

星地相干光通信中的自适应光学系统带宽研究

李佳蔚^{1,2} 陈卫标¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对星地相干激光通信,研究了自适应光学的系统带宽对通信性能的影响。对于特定校正阶数的自适应光学系统,得到了系统需求的控制带宽,并对比了同步轨道(GEO)卫星对地链路和低地轨道(LEO)卫星对地链路。结果显示低轨卫星链路所需的控制带宽远大于同步卫星链路,原因来自于低轨卫星和地面站的高速相对运动产生的垂直链路风速,同时低轨卫星对地链路对自适应光学的带宽需求和天顶角是成反比关系的。分析了低轨卫星对地相干激光通信链路混频效率和自适应系统带宽以及校正阶数的关系,结果表明,200 Hz 的闭环带宽完全可以满足需求,当达到 100 Hz 带宽之后,增加变形镜单元数对混频效率的提升更为有效。

关键词 光通信; 自适应光学; 大气湍流; 控制带宽; 混频效率

中图分类号 TN927

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0806003

Bandwidth of Adaptive Optics System in Satellite-Ground Coherent Laser Communication

Li Jiawei^{1,2} Chen Weibiao¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The influence of system bandwidth of adaptive optics system to communication performance is investigated for satellite-ground coherent optics communication. For a certain modes corrected by adaptive optics, the required servo bandwidth is obtained and the low earth orbit (LEO) satellite-ground laser links are compared with the geosynchronous (GEO) satellite-ground laser links. The results show that the LEO links require larger servo bandwidth than the GEO links. This is due to the high speed relative movement between the LEO and the ground station can generate vertical wind speed link. And the bandwidth requirement of adaptive optics system for LEO-ground link and zenith angle are inversely related. The relationship between the mixing efficiency LEO-ground coherent laser communication link, the adaptive optics system servo bandwidth and corrected modes is also studied. The results show that 200 Hz of close-loop bandwidth can meet the requirement, and increasing the number of actuators on deformable mirror is a more effective way to improve the mixing efficiency when the bandwidth reaches 100 Hz.

Key words optics communications; adaptive optics; atmospheric turbulence; servo bandwidth; mixing efficiency

OCIS codes 060.1660; 060.4510; 010.1285

1 引言

相比于传统微波通信,自由空间相干激光通信以波长更短的激光作为信息载体,具有更高的通信容量、更低的能耗、更好的安全性以及更小的天线尺寸等优势,因此在空间远距离通信中可以作为微波通信的补充

收稿日期: 2016-03-03; 收到修改稿日期: 2016-04-07

作者简介: 李佳蔚(1987—),男,博士研究生,主要从事空间激光通信方面的研究。E-mail: jiaweili387@gmail.com

导师简介: 陈卫标(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光、光电子、激光雷达及其在海洋、大气、空间的应用等方面的研究。E-mail: wbchen@mail.shenc.ac.cn(通信联系人)

和扩展,近些年受到越来越多的重视,也已经在多次激光通信实验中获得了验证^[1-2]。但是短波通信载体给相干光通信带来诸多优势的同时也带来了一些相比于微波通信的弊端,在星地通信链路中,相干激光通信受到大气湍流的严重影响^[3-5],也是当下限制自由空间光通信推广的重要原因之一。激光束在大气湍流中会经历折射率在空间和时间上的随机起伏,这在接收端会产生光强闪烁、光束漂移、波前畸变等问题,其中波前畸变对相干光通信系统产生的影响尤为严重。自适应光学(AO)被认为是解决这一问题的有效途径^[3-4,6]。

湍流引起的波前畸变是指在接收孔径内光束相位在空间和时间上的随机起伏。这会极大降低信号光和本振光的混频效率以及到单模光纤的耦合效率^[7]。自适应系统中的变形镜可以实时产生和畸变波前共轭的面型,进而补偿光束的空间相位起伏。当变形镜产生的共轭面型不能和畸变波前完全匹配时,经过 AO 系统校正的光束波前中会有剩余的空间拟合误差存在。在之前的报道中,Belmonte 等^[8]提出了一个数学模型来计算不同湍流强度下的光强起伏和经过 AO 校正后的空间拟合相位残差,并计算了对相干激光通信系统性能的影响。Zuo 等^[9]利用该模型计算了大气相干激光通信的误码率,证明了自适应光学校正的泽尼克阶数的增加可以极大降低相干通信系统的误码率。Liu 等^[10]研究了经过自适应光学校正后剩余的空间拟合波面误差,也证明了自适应光学是降低大气相干激光通信系统误码率的有效途径。这些报道主要考虑了 AO 校正后的空间拟合相位残差,然而另外一方面,变形镜校正后除了有剩余的空间拟合误差外,还会有校正实时性不足引起的时延误差^[11],这项误差主要是驱动变形镜的闭环控制带宽不足引起的。1977 年,Greenwood^[12]分析了大气湍流的功率谱密度,以此研究了 AO 系统校正的时延误差,得出了系统所需的控制带宽,其中自适应控制系统的频率响应被假设为二元频率滤波和简单的 R-C 滤波模型。

本文对 AO 系统的时延误差和空间拟合误差进行了统一分析,其中 AO 系统假设为二阶控制系统,求出了对应的时延误差,并对相干光通信系统所需的 AO 校正阶数和控制带宽进行了分析。同时对比了低轨卫星对地通信链路和同步卫星对地通信链路对 AO 系统带宽的不同需求。

2 理论模型

接收孔径内光束波前的时间变化是由激光链路和大气湍流的相对运动造成的,垂直链路的风速和湍流强度是影响波前变化快慢的主要因素。对于距离为 L 的大气激光链路,湍流变化的功率谱密度可表示为^[12]

$$F_{\text{PSD}}(f) = 0.0326 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 f^{-8/3} \int_0^L C_n^2(z) V^{5/3}(z) dz, \quad (1)$$

式中 f 为湍流变化的特定频率, λ 为通信激光波长, $V(z)$ 为垂直链路的风速, $C_n^2(z)$ 为大气折射率结构常数,可表示为^[13]

$$C_n^2(z) = 0.00594(v/27)^2 (10^{-5}z)^{10} \exp(-z/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-z/1500) + C_n^2(0) \exp(-z/100), \quad (2)$$

式中 v 为链路上的均方根风速, $C_n^2(0)$ 为接收地面站附近的折射率结构常数。在描述大气湍流的时间变化效应时,风速模型是非常重要的,(1)式中垂直链路的风速 $V(z)$ 可由 Bufton 模型来描述^[13]

$$V(z) = V_T + V_g + V_{\text{tro}} \exp\left[-\left(\frac{z \cos \theta - 9400}{4800}\right)^2\right], \quad (3)$$

式中 V_T 为卫星或飞行器运动引起的链路和湍流的相对速度, V_g 为地面风速, V_{tro} 为对流层顶的风速, θ 为星地通信链路的的天顶角。根据几何定理可推导得出在天顶角 θ ,链路长度 z 处的垂直风速为

$$V_T(z) = \frac{\omega_s(R_e + H)}{H \sec \theta} z \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{R_e \sin \theta}{R_e + H}\right)^2}, \quad (4)$$

式中 ω_s 为卫星或飞行器相对于地心的运动角速度, R_e 为地球半径, H 为卫星或飞行器的海拔高度。

假设自适应光学系统为二阶控制系统,其闭环频率响应 $H(f)$ 可表示为

$$H(f) = \frac{1}{1 - (f/f_0)^2 + 2i\zeta(f/f_0)}, \quad (5)$$

式中 f_0 为控制系统的固有频率, ζ 为阻尼系数。

则经过自适应光学系统校正后,时延波前误差的均方差可表示为

$$\sigma_{\tau}^2 = \int_0^{\infty} |1 - H(f)|^2 F_{\text{PSD}}(f) df, \quad (6)$$

为了计算(6)式,可以将(5)式用二元频域滤波模型 $H'(f)$ 来等效描述

$$H'(f) = \begin{cases} 1, & f \leq f_{\text{eq}}, \\ 0, & f > f_{\text{eq}} \end{cases}, \quad (7)$$

式中 f_{eq} 为二阶控制系统的等效频率,等效方法为

$$\int_0^{f_{\text{eq}}} H'(f) df = \int_0^{f_{3\text{dB}}} H(f) df, \quad (8)$$

由此可以得到等效频率

$$f_{\text{eq}} = \int_0^{f_0 \cdot [(4\xi^4 + 1)^{1/2} - 2\xi^2]^{1/2}} H(f) df, \quad (9)$$

根据(2)式和(7)~(9)式,可以计算(6)式得到自适应校正后的时延波前误差为

$$\begin{aligned} \sigma_{\tau}^2 &= \int_{f_{\text{eq}}}^{\infty} 0.0326 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 f^{-8/3} \int_{L_0}^L C_n^2(z) V^{5/3}(z) dz df = \\ &= \frac{0.0784\pi^2}{\lambda^2} \left\{ \int_0^{f_0 \cdot [(4\xi^4 + 1)^{1/2} - 2\xi^2]^{1/2}} H(f) df \right\}^{-5/3} \int_{L_0}^L C_n^2(z) V^{5/3}(z) dz. \end{aligned} \quad (10)$$

众所周知,光束波前可以用泽尼克多项式来描述。经过变形镜校正后,由于空间波前拟合的不完全性,光束波前还有剩余空间拟合误差存在 σ_r^2 。假设变形镜可以校正的泽尼克阶次为 J ,则剩余拟合误差可表示为^[14]

$$\sigma_r^2 = C_J \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3}, \quad (11)$$

式中系数 C_J 随校正阶次 J 的增加而减小, D 为地面站接收望远镜的孔径尺寸, r_0 为通信激光链路的大气相干长度,这个参数可以表征大气湍流的强度^[13]

$$r_0 = \left[0.432 \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \sec \theta \cdot \int_0^L C_n^2(z) \cdot dz \right]^{-3/5}, \quad (12)$$

式中 r_0 主要由链路路上的折射率结构常数决定。从(11)式可以看出,接收光束的波前畸变量和接收口径的大小成正比。对于一个静态的波前畸变,最大可校正的泽尼克模式数量 J 与自适应光学系统中变形镜的驱动器单元数呈正相关。

根据时延误差(10)式和剩余空间拟合误差(11)式,就可以得到经过自适应光学校正后的信号光总的波前相位误差的均方差为 $\sigma_i^2 = \sigma_{\tau}^2 + \sigma_r^2$ 。

3 结果分析和讨论

自适应光学校正后的总残余波前误差减少至 $\sigma_{\Phi} = 0.2\pi$ (十分之一波长)时,可认为信号光波前相位已经得到足够校正^[12]。对于最大校正泽尼克阶数为 J 的自适应光学系统,可以根据(10)、(11)式得到系统所需的闭环控制带宽

$$f_{\text{eq}}(J) = \left[\frac{0.0784\pi^2 \int_{L_0}^L C_n^2(z) V^{5/3}(z) dz}{\lambda^2} \right]^{3/5} \cdot \frac{1}{(0.2\pi)^2 - C_J \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3}}. \quad (13)$$

由(13)式可以看出,影响 AO 系统所需带宽的参数包括有效折射率结构常数 C_n^2 、风速、接收望远镜口径 D 和大气相干长度 r_0 ,其中 C_n^2 的影响可由 r_0 描述,这两个参数都反映了湍流的强度,后面将分析 D/r_0 和风速对 AO 所需带宽的影响。另外对激光通信系统影响严重的闪烁系数对 AO 系统所需带宽无直接影响。

对于低地轨道(LEO)卫星对地激光链路,图 1 根据(13)式计算了不同校正阶数 J 的 AO 系统所需的闭环控制带宽。在计算中,低轨卫星绕地转动一周的时间设为 90 min,通信激光波长为常见的 1550 nm,地面风速为常见的 4 m/s。LEO 与地面站进行激光通信时,不同天顶角的激光链路穿过底层大气的距离不同,导致链路受到的湍流强度随天顶角的增大而增大,接收望远镜口径 D 和相干长度 r_0 的比值也随着天顶角的增大而相应增

大。图 1 中红线表示 $D/r_0=3$ 的情况,相应的链路天顶角 $\theta=40^\circ$;绿线为 $D/r_0=4$,相应链路天顶角 $\theta=60^\circ$;蓝线为 $D/r_0=5$,天顶角 $\theta=70^\circ$;粉线为 $D/r_0=6$,天顶角 $\theta=75^\circ$;黑线为 $D/r_0=7$,天顶角 $\theta=78^\circ$ 。

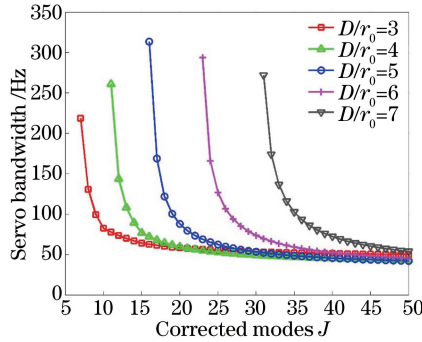


图 1 不同校正阶数情况下,LEO 对地激光链路中的 AO 系统对控制带宽的需求
Fig. 1 In the situation of different corrected modes, the requirement servo bandwidth for AO system in LEO-ground laser links

为了达到剩余校正误差 $\sigma_\phi=0.2\pi$ 的要求, D/r_0 越大则需要校正的泽尼克阶数也越多,同时对闭环带宽的要求也越大。从图 1 也可以看出,随着 D/r_0 即天顶角的增大,虽然链路长度增加,湍流强度增强,但是当校正阶次较高时, $D/r_0=3$ 的情况所需的控制带宽要略高于 $D/r_0=4$ 和 5 的情况。这个现象的原因是卫星和地面站相对运动造成垂直链路风速与天顶角大小成反比关系,因此增大了小天顶角时的控制带宽需求,(3)、(4)式对垂直激光链路的风速进行了描述。

相比于 LEO 对地通信链路,地球同步轨道(GEO)卫星对地通信不存在链路天顶角变化的问题。假设 LEO 和 GEO 对地通信的地面站湍流状况完全一样,即折射率结构常数同为 $C_n^2(0)=1.7\times 10^{-14}\text{ m}^{-2/3}$ 。图 2 对比了天顶角为 0° 的 LEO 对地链路和 GEO 对地链路,图 2(a)给出了 AO 系统需求闭环带宽和校正泽尼克阶数的关系,图 2(b)分析了 AO 系统需求带宽和地面风速的关系,风速的增大会增加 AO 系统的校正带宽需求。由于大气湍流主要集中在海拔高度 20 km 以下,即对流层和对流层顶的范围内,所以尽管 GEO 对地激光链路长度远大于 LEO 链路,但是前者所经历的大气湍流强度和后者 0° 天顶角的情况基本相同。但是由于 GEO 链路对信号光能量的几何耗散远远大于 LEO 链路,所以 GEO 通信链路对接收端 AO 系统的波前传感器提出了更高的灵敏度要求。由图 2 可以看出,GEO 链路对自适应光学系统的闭环带宽需求远低于 LEO 链路,这得益于 GEO 和地面接收站的相对静止,没有卫星高速相对运动造成的垂直链路风速。另一方面,天顶角的增大还会增加 LEO 链路穿过底层大气的距离,使接收端的激光波前畸变进一步恶化。因此 LEO 激光通信链路不仅对 AO 的控制带宽需求高于 GEO 链路,而且对自适应镜的波面拟合和校正能力也要求更高。

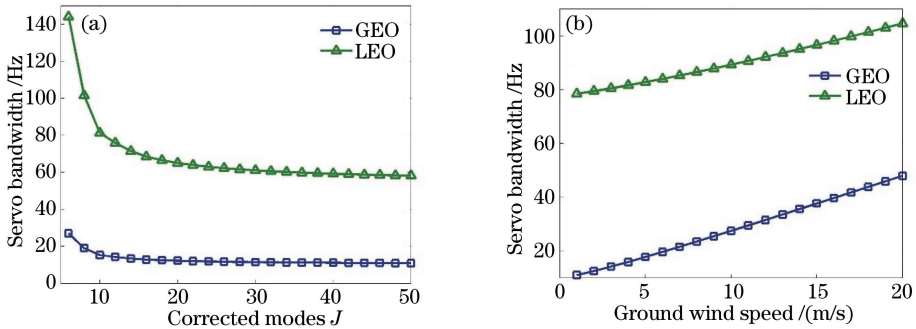


图 2 对比 LEO-地和 GEO-地激光链路对 AO 系统带宽的需求。(a) AO 系统需求带宽随校正阶数变化;
(b) AO 系统需求带宽随地面风速变化

Fig. 2 LEO-ground laser link is compared with GEO-ground laser link on AO system servo bandwidth. (a) Required AO bandwidth changes with corrected modes; (b) required AO bandwidth changes with ground wind speed

为了进一步分析图 1 中出现的小天顶角激光链路对 AO 系统带宽需求更高的现象,图 3 计算了 LEO 对地激光链路不同天顶角下的 Greenwood 频率:

$$f_G = \left[0.102 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \int_0^L C_n^2(z) V(z)^{5/3} dz \right]^{3/5}, \quad (14)$$

这是 Greenwood^[12] 在 1977 年提出的,其中 AO 系统的频率响应被假设为简易的 R-C 滤波模型,在时延误差的均方差设定为 1 rad 时得到 Greenwood 频率。从图 3 中可以看出,LEO 对地激光链路的 Greenwood 频率随着天顶角的增大而不断减小,原因是 LEO 相对地面站运动的速度分量在垂直链路方向随天顶角的增大而不断减小。这也解释了图 1 中在校正阶数较大时出现的现象,即 40°天顶角的激光链路对 AO 系统带宽需求高于 60°和 70°天顶角的链路。

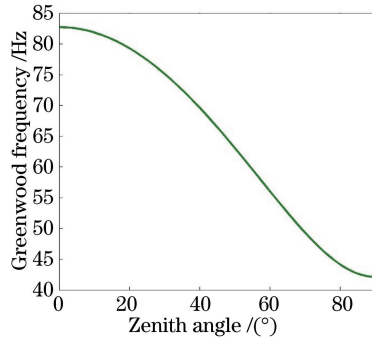


图 3 LEO-地激光链路不同天顶角下 Greenwood 频率的变化

Fig. 3 Variation of Greenwood frequency at different zenith angles in LEO-ground laser links

为了研究 AO 系统闭环控制带宽对相干光通信系统的影响,分析了闭环带宽和混频效率之间的关系。在星地相干光通信中,地面接收机收集到的信号光会和本振光进行混频,进行探测和解码,这样可以利用本振光的强度优势去除热噪声、暗电流的影响,其灵敏度甚至可以达到散粒噪声的探测极限。然而大气湍流引起的波前相位畸变会严重降低信号光和本振光的混频效率,对于信号光 E_s 和本振光 E_{Lo} ,忽略大气湍流引起的信号光的强度起伏,并假设信号光为平面波,则混频效率可表示为^[10]

$$\gamma = \frac{\left[\int_U E_s E_{Lo}(U) \cos \Delta\phi dU \right]^2}{\int_U E_s^2 dU \int_U E_{Lo}^2(U) dU}, \quad (15)$$

式中 $\Delta\phi$ 为信号光的相位起伏, U 为混频面。图 4 给出了不同校正阶数情况下,混频效率随自适应系统闭环带宽的变化关系,针对 LEO 对地激光通信链路, D/r_0 分别等于 4 和 6,天顶角为 0°。

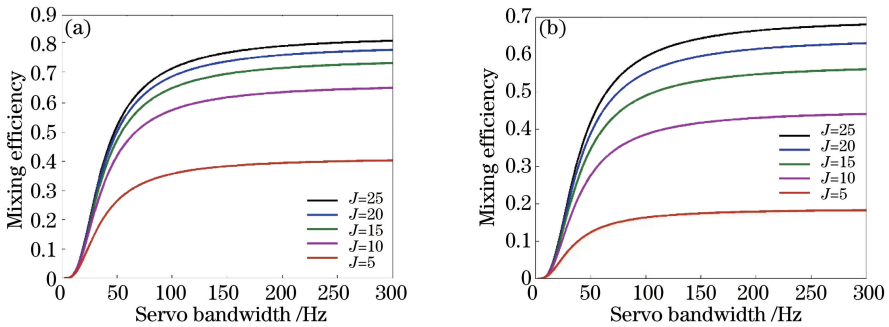


图 4 不同校正阶数下,相干接收机的混频效率随 AO 系统带宽的变化 (a) $D/r_0 = 4$; (b) $D/r_0 = 6$

Fig. 4 Mixing efficiency of coherent receiver varies with servo bandwidth of AO system for different corrected modes

(a) $D/r_0 = 4$; (b) $D/r_0 = 6$

从图 4 中可以看到,当 AO 系统带宽达到 200 Hz 时,即使对于校正阶数比较大的情况,带宽的增大对混频效率的提升也已经很小。所以 200 Hz 的闭环带宽能够满足系统要求,可以保证变形镜的波前校正能力得到充分的利用,而太低的带宽则会引起过大的时延误差进而降低整个 AO 系统的校正性能。同时也可以看出,对于 D/r_0 比较大的情况,系统对校正阶数的需求越来越大,当闭环带宽达到 100 Hz 后,增加校正阶数对混频效率的提升更为有效。

在实际的自适应光学系统中,提高单次校正阶数需要增加变形镜驱动器的数量,从而减少波面拟合误差,但是这意味着算法计算时间的延长,因此增加校正阶数是以牺牲控制带宽为条件的。由于激光通信系统对湍流校正的实时性要求更高,所以这两个设计参数需要根据实际大气信道条件和通信系统性能进行选择。

4 结 论

自适应光学系统可以有效地提升大气相干激光通信系统的外差效率,其闭环带宽对最终的校正性能影响显著,结果表明,200 Hz 的闭环带宽完全可以满足需求,当达到 100 Hz 带宽之后增加系统的可校正泽尼克阶数对混频效率的提升更为有效。对于低轨卫星激光通信链路不同的天顶角即不同的湍流强度,得出了通信系统对自适应光学系统闭环带宽和变形镜校正能力的需求,发现闭环带宽的需求随天顶角的增大而减小。另一方面也分析了低轨卫星对地通信链路和同步卫星对地通信链路的区别,发现低轨卫星相对地面接收站的高速相对运动使自适应光学系统对闭环带宽的需求远大于同步卫星激光链路。

参 考 文 献

- 1 Smutny B, Kaempfner H, Muehlnikel G, *et al.* 5.6 Gbps optical inter-satellite communication link[J]. Proc SPIE, 2009, 7199: 719906.
- 2 Song Tingting, Ma Jing, Tan Liying, *et al.* Experiment design and development of the lunar laser communication demonstration in USA[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040004.
宋婷婷, 马 晶, 谭立英, 等. 美国月球激光通信演示验证——实验设计和后续发展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040004.
- 3 Sodnik Z, Armengola J P, Czichyb R H, *et al.* Adaptive optics and ESA's optical ground station[J]. Proc SPIE, 2009, 7464: 746406.
- 4 Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, Hou Peipei, *et al.* Research progress on overcoming the atmospheric turbulence effect in satellite-to-ground laser communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 120002.
马小平, 孙建锋, 侯培培, 等. 星地激光通信中克服大气湍流效应研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 120002.
- 5 Lou Yan, Zhao Yiwu, Chen Chunyi. Atmosphere impact and ground station selection for satellite-to-ground laser communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 120602.
娄 岩, 赵义武, 陈纯毅. 星地链路激光通信地面站址选择及大气影响研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 120602.
- 6 Wilks S C, Morris J R, Brase J M, *et al.* Modeling of adaptive optics-based free-space communications systems[J]. Proc SPIE, 2002, 4821: 453528.
- 7 Luo Wen, Geng Chao, Li Xinyang. Simulation and experimental study of single-mode fiber coupling efficiency affected by atmospheric turbulence aberration[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0606001.
罗 文, 耿 超, 李新阳. 大气湍流像差对单模光纤耦合效率的影响分析及实验研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0606001.
- 8 Belmonte A, Kahn J. Performance of synchronous optical receivers using atmospheric compensation techniques[J]. Optics Express, 2008, 16(18): 14151-14162.
- 9 Zuo L, Dang A, Ren Y, *et al.* Performance of phase compensated coherent free space optical communications through non-Kolmogorov turbulence[J]. Optics Communication, 2011, 284(6): 1491-1495.
- 10 Liu C, Chen S, Li X, *et al.* Performance evaluation of adaptive optics for atmospheric coherent laser communications[J]. Optics Express, 2014, 22(13): 15554-15563.
- 11 Li J, Zhang Z, Gao J, *et al.* Bandwidth of adaptive optics system in atmospheric coherent laser communication[J]. Optics Communication, 2016, 359: 254-260.
- 12 Greenwood D P. Bandwidth specification for adaptive optics systems[J]. J Opt Soc Am, 1977, 67(3): 391-393.
- 13 Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random media[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005, 481-492.
- 14 Noll R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. J Opt Soc Am, 1976, 66(3): 207-211.