

温度对空间光-单模光纤耦合的影响研究

曹桂源¹ 杨玉强¹ 俞建杰² 沈涛¹

(¹ 哈尔滨理工大学应用科学学院, 哈尔滨 黑龙江 150080
² 哈尔滨工业大学空间光通信技术研究中心, 哈尔滨 黑龙江 150001)

摘要 环境的温度是影响运行于轨道中的光学天线系统性能的主要因素。当温度变化时,透镜和反射镜的曲率和镜组间隔会产生相应的变化,从而导致空间光-单模光纤耦合效率的下降。假设温度只改变天线系统焦距,而不改变光束成像质量,针对反射式光学天线,建立了温度影响空间光-单模光纤耦合效率的理论模型,并对其进行了理论仿真和实验研究。结果表明:实验和仿真结果相吻合,相对于理想情况下(离焦量为零),当温差增大 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,离焦量增大约 $52\text{ }\mu\text{m}$,耦合效率下降约 10% 。此研究结果可为光学天线温控精度的提出提供理论依据。

关键词 光通信;单模光纤耦合;模式耦合;耦合效率;离焦

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.1006003

Influence of Temperature on the Coupling Efficiency of Spatial Light into Single Model Fiber

Cao Guiyuan¹ Yang Yuqiang¹ Yu Jianjie² Shen Tao¹

(¹ *Institute of Application Science, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China*
² *Research Center of Space Optical Communication, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China*)

Abstract Environmental temperature is an important factor which influences the optical antenna system in orbit. When the temperature changes, the curvatures of the mirrors and the distances between lenses can vary, leading to the reducing of the coupling efficiency of spatial light into single model fiber. Assuming that temperature cannot change the imaging quality except for defocus, the model of influence of temperature on coupling efficiency is established for reflection-type antenna. Based on the model, the numerical simulation of the coupling efficiency is delivered. In order to verify the model, the related experiment is done. The results show that the calculated value is in agreement with the experimental results. When the temperature difference increases to $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, defocus value enhances to about $52\text{ }\mu\text{m}$ and the coupling efficiency reduces to about 10% . The results have an important contribution to the design of the optical receiving antenna of space optical communication.

Key words optical communications; single-mode fiber coupling; mode coupling; coupling efficiency; defocus

OCIS codes 060.4510; 220.1010; 060.1660

1 引言

随着信息时代的高速发展,卫星通信传输数据量剧增,信息实时、快速传输对卫星通信提出了越来越高的要求。传统的射频通信受到 1 Gb/s 以上通信速率“瓶颈”的限制,难以适应未来高速、宽带通信

需求,卫星光通信技术被认为是解决该“瓶颈”的唯一有效手段^[1-14]。

对于卫星光通信,信号的接收方式可分为直接探测、零差相干探测和自差相干探测。直接探测方式的原理和结构相对简单,因此最初的卫星光通信

收稿日期:2014-05-29;收到修改稿日期:2014-06-25

基金项目:国家自然科学基金(51307036,51378164)、黑龙江省自然科学基金(E201303)

作者简介:曹桂源(1990—),男,硕士研究生,主要从事空间光通信方面的研究。E-mail: guishouguiyuan@163.com

导师简介:杨玉强(1977—),男,博士,副教授,主要从事空间光通信和光纤传感方面的研究。

E-mail: yqyang0@gmail.com(通信联系人)

接收系统都采用此种探测方式。然而,在实际星间环境下,直接探测无法达到或接近探测灵敏度极限,可实现的传输数据率相对较低,不足以充分获得光载波所带来的带宽优势^[15-16]。零差相干探测和自差相干探测是提高探测灵敏度和传输数据率的两种有效方法,其探测灵敏度都可以达到或接近探测灵敏度极限。零差相干探测体制对激光器线宽和频率稳定度要求极为苛刻,并且需要本振光源和光学锁相环,以致于零差相干接收机结构十分复杂,技术难度非常高^[1-18]。而自差相干探测是专门针对差分相移键控(DPSK)调制格式利用延迟干涉计进行解调的一种探测方法,采用的前置光放大器可对探测器散粒噪声和后续电路热噪声进行有效抑制,探测灵敏度可与零差相干探测相媲美,另外,还具有接收机结构简单和易于实现的优点,被认为是未来高速光通信技术发展中极具潜力的选择之一^[19-23]。

要发挥自差相干探测的潜能,首先必须将空间光高效稳定地耦合到单模光纤(SMF)中。由于单模光纤芯径极小仅为几个微米,因此空间激光与单模光纤的耦合非常困难,且极易受到外部环境的干扰。环境温度是影响耦合效率的重要影响因素之一,当环境温度变化时,透镜和反射镜的曲率和间隔会产生相应的变化,从而导致空间光-单模光纤的耦

合效率下降。

考虑到光学接收天线对系统各参量微小变化的容忍性,本文假设环境温度只改变系统的焦距,而不改变其成像质量,即像差。在此假设的基础上首先理论分析了温度变化对光学系统离焦量的影响,进而分析了温度对空间光-单模光纤耦合效率的影响;为了验证假设的正确性,本文对不同温度下主次镜的成像质量进行了测量,进一步分析了温度对空间光耦合效率的影响规律,发现实验结果与理论分析结果相吻合,验证了假设的正确性。

2 理论分析和数值仿真

反射式光学接收天线主要由主镜、次镜和耦合透镜组成,如图1所示。主镜 M_1 和次镜 M_2 都为反射镜, M_1 为高次曲面, M_2 为球面, r_1 和 r_2 为两镜的曲率半径, D_1 和 D_2 分别为 M_1 和 M_2 的口径, d 为两镜之间的距离, f 为耦合透镜的焦距,其与主镜间的距离为 L 。在理想情况下, M_1 和 M_2 的焦点重合,接收光路的焦点位于耦合透镜的焦平面上,此时光学系统对无穷远物体成理想像。

由于 M_1 和 M_2 的焦点重合,因此满足

$$\frac{r_1}{2} = d + \frac{r_2}{2}. \quad (1)$$

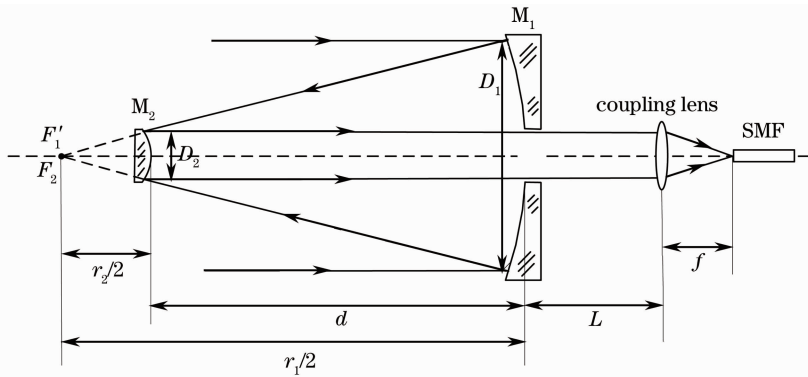


图1 反射式光学天线接收光路简图

Fig. 1 Sketch of the space optical antenna

当光学天线的温度由 T 变为 $T + \Delta T$ 时,受材料热膨胀的影响,主镜和次镜的曲率以及主镜和次镜间的距离都会产生相应的变化,假设变化后主次镜的曲率半径以及主次镜间的距离分别为 r'_1 、 r'_2 、 d' 。根据热膨胀原理可知:

$$\begin{cases} r'_1 = (1 + a_1 \Delta T) r_1 \\ r'_2 = (1 + a_2 \Delta T) r_2, \\ d' = (1 + a_3 \Delta T) d \end{cases} \quad (2)$$

式中 a_1 、 a_2 和 a_3 分别是主镜、次镜和主次镜间支架

材料的热膨胀系数(CTE)。由于光学天线在设计过程中充分考虑了加工和装配公差问题,即光学系统存在少量公差或形变仍能成近似理想像。因此可假设热膨胀后接收天线对无穷远物体仍能成理想像,只是像点的位置发生了变化,即产生了离焦。为了计算离焦量,将接收天线系统近似看做近轴球面系统,光束经每个面的成像都按球面物像公式进行计算。尽管高次曲面为非球面,但是由于其边缘光线和近轴光线成像于同一像点,并且其近轴区域为球

面。因此,高次曲面成像也可以用近轴球面成像公式表示。

图2给出了温度变化后反射式接收天线系统的光路图。从图中可以看出 M_1 和 M_2 的焦点不再重合,整个接收系统焦点相对于温度变化前沿轴向有 Δf 的偏移。空间光通信中光学接收天线可以看作对无穷远物体成像,即入射光为平行光。平行光经反射镜 M_1 后成像于焦点 F'_1 处。对于反射镜 M_2 , 焦点 F'_1 即为物点,且物距为 $-(r'_1/2 - d')$ 。由近轴

物像公式可知:

$$\frac{1}{-(r'_1/2 - d')} + \frac{1}{l'_2} = \frac{2}{-r'_2}, \quad (3)$$

式中 l'_2 为像距。由于物点 F'_1 靠近 M_2 的焦点 F_2 , 因此像距 l'_2 远大于 $L + d'$, 即 $l'_2 \gg L + d'$ 。将其代入(3)式可得:

$$l'_2 = \frac{2r'_2 - 2r'_1 + 4d'}{r'_2(r'_1 - 2d')}. \quad (4)$$

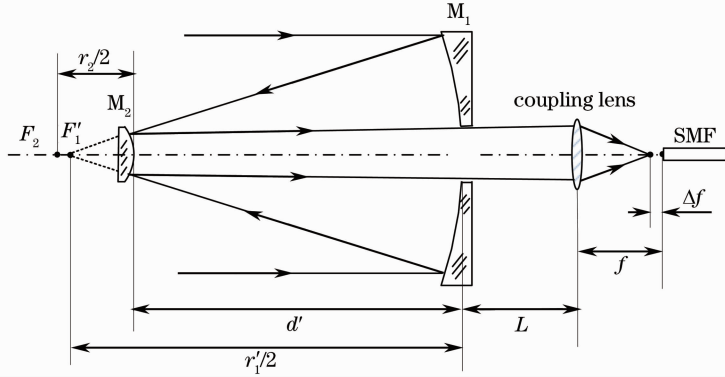


图2 温度变化后的接收天线光路简图

Fig. 2 Sketch of receiving antenna after temperature changes

反射镜 M_2 的像点即为耦合透镜的物点,由薄透镜成像公式可知:

$$\frac{1}{l'_2 + d' + L} + \frac{1}{f + \Delta f} = \frac{1}{f}, \quad (5)$$

式中 Δf 为离焦量(耦合透镜像点与焦平面的距离)。考虑到 $l'_2 \gg L + d$, (5)式可进一步表示为

$$\Delta f = \frac{f^2}{l'_2}, \quad (6)$$

当 $\Delta f > 0$ 时表示耦合透镜的像点位于焦平面之前,当 $\Delta f < 0$ 时表示耦合透镜的像点位于焦平面之后。

光学天线接收系统可等价于口径为 D_1 , 焦距为 fr_1/r_2 的薄透镜,如图3所示。根据模式耦合理论^[24], 离焦量为 Δf 时空间光-单模光纤的耦合效率为

$$\eta = \frac{8\beta^2 \left| \int_0^1 \exp\left[-\left(1 - i \frac{\Delta f \lambda}{\pi \omega_0^2}\right) \beta^2 \rho^2\right] \rho d\rho \right|^2}{1 - \epsilon^2}, \quad (7)$$

式中 $\beta = \pi D_1 \omega_0 r_2 / (2\lambda f r_1)$ 为耦合参数, $\epsilon = D_2 / D_1$ 为空间遮挡比, ω_0 为单模光纤基模的模场半径, λ 为波长, $\rho = 2r_a / D_1$ 为归一化孔径高度, r_a 为点到光轴的距离。将(2)、(4)、(6)式代入(7)式即可得到耦合效率随温差的变化关系。

反射式接收天线参数如下: $D_1 = 250$ mm, $D_2 = 17$ mm, $r_1 = 500$ mm, $r_2 = 33.3$ mm, $d = 233.5$ mm, $f = 75$ mm。主次镜及其支架所用材料及其热膨胀

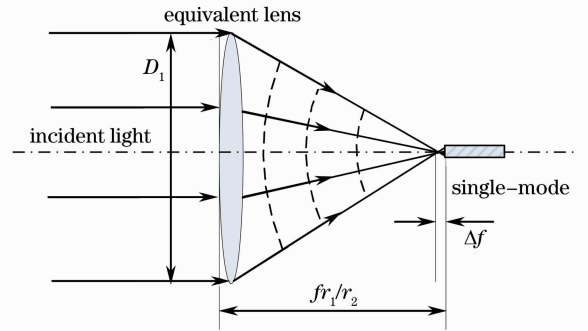


图3 空间光到单模光纤的耦合简图

Fig. 3 Coupling of incident light to single-mode fiber 系数如表1所示。

表1 主次镜及其支架材料和热膨胀系数

Table 1 Material and CTE of the element

Element	Material	CTE / °C
M_1	Fused silica	$\alpha_1 = 0.55 \times 10^{-6}$
M_2	Zerodur	$\alpha_2 = 0.1 \times 10^{-6}$
Frame	4J32	$\alpha_3 = 6.0 \times 10^{-6}$

针对以上结构参数,数值模拟了离焦量和耦合效率随温度的变化,如图4所示。结果表明离焦量随温差的增大呈线性变化,斜率为 $\Delta f / \Delta T \approx 0.06$ mm/°C。耦合效率随温差的增大近似呈高斯型变化,理想情况下(离焦量为零),耦合效率最大,其值为 81.5%;相对于理想情况,当温度增大到 0.5 °C 时(离焦量约增大

15 μm), 耦合效率仅下降约 1.0%; 当温差增大到 2 $^{\circ}\text{C}$ 时, 耦合效率下降约 10%; 当温差下降 4 $^{\circ}\text{C}$ 时, 耦合

效率下降约 33%; 当温差下降 6 $^{\circ}\text{C}$ 时, 耦合效率下降约 58%。

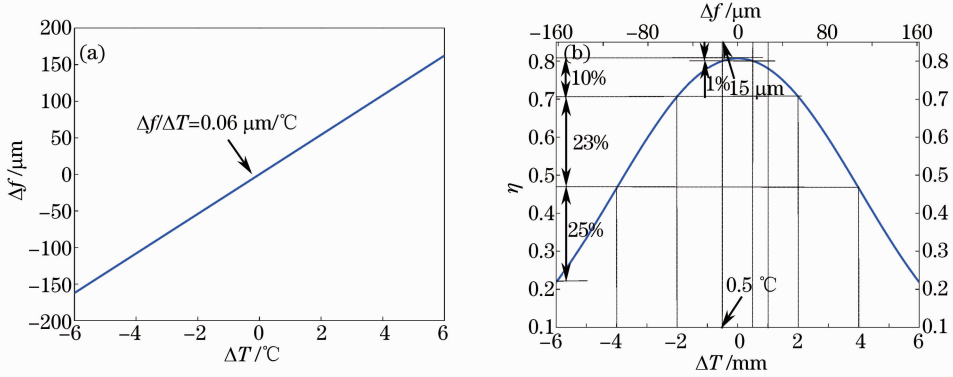


图 4 离焦量和耦合效率随温差的变化关系

Fig. 4 (a) Defocus Δf and (b) coupling efficiency η versus ΔT

3 实验及仿真分析

理论推导过程中假设温度只改变系统的焦距, 而不改变其成像质量, 为了验证此假设的正确性, 利用 ZYGO 干涉仪测量了不同温度下主次镜系统的

初级像差, 测量结果如表 2 所示。由表 2 可知: 各初级像差中, 离焦随温度的增大逐渐减小, 且变化明显; 像散、彗差和球差随温度的增加无明显变化。此结果验证了理论分析中假设的正确性。

表 2 初级像差随温度的变化

Table 2 Primary aberrations versus temperature

$T / ^{\circ}\text{C}$	Defocus $/\lambda$	Astigmatism- x / λ	Astigmatism- y / λ	Coma- x / λ	Coma- y / λ	Spherical
22.0	-0.041	-0.078	-0.026	0.180	0.004	-0.110
22.2	-0.072	-0.068	-0.045	0.181	0.003	-0.095
22.4	-0.109	-0.083	-0.041	0.165	0.003	-0.085
22.6	-0.134	-0.075	-0.045	0.161	0.004	-0.075
22.8	-0.157	-0.073	-0.038	0.169	0.015	-0.074
23.0	-0.182	-0.081	-0.055	0.159	0.012	-0.065
23.2	-0.211	-0.078	-0.043	0.158	0.014	-0.049
23.4	-0.238	-0.085	-0.030	0.139	0.010	-0.056
23.6	-0.266	-0.079	-0.030	0.148	0.006	-0.056
23.8	-0.286	-0.032	-0.027	0.140	0.013	-0.054
24.0	-0.311	-0.069	-0.051	0.148	0.019	-0.079

不同温度下, 主次镜波前及面型误差如图 5 所示。图中, “Power” 表示待测系统面型与理想参考面之间的差异, 其值为初级像差离焦的 2 倍。图 5 表明随温度的增大 “Power” 值逐渐增大, 且变化明显。 “Power” 与光束波前的关系如图 6 所示, 图中球面为光束经主次镜后的波前, C 为球面的球心, D_2 为次镜的口径。由前面的推导可知, C 点即为次镜的像点, 因此, 球面的半径 R 可表示为 $R = l'_2 + d' \approx l'_2$ 。

利用图 6 中的几何关系可得

$$R = l'_2 = \frac{D_2^2}{8P}, \quad (8)$$

式中 P 为 “Power” 值。

将(8)式代入(5)式可得

$$\Delta f = \frac{8Pf^2}{D_2^2}. \quad (9)$$

将实验测得的 “Power” 值及焦距 f 和口径 D_2 代入(9)式即可计算出不同温度下光学接收天线的离焦量 Δf , 所得结果如表 3 所示。

图 7 为由实验数据和仿真数据获得的不同温度下接收天线的离焦量及耦合效率, 由图可知实验和仿真结果基本吻合, 温度在 22.0 $^{\circ}\text{C}$ ~ 24.0 $^{\circ}\text{C}$ 的变化范围内, 离焦量约增大 52 μm , 耦合效率下降约 10%; 温度由 22.0 $^{\circ}\text{C}$ 增大到 23.5 $^{\circ}\text{C}$ 的过程中实验和仿真结果吻合得非常好, 温度由 23.5 $^{\circ}\text{C}$ 增大到 24.0 $^{\circ}\text{C}$ 过程中实验和仿真结果略有差异, 这是因为

温度增大时尽管天线系统产生的其他像差与离焦相比非常小,但是随着温差的增大,其他像差也逐渐增大,造成了实验和仿真结果略有差异。

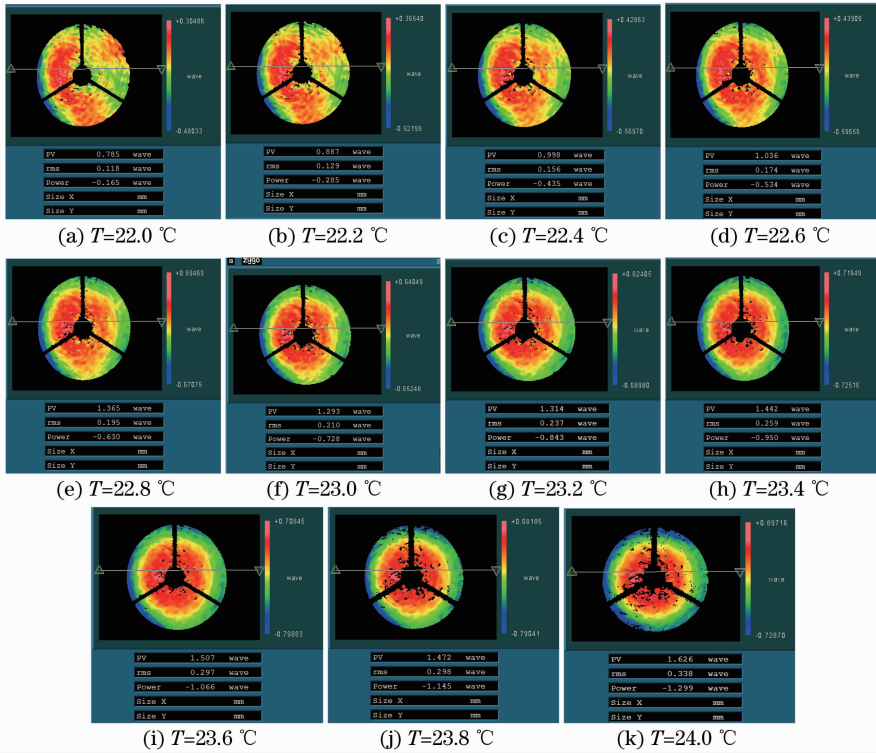


图 5 不同温度下的实验结果

Fig. 5 Measurement results at different temperatures

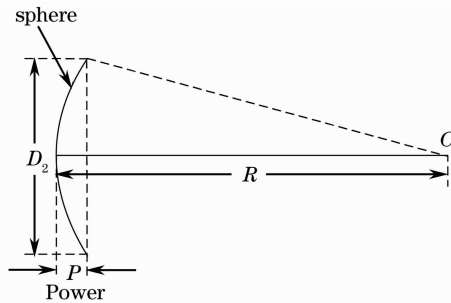


图 6 “Power”与光束波前的关系

Fig. 6 Relationship of Power and wave-front

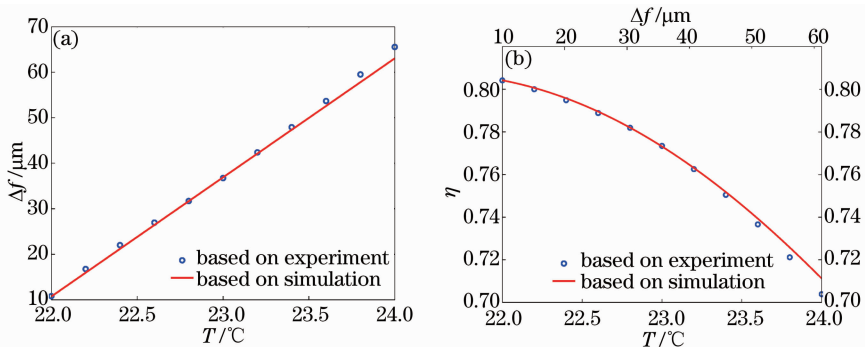


图 7 实验与理论模拟结果对比。(a)离焦量; (b)耦合效率

Fig. 7 Contrast between simulation results and measurement results. (a) Defocus; (b) coupling efficiency

表 3 离焦量 Δf 的 Zernike 系数
Table 3 Zernike coefficients of Δf

$T / ^\circ\text{C}$	22.0	22.2	22.4	22.6	22.8	23.0	23.2	23.4	23.6	23.8	24.0
P / λ	-0.082	-0.141	-0.218	-0.267	-0.314	-0.364	-0.41	-0.475	-0.532	-0.572	-0.621
$\Delta f / \mu\text{m}$	10.54	16.36	21.48	26.31	30.94	35.87	40.40	46.80	52.412	56.36	61.19

4 结 论

空间光-单模光纤的耦合是空间光通信自差相干探测体制的关键技术,耦合效率的高低直接决定通信质量。假设温度只改变天线系统焦距,而不改变光束成像质量,针对反射式光学天线建立了温度对空间光-单模光纤耦合效率影响的理论模型。主次镜面型测试实验验证了假设前提的正确性。结果表明:实验和仿真结果基本吻合,相对于理想情况下(离焦量为零),当温差增大 2°C 时,离焦量增大约 $52\ \mu\text{m}$,耦合效率下降约 10% 。此研究结果对空间光通信光学接收天线的设计有重要意义。

参 考 文 献

- 1 Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, Zhi Yanan, *et al.*. Research of DPSK modulation and self-differential homodyne coherent detection technology to overcome atmospheric turbulence effect in the satellite-to-ground laser communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706017.
马小平, 孙建锋, 职亚楠, 等. DPSK 调制/自差动零差相干探测技术克服星地激光通信中大气湍流效应的研究 [J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706017.
- 2 Zheng Yang, Jiang Huiling, Tong Shoufeng, *et al.*. Establishment of space light mixer mathematical model based on the space coherent laser communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706024.
郑 阳, 姜会林, 佟首峰, 等. 基于相干激光通信空间光混频器数学模型的建立 [J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706024.
- 3 Chen Jing, Xue Haizhong, Liu Xuewen, *et al.*. Low-power laser jamming techniques to free space optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0106005.
陈 静, 薛海中, 刘学文, 等. 无线激光通信系统弱光干扰技术 [J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0106005.
- 4 Ke Xizheng, Song Peng, Pei Guoqiang. Research on multi-aperture reception in wireless laser communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1201003.
柯熙政, 宋 鹏, 裴国强. 无线激光通信中的多孔径接收技术研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1201003.
- 5 Hu Qingsong, Huang Yuhua, Wang Junbo, *et al.*. Performance analysis of multi-hop free space optics over strong turbulence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0906004.
胡庆松, 黄玉划, 王俊波, 等. 强湍流下多跳自由空间光通信的性能分析 [J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0906004.
- 6 Wang Yan, Li Hongzuo, Hao Ziqiang. Research of anti-radiation technology for the EDFA systems in space environment [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(7): 070601.
王 岩, 李洪祚, 郝子强. 空间光通信中 EDFA 的抗辐射技术的研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(7): 070601.
- 7 Zhai Chao, Wu Feng, Yang Qingbo, *et al.*. Simulation research of laser beam atmospheric propagation in free-space optical communication [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0505004.

- 翟 超, 武 风, 杨清波, 等. 自由空间光通信中大气光束传输数值模拟研究 [J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0505004.
- 8 Wu Feng, Yu Siyuan, Zhou Jie, *et al.*. Analysis of the stability of bidirectional beam tracking in inter-satellite optical communication [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1105003.
武 风, 于思源, 周 洁, 等. 星间光通信链路双向光束稳定跟踪约束条件分析 [J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1105003.
- 9 Li Rongling, Shang Huiliang, Lei Yu, *et al.*. Research of key enabling technologies for high-speed visible-light communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 050003.
李荣玲, 商慧亮, 雷 雨, 等. 高速可见光通信中关键使能技术研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(5): 050003.
- 10 C Chen, H Yang, Z Zhou, *et al.*. Effects of source spatial partial coherence on temporal fade statistics of irradiance flux in free-space optical links through atmospheric turbulence [J]. *Opt Express*, 2013, 21(24): 29731-29743.
- 11 J Ding, M Li, M Tang, *et al.*. BER performance of MSK in ground-to-satellite uplink optical communication under the influence of atmospheric turbulence and detector noise [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(18): 3488-349.
- 12 Y Jiang, K Tao, Y Song, *et al.*. Packet error rate analysis of OOK, DPIM, and PPM modulation schemes for ground-to-satellite laser uplink communications [J]. *Appl Opt*, 2014, 53(7): 1268-1273.
- 13 W Du, L Tan, J Ma, *et al.*. Temporal-frequency spectra for optical wave propagating through non-Kolmogorov turbulence [J]. *Opt Express*, 2010, 18(6): 5763-5775.
- 14 Yang Changqi, Jiang Wenhan, Rao Changhui. Impact of aperture averaging on bit-error rate for free-space optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 212-218.
杨昌旗, 姜文汉, 饶长辉. 孔径平均对自由空间光通信误码率的影响 [J]. *光学学报*, 2007, 27(2): 212-218.
- 15 Ma Dongtang, Wei Jibo, Zhuan Zhaowen. Analysis of the laser diodes' temperature field in multiple-beam atmospheric laser communications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(8): 1020-1024.
马东堂, 魏急波, 庄钊文. 大气激光通信中多光束传输性能分析和信道建模 [J]. *光学学报*, 2004, 24(8): 1020-1024.
- 16 G D Fletcher, T R Hicks, B Laurent. The SILEX optical inter-orbit link experiment [J]. *Electr & Comm Eng J*, 1991, 3(6): 273-279.
- 17 B Smutny, H Kaempfner, G Muehlnikel, *et al.*. 5.6 Gb/s optical intersatellite communication link [J]. *SPIE*, 2009, 7199: 719906.
- 18 R Fields, C Lunde, R Wong, *et al.*. NFIRE-to-Terra SAR-X laser communication results: satellite pointing, disturbances and other attributes consistent with successful performance [C]. *SPIE*, 2009, 7330: 73300Q.
- 19 X Zhang, Z Qu, G Yang. Probability density function of noise statistics for optically pre-amplified DPSK receivers with optical Mach-Zehnder interferometer demodulation [J]. *Opt Commun*, 2006, 258(2): 177-183.
- 20 F Zhao, S Yu, J Ma, *et al.*. Effect of Doppler shift on differential phase-shift keying receivers using interferometric demodulation and balanced detection in intersatellite laser communication links [J]. *Opt Eng*, 2010, 49(10): 105001.

- 21 K Shiraish, H Yoda, T Endo, *et al.*. A lensed GIO with a long working distance for the coupling between laser diodes with elliptical fields and single-mode fibers [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2004, 16(4): 1104–1106.
- 22 W Pan, L Liu, H Liu, *et al.*. A novel technique for wireless optical communications with lens let array processor [J]. Chin Opt Lett, 2006, 4(5): 265–267.
- 23 C Ruilier. A study of degraded light coupling into single-mode fibers [C]. SPIE, 1998, 3350: 319–329.
- 24 O Wallner, P J Winzer, W R Leeb. Alignment tolerances for plane wave to single-mode fiber coupling and their mitigation by use of pigtailed collimators [J]. Appl Opt, 2002, 41(4): 37–44.

栏目编辑：王晓玻