

微振动对空间光-光纤耦合的影响及补偿方法*

胡清桂¹, 李成忠²

(1. 内江师范学院现代教育技术中心 内江, 641100) (2. 西南交通大学信息科学与技术学院 成都, 610000)

摘要 为了增强空间光-光纤耦合的耐振动性能, 提高耦合效率, 首先对微振动环境下空间光-光纤的耦合特征进行了分析, 设计了一种新的锥形接收器; 然后, 并对锥形接收器的全反射特征和耦合性能进行了理论分析, 在微振动环境下, 新的锥形接收器耦合效率高于普通光纤接收器; 最后, 进行了实验研究, 采用普通光纤作为接收器时, 耦合效率随着振幅的增大而迅速降低, 当振幅从 0 增大到 280 μrad 时, 耦合效率从 95% 降低至 10%, 但采用新型锥形光纤接收器时, 耦合效率从 95% 降低至 55%。结果表明, 在微振动环境下, 新型接收器能有效提高空间光光纤的耦合效率。

关键词 微振动; 锥形连接结构; 自由空间光通信; 耦合效率

中图分类号 TN249; TH7

引言

在一些无法铺设光纤或者铺设光纤困难的场合, 自由空间光通信有广泛的应用前景。随着普通光纤通信技术的迅猛发展, 自由空间光通信和普通光纤通信技术的结合是一个重要的方向^[1-2]。而两者的结合首先需要解决如何将微弱的空间光信号耦合进入光纤这一关键问题。由于光纤纤芯直径很小^[3], 光学耦合系统需要很高的成像精度和稳定性。

但对空间设备而言, 振动会不可避免地产生, 使得光斑入射角度以及成像位置随环境变化而变化。以卫星平台的振动为例, 根据已有研究结果, 其振动主要集中在 50 Hz 以内, 振幅值一般小于 200 微弧度(μrad), 并且具有周期性^[3-4], 其补偿方法主要有基于反馈控制的补偿技术和在卫星上安装防振动装置^[5-7], 根据已有研究, 前者对低频振动有较好补偿效果, 对高频振动效果较差, 而后一种补偿技术正好相反。为了提高空间光-光纤的耦合效率, 笔者首先对空间光-光纤在微振动环境下的耦合特征进行了分析, 然后提出了一种采用有方向性锥形接收器的补偿方法, 并对这一新的锥形接收器进行了理论分析和模拟实验研究。理论分析和模拟实验结果都表明, 在微振动环境下, 新型接收器能有效提高空间

光-光纤的耦合效率。笔者提出的锥形接收器, 不但可以应用到地面和卫星间的空间光通信, 还可以应用到地面与航空器、以及地面和空间武器装备制导系统等设备的空间光通信。这一新的设计已获得专利授权, 专利名称: 一种有方向性带塑料材质插头的不对称光纤; 专利申请号: CN201620005088.0; 授权公告号: CN205301623U。

1 空间光-光纤微振动环境下的耦合特征

典型的空间光-光纤耦合系统如图 1 所示^[8-9], 激光通过整形系统整形后由天线发送出去, 接收天线接收激光, 然后通过微透镜耦合系统将光信号耦合进入光纤。当激光发射平台发生振动时, 会使接收方产生对准偏差, 特别是对光纤而言, 因其接收面积较小, 耦合效率会因对准偏差的增大而严重下降。

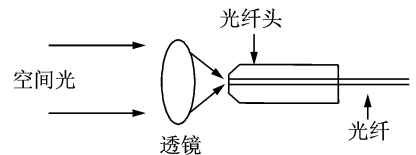


图 1 空间光-光纤耦合原理图

Fig. 1 The coupling principle of spatial light into fiber

* 国家技术创新基金资助项目(13C26212201166); 国家自然科学基金资助项目(61275080)
收稿日期: 2016-12-01; 修回日期: 2017-03-10

振动会造成投射到接收光纤端面上的光斑发生角向偏移,径向偏移和横向偏移,这三种偏移对耦合效率都有影响,光纤通信中横向偏移对耦合效率影响最大^[10]。类似地,横向偏移对空间光耦合进入光纤影响最为显著,为此有必要深入分析。

空间设备系统本身的振动会使其发射的信号光斑在接收光纤端面振动,假设振动是以接收光纤原点为中心,并假设投射到接收光纤端面上的光斑为圆斑,接收光纤半径和光斑半径分别是 r_0 和 r_1 ,并设 r_0 大于 r_1 。光斑中心以接收光纤原点为中心,在 $-r_i$ 和 r_i 之间移动,由于对称性,文中只讨论光斑中心从光纤原点 O 移动到 r_i 这一过程。图 2 为其接收光纤和光斑横向移位示意图, O 为坐标原点(光纤原点)。

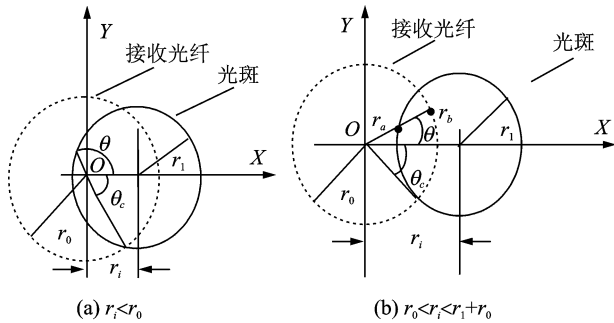


图 2 接收光纤和光斑坐标示意图

Fig. 2 The coordinates of both the receiving optical fiber and light spot

为了计算简便,假设到达接收光纤端面的光束光强分布可用高斯光束进行描述^[11-12]

$$I = \left(\frac{A^2}{\omega^2}\right) \exp(-2r^2/\omega^2) \quad (1)$$

其中: r 为光点到 z 轴距离; A 为光振幅, ω 为光斑束腰半径, ω 可由下式决定, $\omega^2 = \omega_0^2 + \tan^2\theta_0(z + z_0)^2$,其中 z_0 为光纤端面位置; z 为出射光和光纤端面距离; ω_0 为光腰半径; θ_0 为发散角。

进一步,参照图 1,位于坐标 (x_i, y_i, z) 点的接收光强^[13] P_i 为

$$P_i = \gamma \iint_s \left(\frac{A^2}{\omega^2}\right) \exp(-2r^2/\omega^2) ds \quad (2)$$

其中: s 为纤芯面积, $s = \pi r_0^2$, r_0 为纤芯半径, γ 耦合损耗。

为了便于计算,可将式(2)简化为一维角坐标积分,即 $z=0$,这种情况下,根据坐标关系, $r_i = (x_i^2 +$

$y_i^2)^{1/2}$,分为两种情形。

情形 1: $r_i < r_0$,参照图 2(a),得式(3)。

$$P_i = \frac{1}{2} \gamma A^2 \int_0^{\theta_c} [1 - \exp(-2r_b/\omega^2)] d\theta \quad (3)$$

其中: $\theta_c = \arccos(\frac{r_i}{r_0})$, $0 < \theta < \theta_c$ 时, $r_b = r_0$; $\theta_c < \theta < \pi$ 时, $r_b = r_i \cos\theta + (r_0^2 - r_i^2 \sin^2\theta)^{1/2}$ 。

情形 2: $r_0 < r_i < r_1 + r_0$ 。

参照图 2(b),可得到式(4)。

$$P_i = \frac{1}{2} \gamma A^2 \left\{ \int_0^{\theta_c} [\exp(-2r_a^2/\omega^2) - \exp(-2r_0^2/\omega^2)] d\theta + \int_{\theta_c}^{\theta_d} [\exp(-2r_a^2/\omega^2) - \exp(-2r_b^2/\omega^2)] d\theta \right\} \quad (4)$$

其中: $r_a = r_i \cos\theta - (r_0^2 - r_i^2 \sin^2\theta)^{1/2}$;当 $\theta_c < \arcsin(r_0/r_i)$, $\theta_d = \arcsin(r_0/r_i)$,否则, $\theta_d = \theta_c$ 。注: c 为交点, d 为切点,这样,光纤端面处总功率

$$P_c = \iint_s (A^2/\omega^2) \exp(-2r^2/\omega^2) ds = \frac{1}{2} \pi A^2 [1 - \exp(-2r_0^2/\omega_c^2)] \quad (5)$$

因此,耦合效率为

$$\eta = P_i/P_c \quad (6)$$

设耦合损耗 γ 为 0.95,光纤为单模,半径为 $4.0 \mu\text{m}$,入射光斑半径为 $3.0 \mu\text{m}$,设 r_i 在 $0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 之间变化,采用 MATLAB 软件,耦合效率的数值计算结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,耦合效率 η 随 r_i 的增大而降低,耦合效率 η 在 r_i 大于 $2.0 \mu\text{m}$ 时下降速度明显加快。

图中 r_i 实际上就是振动造成接收光纤和光斑横向移位,根据上面的推导过程,增加接收光纤受光面积 s 可以提高耦合效率,为此,笔者提出一种新型有方向性锥形光纤连接器。

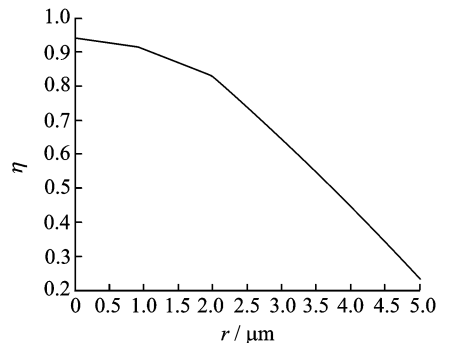


图 3 普通光纤接收器耦合效率数值计算结果

Fig. 3 Results of efficiency of common fiber receiver

2 锥形光纤接收器及其全反射分析

2.1 锥形光纤接收器

从前面分析可知,振动会使空间光-光纤耦合效率明显降低。为了提高耦合效率,笔者设计了一种新的有方向性锥形接收器,如图 4 所示,新的锥形结构通过扩大受光面积以提高耦合效率。

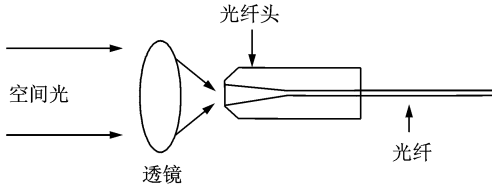


图 4 锥形接收器耦合系统

Fig. 4 The tapered coupling system

2.2 锥形接收器全反射分析

图 5 为锥形光纤接收器结构示意图,图中: n_1 、 n_2 和 n_0 分别为纤芯和包层以及光纤周围介质的折射率;锥体和纤芯材料相同,折射率也为 n_1 ; D 为锥体底面直径; θ 为锥面斜面与光纤纤芯法线的夹角。

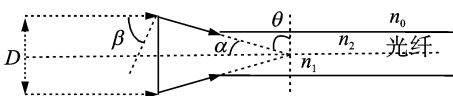


图 5 锥形光纤接收器

Fig. 5 The tapered fiber connector

光束入射进入连接器锥体部分后,为了使进入锥体部分的光束全部进入光纤,则需要光束在锥体内入射锥面交界处时发生全反射。

为了便于计算,假设光束水平入射,并且光束入射进入连接器锥体部分后也是水平方向传播,在锥体内部水平方向传播的光束射向锥体界面时,其入射角为 β (见图 5),由几何关系有 $\theta = \beta$ 。

设锥体内部水平方向传播的光束射向锥体界面全反射临界角记为 θ_c ,为了使水平入射的激光全部进入光纤内传输,则锥面斜面与光纤纤芯法线的夹角 θ 需满足如下条件:

$$\theta = \beta \geq \theta_c = \arcsin(n_2/n_1) \quad (7)$$

锥形连接器锥体部分的半锥角^[14]记为 α ,它是锥面母线和锥体轴心线的夹角。为了使锥体内部水平方向传播的光束射向锥体界面时产生全反射,则需要下面公式成立,即

$$\alpha \leq 90^\circ - \theta = 90^\circ - \beta =$$

$$90^\circ - \theta_c = 90^\circ - \arcsin(n_2/n_1) \quad (8)$$

式(8)的物理意义是给出了半锥角 α 的最大值,如果半锥角 α 大于这一数值,那么锥体内部水平方向传播的光束射向锥体界面时就不会产生全反射。因此,设计新型的锥形光纤连接器时,其半锥角 α 应小于式(8)规定的数值。

3 耦合效率实验

为了进一步研究新型空间光-锥形光纤接收器的有效性,笔者同成都中住光纤有限公司的技术人员进行了沟通和交流,并在该公司技术研发部试制了新型锥形光纤连接器,然后进行了实验测试。

3.1 样品制作过程

考虑到新的锥形光纤连接器难以直接生产,所以采用光纤熔接过程中使用的熔融拉锥方法对普通光纤进行加工从而获得新的锥形光纤连接器,熔锥方法的技术已经十分成熟。本实验采用 SCS-4000 熔融拉锥系统制作锥形光纤耦合器^[15],使用一根多模光纤和一根单模光纤进行熔融拉锥,火焰熔融光纤的范围设置在约 7 mm,利用氢氧火焰加热熔融光纤,并选取纳米级石英粉作为一种助粘剂。

熔融拉锥使两根光纤熔融连接在一起^[16],连接处出现熔锥形结构,之后再用水专用切割刀在锥型结构处切割,形成有锥形连接器的光纤,然后对锥形连接器进行侧边抛磨,使锥形结构符合要求,从而制造出带有锥形头的单模光纤。实验中采用新型轮式光纤侧边抛磨机,用其制作侧面抛磨光纤容易控制抛磨区长度和形状,能有效控制抛磨面凹凸范围不超过 $1 \mu\text{m}$,锥面斜面与纤芯的夹角为 8° 。

本次实验试制的锥形接收器, n_1 约为 1.49; n_2 约为 1.46,不计 n_0 影响,根据前面的分析,其最大半锥角应满足下式

$$\alpha \leq 90^\circ - \arcsin(n_2/n_1) = 90^\circ - \arcsin(1.46/1.49) = 90^\circ - 78^\circ = 12^\circ$$

实验中试制的锥形连接器半锥角为 8° 是满足条件的。

3.2 新接收器耦合效率理论值

同样,设耦合损耗 γ 为 0.95,锥形接收器锥口半径为 $6.0 \mu\text{m}$,光纤依然为单模半径为 $4.0 \mu\text{m}$,接收光纤端面上的光斑半径为 $3.0 \mu\text{m}$,设振动造成光斑中心和接收光纤端面中心距离 r_i 在 $0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 之间变化,耦合效率的数值计算结果如图 6 所示。

参见图 6,和普通光纤接收器相比(见图 3),锥形光纤接收器耦合效率较高,比如, r_i 为 $5.0 \mu\text{m}$ 时,从图 6 中可以看出,锥形光纤接收器耦合效率 40%左右,从图 3 中可以看出,普通光纤接收器耦合效率 23%左右。

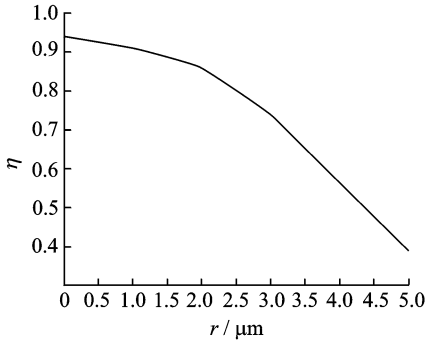


图 6 新接收器耦合效率理论计算结果

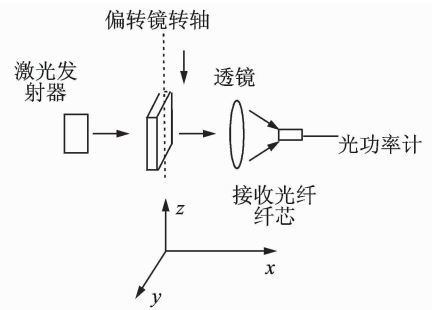
Fig. 6 Theoretical efficiency value of new receiver

3.3 实验室测试

实验室模拟测试系统如图 7 所示,包括激光发射、振动模拟,激光接收以及光功率测试部分^[17-18]。激光发射部分是由一个 DFB 型激光器芯片和一个发射准直透镜组成,DFB 型激光器芯片输出波长为 1550 nm 的激光,阈值电流为 12 mA ,工作电流为 25 mA ,最大输出功率约 12 mW 。振动模拟部分由控制系统和高速偏转镜构成,在控制系统控制下,高速偏转镜以旋转轴为中心往复偏转,用以模拟发射平台振动导致的偏差,振动频率 $1 \sim 50 \text{ Hz}$,振幅 $0 \sim 280 \mu\text{rad}$ 。激光接收部分由一个接收准直透镜和接收光纤纤芯组成,接收准直透镜焦距 f 取 10 mm ,纤芯半径为 $5 \mu\text{m}$,数孔直径 NA 取 0.22 。

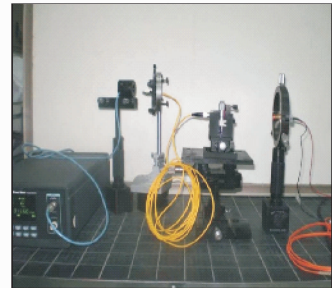
实验过程中,首先,偏转镜不发生偏转,即没有振动产生时,调节发射透镜和接收透镜,使系统达到最佳耦合状态(光功率计接收到功率最大的状态),这种情况下,采用普通光纤纤芯时,光功率测量结果约为 0.70 mW ,采用新型锥形光纤纤芯时,光功率测量结果约为 0.68 mW 。这表明没有振动时,普通光纤纤芯耦合效率略高,新型锥形光纤耦合效率略低,这是因为锥形光纤存在锥形端面和纤芯熔接点,熔接处会出现回波发射从而损失部分光能的缘故,由于笔者主要研究振动的影响,因此忽略这一微小差异。

接下来,由控制系统控制偏转镜偏转,模拟不同频率,不同振幅情况下的耦合效率。在振动环境下,采用普通光纤纤芯时,光功率测量结果约为 p_1 ,设



(a) 实验原理图

(a) Experimental schematic diagram



(b) 实验场景图

(b) Experimental scene

图 7 实验原理和实验场景图

Fig. 7 experimental diagram and scene

普通光纤在振动环境下的耦合效率 $\eta_1 = P_1 / 0.70$,采用新型锥形接收器时,光功率测量结果约为 p_2 ,设新型锥形接收器振动环境下的耦合效率 $\eta_2 = P_2 / 0.68$ 。首先设定振动频率为 30 Hz ,测定了不同振幅下的耦合效率,结果如表 1 所示,并根据表 1 结果,采用 MATLAB 软件绘制了拟合曲线,如图 8 所示。采用同样的方法,进一步绘制了振动频率为 40 和 50 Hz 的拟合曲线,如图 9,10 所示。限于篇幅,频率为 40 和 50 Hz 数据表格略去。

表 1 振动频率为 30 Hz 时传统接收器和新接收器耦合效率
Tab. 1 Efficiencies of new and common receivers under 30 Hz

振幅 / μrad	0	50	100	150	200	250	300
η_1	0.90	0.90	0.80	0.60	0.50	0.30	0.11
η_2	0.95	0.90	0.83	0.78	0.70	0.60	0.55

参见图 8~10,其振动频率分别为 $30, 40, 50 \text{ Hz}$ 时,振幅从 $0 \sim 300 \mu\text{rad}$ 情况下 η_1 和 η_2 的关系,从图中可以看出,不同振动频率情况下, η_1 和 η_2 的关系大致相同,这表明振动频率对耦合效率影响不大。从振幅的角度来看,振幅对 η_1 和 η_2 的影响十分明显,参照图 8,采用普通光纤连接器时,耦合效率随着振幅的增大而迅速降低,当振幅从 0 增大到

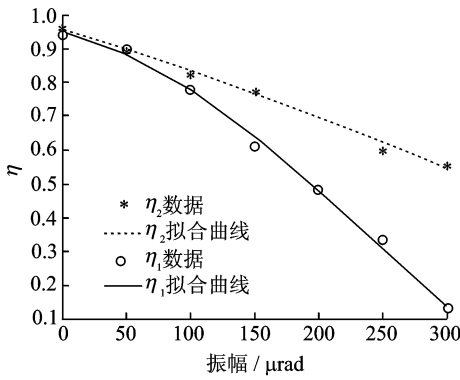


图 8 振动频率为 30 Hz 时传统接收器和新接收器耦合效率

Fig. 8 Efficiencies of new and common receivers under 30 Hz

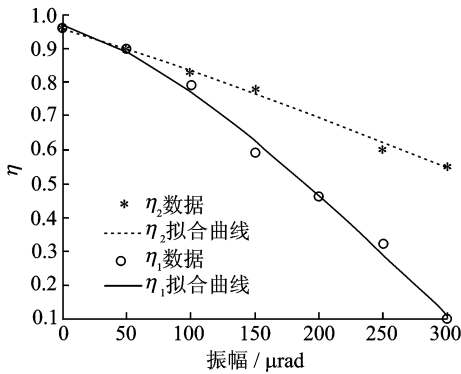


图 9 振动频率为 40 Hz 时传统接收器和新接收器耦合效率

Fig. 9 Efficiencies of new and common receivers under 40 Hz

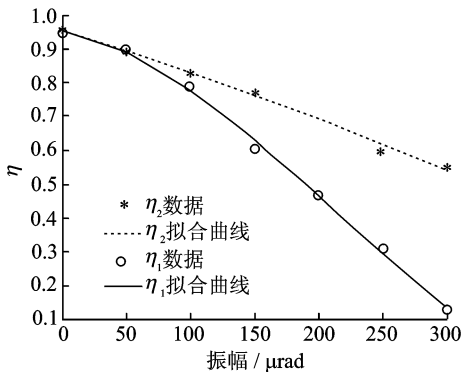


图 10 振动频率为 50 Hz 时传统接收器和新接收器耦合效率

Fig. 10 Efficiencies of new and common receivers under 50 Hz

280 μrad 时,耦合效率从大约 95%降低至 10%,但对新型锥形光纤连接器而言,尽管耦合效率也随着振幅的增大而降低,但耦合效率降低的幅度要小一些。当振幅从 0 增大到 280 μrad 时,新连接器耦合

效率从 95%降低至 55%,可见,新的连接器具有更强的抗振动性能。参照图 8,9,当振动频率分别为 40 和 50 Hz 时,也能得出大致相同的结论。

4 结束语

笔者首先分析了微振动对空间光-光纤耦合的影响,设计了一种新的锥形接收器,并对这一新的接收器进行了理论分析和实验测试。结果表明,在微振动环境下,和振动频率相比,振幅的变化对耦合效率的影响较大。当振幅变大时,和普通光纤接收器相比,新型锥形光纤接收器耦合效率下降速度较慢,在相同振幅情况下,新型锥形光纤接收器耦合效率较高。这种新型光纤接收器不但可以应用到地面和卫星间的空间光通信,还可以应用到地面与航空器、以及地面和空间武器装备制导系统等设备的空间光通信。同时,由于在普通光纤通信中,发送和接收数据分别各用一根光纤,所以笔者提出的锥形连接器还可以在普通光纤通信接收端使用。

参 考 文 献

- [1] 姜会林. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 35-52.
- [2] 赵静, 赵尚弘, 李勇军, 等. 空间分集技术在航空激光通信中的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080603-1-080603-6.
Zhao Jing, Zhao Shanghong, Li Yongjun, et al. Application of spatial diversity technology for airborne laser communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080603-1-080603-6. (in Chinese)
- [3] Chan V W S. Optical space communications [J]. IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(6): 959-975.
- [4] Morio T, Kenichi A. In-orbit measurements of short term attitude and vibrational environment on the engineering test satellite VI using laser communication equipment[J]. Optical Engineering, 2001, 40(5): 827-832.
- [5] Shinhak L, James W A. Pointing and tracking subsystem design for optical communications link between the international space station and ground[C]// Free-Space Laser Communication Technologies XI. Bellingham WA USA: SPIE Proceedings Press, 2000, 3932: 150-157.

- [6] Fan Fei, Gu Wenhao, Chen Sai, et al. State conversion based on terahertz plasmonics with vanadium dioxide coating controlled by optical pumping[J]. Opt Lett, 2013, 38(9):1582-1584.
- [7] Lin Yixiang, Ai Yong, Shan Xin, et al. Simulation of two-dimensional target motion based on a liquid crystal beam steering method[J]. Optics Engineering, 2015, 54(5):056102.
- [8] Prabu K, Sriram D. MIMO free-space optical communication employing coherent BPOLSK modulation in atmospheric optical turbulence channel with pointing errors[J]. Optics Communication, 2015, 343: 188-194.
- [9] Prabhmandeep K, Virander K J, Subrat K. Performance analysis of free space optical links using multi-input multi-output and aperture averaging in presence of turbulence and various weather conditions[J]. IET Communication, 2015, 9(8):1104-1109.
- [10] 张伟杰. 光纤通信中机械误差损耗的研究[J]. 光通信研究, 2014, 31(6):52-54.
Zhang Weijie. Study on mechanical error loss in infrared wavelength-based fiber-optic communications [J]. Study on Optical Communications, 2014, 31(6):52-54. (in Chinese)
- [11] Bayki E, Schober R, Mallik R K. Performance analysis of MIMO free-space optical systems in Gamma-Gamma fading[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(11):3415-3424.
- [12] Tsiftsis T A, Sandalidis H G, Karagiannidis G K, et al. Optical wireless links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(2):951-957.
- [13] 武云云. 自适应光学技术在大气光通信中的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [14] 童峥嵘, 韩伟, 曹晔. 基于多模光纤偏芯熔接实现温度和折射率同时测量的光纤传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(1):0106004-1-0106004-5.
Tong Zhengrong, Han Wei, Cao Ye. Fiber sensor for simultaneous measurement of temperature and refraction index based on multi mode fiber core-offset[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1):0106004-1-0106004-5. (in Chinese)
- [15] Yin Guolu, Lou Shuqin, Zou Hui. Refractive index sensor with asymmetrical fiber Mach-Zehnder interferometer based on concatenating single-mode abrupt taper and core-offset section[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45(2):284-300.
- [16] 柯熙政, 刘妹. 湍流信道无线光通信中的分集接收技术[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0106005-1-0106005-8.
Ke Xizheng, Liu Mei. Diversity reception technology over atmospheric turbulence channels in wireless optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1):0106005-1-0106005-8. (in Chinese)
- [17] Prabu K, Sriram K D, Reza M. BER analysis of BPSK-SIM-based SISO and MIMO FSO systems in strong turbulence with pointing errors [J]. Optik, 2014, 125(21):6413-6417.
- [18] 冷蛟锋, 郝士琦, 瞿福琪, 等. 无线相干光通信空间分集接收合并技术[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1):010602-1-010602-6.
Leng Jiaofeng, Hao Shiqi, Zhai Fuqi, et al. Combination of spatial diversity coherent receivers for wireless optical communication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(1):010602-1-010602-6. (in Chinese)



第一作者简介:胡清桂,男,1973年1月生,硕士、副研究员。主要研究方向为计算机网络与激光通信。曾发表《Influence of vibration on spatial coupler and the tapered receiver》(《Optical Engineering》2018, Vol. 57, No. 4)等论文。
E-mail: hu646100177@126.com

