

# 空间光-单模光纤耦合效率因素分析

邓科, 王秉中, 王旭, 幺周石, 胡渝

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

**【摘要】**根据电磁场模场匹配理论,分析了影响空间光-单模光纤耦合效率的因素。通过优化耦合透镜相对孔径,可以实现较高效率的耦合。理论计算表明,当透镜相对孔径分别为0.203和0.211时,1 310 nm激光最大耦合效率为82.54%,1 550 nm激光最大耦合效率为82.69%。当对准出现偏差时,耦合效率下降,对准偏差与耦合效率关系曲线与光纤端面光场分布曲线相似,工程上可方便地加以计算。实验结果验证了理论分析方法和结果,测得最大耦合效率为61%。

**关键词** 空间光; 耦合; 自由空间光通信; 单模光纤

中图分类号 TN929.11; O431.2

文献标识码 A

## Technology of Coupling Beam into Single-Mode Fiber in Free Space Optical Communication System

DENG Ke, WANG Bing-zhong, WANG Xu, YAO Zhou-shi, HU Yu

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** On the basis of field-matching theory, we analyzed the elements that affect the coupling efficiency of light from free space to single-mode fiber. If the F number of coupling lens is optimized, the coupling efficiency is adequate. Theoretical calculation indicates that the maximum coupling efficiencies of 82.54% and 82.69% in wavelength of 1 310 nm and 1 550 nm are achieved when the F numbers of lens are 0.203 and 0.211, respectively. Aiming offset brings decline of coupling efficiency. The decline curve is similar to the field curve of fiber end, and it can be conveniently obtained in engineering calculation. Experimental results confirm the theory, and the measured maximum coupling efficiency is 61%.

**Key words** beam; coupling; free space optical communication; single-mode fiber

自由空间光通信(Free Space Optical Communication, FSO)技术有容量大、抗干扰能力强、结构简单、组网灵活等特点<sup>[1-3]</sup>,将成熟的光纤通信技术应用用于自由空间光通信系统中有诸多优势<sup>[4]</sup>。其中包括利用低噪声光纤前置放大器和光纤通信信号探测器,可以提高接收灵敏度,得到更宽的信号带宽,达到近量子极限的探测灵敏度。将光纤通信技术应用用于自由空间光通信系统就面临着空间光与光纤的接口技术的挑战。自由空间光通信系统接收光信号往往十分微弱,因此,空间光与光纤耦合问题的关注焦点是耦合效率。

使用耦合透镜将空间光耦合进入单模光纤,采用模场匹配理论来进行耦合效率的分析。根据单模光纤模场半径选定优化的耦合透镜参数可以获得最大的耦合效率。当出现对准偏差的时候,耦合效率

会出现下降。为分析通信系统性能,还要知道耦合效率与对准偏差之间的关系。

### 1 空间光-单模光纤正对准耦合效率

光纤端面上电磁场分布为零阶贝塞尔函数,而一般以高斯分布来近似为<sup>[5]</sup>:

$$\Psi(r) = \exp\left[-\left(r/r_0\right)^2\right] \quad (1)$$

式中  $r_0$  为单模光纤模场半径;  $r$  是光纤端面上任一点到中心的径向距离。经过远距离真空传输的光波到达接收孔径的时候,可以看作平面光波,在接收透镜焦点上电磁场分布为<sup>[6]</sup>:

$$U(r) = \exp(ikf) \exp(ikr^2/2f) \pi a^2 \times \dots \times \left[2J_1\left(\frac{2\pi ar}{\lambda f}\right) / \left(\frac{2\pi ar}{\lambda f}\right)\right] / (i\lambda f) \quad (2)$$

式中  $f$  是耦合透镜焦距;  $\lambda$  是波长;  $2a$  是耦合透镜孔径光阑;  $k$  是波数。

实现单模光纤高效耦合的最重要条件是满足注入条件(或称为模场匹配)——耦合进入单模光纤的激光与单模光纤出纤电磁场分布(幅度和相位)相同,可获得最高的耦合效率。可行的方法是对焦点艾里光斑和光纤端面模场进行比较,选取适当透镜参数,使得艾里光斑衍射光场与光纤端面模场的差异最小。

空间光-单模光纤耦合效率为<sup>[5]</sup>:

$$\eta = \frac{\iint U^*(r)\Psi(r)rdrd\theta \div \dots \div \sqrt{\iint U(r)U^*(r)rdrd\theta \iint \Psi(r)\Psi^*(r)rdrd\theta}} \quad (3)$$

将式(1)、(2)代入式(3),可得空间光-单模光纤能量耦合效率为:

$$T = \eta\eta^* = |\eta|^2 = \left| \int_0^{+\infty} \exp\left[-(r/r_0)^2\right] \exp(-ikr^2/2f) \times \dots \times \left[ 2J_1\left(\frac{2\pi ar}{\lambda f}\right) \middle/ \left(\frac{2\pi ar}{\lambda f}\right) \right] r dr \right|^2 \div \dots \div \int_0^{+\infty} \exp\left[-2(r/r_0)^2\right] r dr \div \dots \div \int_0^{+\infty} \left[ 2J_1\left(\frac{2\pi ar}{\lambda f}\right) \middle/ \left(\frac{2\pi ar}{\lambda f}\right) \right]^2 r dr \quad (4)$$

从式(4)看出,当选定单模光纤和光波长的时候,可以通过改变  $2a/f$  的值(即相对孔径的倒数)改变能量耦合效率。由于解析表达式的复杂性,最高耦合效率的寻找用计算机数值计算来完成,通过计算,做出  $2a/f$  与能量耦合效率  $T$  关系曲线,如图1所示。

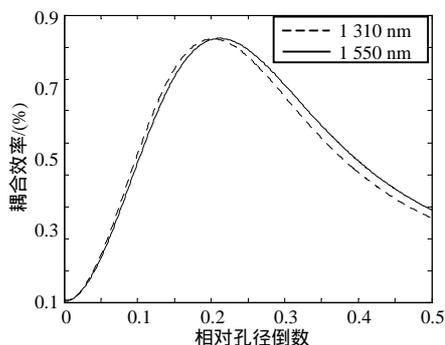


图1 正对准空间光-单模光纤耦合效率与耦合透镜相对孔径倒数关系曲线

从图1中读出在1310 nm和1550 nm波长时候,耦合效率最大值以及相对应的耦合透镜相对孔径倒数(优化值)如表1所示。

表1 单模光纤最大耦合效率对应的耦合透镜相对孔径倒数

| 波长/nm | 最大耦合效率/(%) | 耦合透镜相对孔径倒数 |
|-------|------------|------------|
| 1310  | 82.54      | 0.203      |
| 1550  | 82.69      | 0.211      |

## 2 空间光-单模光纤对准偏差耦合效率

在实际的自由空间光通信系统中,收发端机存在一定的对准误差。光入射到天线的角度处于变化之中,这对空间光-光纤耦合的影响主要表现为:焦点在光纤端面上的移动,造成衍射光场与光纤端面光场幅度匹配程度降低,损耗增加。由于入射角变化范围较小,与正入射时候只相差一个很小的相位因子,可忽略这种影响。光纤端面上电磁场分布为零阶贝塞尔函数,而一般以高斯分布来近似:

$$\Psi(x-x_{\text{offset}}, y) = \exp\left\{-\left[(x-x_{\text{offset}})^2 + y^2\right]/r_0^2\right\} \quad (5)$$

式中  $x_{\text{offset}}$  是光斑中心偏移距离。由于光纤端面模场关于中心轴对称,因此考虑  $x$  方向上的偏移即可。

焦点上电磁场分布与式(2)相同。在  $x$  方向光斑偏离  $x_{\text{offset}}$ , 在  $y$  方向不偏离时,空间光-单模光纤能量耦合效率为:

$$T(x_{\text{offset}}) = \eta(x_{\text{offset}})\eta(x_{\text{offset}})^* = |\eta(x_{\text{offset}})|^2 = \left| \iint 2 \exp\left[-\frac{(x-x_{\text{offset}})^2}{r_0^2}\right] \times \dots \times \exp\left(-ik\frac{x^2+y^2}{2f}\right) J_1\left(\frac{2\pi a\sqrt{x^2+y^2}}{\lambda f}\right) \div \dots \div \frac{2\pi a\sqrt{x^2+y^2}}{\lambda f} dx dy \right|^2 \div \dots \div \iint \exp\left[-2\frac{(x-x_{\text{offset}})^2+y^2}{r_0^2}\right] dx dy \div \dots \div \iint \left[ 2J_1\left(\frac{2\pi a\sqrt{x^2+y^2}}{\lambda f}\right) \middle/ \left(\frac{2\pi a\sqrt{x^2+y^2}}{\lambda f}\right) \right]^2 dx dy \quad (6)$$

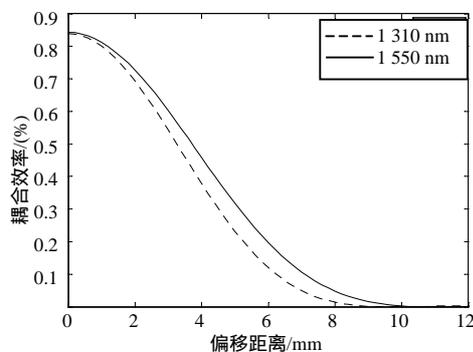


图2 耦合效率与光斑偏移距离曲线

图2中对准偏差的耦合衰减曲线类似高斯曲线,

因此试用单模光纤端面光场高斯曲线去拟合这条曲线,符合程度相当好。因此,在考虑入射光偏转造成的耦合效率下降问题的时候,可以采用单模光纤端面光场高斯曲线来作为工程近似衰减计算曲线,如图3所示。

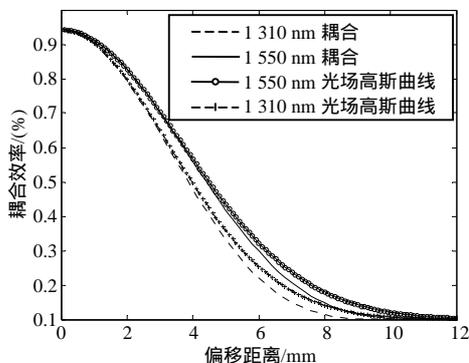


图3 用光纤端面出纤高斯光场曲线耦合光斑偏移耦合效率曲线

### 3 实验结果

采用自行研制的“空间光-单模光纤无源耦合测试平台”测量了耦合效率。该平台由计算机控制压电陶瓷,同时记录光电探测器光功率。由于是自动完成组装测试,测量时间短,减轻了环境变化对测量结果的影响,所以精度较高。

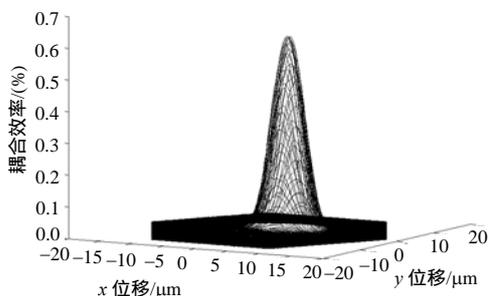


图4 空间光-单模光纤耦合效率测试结果

表2 不同 $1/F^\#$ 情况下耦合效率

| $2a$ /mm | $1/F^\#$ | $\eta_{max}$ |
|----------|----------|--------------|
| 3.5      | 0.175    | 0.58         |
| 4.0      | 0.200    | 0.61         |
| 4.5      | 0.225    | 0.59         |
| 5.0      | 0.250    | 0.57         |

用于耦合的光纤是商用单模光纤跳线,光纤端面未作镀膜等特殊处理。光源波长 $\lambda=1\ 310\ \text{nm}$ ,耦

合透镜直径 $2a=4\ \text{mm}$ ,耦合透镜焦距 $f=20\ \text{mm}$ ,因此耦合透镜相对孔径的倒数 $1/F^\#=0.200$ 。测试结果如图4所示,测得的最大耦合效率 $\eta_{max}=0.61$ 。图中表示了对准偏差不同时的耦合效率,即汇聚点在光纤端面上扫描时耦合效率情况,以三维图形表示。

为验证相对孔径优化理论分析结果,作了多组相对孔径耦合效率测试,结果如表2所示。

实验结果与理论分析曲线趋势相同,验证了理论分析方法的正确性。但实验结果中一些数据值与理论结果不符合,表明测试用的光学器件质量有待提高。

### 4 结论

光纤器件在自由空间光通信中有着重要的应用,将经过远距离传输的空间光耦合进入单模光纤是一项精密工程。通过优化耦合透镜相对孔径,可以实现较高效率的耦合。理论计算表明,当透镜相对孔径分别为0.203和0.211时,1 310 nm激光最大耦合效率为82.54%,1 550 nm激光最大耦合效率82.69%,工程可做到的耦合效率受到光纤端面反射、光学系统质量等因素的制约,因此可采用对光纤端面镀增透膜,设计和加工高精度光学系统等措施来提高空间光-单模光纤耦合效率。当对准出现偏差时,耦合效率下降。对准偏差与耦合效率关系曲线与光纤端面光场分布相似,工程上可以方便地加以计算。

#### 参考文献

- [1] 王佳,俞信.自由空间光通信技术的研究现状和发展方向综述[J].光学技术,2005,31(2):259-265.
- [2] 许国良,张旭苹,徐伟弘.自由空间光通信[J].光电子技术,2002,22(4):198-205.
- [3] 程莉.自由空间光通信技术[J].工控新技术,2004,14(5):24-27.
- [4] VINCENT W S C. Optical space communications[J]. IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(6): 959-975.
- [5] SIMON T, JEAN L. Advanced fiber coupling technologies for space and astronomical applications[C]//Proc of SPIE Photonics North 2004: Photonic Applications in Astronomy, Biomedicine, Imaging, Materials Processing, and Education, [S. l.]: SPIE, 2004, 5578: 40-51.
- [6] 朱自强,王仕藩,苏显渝.现代光学教程[M].成都:四川大学出版社,1990.

编辑 税红