

文章编号 1004-924X(2014)10-2605-06

自适应光学技术在通信波段对大气湍流的校正

刘 超, 陈善球, 廖 周, 魏 凯, 李 敏, 鲜 浩*

(1. 中国科学院 自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要:针对大气湍流引起的激光光强、相位和传输方向的随机变化对大气激光通信质量的影响,开展了用自适应光学(AO)技术校正大气湍流影响的研究。定量分析了自适应光学技术在通信波段校正大气湍流的效果。利用中国科学院光电技术研究所研制的安装在云南丽江高美谷观测站的 1.8 m 望远镜和 127 单元 AO 系统,在 1 550 nm 通信波段对不同高度角的恒星进行了大气湍流校正实验。通过采集校正后的恒星图像,分析了校正后的斯特勒尔比,同时记录下当时的大气相干长度,由此得到了在不同大气湍流条件下的校正效果。实验表明,当大气湍流强度 $D/r_0(1\ 550\ \text{nm})$ 小于 6.5 时,校正后的波面 RMS 值可以小于 1 rad,即在中弱大气湍流条件下,该 AO 系统可以有效地对大气湍流进行校正。

关键词:自适应光学;相干激光通信;大气湍流;波面校正

中图分类号:O439;TN929.12 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142210.2605

Correction of atmospheric turbulence by adaptive optics in waveband of free-space coherent laser communication

LIU Chao, CHEN Shan-qiu, LIAO Zhou, WEI Kai, LI Min, XIAN Hao*

(1. Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

* Corresponding author, E-mail: xianhao@ioe.ac.cn

Abstract: In consideration of effect of intensity scintillation, phase distortion and transmission direction changes caused by atmospheric turbulence on communication links, this paper explores the correction technology of the atmospheric turbulence by the adaptive optics (AO). The correction effects of the AO on atmospheric turbulence in the waveband of free-space communication was analyzed quantitatively. A field experiment to observe the star with different altitude angles in the 1 550 nm waveband was performed with a 1.8 m telescope mounted on Yunnan and the 127-actuators AO system developed by the Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences. The Strehl ratio and the atmospheric coherent length were recorded for the observation of each star. The experiment results show that when the atmospheric turbulence intensity $D/r_0(1\ 550\ \text{nm})$ is less than 6.5, the wavefront error will be less than 1 rad after correction by the AO. It concludes that the AO is able to overcome the effect of the atmospheric turbulence on the required quality of free-space coherent laser com-

收稿日期:2013-11-22;修订日期:2014-01-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61308082)

munication under weak and moderate turbulence conditions.

Key words: adaptive optics; coherent laser communication; atmospheric turbulence; wavefront correction

1 引言

随着信息化时代的到来,互联网和多媒体技术得到了飞速发展,对无线和有线通信系统的带宽要求也越来越高。在卫星通信领域,传统的微波通信系统已经不能满足大容量信息传输的需求,这是因为随着超光谱成像仪和合成孔径雷达的应用以及多媒体业务的拓展,卫星通信带宽将达到 10 Gbps 量级以上,而 10 Gbps 是微波通信系统的理论带宽上限。空间激光通信系统以激光作为载波媒介,潜在的通信带宽可以达到 100 Gbps 量级以上,并且具有保密性好、体积小、重量轻、功耗低、抗干扰能力强以及不受无线电频率管制等优点,因此,自由空间激光通信是解决卫星微波通信瓶颈的必然选择。

按照接收方式的不同,自由空间激光通信可分为直接探测系统和相干探测系统。与直接探测系统相比,相干探测系统要探测本振光和信号光的混频光场,因此具有接收灵敏度高,能够克服背景噪声等优点,是一种更有发展前景的系统。2008 年,德国和美国已经成功实现了低轨卫星(LEO)间 5.6 Gbps 的激光通信链路^[1-5],通信的误码率(Bit Error Rate, BER)低于 10^{-9} ,可以满足高质量的通信。他们还进行了 LEO-地通信实验,为了减弱湍流的干扰,选择的接收望远镜口径较小(6 cm);不幸的是这样得到的误码率高达 10^{-5} 以上,不能满足高质量通信的要求,并且当口径加大时,BER 还将急剧增大。分析表明导致误码率上升的原因主要是大气湍流引起传输激光光强、相位和传输方向的随机变化使得相干接收机的干涉对比度(混频效率)急剧下降,从而严重影响了相干接收机的信噪比,于是导致误码率增大。

自适应光学(Adaptive Optics, AO)可以实时校正大气湍流的影响,目前在天文成像^[6-7]、人眼视网膜成像^[8]等方面得到了广泛的应用。国内外科研人员对于 AO 技术在非相干激光通信系统^[9-12,13]的应用开展了大量研究。研究表明, AO 不仅可以有效地改善非相干通信系统的通信质量,而且能够提高大气相干通信的混频效率,降低

误码率,增加通信距离。相应的研究工作目前正在进行中^[1,15-16],但还没有关于实验结果的报导。然而, AO 对于非相干和相干通信系统的作用存在较大差异。对于非相干通信系统, AO 的主要作用在于减小接收信号光的光强闪烁;而对于相干通信系统, AO 的作用主要体现在提高信号光和本振光空间波前的位相匹配精度,从而提高混频效率。

本文通过实验研究,讨论了 AO 系统在 1 550 nm 通信波长的激光通信系统中能够达到的空间相位校正精度,从而为空间相干激光通信的 AO 系统设计提供依据。

2 自适应系统在通信波段的校正效果

实验在中国科学院光电技术研究所位于云南天文台丽江高美古观测站的 127 单元 1.8 m 自适应光学望远镜系统^[17-19]上进行,采用恒星作为观测目标,把中心波长为 1 550 nm 的窄带滤光片(半高全宽(FWHM)为 10 nm)置于 J 波段相机之前,得到了自适应光学系统在 1 550 nm 通信波长的校正效果。通过改变观测目标的高度角还得到了不同强度的大气湍流条件。

在 2013 年 6 月 11 日北京时间 22:33 对恒星 HIP72105 进行了观测。该星的星等为 2.35 m,高度角为 87° , AO 校正频率为 2 000 Hz。当时的大气相干长度 r_0 为 7.3 cm(波长为 550 nm,斜程路径),如图 1 所示。

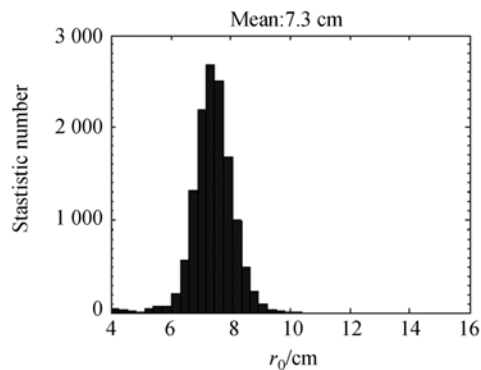


图 1 550 nm 处大气相干长度 r_0 的分布

Fig. 1 Distribution of Fried parameter r_0 of atmospheric turbulence at 550 nm

对恒星进行了一次实时校正,保存了校正前后共 95 帧恒星图像数据,第 1~20 帧为校正前的数据,第 21~95 帧为校正后的数据,曝光时间为 300 ms。自适应光学系统校正前的恒星像如图 2 所示,校正后的恒星像如图 3 所示。由图可见,校正后能量高度集中,恒星的最高光强从 360 IDU 提升到约 8200 IDU。从图 3 和图 4 可以清晰看到恒星像的一级衍射环。

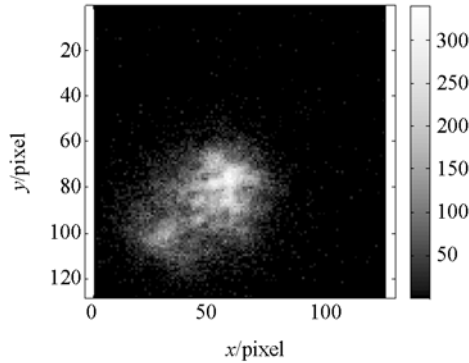


图 2 AO 系统校正前的恒星像(星号:HIP72105,曝光时间:300 ms,第 5 帧,共 95 帧)

Fig. 2 Image of star HIP72105 before AO correction (Exposure time: 300 ms; the fifth frame of 95 frames)

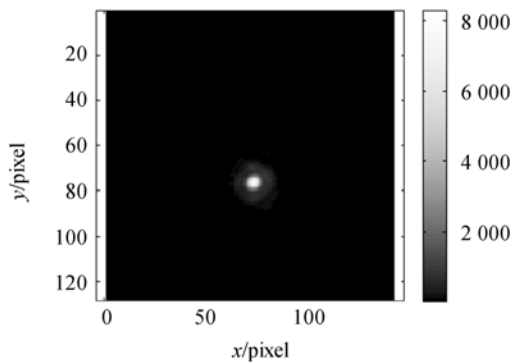


图 3 经过 AO 校正后,恒星 HIP72105 在通信波长 1 550 nm 的单帧远场光斑(第 66 帧,共 95 帧)

Fig. 3 Single frame image of star HIP72105 in 1 550 nm after AO correction(the 66th frame of 95 frames)

对图 3 的恒星像进行积分,获得了其周围的能量曲线,如图 5 所示。图 5 同时给出了系统衍射极限的能量曲线。定义在系统艾里斑半径位置处的远场环能量与衍射极限环能量之比为环能量斯特勒尔比(Strehl Ratio, SR)。由图 5 得出,该帧图像的 SR 为 0.64。

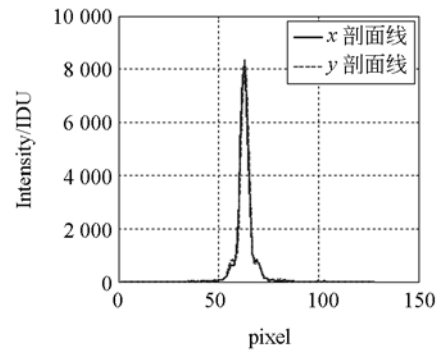


图 4 远场光斑的 xy 剖面线

Fig. 4 x and y cuts in far field light spot of star

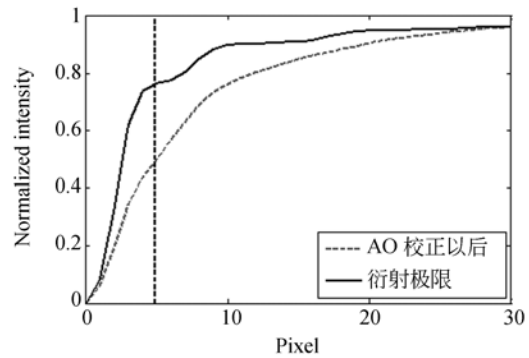


图 5 单帧远场光斑的环能量曲线, y 轴为归一化光强

Fig. 5 Annular energy curves of single frame star image (intensity of y axis is normalized)

对校正前后的 95 帧图像逐帧进行 SR 计算,获得了单帧 SR 的变化曲线,如图 6 所示。由图可见,在校正前,SR 约为 0.1;经过自适应系统校正后,SR 的平均值提高到 0.6 左右,校正效果非常好。

为了评价 AO 系统长时间的校正效果,把校正后的图像进行叠加得到长曝光图像。图 7 给出了从第 30 帧叠加到第 95 帧的长曝光图像,曝光总时间为 19.8 s。对长曝光的剖面线(如图 8 所示)仍可以清晰得到衍射环。由长曝光像的环能量曲线得到长曝光像的 SR 为 0.58,与单帧远场像的 SR 相差不大,说明校正后图像的稳定性很好。

分别对 41 颗恒星进行自适应光学校正,得到的结果如图 10 所示。从图可以看到,在 1 550 nm 通信波长,在不同的湍流条件下(D/r_0 不同),自适应光学校正后所得到的 SR。

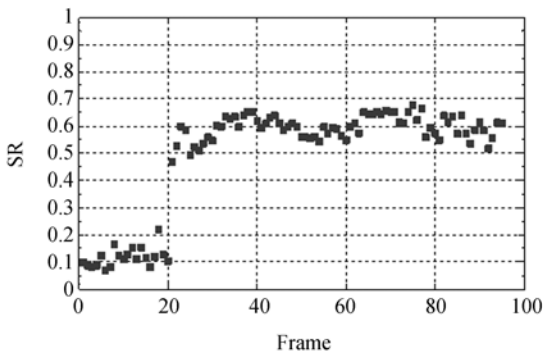


图 6 单帧图像的 SR 比(0~20 帧为校正前,21~95 帧为校正后)

Fig. 6 Strehl Ratios (SR) of images (before correction: the 1 st-20 th frames; after correction: the 21th-95th frames)

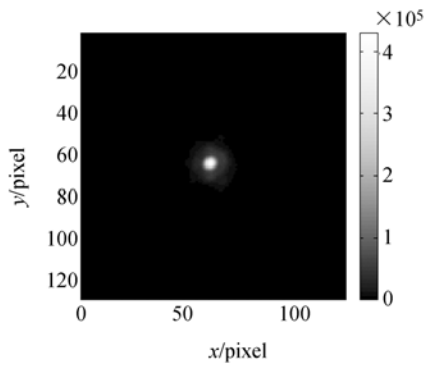


图 7 30~95 帧远场图像叠加获得的长曝光像(总计曝光时间为 19.8 s ,SR 为 0.58)

Fig. 7 Long exposure image acquired by adding frames from the 30th to 95th frames (total exposure time is 19.8 s, long exposure time SR is 0.58)

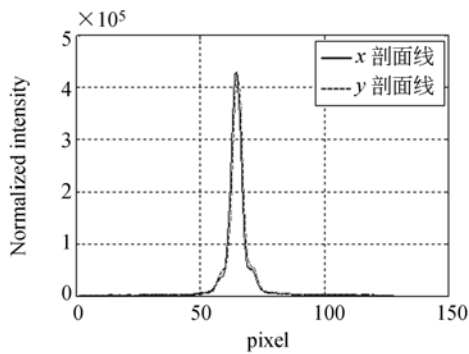


图 8 长曝光像的 xy 剖面线

Fig. 8 x and y cuts of long exposure star image

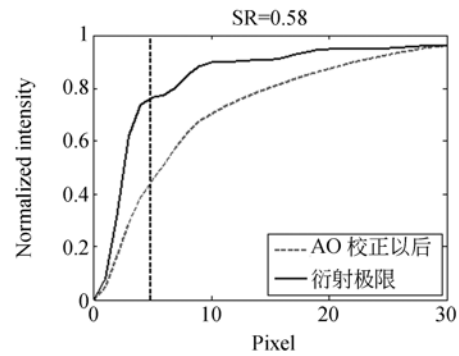


图 9 长曝光像的环围能量曲线(y 轴为归一化光强)

Fig. 9 Annular energy curves of long exposure star image (intensity of y axis is normalized)

根据 SR 与波前像差 RMS 值 σ 的关系:

$$SR = e^{-\sigma^2}, \quad (1)$$

得到,当 $\sigma \leq 1$ rad 时, $SR \geq 0.367$ 。由图 10 可知,此时 $D/r_0 < 6.5$ 。

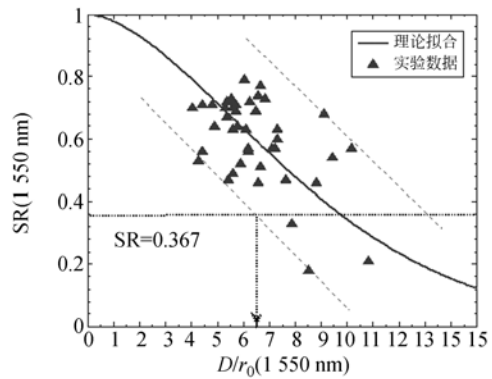


图 10 对 41 颗恒星进行校正后获得的 SR 与 D/r_0 的关系

Fig. 10 Relation between SR and D/r_0 of 41 stars after correction

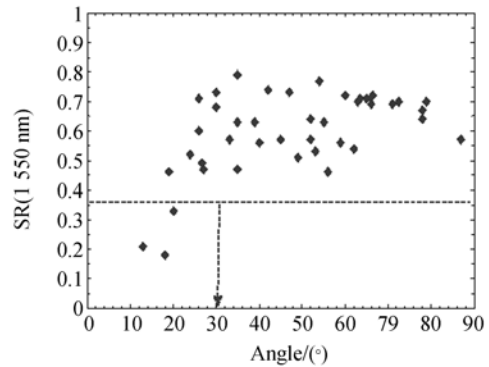


图 11 AO 校正后 SR 与恒星所在高度角的关系

Fig. 11 SR vs. altitude angle of observed stars after AO correction

图 11 给出了经 AO 校正后,SR 与恒星所在高度角的关系。可以看出,当 $SR > 0.367$ 时,恒星所在的高度角要大于 30° ;而当高度角小于 30° 时,校正效果会急剧下降。

3 结 论

本文对 AO 在通信波段的校正能力进行了实验研究。利用中国科学院光电技术研究所研制的安装在云南天文台丽江高美谷观测站的 1.8 m AO 望远镜,在 1 550 nm 通信波段对 41 颗不同高度角的恒星进行了大气湍流校正实验。实验结

果表明,当湍流强度 $D/r_0 < 6.5$ 时,校正后的大气湍流残差 RMS 值小于 1 rad。不同高度角的 AO 校正效果不同,当高度角大于 30° 时,校正后的大气湍流残差 RMS 值小于 1 rad。通过本文的研究可以看出,在中弱的大气湍流条件下,AO 系统可以非常有效地校正大气湍流。

4 致 谢

感谢云南天文台的张定稳、和汉龙等在实验过程中给予的望远镜操作方面的指导和帮助。

参考文献:

- [1] GREGORY M, HEINE F, KAMPFNER H. Commercial optical inter-satellite communication at high data rates[J]. *Opt. Eng.*, 2012, 51(3):031202.
- [2] SEEL S, KAMPFNER H, HEINE F. Space to ground bidirectional optical communication link at 5.6 Gbps and EDRS connectivity outlook [J]. *IEEE*, 2011, 1111:1-7.
- [3] FIELDS R A, KOZLOWSKI D A, YURA H T. 5.625 Gbps bidirectional laser communications measurements between the NFIRE satellite and an optical ground station [J]. *SPIE*, 2011, 8184: 81840D.
- [4] HEINE F, KAMPFNER H, LANGE R. Optical inter-satellite communication operational [J]. *The 2010 Military Communications Conference*, 2010, 978:2284-2288.
- [5] SMUTNY B, KAEMPFNER H, MUEHLNIKEL G. 5.6 Gbps optical intersatellite communication link [J]. *SPIE*, 2009, 7199: 719926.
- [6] RODDIER F. *Adaptive Optics in Astronomy* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [7] HARDY J W. *Adaptive Optics For Astronomical Telescopes* [M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [8] 刘超,穆全全,胡立发,等. 校正水平湍流波面的自适应光学系统带宽需求分析 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(10):2137-2142.
- LIU CH, MU Q Q, HU L F, *et al.*. Bandwidth requirements of adaptive optical system for horizontal turbulence correction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10):2137-2142. (in Chinese)
- [9] PORTER J, QUEENER H M, LIN J E. *Adaptive Optics for Vision Science Principles, Practices, Design, and Applications* [M]. Canada: Wiley-Interscience A, John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [10] TYSON R K, THARP J, SCANNING D E. Measurement of the bit-error rate of an adaptive optics, free-space laser communications system, part 2: multichannel configuration, aberration characterization, and closed-loop results [J]. *Opt. Eng.*, 2005, 44(9): 096003-096003-6.
- [11] WRIGHT M W, ROBERTS J, FARR W. Improved optical communications performance combining adaptive optics and pulse position modulation [J]. *Opt. Eng.*, 2008, 47(1): 016003-016003-8.
- [12] CHEN E, CHENG H, LI X. Research on adaptive optics in satellite-to-ground laser communication [J]. *SPIE*, 2012, 8331: 833104.
- [13] WEYRAUCH T, VORONTSOV M A, GOWENS J W. Fiber coupling with adaptive optics for free-space optical communication [J]. *Free-Space Laser Communication and Laser Imaging*, 2002, 4489: 177-184.
- [14] 武云云,陈二虎,张宇. 自适应光学技术提高 FSO 性能的实验验证 [J]. *光通信技术*, 2012(4): 15-18.
- WU Y Y, CHEN E H, ZHANG Y. Experiment on adaptive optics to improve the performance of FSO [J]. *Opt. Commun. Tech.*, 2012(4):15-18. (in Chinese)
- [15] LIU C, CHEN S, LI X. The performance evaluation of adaptive optics for atmospheric coherent laser communications [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(13):15554-15563.

- [16] SODNIK Z, ARMENGOL J P, CZICHY R H. Adaptive optics and ESA's optical ground station[J]. *SPIE*, 2009, 7464:746406.
- [17] WEI K, ZHANG X, XIAN H. First light on the 127-element adaptive optical system for 1.8-m telescope[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, 8(11):1019-1021.
- [18] RAO C, WEI K, ZHANG X. First observations on the 127-element adaptive optical system for 1.8 m telescope [J]. *SPIE*, 2010, 7654: 76541H-76541H-8.
- [19] RAO C, JIANG W, ZHANG Y. Progress on the 127-element adaptive optical system for 1.8m telescope[J]. *SPIE*, 2008, 7015:70155Y-70155Y-9.

作者简介:



刘 超(1983—),男,四川安岳人,博士,助理研究员,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事自适应光学在空间激光通信中的应用研究。E-mail: liuchaoioe@163.com

通讯作者:



鲜 浩(1969—),男,四川眉山人,硕士,研究员,2008年于电子科技大学获得硕士学位,现为中国科学院自适应光学重点实验室主任,主要从事自适应光学、大口径望远镜等方面的研究。E-mail: xianhao@ioe.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)