

自适应光学校正下空间光通信的光纤耦合效率及斯特列尔比

韩立强, 王志斌

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 采用光纤部件的自由空间光通信系统需要把接收到的光束耦合进单模光纤中, 然而由于大气湍流的影响, 使光纤耦合效率下降。自适应光学能够减小大气湍流效应, 提高光纤耦合效率, 根据大气湍流参数的空间光到单模光纤耦合效率表达式, 得到了自适应光学校正下单模光纤耦合效率表达式, 仿真结果显示: 自适应光学能够增加空间相干长度, 从而有效提高光纤耦合效率。同时还研究了斯特列尔比与耦合效率的关系, 结果表明: 无论有无自适应光学校正, 两者都具有很好的拟合关系, 因此在实际中可以用比较简单的斯特列尔比近似估计耦合效率。

关键词: 自由空间光通信; 耦合效率; 大气湍流; 自适应光学

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)01-0125-05

Fiber coupling efficiency and Strehl ratio for space optical communication based on adaptive optics correction

Han Liqiang, Wang Zhibin

(College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The received laser beam in a free-space optical communication using fiber-optic components system must be coupled into a single-mode fiber. However, atmospheric turbulence degrades the fiber-coupling efficiency. Adaptive optics can reduce the effects of atmospheric turbulence and improve fiber coupling efficiency. According to space light into single-mode fiber coupling efficiency expression with the atmospheric turbulence parameters, the single-mode fiber coupling efficiency expressions based on adaptive optics correction was deduced. Simulation results show that adaptive optics system correcting the aberrations induced by turbulence can increase the spatial coherence radius and then can improve the coupling efficiency. The the relationship between Strehl ratio and coupling efficiency was studied. The results show that regardless of the presence or absence of adaptive optics correction, both have good fitting relationship. Therefore, simple Strehl ratio can be used to estimate the single-mode fiber coupling efficiency.

Key words: free space optical comunication; coupling efficiency; atmospheric turbulence; adaptive optics

收稿日期: 2012-05-05; 修订日期: 2012-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(61107039)

作者简介: 韩立强(1976-), 男, 博士, 主要从事自由空间光通信等方面的研究。Email: ysdxhlq@163.com

0 引言

自由空间光通信具有带宽宽、无需频谱许可、部署快速便携、成本低等优点,近些年受到了广泛关注。但激光在大气中传输时,大气湍流会使传输光束的波前相位随机起伏,引起光束抖动、光斑漂移、闪烁、光束扩展等大气湍流效应,降低激光束的光束质量,严重影响激光通信系统的稳定性和可靠性^[1-2]。使用光纤器件的自由空间光通信系统需要把透镜接收到的光信号耦合到光纤中,进行信号传输,但由于大气湍流的影响,在接收端耦合到光纤中的是经过大气后发生畸变的光信号,它使单模光纤耦合效率严重下降。

在相关文献中, Peter J. Winzer 在激光雷达应用中详细研究了相干光光纤耦合效率^[3];在参考文献^[4]中,研究了自由空间光通信中到达角起伏扰动与光纤耦合效率的关系^[4]; Yamac D 推导了基于大气湍流参数的光纤耦合效率表达式,理论上分析了大气湍流对自由空间光通信光纤耦合效率的影响^[5]。在补偿光纤耦合效率方面,在接收端和发射端使用掺铒光纤放大器能够提高光纤耦合光功率^[6];利用光纤阵列也可提高光纤耦合效率^[7];自适应光学系统也能够补偿湍流的影响,提高光纤耦合效率^[8]; Weyrauch T 则采用无模型波前校正对自由空间光通信中耦合效率进行了具体补偿实验研究^[9];在参考文献^[10]中,理论分析了在自由空间光通信中,采用模式校正和光纤阵列共同校正能够达到最好的耦合效率;在参考文献^[11]中,采用微透镜阵列来提高光纤耦合效率;参考文献^[12]中,在自由空间光通信中利用快速反射镜补偿由于跟踪误差造成耦合效率的损失;在参考文献^[13]中,分析了在自由空间光通信中局部波前相差对单模光纤耦合效率的影响。

文中首先基于给出的大气湍流下自由空间光通信的单模光纤耦合效率表达式,分析了自适应光学校正下单模光纤耦合效率,同时讨论了斯特列尔比与耦合效率的关系。

1 单模光纤耦合效率

单模光纤耦合效率是指耦合进单模光纤中的光功率(P_c)与接收孔径平面上的入射光功率(P_a)之

比,即

$$\eta = \frac{(P_c)}{(P_a)} = \frac{\left\langle \left| \int_A \mathbf{U}_i(\mathbf{r}) \mathbf{U}_m^*(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \right|^2 \right\rangle}{\left\langle \left| \int_A \mathbf{U}_i(\mathbf{r}) \right|^2 d\mathbf{r} \right\rangle} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{U}_i(\mathbf{r})$ 为接收孔径上的入射光场; $\mathbf{U}_m(\mathbf{r})$ 为单模光纤模场。在自由空间光通信中,光束经过大气湍流后,耦合进单模光纤,其光纤耦合效率的表达式^[5]为:

$$\eta = 8a^2 \int_0^1 \int_0^1 \exp[-(a^2 + A_R/A_c)(x_1^2 + x_2^2)] \cdot I_0(2A_R/A_c x_1 x_2) x_1 x_2 dx_1 dx_2 \quad (2)$$

其中, I_0 是零阶第一类修正的贝塞耳函数,

$$a = \frac{D_R}{2} \frac{\pi W_m}{\lambda f} \quad (3)$$

$$A_R = \frac{\pi D_R^2}{4} \quad (4)$$

$$A_c = \pi \rho_c^2 \quad (5)$$

$$\rho_c = (1.46 C_n^2 k^2 L)^{-3/5} \quad (6)$$

式中: A_R 接收孔径面积; A_c 为入射光波的空间相干面积; ρ_c 为空间相干长度; D_R 为接收透镜孔径; W_m 为光纤端面模场半径; f 为接收透镜焦距; λ 为波长; $k=2\pi/\lambda$ 为波数; L 为传输距离; C_n^2 为大气折射率结构常数,斜程传输情景,此时;采用公式(7)的 Hufnagel-Valley 模型, ρ_c 则变为公式(8):

$$C_n^2(h) = 0.00594(v/27)^2(10^{-5}h)^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-6} \exp(-h/1500) + C_n^2(0) \exp(-h/1000) \quad (7)$$

$$\rho_c = [1.46 k^2 \sec \zeta \int_0^H C_n^2(h) dh]^{-3/5} \quad (8)$$

式中: h 为海拔高度; v 为风速的平方根均值,一般取 $C_n^2(0) = 1.7 \times 10^{-14}$, $H = L \cos(\zeta)$,为天顶角。

2 自适应光学校正下的耦合效率

自适应光学能够有效补偿大气湍流的影响,下面讨论了在自适应光学校正下的自由空间光通信单模光纤耦合效率。自适应光学相差理论中,常用泽尼克多项式描述波前:

$$\phi(\mathbf{r}, \theta) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i Z_i(\mathbf{r}, \theta) \quad (9)$$

式中: a_i 为泽尼克相差多项式的系数,如果前 j 阶模

式被校正,则未校正的波前残差为:

$$\Delta_j = \sum_{i=j+1}^{\infty} \langle |a_i|^2 \rangle = \text{coef}(j) \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} \quad (10)$$

式中:coef(j)为 Noll 系数,即,

$$\text{coef}(j) \approx 0.294 4 j^{-\sqrt{3}/2} \quad (11)$$

光波经过大气湍流,其波前相位发生畸变,已知大气湍流 Fried 参数 r_0 和而空间相干长度 r_c 的关系为:

$$r_0 = 2.1 r_c \quad (12)$$

结合以上公式,根据参考文献[14]可知,光束经大气湍流传输,接收端被自适应光学系统校正后,如果前 j 阶模式被校正,则相应校正后的 Fried 参数 ρ_0 可近似变为:

$$\rho_0 = 0.286 \left(\frac{3.44}{\text{coef}(j)} \right)^{3/5} j^{-0.362} r_0 \quad (13)$$

根据 Fried 参数和空间相干长度的关系,可得校正后的空间相干长度 ρ_c 为:

$$\rho_c = \frac{\rho_0}{2.1} \quad (14)$$

把公式(13)和(14)带入公式(2)即得到自适应光学校正下的耦合效率,所以经过自适应光学系统校正补偿后,空间相干长度 ρ_c 增大,相应的入射光波的空间相干面积 A_c 也就变大,自由空间光通信系统的单模光纤耦合效率随之增大,具体仿真如下。

根据耦合效率公式,仿真分析了自适应光学校正后对自由空间光通信单模光纤耦合效率的具体影响。由参考文献[5]可知 a 的最优值为 1.12,以下仿真均假定 $a=1.12$ 。图 1 显示了波长 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$,接收孔径 $D_R=10 \text{ cm}$,传输距离 1 000 m,耦合效率与校正模数及大气折射率结构常数的关系,随着湍流强度的增大,即大气折射率结构常数增加,单模光纤耦合效率变小,但随着校正模数的增大,耦合效率能够得到

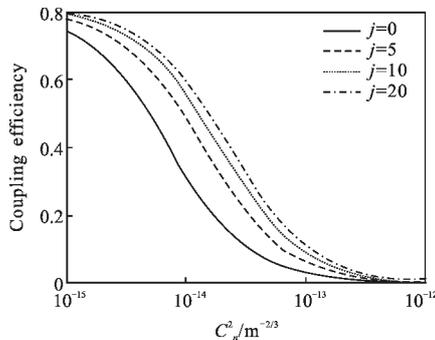


图 1 不同校正模数时,耦合效率与 C_n^2 的关系

Fig.1 Coupling efficiency vs C_n^2 with different correction mode

显著提高。图 2 显示了 $C_n^2=10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 时,耦合效率与传输距离的关系,从图可见,随着传输距离的增大,单模光纤耦合效率急剧降低,但随着校正模数的增大,耦合效率能够得到显著提高。图 3 显示了斜程传输时,耦合效率与天顶角的关系,假定接收孔径 $D_R=10 \text{ cm}$,波长 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$,风速的平方均值 $v=10 \text{ m/s}$,传输距离 1 000 m,从图可知,随着天顶角增大,耦合效率随之减小,但随着校正模数的增大,耦合效率能够得到显著提高。综上分析可知,随着参数大气湍流、传输距离、天顶角的增大,耦合效率随之减小;但通过自适应光学校正后,耦合效率能够得到显著提高,特别是经过 5 阶模数的校正就能得到较大的提高,虽然随着校正模数不断提高,耦合效率不断增加,但高阶模数以后,提升效果有限,且计算量显著增加,因此常采用较低的模数就能达到较好的性价比。

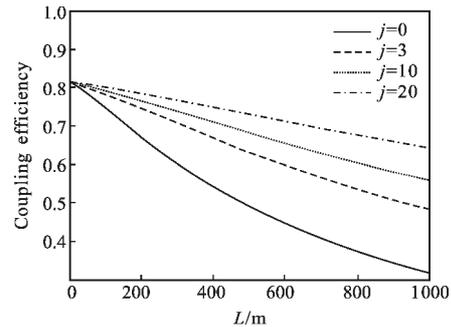


图 2 不同校正模数时,耦合效率与 C_n^2 的关系

Fig.2 Coupling efficiency vs C_n^2 with different correction mode

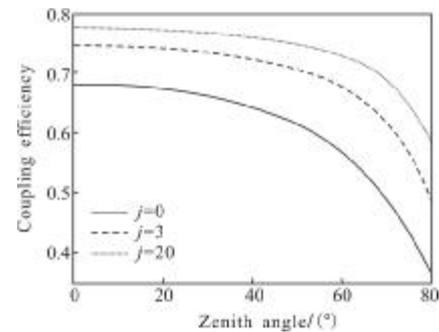


图 3 不同校正模数时,耦合效率与天顶角的关系

Fig.3 Coupling efficiency vs zenith angle with different correction mode

3 耦合效率与斯特列尔比的关系

在自适应光学系统中一般是采用斯特列尔比来评价自适应光学系统校正后的光束质量。设原始波波前上任意一点的复振幅可表示为:

$$E(\rho) = A(\rho)e^{j\varphi(\rho)} \quad (15)$$

式中： $\varphi(\rho)$ 为波前相位； $A(\rho)$ 为波前振幅，求出 $E(\rho)$ 在远场的夫朗和费衍射，然后根据衍射强度分布，可得到该点的成像焦斑在光轴上的光强为：

$$I = \frac{1}{\lambda^2 F^2} |A(\rho)e^{j\varphi(\rho)}|^2 \quad (16)$$

式中： F 为成像系统焦距。如果波前为理想平面波，则有 $\varphi(\rho)=0$ ，则成像焦斑在光轴上的光强，也就是衍射极限时的光强为：

$$I_0 = \frac{1}{\lambda^2 F^2} |A(\rho)|^2 \quad (17)$$

把原始波前实际峰值光强与衍射极限峰值光强的比值定义为斯特列尔比(SR)，即：

$$SR = \frac{I}{I_0} = \left| \frac{A(\rho)e^{j\varphi(\rho)}}{A(\rho)} \right|^2 \quad (18)$$

对公式(20)用麦克劳林级数展开，并只取前两项，则公式(20)可简化为：

$$SR = 1 - \sigma_\varphi^2 \quad (19)$$

式中： σ_φ^2 为波前相位方差。若畸变波前相位服从高斯分布，则公式(19)可进一步简化为：

$$SR = \exp(-\sigma_\varphi^2) \quad (20)$$

从公式(20)可以看出，此时斯特列尔比 SR 仅是波前相差的函数，对相差非常敏感，非常适合用于评价自适应光学系统校正质量的指标。斯特列尔比 SR 还可以用以下公式近似计算^[15]：

$$SR = [1 + (D_R/r_0)^{5/3}]^{-6/5} \quad (21)$$

式中： D_R 为接收孔径； r_0 为大气相干参数。

把公式(13)带入公式(21)就可以得到自适应光学校正下的系统斯特列尔比，通过仿真比较自适应光学校正下的耦合效率与斯特列尔比之间的关系，从图 4 可知，当 D_R/r_0 大于 1 时，无论是在没有自适

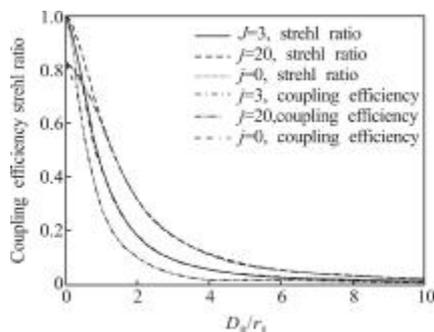


图 4 不同校正模数时，耦合效率与斯特列尔比的关系

Fig.4 Coupling efficiency vs Strehl ratio with different correction mode

应光学校正($j=0$)时还是校正模数不同时(如 $j=3, j=20$)，耦合效率与斯特列尔比都有很好的拟合关系，因此在实际中可以用比较简单的斯特列尔比近似估计耦合效率。

4 结论

基于光纤耦合的自由空间光通信系统由于在发射端和接收端均采用光纤进行连接，这样在室外部分仅放置光学天线系统即可，而其他部件通过光纤连接放置于室内就可以实现通信，所以整个系统结构简单，维护方便，易于安装；并且能够与现有成熟的光纤通信网络很好地融合。然而由于大气湍流的影响，使光纤耦合效率下降，为了提高光纤耦合效率，文中根据大气湍流参数的单模光纤耦合效率表达式，理论推导得到了自适应光学校正下耦合效率表达式，结果显示，较低模式校正就能够有效提高光纤耦合效率，同时还表明，无论是否有自适应光学校正，斯特列尔比与耦合效率都具有很好的拟合关系，这样就可以用斯特列尔比近似估计耦合效率。

参考文献：

- [1] Han Liqiang, Wang Qi, Shida Katsunori. Performance of free space optical communication over gamma-gamma atmosphere turbulence[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1318-1323. (in Chinese)
韩立强, 王祁, 信太克归. Gamma-gamma 大气湍流下自由空间光通信的性能 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1318-1323.
- [2] Han Liqiang, Wang Qi, Shida Katsunori. Outage probability of free space optical communication over atmospheric turbulence[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4): 660-663. (in Chinese)
韩立强, 王祁, 信太克归. 大气湍流下自由空间光通信中断概率分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 660-663.
- [3] Winzer Peter J, Leeb Walter R. Fiber coupling efficiency for random light and its applications to lidar [J]. Opt Lett, 1998, 23: 986-988.
- [4] Morio Toyoshima. Maximum fiber coupling efficiency and optimum beam size in the presence of random angular jitter for free-space laser systems and their applications[J]. J Opt Soc Am, 2006, A23: 2246-2250.
- [5] Yamac D, Frederic M D. Fiber-coupling efficiency for free-

- space optical communication through atmospheric turbulence [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(23): 4946-4952.
- [6] Song Dongyiel, Hurh Yoon Suk, Cho Jin Woo, et al. 4×10 Gb/s terrestrial optical free space transmission over 1.2 km using an EDFA preamplifier with 100 GHz channel spacing [J]. *Opt Express*, 2000, 7: 280-284.
- [7] Hans Bruesselbach, Minden Monica L, Wang Shuoqin, et al. A coherent fiber-array-based laser link for atmospheric aberration mitigation and power scaling [C]//SPIE, 2004, 5338: 90-101.
- [8] Jobling S, McCuske K T, Kwiat P G. Adaptive optics for improved mode-coupling efficiencies[C]//Laser Science XXIV. Rochester, NY: Optical Society of America, 2008: JWA32.
- [9] Weyrauch T, Vorontsov M A, Gowens J W, et al. Fiber coupling with adaptive optics for free-space optical communication[C]//SPIE, 2002, 4489: 177-184.
- [10] Wu Hanling, Yan Haixing, Li Xinyang. Modal correction for fiber-coupling efficiency in free-space optical communication systems through atmospheric turbulence [J]. *International Journal for Light and Electron Optics*, 2010, 121 (19): 1789-1793.
- [11] Daniel V H, David M B, Nathan W R, et al. Fiber optic bundle array wide field-of-view optical receiver for free space optical communications[J]. *Opt Lett*, 2010, 35: 3559-3561.
- [12] Hideki Takenaka, Morio Toyoshima. Study on the fiber coupling efficiency for ground-to-satellite laser communication links[C]//SPIE, 2010, 7587: 75870U1-75870U12.
- [13] Ma Jing, Zhao Fang, Tan Liying, et al. Degradation of single-mode fiber coupling efficiency due to localized wavefront aberrations in free-space laser communications[J]. *Opt Eng*, 2010, 49: 0450041-0450046.
- [14] Cagigal M P, Canales V F. Generalized Fried parameter after adaptive optics partial wave-front compensation [J]. *J Opt Soc Am*, 2000, A17: 903-910.
- [15] Andrews L C, Phillips R L, Sasiela R J, et al. Strehl ratio and scin theory for uplink Gaussian-beam waves: beam wander effects[J]. *Opt Eng*, 2006, 45: 7600101-7600112.

下期预览

基于 Tm,Ho:YAP 种子注入激光的多普勒测速实验研究

鞠有伦,戴通宇,申英杰,王 强,姚宝权,王月珠

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:报道了一台二极管泵浦种子注入 Tm,Ho:YAP 激光器。在重复频率 100 Hz 时,获得了单脉冲能量 2.8 mJ、脉冲宽度 289 ns 的 2.13 μm 单频脉冲激光输出。利用该种子注入 Tm,Ho:YAP 激光器作为发射光源,以一个最大标称线速度 20.4 m/s、直径 10 cm 的风扇作为模拟探测目标,通过外差式相干探测的方法进行了激光多普勒测速实验。利用本振光与信号光的激光拍频信号,得到包含模拟探测目标速度信息的多普勒频移,通过数据处理计算出了风扇不同转速条件下模拟探测目标的速度,并与模拟目标的实际速度进行了对比,测量速度误差小于 1 m/s。