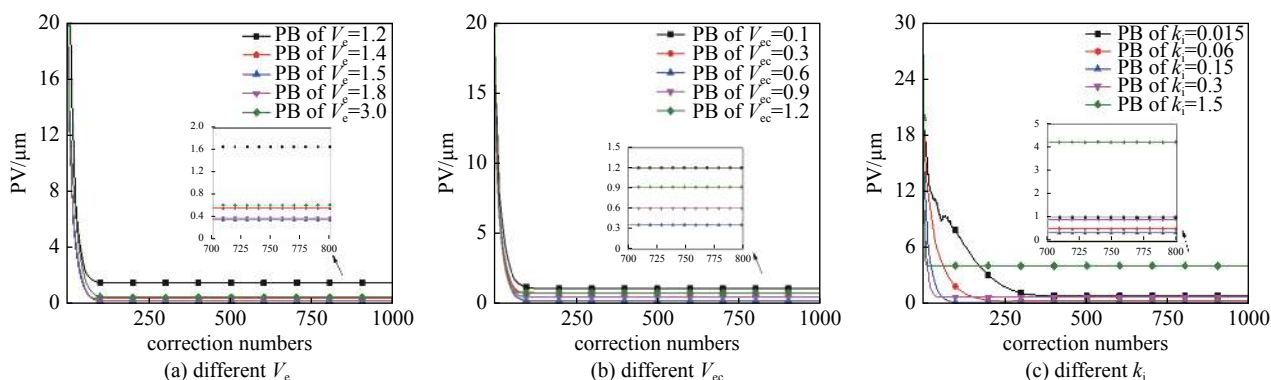


Fig. 14 PV curve of wavefront corrected by fuzzy control^[100]

图 14 模糊控制校正波前 PV 曲线^[100]

激光经远距离传输后, 强湍流所导致的波前畸变速率使得波前传感器无法实时准确地捕获波前信息, 变形镜的执行存在滞后, 延迟使得波前修正存在误差, 降低了波前修正精度。考虑在 PID 算法的基础上, 对数据进行预测处理, 建立波前预测模型, 降低系统伺服延时, 提高校正速率。图 15 为自适应光学波前预测校正收敛曲线图。预测算法的闭环收敛速度较快, 系统校正速率相对较快。闭环系统到达稳定前, 预测算法校正效果相比 PID 算法的校正效果更加明显, 系统到达稳定状态时, 二者校正效果基本相同。

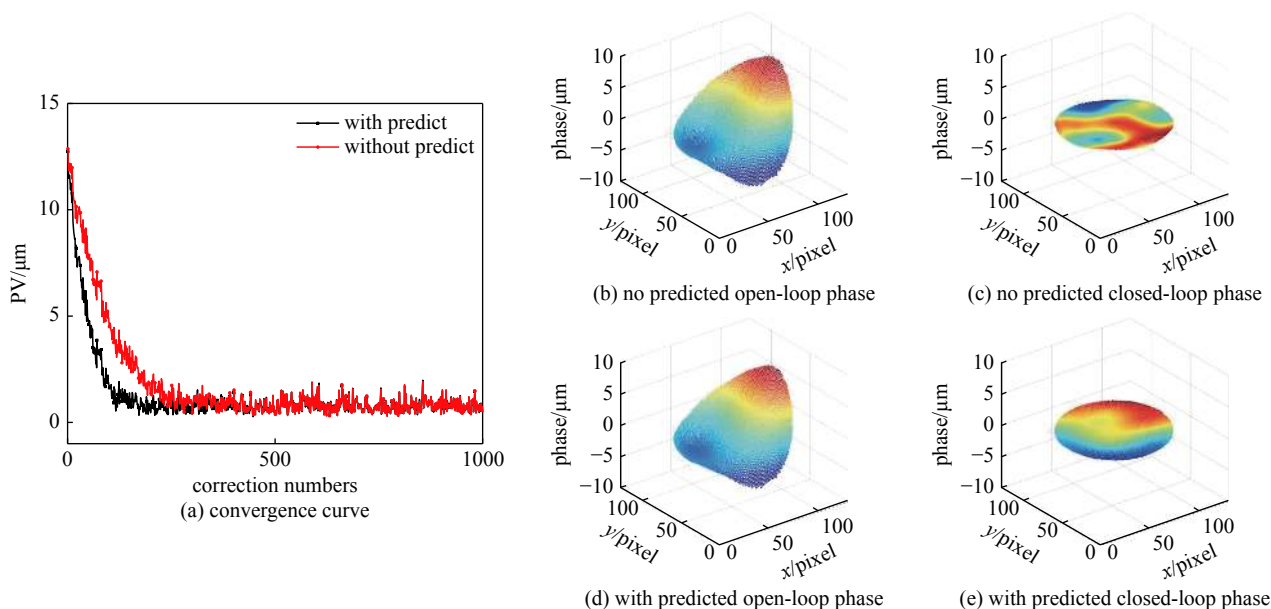


Fig. 15 Adaptive optics wavefront prediction and correction

图 15 自适应光学波前预测校正

3.2 无波前测量的自适应光学系统

在有波前测量的基础上, 西安理工大学开展了无波前测量的自适应光学系统方面的研究^[101]。无波前传感技术不需要波前传感器进行波前测量与波前重构^[102-103], 以得到波前畸变信息, 而是直接把畸变信息转化为性能指标如光强、SR、耦合效率等, 使用优化算法对性能指标进行迭代优化, 控制校正器不断变形, 得到最优的性能指标, 从而达到校正畸变波前的目的^[104]。基于无波前的自适应光学系统如图 16 所示。

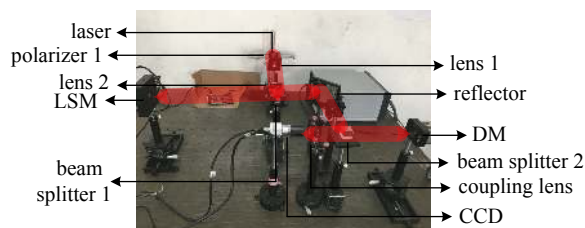


Fig. 16 Wavefrontless adaptive optics system

图 16 无波前自适应光学系统图

3.2.1 模式法

模式法认为畸变波前可以由某种模式表示出来^[105]。该算法一般分为两种：一种是选用某种模式对畸变后的波前进行模拟，求出模式系数和变形镜各促动器影响函数两者间的转换矩阵，然后结合智能优化算法通过不断迭代算出所需要的模式校正系数来进行畸变波前的校正；另一种是根据探测到的光斑计算出某种性能指标作为系统函数，利用该函数和模式系数间的联系来进行计算，求出校正波前误差所需要的模式校正系数进行校正。由于选用的基底模式需要满足倒数正交关系，所以目前常用的基底模式有 Lukosz 模式和变形镜本征模式(Eigen Mode)^[106]。

变形镜本征模式的无波前校正算法，首先需要建立光学系统模型，模拟准直高斯光束在大气中的传输，生成畸变光斑；接着需要建立变形镜模型，并推导出其对应的变形镜本征模式以作为基底模式；最后计算系统函数，根据变形镜本征模式法原理对波前像差进行校正。图 17 为采用变形镜本征模式法波前校正曲线，图 18 为校正前后光斑图形。随着迭代次数的增加，光强也逐渐增加。

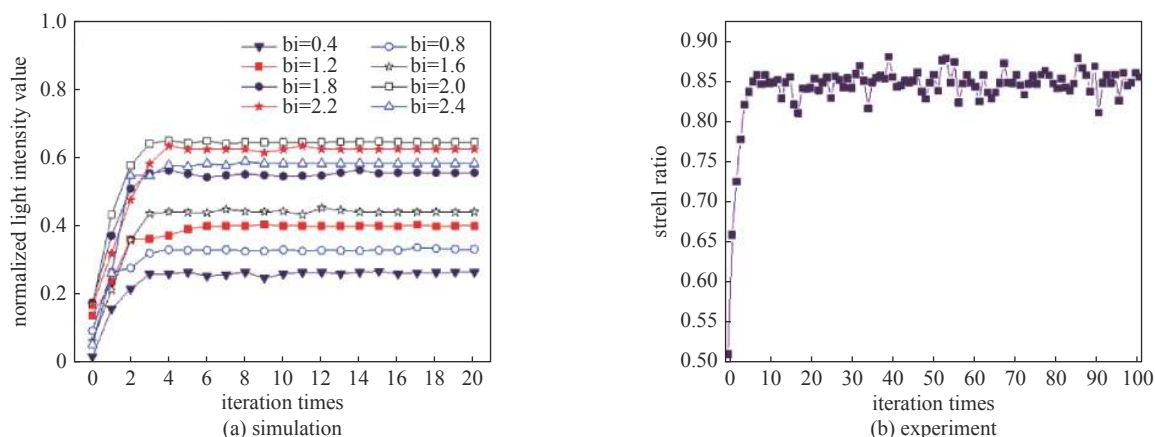


Fig. 17 Deformable mirror eigen mode corrected light intensity SR change curve^[107]

图 17 变形镜本征模式校正光强 SR 变化曲线^[107]

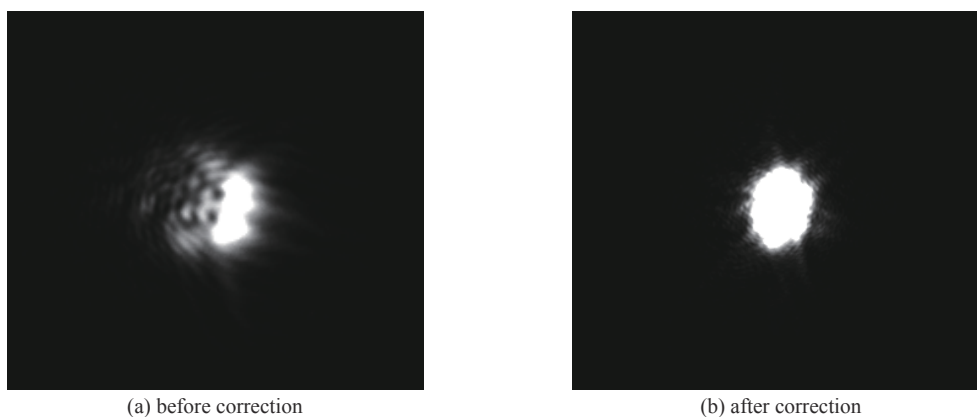


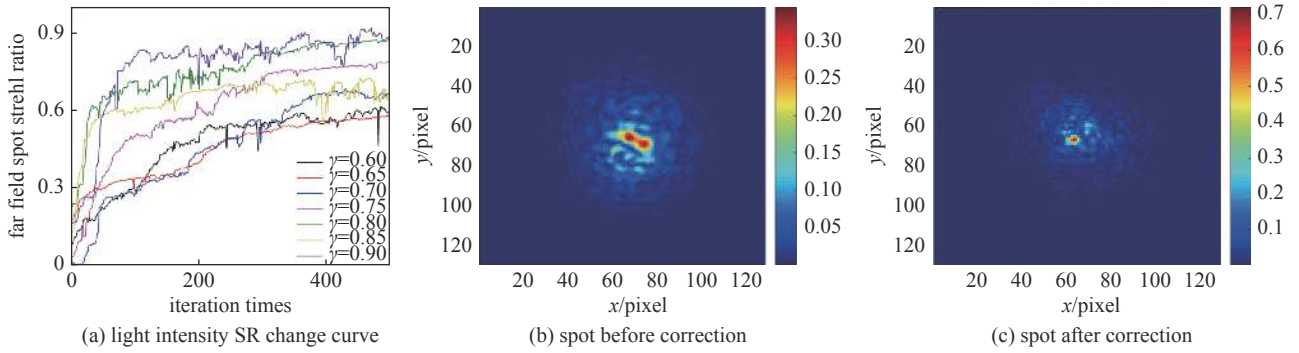
Fig. 18 Light spot by wavefront correction^[107]

图 18 波前校正前后光斑图^[107]

3.2.2 非模式法

自适应光学非模式法的工作原理是根据寻优算法求得波前校正器的驱动电压以使目标函数达到最大值。常用的算法有：梯度下降类算法，如共轭梯度法、SPGD 算法^[108-109]；启发类算法，如模拟退火(SA)算法^[110]、爬山法、遗传算法等^[111]。

SPGD 算法依据光强的分布，来持续优化寻找波前校正器控制电压的最优值，从而使目标函数值达到要求^[112]。从数值模拟角度出发，研究基于 SPGD 算法的无波前探测自适应光学技术对波前畸变的校正，分析了 SPGD 算法中不同参数取值对校正效果的影响^[113]。图 19 为采用 SPGD 算法校正曲线和校正前后光斑，未校正前远场光斑散斑严重且能量不汇聚，经过基于 SPGD 算法的无波前探测自适应光学技术校正后，光斑中心光强明显增加，且能量更加汇聚。

Fig. 19 Wavefront correction based on SPGD algorithm^[114]图 19 基于 SPGD 算法波前校正^[114]

SPGD 算法以 1550 nm 光功率作为反馈,以光纤耦合、变形镜和处理器形成环路,对 1550 光功率进行修正,修正后的光纤耦合输出的光功率变化如图 20 所示。

经校正后的波前光纤尾端输出的信号光功率明显增大,耦合效率提升约为 32 倍。耦合效率的提高则会对通信性能产生直接的贡献,然而该方法仅使用于弱湍流静态波前的环境下,并不适用于强湍流环境所引起的耦合效率的起伏。

西安理工大学同样开展了非模式无波前的涡旋光自适应光学波前校正实验,相位恢复 Gerchberg-Saxton 算法是一种由波前强度重构波前相位的间接测量法,由光场的光强分布反推相位信息,算法思想为:由入射平面和输出平面处的光强分布,通过控制起始条件并进行迭代运算得到所需光场的相位分布信息^[116]。

图 21 是各阶次涡旋光束利用相位恢复 Gerchberg-Saxton 算法校正前后光强分布图。经相位恢复 Gerchberg-Saxton 算法校正后,单模涡旋光束经湍流后发生扭曲的环状分布得到很大程度恢复,环形光斑上的能量分布变均匀。图 21 总体可以看出,相位恢复 Gerchberg-Saxton 算法对单模以及多模复用涡旋光束都可实现有效的波前畸变校正。

相位差法(PD)是一种由成像系统像面光强信息间接反推波前相位分布的无波前探测技术。该算法要求采集系统焦面和离焦面两个平面的光强信息,并根据两个通道的点扩散函数建立目标函数,最后通过最优化函数求解得到成像系统光瞳面的波前相位分布。相位差法无波前校正系统校正补偿单个涡旋光束的光强分布如图 22 所示^[118]。经大气湍流扰动后,光束产生畸变,焦面及离焦面的光强分布相比初始状态变得分散。经相位差法校正后,光强分布相比畸变时刻更加均匀且环形光斑上的能量增强,相位差法对单个涡旋光束的波前畸变可达到有效的校正。

3.3 采用液晶空间光调制器波前校正

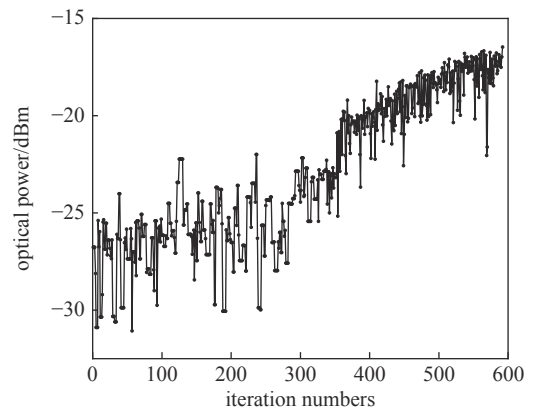
液晶空间光调制器(LC-SLM)是基于液晶的电控双折射原理,通过改变液晶的电驱动信号,实现对光波相位的连续调制。图 23 为基于相干光通信系统的液晶空间光波前校正系统框图。

图 24 为无波前校正时示波器输出的中频(IF)信号电压值,图 22 中(a)为同相方向(I路)的中频信号电压幅值,(b)为正交方向(Q路)的中频信号电压幅值。校正后平衡探测器输出的中频信号电压幅值趋于稳定值,尽管实验中随着时间的变化,中频信号电压幅值会有轻微的起伏,但输出正弦波幅值之间不会出现太大的差值,基本上稳定,相比于图 24 校正前的中频信号电压幅值,利用 LC-SLM 进行波前校正后的中频信号电压幅值增大了 1.7 倍左右,同时校正后的 SNR 增大了近 3 倍左右^[121]。

3.4 偏摆镜和变形镜组合波前校正

引入偏摆镜(TM)^[123]或多级变形镜进行波前修正是目前针对大幅度畸变波前校正自适应光学系统的发展趋势,使用偏摆镜或大行程变形镜(通常称为 Woofers)修正波前低阶成分,小行程变形镜(通常称为 Tweeters)修正波前高阶成分,基于 Zernike 多项式的正交性使得两者之间的校正区域空间具有明确划分^[124]。

对于常见的多校正器自适应光学系统,一种是基于二维运动的压电偏摆镜 TM 与具有独立单元的变形镜 DM69

Fig. 20 Optimal optical fiber coupling correction curve after wavefrontless correction^[115]图 20 无波前校正法光纤耦合校正曲线^[115]

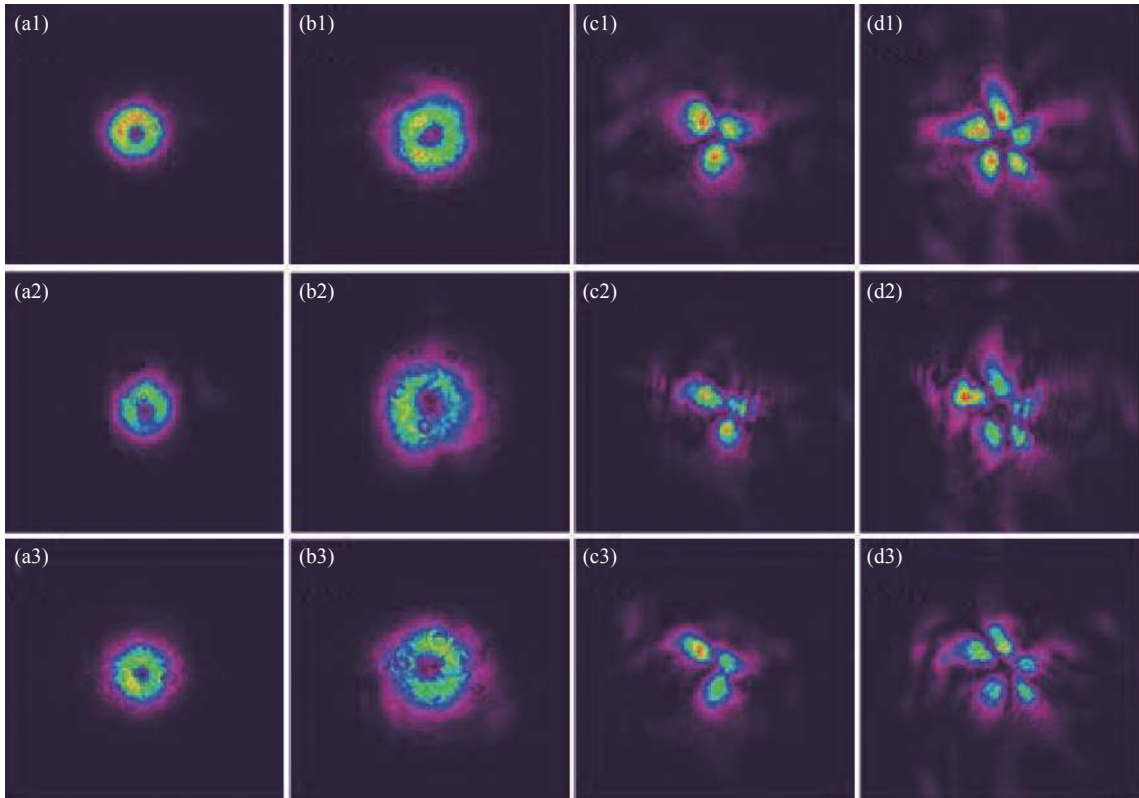


Fig. 21 Intensity distribution of vortex beams before and after correction by phase recovery Gerchberg-Saxton algorithm^[117]
 (a1)~(d1) no turbulence, (a2)~(d2) has turbulence, (a3)~(d3) correction

图 21 各阶次涡旋光束利用相位恢复 Gerchberg-Saxton 法校正前后光强分布图^[117]
 (a1)~(d1) 无湍流; (a2)~(d2) 有湍流; (a3)~(d3) 校正后

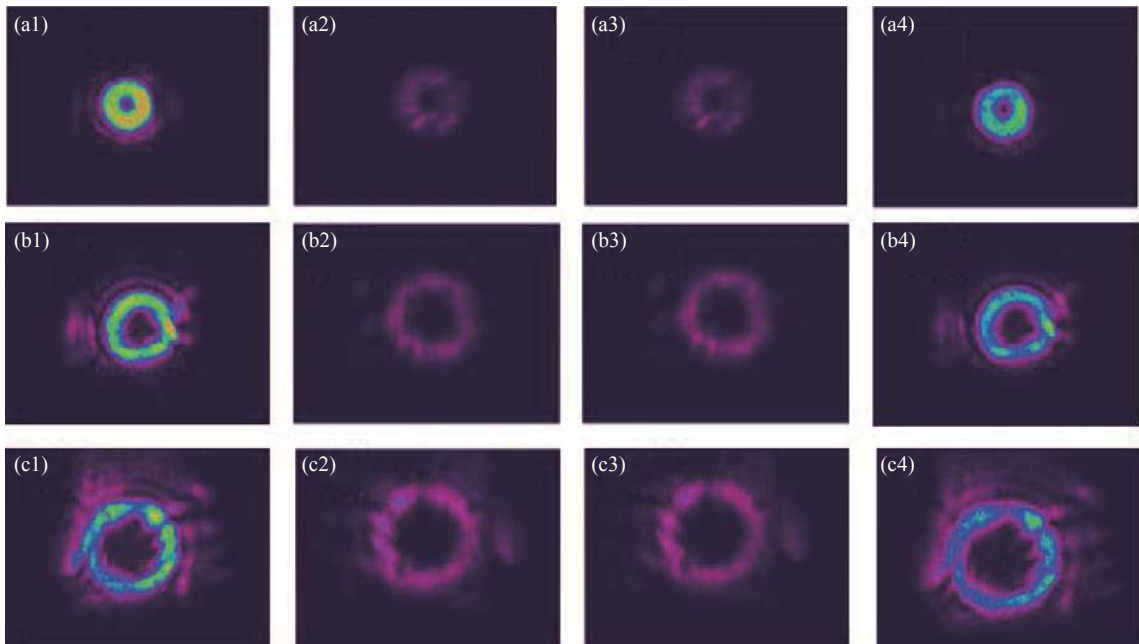


Fig. 22 Intensity distribution of single vortex beam corrected by phase difference method^[119]

(a1)~(c1) initial light intensity, (a2)~(c2) the light intensity at the focal plane, (a3)~(c3) intensity at defocus plane, (a4)~(c4) corrected light intensity

图 22 相位差法校正单个涡旋光束的光强分布图^[119]

(a1)~(c1) 初始光强; (a2)~(c2) 焦面处光强; (a3)~(c3) 离焦面处光强; (a4)~(c4) 校正后光强

组成的自适应光学系统; 一种为少独立单元大行程变形镜 DM69 和多独立单元小行程变形镜 DM292 组成的自适应光学系统, 由于激光通信系统对于波前修正的精度要求并不高, 且 DM292 的造价成本相对于 TM 造价成本要

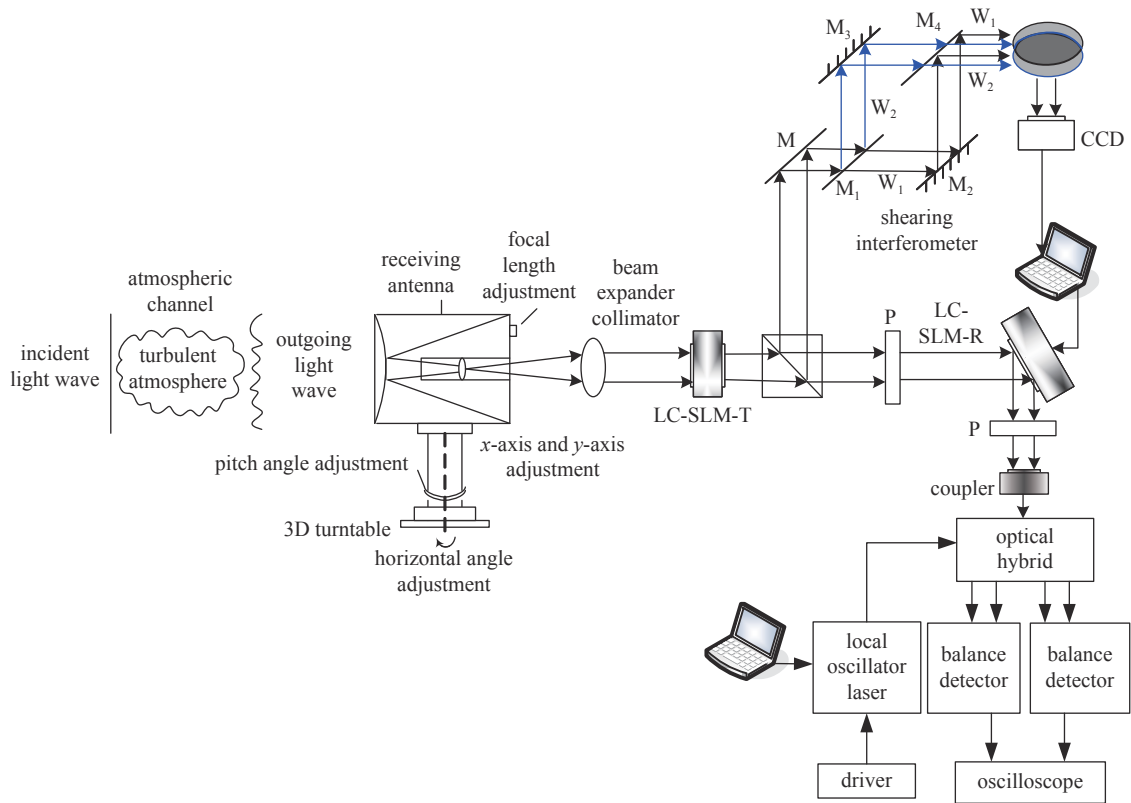


Fig. 23 Schematic diagram of LC-SLM wavefront correction in wireless coherent optical communication system^[120]

图 23 无线相干光通信系统 LC-SLM 波前校正示意图^[120]

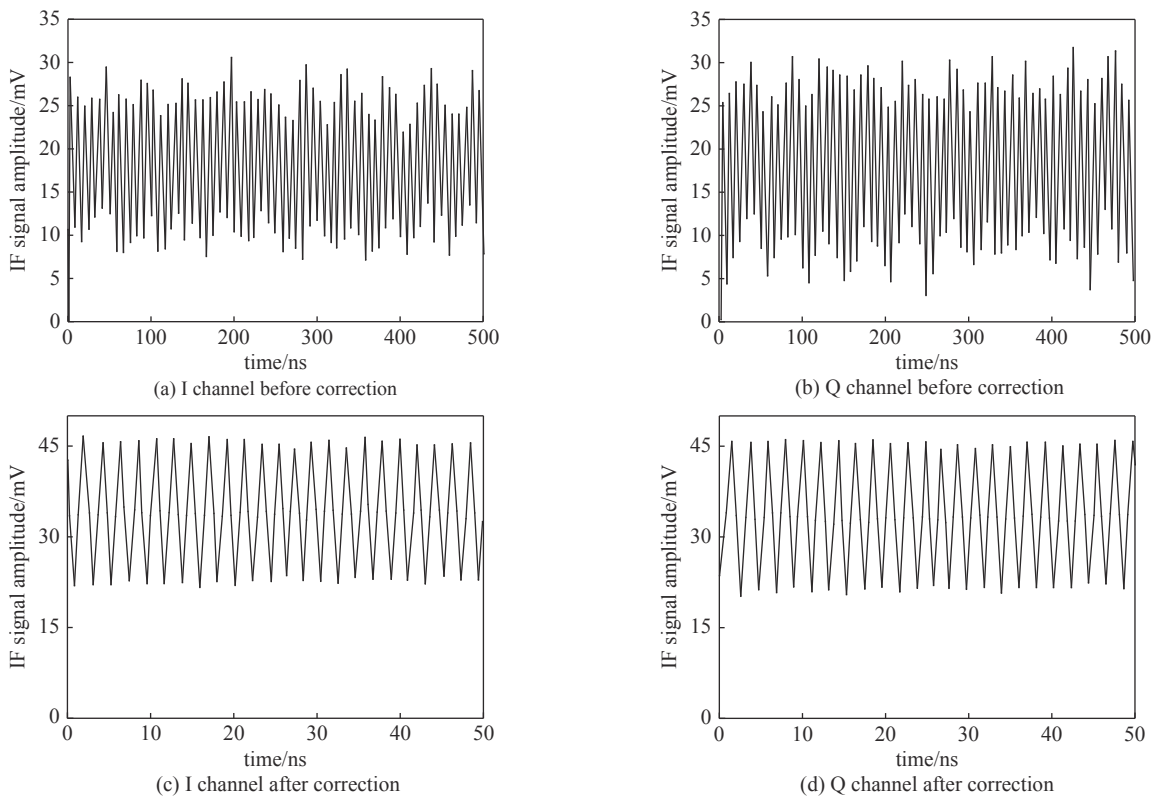


Fig. 24 Amplitude of immediate frequency signal before and after correction^[122]

图 24 校正前后中频信号幅值^[122]

高, 因此实际中通常选用 TM 和 DM69 组合的自适应光学系统用于闭环校正实现系统通信。

图 25 和图 26 为分别采用 TM 单独校正、采用 DM69 单独校正以及采用 TM 和 DM69 同时校正情况下的波前

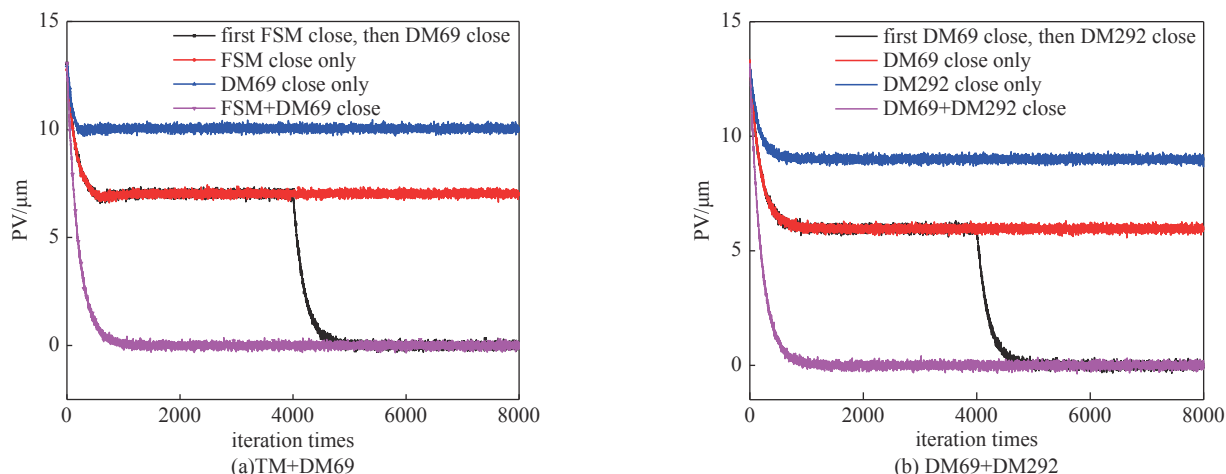


Fig. 25 PV convergence curve of multi-corrector wavefront correction

图 25 多校正器波前校正 PV 收敛曲线

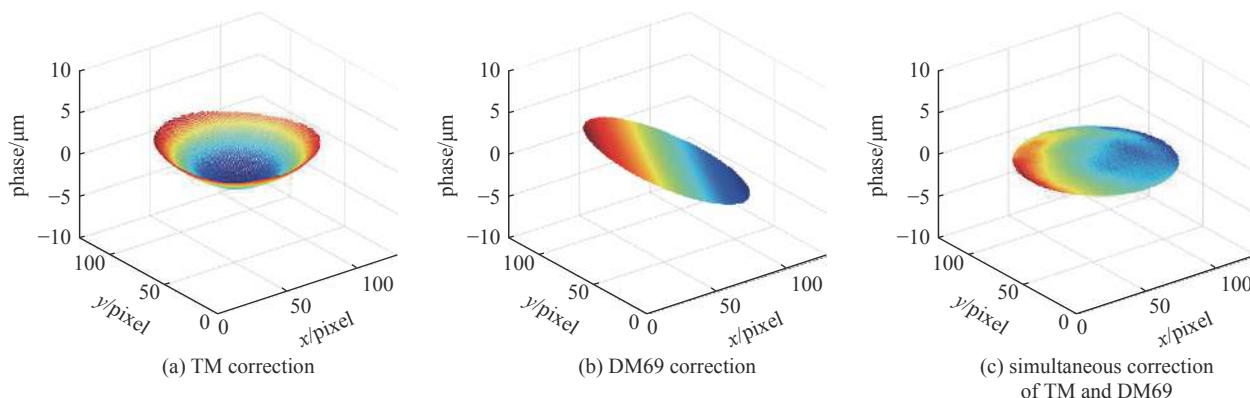


Fig. 26 Wavefront phase of adaptive optics system based on TM and DM combination

图 26 基于 TM 和 DM 组合的自适应光学系统波前相位

PV 曲线以及波前相位图。由图 25 可知，TM 和 DM69 同时闭环的修正效果要优于单独 TM 的修正效果以及单独 DM69 的修正效果。TM 的引入同时缓解了由于波前畸变过大使得变形镜促动器产生大幅度行程的问题，使得变形镜在校正相同畸变量的波前相位时功率得到缓解。

3.5 空间光光纤耦合自适应光学波前校正

3.5.1 光纤耦合自动对准提高耦合效率

为提高空间光到光纤的耦合效率，西安理工大学设计了基于二维压电陶瓷自动对准的光纤耦合系统^[125]，通过改变施加在压电陶瓷上的电压带动光纤产生位移，实现光轴对准^[126]。

图 27(a) 为采用模拟退火算法后 X 轴输出电压变化曲线。由图中可以看出刚开始曲线一直有波动，即整个系

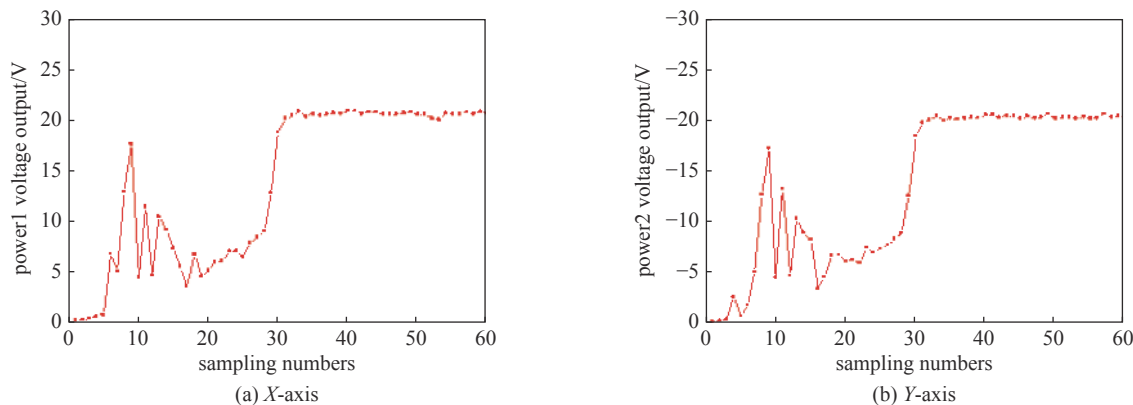


Fig. 27 Voltage change while using simulated annealing algorithm^[127]

图 27 加算法时电压变化^[127]

统正在寻找最大值,之后处于稳定状态,即找到了最佳耦合位置,此时电压值以在 20.68 V 处上下漂移且幅度不超过 0.1 V,此时电压均值为 20.65 V,方差值为 0.0443^2 V。图 27(b)为采用模拟退火算法后 Y 轴输出电压变化曲线。由图中可以看出刚开始曲线一直有波动,即整个系统正在寻找最大值,波动的过程就是寻找最佳耦合位置的过程,之后处于稳定状态,即找到了最佳耦合位置,此时电压均值为 -20.323 V,方差值为 0.0321^2 V。电压曲线实时反映了整个系统寻找最佳耦合位置的过程。

模拟退火算法可在较短时间内寻找到最佳的耦合位置,耦合效率达到了 51.4%。该系统中设计的压电陶瓷驱动电路精度高、压电陶瓷固定方式可靠,该方法可以有效提高光纤的耦合效率。

在二维压电陶瓷用于光纤耦合自动对准的基础上,西安理工大学设计了一种五自由度空间光-单模光纤耦合装置,采用三种不同位移方式的压电陶瓷,并根据三种压电陶瓷的工作条件设计了对应的恒压直流供电和电压放大电路。采用 SPGD 算法,以耦合进单模光纤中的光功率大小为系统性能评价函数,实现空间光与单模光纤耦合的自动对准。图 28 为引入不同偏差下耦合光功率随迭代次数变化曲线。

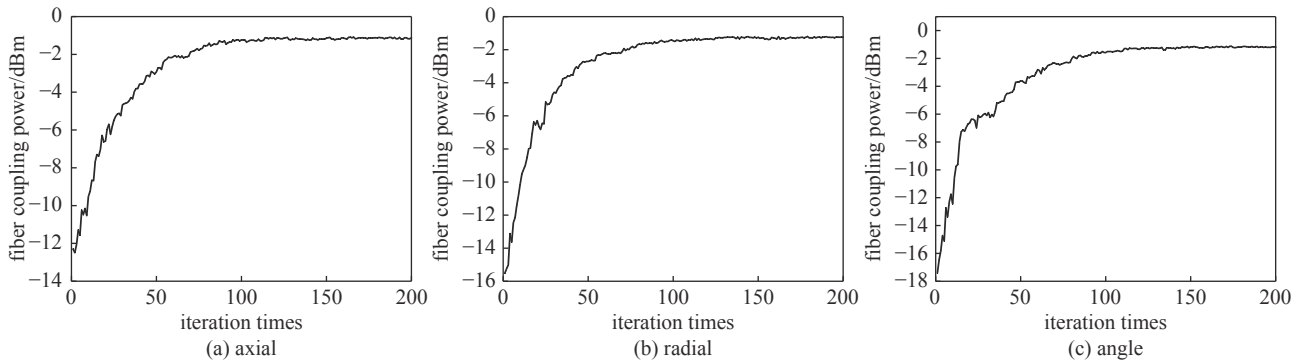


Fig. 28 Variation curve of coupling optical power with iteration times under different deviations^[128]

图 28 引入不同偏差下耦合光功率随迭代次数变化曲线^[128]

从图 28(a)中可以看出在引入轴向偏差时初始耦合光功率为 -12.37 dBm,经算法约 75 次左右迭代后光功率收敛到 -1.15 dBm 左右,此时耦合入光纤中的光功率波动较小说明轴向引起的偏差得到了调整。从图 28(b)中可以看出,在引入径向偏差时的初始耦合光功率为 -15.51 dBm,经算法约 90 次左右迭代耦合光功率实现收敛,收敛后耦合光功率在 -1.21 dBm 左右微小波动,说明径向偏差得到了补偿。从图 28(c)可以看出在调整入射光方向引入角度偏差时,初始耦合光功率为 -17.4 dBm,经算法 100 次左右迭代耦合光功率逐渐收敛,最后在 -1.19 dBm 左右上下波动,说明角度偏差得到了补偿^[128]。

3.5.2 模式转换提高耦合效率

无线光通信系统中由于空间光的模式受到大气湍流的影响,光束模式退化,导致与接收端耦合使用的单模光纤模场不完全匹配,从而降低了空间光-单模光纤的耦合效率。西安理工大学开展了基于 LC-SLM 的自由空间光由高阶模式转换为低阶模式的实验研究^[129-130]。

图 29 为由高阶模式转化为低阶模式的转化结果。第一列的 LP_{02} 模式分布与理想光强分布对比,光场能量的分布及对称性均与理想的情况保持一致,但周围不可避免地存在高阶衍射分量。退化后的模式再经过 LC-SLM2,得到的 LP_{01} 模式光场分布能量集中,与理想情况下的模式场分布保持一致。并且随着模式阶数的减小转换后光场分布越集中。可见基于 LC-SLM 的空间模式转换结合 SA 算法后,得到的 LP_{01} 模式分布与理想条件下的分布保持一致,能量集中在中心位置处,有明显的转换效果。

当预处理得到的退化后模式为 LP_{22} 时,纯二进制转换时耦合功率为 -18.53 dBm,SA 算法优化后的耦合效率由 55.92% 提高到 66.21%。利用 LC-SLM 实现模式转换,增加基模的含量,从模式转换间接实现对于空间光-单模光纤耦合效率的提升。阶数最小的 LP_{02} 模式转换后的耦合效率提升至 69.18%。 LP_{71} 模式对应阶数最大,耦合效率由二进制转换的 49.12% 提升至 60.29%。

3.5.3 自适应光学光纤耦合实验

为提高空间光到光纤的耦合效率,针对无波前和有波前相结合的方法开展了采用自适应光学抑制大气湍流技术的无线光通信研究。图 30 为自适应光学光纤耦合系统,由 TM、DM69、波前传感器和计算机组成有波前自适应光学系统,由分光棱镜、耦合透镜、单模光纤和光功率计和红外相机组成无波前光纤耦合自适应光学系统,通过自

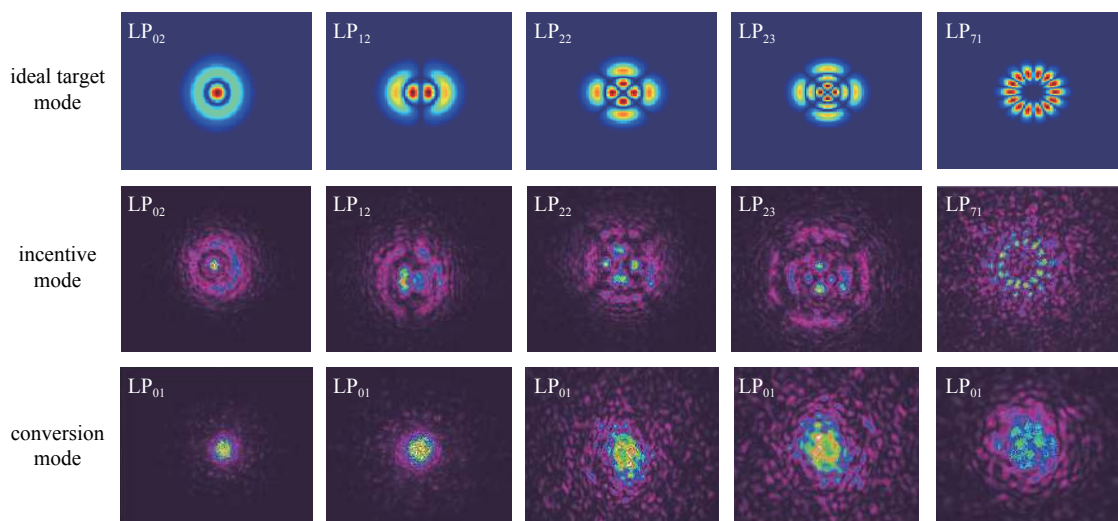


Fig. 29 Mode conversion results^[131]
图 29 模式转换结果^[131]

适应光学系统的波前闭环控制实现光纤耦合功率控制。

由于波前传感器所采集的波前相位和光纤耦合光纤端面并非在同一光路,由透镜产生的非公光路像差和光纤耦合装配误差均属于静态误差,其误差大小与外界环境的变化无关,只和透镜材质均匀性、器件安装位置和光纤耦合端面的位置有关。误差的存在使得传统的自适应光学闭环后,支路的波前未能得到理想修正。消除该误差的方法有盲优化算法和相位差异法,而盲优化法相比于相位差异法在实际工程应用更为成熟。图 31 为采用 SPGD 算法消除误差前后的耦合功率曲线以及波前 PV 曲线,由图 31 可知,在未消除误差后,自适应光学闭环后功率下降,而消除后耦合功率上升。

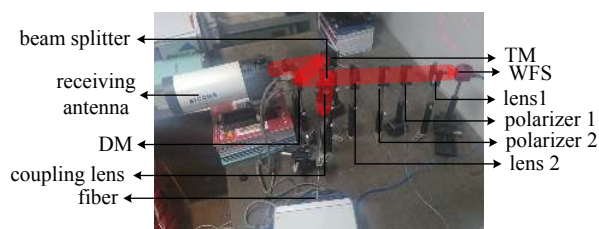
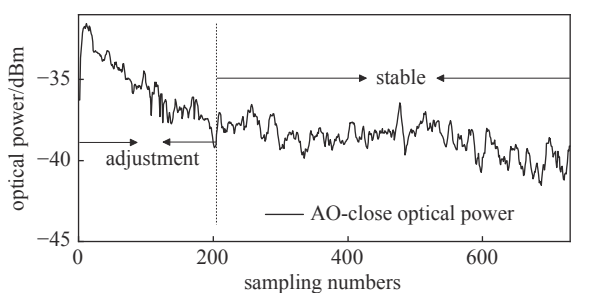
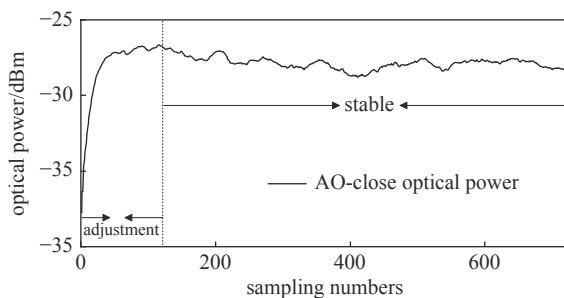


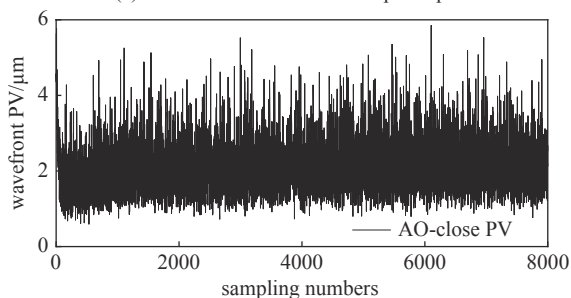
Fig. 30 Schematic diagram of adaptive optics wavefront correction optical fiber coupling control system
图 30 自适应光学波前校正光纤耦合控制系统示意图



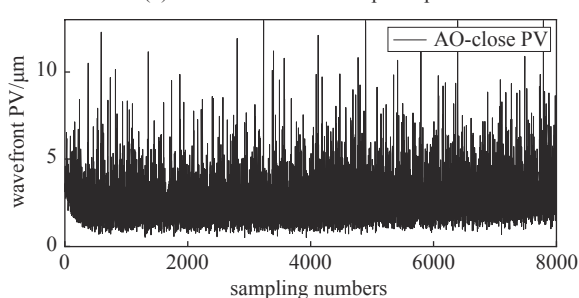
(a) Non eliminated aberration optical power



(b) eliminated aberration optical power



(c) Non eliminated aberration wavefront PV value



(d) eliminated aberration wavefront PV value

Fig. 31 Effect of non-common optical path aberration on closed-loop coupling power and wavefront phase of adaptive optics

图 31 非共光路像差对自适应光学闭环耦合功率以及波前相位的影响

图 32 为在自适应光学开环和闭环情况下耦合功率的曲线,从图 32 中可以看出,校正后的耦合效率明显高于校正前的耦合效率,表明自适应光学修正畸变波前可有效提高空间光到光纤的耦合效率。

以消除非公光路后的波前相位作为控制对象,图 33 为不同距离情况下依据实测波前 Zernike 系数对于耦合效率的计算结果。波前经修正后,对于光波经室内、600 m、1 km、5 km、10 km、100 km 不同距离传输后,波前畸变对于耦合效率的影响分别约由 10%、5%、10%、3%、5%、5% 提升至 90%、80%、90%、60%、40%、10%。同时,近距离修正的提升效果要优于远距离修正的提升效果。近距离的耦合效率修正后的耦合效率数值起伏要小于远距离的耦合效率修正起伏。

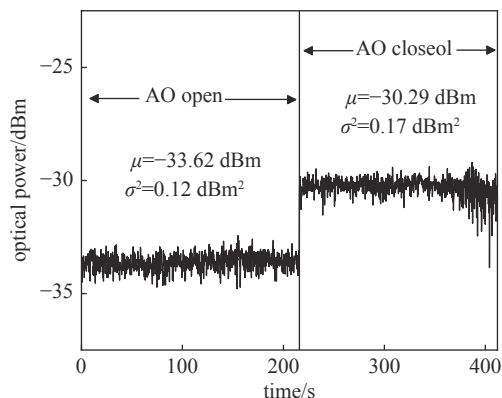


Fig. 32 Variation curve of fiber coupling power before and after adaptive optics wavefront correction

图 32 自适应光学波前校正前后光纤耦合功率变化曲线

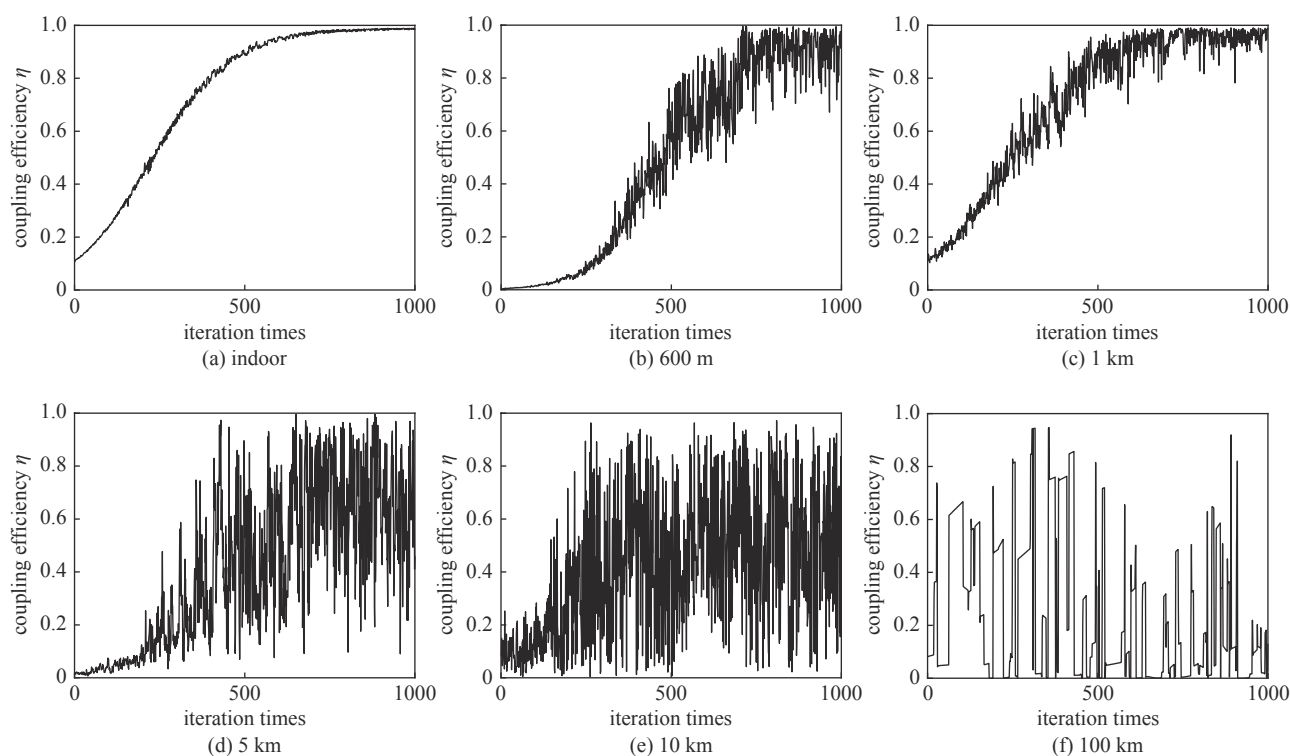


Fig. 33 Effect curve of wavefront correction on coupling efficiency at different distances

图 33 不同距离情况下波前修正对于耦合效率影响的曲线

对于 10 km 距离的波前修正前后的耦合效率,其修正后对于修正前的耦合有数值上的提升,但耦合效率的起伏过大,不利于通信系统的稳定性。而对于 100 km 波前耦合效率修正后却无明显的提升,这是因为 100 km 的强湍流所引起的光强闪烁,光斑完全破碎,直接导致波前 Zernike 系数数据采集不连续。100 km 波前的畸变量非连续且畸变量过大无法保证波前修正的实时性。

针对后续将自适应光学技术应用于无线光通信系统的研究,研究内容重点应倾向于畸变波前进行修正后位于耦合透镜焦平面光斑的汇聚程度,以便能够直接耦合进入 IM/DD 系统的探测器感光面。针对远距离相干检测系统,应将研究重点方向倾向于无波前传感校正,通过模式以及非模式优化算法在修正畸变波前的同时,提高空间光到光纤的耦合效率。同时应考虑大气湍流中自适应光学技术光耦合功率相对起伏方差,以保证系统具有稳定的通信性能。

4 结 语

本文系统地国内外自适应光学在无线光通信领域的应用进行了总结,同时介绍了西安理工大学相关领域的

工作。其中包括有波前测量的自适应光学系统、无波前测量的自适应光学系统、液晶空间光调制器波前校正、偏摆镜和变形镜组合的波前校正、空间光光纤耦合自适应光学波前校正等方面的研究工作,并指出了今后的研究方向。

参考文献:

- [1] 饶长辉, 姜文汉. 自适应光学系统对大气湍流补偿的有效性分析[J]. 强激光与粒子束, 1996, 8(4): 469-475. (Rao Changhui, Jiang Wenhan. Effectiveness analysis of adaptive optics system compensating atmosphere turbulence[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1996, 8(4): 469-475)
- [2] Babcock H W. The possibility of compensating astronomical seeing[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1953, 65(386): 229-236.
- [3] 胡立发, 刘超, 申文, 等. 自适应光学技术在天文观测中的研究进展[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 084202. (Hu Lifa, Liu Chao, Shen Wen, et al. Advancement of adaptive optics in astronomical observation[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2017, 47: 084202)
- [4] 张雨东, 姜文汉, 史国华, 等. 自适应光学的眼科学应用[J]. 中国科学 G辑: 物理学 力学 天文学, 2007, 37(s1): 68-74. (Zhang Yudong, Jiang Wenhan, Shi Guohua, et al. Ophthalmological applications of adaptive optics[J]. Science in China (Series G: Physics, Mechanics & Astronomy), 2007, 37(s1): 68-74)
- [5] 姜文汉, 杨泽平, 官春林, 等. 自适应光学技术在惯性约束聚变领域应用的新进展[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1625-1634. (Jiang Wenhan, Yang Zeping, Guan Chunlin, et al. New progress on adaptive optics in inertial confinement fusion facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1625-1634)
- [6] 杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学技术在大气光通信系统中的应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(1): 61-68. (Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Applications of adaptive optics technology in atmospheric laser communications system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(1): 61-68)
- [7] Fried D L. Adaptive optics topical issue[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1977, 67: 422.
- [8] Tyson R K. Adaptive optics and ground-to-space laser communications[J]. Applied Optics, 1996, 35(19): 3640-3646.
- [9] Tyson R K. Bit-error rate for free-space adaptive optics laser communications[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2002, 19(4): 753-758.
- [10] Tyson R K, Canning D E, Tharp J S. Measurement of the bit-error rate of an adaptive optics, free-space laser communications system, part 1: tip-tilt configuration, diagnostics, and closed-loop results[J]. Optical Engineering, 2005, 44: 096002.
- [11] Wilks S C, Morris J R, Brase J M, et al. Modeling of adaptive optics-based free-space communications systems[C]//Proceedings Volume 4821, Free-Space Laser Communication and Laser Imaging II. 2002, 4821: 121-128.
- [12] Thompson C A, Kartz M W, Flath L M, et al. Free space optical communications utilizing MEMS adaptive optics correction[C]//Proceedings Volume 4821, Free-Space Laser Communication and Laser Imaging II. 2002, 4821: 129-138.
- [13] Weyrauch T, Vorontsov M A. Atmospheric compensation with a speckle beacon in strong scintillation conditions: directed energy and laser communication applications[J]. Applied Optics, 2005, 44(30): 6388-6401.
- [14] Weyrauch T, Vorontsov M A. Free-space laser communications with adaptive optics: atmospheric compensation experiments[J]. Journal of Optical and Fiber Communications Reports, 2004, 1(4): 355-379.
- [15] Wright M W, Roberts J E, Farr W H, et al. Improved optical communications performance combining adaptive optics and pulse position modulation[J]. Optical Engineering, 2008, 47: 016003.
- [16] Hemmati H, Chen Y J, Crossfield I. Telescope wavefront aberration compensation with a deformable mirror in an adaptive optics system[C]//Proceedings of SPIE, Free-Space Laser Communication Technologies XVIII. 2006, 6105: 123-127.
- [17] Wilson K E, Wright M W, Lee S, et al. Adaptive optics for daytime deep space laser communications from Mars[C]//Digest of the LEOS Summer Topical Meeting. 2005: 19-20.
- [18] Boroson D M, Biswas A, Edwards B L. MLCD: Overview of NASA's Mars laser communications demonstration system[C]//Proceedings of SPIE, Free-Space Laser Communication Technologies XVI. 2004, 5338: 16-28.
- [19] Stewart J B, Murphy D V, Moores J D, et al. Comparing adaptive optics approaches for NASA LCRD ground station #2[C]//Proceedings of SPIE, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXV. 2013, 8610: 86100M.
- [20] Wright M W, Morris J F, Kovalik J M, et al. Adaptive optics correction into single mode fiber for a low earth orbiting space to ground optical communication link using the OPALS downlink[J]. Optics Express, 2015, 23(26): 33705-33712.
- [21] Juarez J C, Young D W, Sluz J E, et al. Free-space optical channel propagation tests over a 147-km link[C]//Proceedings of SPIE, Atmospheric Propagation VIII. 2011, 8038: 80380B.
- [22] Heine F, Kämpfner H, Czichy R, et al. Optical inter-satellite communication operational[C]//Milcom 2010 Military Communications Conference. 2010: 1583-1887.
- [23] Sodnik Z, Armengol J P, Czichy R H, et al. Adaptive optics and ESA's optical ground station[C]//Proceedings of SPIE, Free-Space Laser Communications IX. 2009, 7464: 746406.
- [24] Berkefeld T, Soltau D, Czichy R, et al. Adaptive optics for satellite-to-ground laser communication at the 1m telescope of the ESA Optical Ground Station, Tenerife, Spain[C]//Proceedings of SPIE, Adaptive Optics Systems II. 2010, 7736: 77364C.
- [25] Gregory M, Troendle D, Muehlnikel G, et al. Three years coherent space to ground links: performance results and outlook for the optical ground station equipped with adaptive optics[C]//Proceedings of SPIE, Free-space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXV. 2013: 746406.

- [26] Arimoto Y, Toyoshima M, Toyoda M, et al. Preliminary result on laser communication experiment using (ETS-VI)[C]//Proceedings of SPIE, Free-Space Laser Communication Technologies VII. 1995, 2381: 151-158.
- [27] Kudielka K H, Hayano Y, Klaus W, et al. Low-order adaptive optics system for free-space lasercom: design and performance analysis[C]//Proceedings of the 2nd International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine. 2015.
- [28] Petit C, Vedrenne N, Michau V, et al. Adaptive optics results with SOTA[C]//2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications. 2016: 1-7.
- [29] Hashmi A J, Eftekhari A A, Adibi A, et al. Analysis of adaptive optics-based telescope arrays in a deep-space inter-planetary optical communications link between Earth and Mars[J]. *Optics Communications*, 2014, 333: 120-128.
- [30] Pasupathi T, Selvi J A V, Samuel J N. Mitigation of low-order atmospheric turbulent effects using sensorless adaptive optics in terrestrial free space optical communication[C]//2016 International Conference on Emerging Trends in Engineering, Technology and Science (ICETETS). 2016.
- [31] Carrizo C E, Calvo R M, Belmonte A. Proof of concept for adaptive sequential optimization of free-space communication receivers[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(20): 5397-5403.
- [32] Brady A, Rössler C, Leonhard N, et al. Validation of pre-compensation under point-ahead-angle in a 1 km free-space propagation experiment[J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 17840-17850.
- [33] Baykal Y, Gökçe M, Ata Y. Application of adaptive optics on bit error rate of M -ary pulse-position-modulated oceanic optical wireless communication systems[J]. *Laser Physics*, 2020, 30: 076202.
- [34] 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.
- [35] Paillier L, Le Bidan R, Conan J M, et al. Space-ground coherent optical links: ground receiver performance with adaptive optics and digital phase-locked loop[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(20): 5716-5727.
- [36] Ata Y, Korotkova O. Adaptive optics correction in natural turbulent waters[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2021, 38(4): 587-594.
- [37] Osborn J, Townson M J, Farley O J D, et al. Adaptive optics pre-compensated laser uplink to LEO and GEO[J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 6113-6132.
- [38] Leonhard N, Berlich R, Minardi S, et al. Real-time adaptive optics testbed to investigate point-ahead angle in pre-compensation of Earth-to-GEO optical communication[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13157-13172.
- [39] Chu Xiuxiang, Qiao Chunhong, Feng Xiaoxing, et al. Propagation of Gaussian-Schell beam in turbulent atmosphere of three-layer altitude model[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(21): 3871-3878.
- [40] 姜文汉, 张雨东, 饶长辉, 等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. *光学学报*, 2011, 31: 0900106. (Jiang Wenhan, Zhang Yudong, Rao Changhui, et al. Progress on adaptive optics of Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31: 0900106)
- [41] 姜文汉. 自适应光学发展综述[J]. *光电工程*, 2018, 45: 170489. (Jiang Wenhan. Overview of adaptive optics development[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45: 170489)
- [42] 姜文汉. 自适应光学在中国的40年——自适应光学专题导读[J]. *光电工程*, 2018, 45(3): 6. (Jiang Wenhan. 40 years of adaptive optics in China—introduction to adaptive optics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 6)
- [43] 杨慧珍, 蔡冬梅, 陈波, 等. 无波前传感自适应光学技术及其在大气光通信中的应用[J]. *中国激光*, 2008, 35(5): 680-684. (Yang Huizhen, Cai Dongmei, Chen Bo, et al. Analysis of adaptive optics techniques without a wave-front sensor and its application in atmospheric laser communications[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(5): 680-684)
- [44] 李欢, 张洪涛, 尹福昌. 空间激光通信系统中大气湍流的自适应补偿方法[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 31(2): 1-3. (Li Huan, Zhang Hongtao, Yin Fuchang. The adaptive optics technique for atmospheric turbulence in laser communication system[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 31(2): 1-3)
- [45] 夏利军, 李晓峰. 基于自适应光学的大气光通信波前校正实验[J]. *信息与电子工程*, 2010, 8(3): 331-335. (Xia Lijun, Li Xiaofeng. Transmission wave-front correction of atmospheric optical communication based on adaptive optics technology[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2010, 8(3): 331-335)
- [46] 武云云, 陈二虎, 张宇, 等. 自适应光学技术提高FSO性能的实验验证[J]. *光通信技术*, 2012, 36(4): 15-18. (Wu Yunyun, Chen Erhu, Zhang Yu, et al. Experiment on adaptive optics to improve the performance of FSO[J]. *Optical Communication Technology*, 2012, 36(4): 15-18)
- [47] 韩立强, 王祁, 信太克归, 等. 基于自适应光学补偿的自由空间光通信系统性能研究[J]. *应用光学*, 2010, 31(2): 301-304. (Han Liqiang, Wang Qi, Xin Taikegui, et al. Free space optical communication based on adaptive optics compensation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(2): 301-304)
- [48] 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. (Wu Yunyun, Chen Erhu, Zhang Yu, et al. Simulation and experiment analysis of adaptive optics in atmospheric laser communication[J]. *Optical Communication Technology*, 2012, 36(8): 52-55)
- [49] Li Jiawei, Zhang Zhen, Gao Jianqiu, et al. Bandwidth of adaptive optics system in atmospheric coherent laser communication[J]. *Optics Communications*, 2016, 359: 254-260.
- [50] 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: 0806003. (Li Jiawei, Chen Weibiao. Bandwidth of adaptive optics system in satellite-ground coherent laser communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43: 0806003)
- [51] Liu Wei, Shi Wenxiao, Wang Bin, et al. Free space optical communication performance analysis with focal plane based wavefront measurement[J]. *Optics Communications*, 2013, 309: 212-220.
- [52] 武云云, 李新阳, 饶长辉. 大气湍流像差对空间零差二进制相移键控相干光通信误码性能的影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0606002. (Wu Yunyun, Li

- Xinyang, Rao Changhui. Effect of atmospheric turbulence aberration on the bit-error performance of homodyne binary phase shift keying coherent optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0606002)
- [53] Liu Wei, Shi Wenxiao, Yao Kainan, et al. Fiber coupling efficiency analysis of free space optical communication systems with holographic modal wave-front sensor[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 60: 116-123.
- [54] Li Zhaokun, Cao Jingtai, Zhao Xiaohui, et al. Combinational-deformable-mirror adaptive optics system for atmospheric compensation in free space communication[J]. *Optics Communications*, 2014, 320: 162-168.
- [55] Liu Wei, Yao Kainan, Huang Danian, 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.
- [56] Ren Yongxiong, Xie Guodong, Huang Hao, et al. Adaptive optics compensation of multiple orbital angular momentum beams propagating through emulated atmospheric turbulence[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(10): 2845-2848.
- [57] Cao Jingtai, Zhao Xiaohui, Li Zhaokun, 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.
- [58] Liu Chao, Chen Shanqiu, Li Xinyang, et al. Performance evaluation of adaptive optics for atmospheric coherent laser communications[J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 15554-15563.
- [59] Liu Chao, Chen Mo, Chen Shanqiu, et al. Adaptive optics for the free-space coherent optical communications[J]. *Optics Communications*, 2016, 361: 21-24.
- [60] Huang Jian, Deng Ke, Liu Chao, et al. Effectiveness of adaptive optics system in satellite-to-ground coherent optical communication[J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 16000-16007.
- [61] Huang Jian, Mei Haiping, Deng Ke, et al. Signal to noise ratio of free space homodyne coherent optical communication after adaptive optics compensation[J]. *Optics Communications*, 2015, 356: 574-577.
- [62] Li Ming, Cvijetic M. Coherent free space optics communications over the maritime atmosphere with use of adaptive optics for beam wavefront correction[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(6): 1453-1462.
- [63] Li Ming, Gao Wenbo, Cvijetic M. Slant-path coherent free space optical communications over the maritime and terrestrial atmospheres with the use of adaptive optics for beam wavefront correction[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(2): 284-297.
- [64] Chen Mo, Liu Chao, Xian Hao. Experimental demonstration of single-mode fiber coupling over relatively strong turbulence with adaptive optics[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(29): 8722-8726.
- [65] Zhao Shengmei, Wang Le, Zou Li, et al. Both channel coding and wavefront correction on the turbulence mitigation of optical communications using orbital angular momentum multiplexing[J]. *Optics Communications*, 2016, 376: 92-98.
- [66] Chen Mo, Liu Chao, Rui Daoman, et al. Experimental results of 5-Gbps free-space coherent optical communications with adaptive optics[J]. *Optics Communications*, 2018, 418: 115-119.
- [67] 芮道满, 刘超, 陈莫, 等. 自适应光学技术在星地激光通信地面站上的应用[J]. *光电工程*, 2018, 45(3): 170647. (Rui Daoman, Liu Chao, Chen Mo, et al. Application of adaptive optics on the satellite laser communication ground station[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170647)
- [68] Yang Leqiang, Yao Kainan, Wang Jianli, et al. Performance analysis of 349-element adaptive optics unit for a coherent free space optical communication system[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 13150.
- [69] Chang Huan, Yin Xiaoli, Cui Xiaozhou, et al. Performance analysis of adaptive optics with a phase retrieval algorithm in orbital-angular-momentum-based oceanic turbulence links[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(22): 6085-6090.
- [70] Rui Daoman, Liu Chao, Chen Mo, et al. Probability enhancement of fiber coupling efficiency under turbulence with adaptive optics compensation[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 60: 102343.
- [71] Chang Huan, Yin Xiaoli, Yao Haipeng, et al. Low-complexity adaptive optics aided orbital angular momentum based wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 1(1): 1-13.
- [72] Gu Haijun, Liu Meiqi, Liu Haoyu, et al. An algorithm combining convolutional neural networks with SPGD for SLAO in FSOC[J]. *Optics Communications*, 2020, 475: 126243.
- [73] Jiang Lun, Dai Zhengshuang, Yu Xin, et al. Experimental demonstration of a single-mode fiber coupling over a 1 km urban path with adaptive optics[J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2021, 42(3): 363-370.
- [74] Zhang Shen, Wang Rui, Wang Yukun, et al. Extending the detection and correction abilities of an adaptive optics system for free-space optical communication[J]. *Optics Communications*, 2021, 482: 126571.
- [75] Chen Mo, Liu Chao, Rui Daoman, et al. Performance verification of adaptive optics for satellite-to-ground coherent optical communications at large zenith angle[J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4230-4242.
- [76] Liu Wei, Yao Kainan, Chen Lu, et al. Performance analysis of coherent free space optical communications with sequential pyramid wavefront sensor[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 100: 332-341.
- [77] 柯熙政, 吴加丽, 杨尚君. 面向无线光通信的大气湍流研究进展与展望[J]. *电波科学学报*, 2021, 36(3): 323-339. (Ke Xizheng, Wu Jiali, Yang Shangjun. Research progress and prospect of atmospheric turbulence for wireless optical communication[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2021, 36(3): 323-339)
- [78] 柯熙政, 邓莉君. 无线光通信中的部分相干光传输理论[M]. 北京: 科学出版社, 2016. (Ke Xizheng, Deng Lijun. Theory of partially coherent optical transmission in wireless optical communication[M]. Beijing: Science Press, 2016)

- [79] 柯熙政, 殷致云. 无线激光通信系统中的编码理论[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (Ke Xizheng, Yin Zhiyun. Coding theory in wireless laser communication system[M]. Beijing: Science Press, 2009)
- [80] 柯熙政, 邓莉君. 无线光通信[M]. 北京: 科学出版社, 2016. (Ke Xizheng, Deng Lijun. Wireless laser communication[M]. Beijing: Science Press, 2016)
- [81] 柯熙政, 谌娟, 邓莉君. 无线光MIMO系统中空时编码理论[M]. 北京: 科学出版社, 2014. (Ke Xizheng, Chen Juan, Deng Lijun. Space time coding theory for wireless optical MIMO systems[M]. Beijing: Science Press, 2014)
- [82] 柯熙政. 无线光正交频分复用原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017. (Ke Xizheng. Principle and application of wireless optical orthogonal frequency division multiplexing[M]. Beijing: Science Press, 2017)
- [83] 柯熙政, 吴加丽. 无线光相干通信原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019. (Ke Xizheng, Wu Jiali. Principle and application of wireless optical coherent communication[M]. Beijing: Science Press, 2019)
- [84] 柯熙政. 紫外光自组织网络理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (Ke Xizheng. Theory of UV self-organizing network[M]. Beijing: Science Press, 2011)
- [85] 柯熙政, 王姣. 涡旋光束的产生、传输、检测及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2018. (Ke Xizheng, Wang Jiao. Generation, transmission, detection and application of vortex beam[M]. Beijing: Science Press, 2018)
- [86] 柯熙政, 陈锦妮. 无线激光通信外差检测系统及其检测方法: CN103051375A[P]. 2013-04-17. (Ke Xizheng, Chen Jinni. Heterodyne detection system and method for wireless laser communication: CN103051375A[P]. 2013-04-17)
- [87] 谭振坤, 柯熙政, 王姣. 外差探测系统波前校正实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 121-127. (Tan Zhenkun, Ke Xizheng, Wang Jiao. Experimental study on the wavefront correction of heterodyne detection system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(12): 121-127)
- [88] Wu Jiali, Ke Xizheng. Development of adaptive optical correction and polarization control modules for 10-km free-space coherent optical communications[J]. *Journal of Modern Optics*, 2020, 67(3): 189-195.
- [89] Ke Xizheng, Yang Shangjun, Wang Jiao. Experimental study of free space coherent optical communication on 1km[C]//10th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT). Stockholm, Sweden: IEEE, 2018: 61-65.
- [90] Ke Xizheng, Chen Xiaozhan. Correcting wavefront distortion of dual-wavelength beams due to atmospheric turbulence with a correction coefficient[J]. *Optics and Photonics Journal*, 2020, 10(4): 64-77.
- [91] Ke Xizheng, Tan Zhenkun. Effect of angle-of-arrival fluctuation on heterodyne detection in slant atmospheric turbulence[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(5): 1083-1090.
- [92] Tan Zhenkun, Ke Xizheng. Analysis of a heterodyne detection system affected by irradiance and phase fluctuations in slant atmospheric turbulence[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(32): 9596-9603.
- [93] Boyer C, Michau V, Rousset G. Adaptive optics: Interaction matrix measurements and real-time control algorithms for the COME-ON project[C]//Proceedings Volume 1237, Amplitude and Intensity Spatial Interferometry. 1990, 1237: 63-81.
- [94] Kasper M, Fedrigo E, Looze D P, et al. Fast calibration of high-order adaptive optics systems[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2004, 21(6): 1004-1008.
- [95] Paschall R N, Anderson D J. Linear quadratic Gaussian control of a deformable mirror adaptive optics system with time-delayed measurements[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(31): 6347-6358.
- [96] 张丹玉. 自适应光学波前畸变控制及实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020. (Zhang Danyu. Research on wavefront distortion control and experiment of adaptive optics[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020)
- [97] Polo A, Haber A, Pereira S F, et al. An innovative and efficient method to control the shape of push-pull membrane deformable mirror[J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27922-27932.
- [98] Haber A, Polo A, Smith C S, et al. Iterative learning control of a membrane deformable mirror for optimal wavefront correction[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(11): 2363-2373.
- [99] 刘章文, 李正东, 周志强, 等. 基于模糊控制的自适应光学校正技术[J]. *物理学报*, 2016, 65: 014206. (Liu Zhangwen, Li Zhengdong, Zhou Zhiqiang, et al. Adaptive optics correction technique based on fuzzy control[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65: 014206)
- [100] Ke Xizheng, Zhang Danyu. Fuzzy control algorithm for adaptive optical systems[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(36): 9967-9975.
- [101] 李有宽, 陈栋泉, 杜祥瑞. 大气闪烁对自适应光学校正的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(5): 545-550. (Li Youkuan, Chen Dongquan, Du Xiangwan. Atmospheric scintillation effect on adaptive optics correction[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(5): 545-550)
- [102] 杨珂. 计算光场成像波前传感技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019. (Yang Ke. Research on wavefront sensing technology with computational light field imaging[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019)
- [103] 柯熙政, 杨珂, 张颖. CAPIS技术探测波前畸变的实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56: 120101. (Ke Xizheng, Yang Ke, Zhang Ying. Experimental study on wavefront distortion detection using CAPIS technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56: 120101)
- [104] 柯熙政, 张云峰. 无波前传感自适应系统及利用该系统提高收敛速度的方法: CN110365404A[P]. 2019-10-22. (Ke Xizheng, Zhang Yunfeng. Wavefront-free sensing adaptive system and method of improving convergence rate by using system: CN110365404A[P]. 2019-10-22)
- [105] 李梅. 光束波前畸变的本征模式法校正实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020. (Li Mei. Experimental study on eigenmode method correction of beam distortion[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020)
- [106] 喻际, 董冰. 基于变形镜本征模式的无波前传感器自适应光学系统实验研究[J]. *光学学报*, 2015, 35: 0322004. (Yu Ji, Dong Bing. Experimental study of wavefront sensorless adaptive optics based on deformable mirror eigen modes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35: 0322004)

- [107] Ke Xizheng, Li Mei. Laser beam distorted wavefront correction based on deformable mirror eigenmodes[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58: 126101.
- [108] 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: 070101. (Ke Xizheng, Zhang Yunfeng, Zhang Ying, et al. GPU acceleration in wave-front sensorless adaptive wave-front correction system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56: 070101)
- [109] 马慧敏, 张鹏飞, 张京会, 等. 自适应光学系统随机并行梯度下降算法[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(6): 1206-1210. (Ma Huimin, Zhang Pengfei, Zhang Jinghui, et al. Stochastic parallel gradient descent algorithm for adaptive optics system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(6): 1206-1210)
- [110] Zommer S, Ribak E N, Lipson S G, et al. Simulated annealing in ocular adaptive optics[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(7): 939-941.
- [111] 杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统几种随机并行优化控制算法比较[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(1): 11-16. (Zhang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Comparison of several stochastic parallel optimization control algorithms for adaptive optics system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(1): 11-16)
- [112] 吴加丽. 无波前探测的相干光通信系统实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018. (Wu Jiali. Research of the coherent optical communication system with wavefront sensorless[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018)
- [113] Vorontsov M A. Decoupled stochastic parallel gradient descent optimization for adaptive optics: integrated approach for wave-front sensor information fusion[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2002, 19(2): 356-368.
- [114] 吴加丽, 柯熙政. 无波前传感器的自适应光学校正[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55: 030103. (Wu Jiali, Ke Xizheng. Adaptive optics correction of wavefront sensorless[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55: 030103)
- [115] 谭振坤. 无线光通信中外差探测性能影响因素及实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019. (Tan Zhenkun. Effects of factors on the performance of heterodyne detection and experimental investigation in wireless optical communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019)
- [116] 王夏尧. 涡旋光束的自适应光学校正技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018. (Wang Xiayao. Research on adaptive optics correction technique of vortex beams[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018)
- [117] 柯熙政, 王夏尧. 涡旋光波前畸变校正实验研究[J]. *光学学报*, 2018, 38: 0328018. (Ke Xizheng, Wang Xiayao. Experimental study on the correction of wavefront distortion for vortex beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38: 0328018)
- [118] 崔娜梅. 相位差法校正涡旋光束波前畸变的实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020. (Cui Namei. Experimental research on correcting wavefront distortion of vortex beam by phase diversity method[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020)
- [119] Ke Xizheng, Cui Namei. Experimental research on phase diversity method for correcting vortex beam distortion wavefront[J]. *Applied Physics B*, 2020, 126: 66.
- [120] 柯熙政, 韩柯娜. 液晶空间光调制器的波前模拟及波前校正[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56: 051403. (Ke Xizheng, Han Kena. Wavefront simulation and wavefront correction of liquid crystal spatial light modulator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56: 051403)
- [121] 孔英秀. LC-SLM的空间相干光通信波前校正技术[D]. 西安: 西安理工大学, 2019. (Kong Yingxiu. Wavefront correction technique of spatial coherent optical communication with LC-SLM[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019)
- [122] 孔英秀, 柯熙政, 杨媛. 大气湍流对空间相干光通信的影响研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52: 080601. (Kong Yingxiu, Ke Xizheng, Yang Yuan. Influence research of atmospheric turbulence on space coherent optical communications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52: 080601)
- [123] 李新阳, 凌宇, 陈东红, 等. 自适应光学系统中高速倾斜反射镜的稳定控制[J]. *强激光与粒子束*, 1999, 11(1): 31-36. (Li Xinyang, Ling Ning, Chen Donghong, et al. Stable control of the fast steering mirror in adaptive optics system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(1): 31-36)
- [124] 李有宽, 陈栋泉, 杜祥琬. 双变形镜自适应光学全场补偿模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(6): 665-669. (Li Youkuan, Chen Dongquan, Du Xiangwan. Simulation of full field correction with two-deformable-mirror adaptive optics[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(6): 665-669)
- [125] 柯熙政, 罗静, 雷思琛. 空间光耦合自动对准方法与实现[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47: 0103009. (Ke Xizheng, Luo Jing, Lei Sichen. Automatic alignment method and realization of space optical coupling[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47: 0103009)
- [126] 柯熙政, 陈炜. 基于光纤阵列的空间光耦合探测装置: CN103209022A[P]. 2013-07-17. (Ke Xizheng, Chen Wei. Space optic coupling detection device based on optical fiber arrays: CN103209022A[P]. 2013-07-17)
- [127] 罗静. 空间光耦合自动对准技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018. (Luo Jing. Research on automatic alignment technology of space optical fiber coupling[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018)
- [128] Ke Xizheng, Yin Benkang. Experimental research on automatic alignment and control algorithm of spatial light-fiber coupling[J]. *International Journal of Optics*, 2021, 2021: 8481146.
- [129] 柯熙政, 张旭彤. 一种利用模式转换提高单模光纤耦合效率的方法: CN110133803A[P]. 2019-08-16. (Ke Xizheng, Zhang Xutong. Method of improving single-mode optical fiber coupling efficiency through mode conversion: CN110133803A[P]. 2019-08-16)
- [130] 张旭彤. 模式转换法提高单模光纤耦合效率的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020. (Zhang Xutong. Research on mode conversion to improve coupling efficiency on single-mode fiber[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020)
- [131] Ke Xizheng, Zhang Xutong. Conversion of free-space optical path mode by spatial light modulator[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59: 016109.