

文章编号: 1001-4322(2006)09-1460-05

# 大气湍流中空间光至单模光纤耦合的跟踪算法\*

向劲松, 么周石, 胡 渝

(电子科技大学 物理电子学院, 成都 610054)

摘 要: 通过模拟湍流波前的振幅起伏及相位起伏, 研究了采用 CCD 探测器的湍流波前倾斜校正系统的空间光到单模光纤耦合功率的衰落特性, 对 CCD 图像的跟踪算法进行了研究。仿真结果表明, 在接收孔径直径与 Fried 参数的比值较大时, 采用质心跟踪算法的倾斜校正系统的性能很差, 耦合光功率会产生严重衰落。提出了一种高斯模板匹配的倾斜校正跟踪算法, 在湍流较强时, 可以有效地降低耦合光功率的衰落深度, 并且可以避免采用质心算法可能出现的大孔径接收性能低于小孔径的不利情况。

关键词: 无线光通信; 大气湍流; 光耦合; 信号衰落; CCD 探测器; 跟踪算法

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A

无线光通信具有通信速率高、结构简单、组网灵活等优点, 特别是在突发事故造成通信中断或通信阻塞下的临时通信, 以及在跨江、跨河等不易采用有线连接等情况下, 无线光通信具有重要价值。在这些通信场合中直接将远距离传输来的激光束耦合进单模光纤, 可以避免复杂的光-电-光的转换, 具有数据透明传输、易于与光纤网络融合等优点<sup>[1]</sup>。无线光通信技术的领先厂商 Dominion Lasercom 公司开发了采用光纤耦合的无线光端机<sup>[2]</sup>。但这种无线光通信系统必然受到大气湍流的影响, 湍流引起的光场振幅起伏会使接收孔径接收到的光强起伏(闪烁), 另外湍流引起的波前相位起伏会使光场的空间相干性退化, 使空间光到单模光纤的耦合功率降低并产生起伏<sup>[3-5]</sup>, 这些起伏可能导致突发性通信错误, 甚至通信中断。采用自适应光学技术纠正畸变的湍流波前, 可以有效地提高耦合效率<sup>[6]</sup>。但自适应光学系统比较复杂, 成本高, 在许多情况下, 通过一快速倾斜镜(FSM)进行简单的湍流波前倾斜校正就可获得较好的性能。本文通过模拟湍流波前, 分析了采用 CCD 探测器的波前倾斜校正系统的空间光到单模光纤耦合功率的衰落特性, 并提出了一种采用高斯模板匹配的跟踪算法, 在接收孔径直径与 Fried 参数的比值较大时, 这种算法的性能明显优于质心跟踪算法。

## 1 大气湍流及波前模拟

图 1 为空间光到单模光纤耦合示意图。单模光纤放在耦合光学系统的焦面上, 采用 CCD 作为位置传感器, 探测湍流的波前倾斜量。用一快速倾斜镜进行波前倾斜校正, 使耦合进单模光纤中的光功率最大, 这种结构可同时克服接收孔径对准误差的影响。图中  $f_b$  为耦合光学系统的等效焦距,  $f_c$  为 CCD 成像系统的等效焦距,  $P_a$  为接收孔径所接收到的光功率,  $P_b$  为耦合进单模光纤中的光功率,  $P_c$  为 CCD 探测器所接收的光功率。

设平均入射光强为  $I_0$ , 在存在大气湍流时, 接收孔径平面上点  $(x_a, y_a)$  处的入射光场复振幅可表示为

$$E_a(x_a, y_a) = \sqrt{I_0} \exp[\chi(x_a, y_a) + i\phi(x_a, y_a)] \quad (1)$$

式中  $\chi$ ,  $\phi$  分别表示光波波前的对数振幅起伏及相位起伏。相位起伏  $\phi$  的结构函数为<sup>[7]</sup>

$$D_\phi(s) = [\phi(s_1) - \phi(s_2)]^2 = 6.88(s/r_0)^{5/3} \quad (2)$$

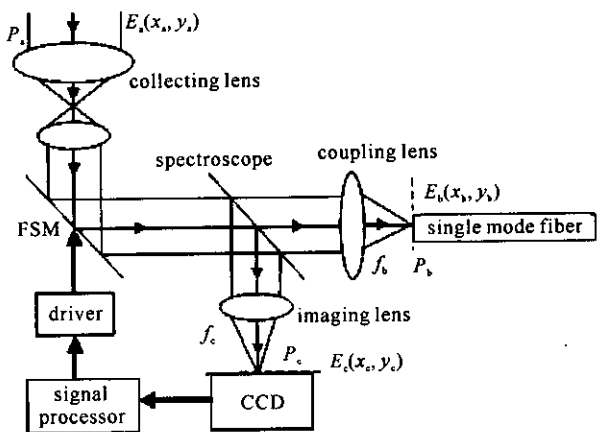


Fig. 1 Scheme of optical coupling system

图 1 耦合光学系统示意图

\* 收稿日期 2005-10-28; 修订日期 2006-06-20

作者简介: 向劲松(1975—), 男, 电子科技大学物理电子学院博士研究生, 主要从事空间光通信的研究; xiangjs@sohu.com。

式中  $s$  为接收孔径平面上两点  $s_1$  与  $s_2$  之间的距离  $r_0$  为 Fried 参数。对于在路径均匀湍流中传播的球面波，Fried 参数为<sup>[8]</sup>

$$r_0 = [0.423k^2 C_n^2 \int_0^L (\eta/L)^{5/3} d\eta]^{-3/5} \tag{3}$$

式中  $C_n^2$  为折射率结构常数  $k=2\pi/\lambda$   $\lambda$  为激光波长 这里取  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  ;  $L$  为激光传播距离。具有结构函数为式(2)形式的湍流波前相位可通过 Zernike 多项式模拟<sup>[7]</sup>。

根据 Rytov 理论,弱湍流下对数振幅起伏  $\chi$  服从高斯分布,在路径均匀湍流中传播的球面波的对数振幅方差  $\sigma_x^2=0.124C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ ,协方差为<sup>[9]</sup>

$$B_x(s) = [\chi(s_1) - \bar{\chi}] [\chi(s_2) - \bar{\chi}] = 4\pi^2 k^2 \int_0^\infty K \phi_n(K) dK \int_0^L J_0(sK\eta/L) \sin^2[K^2 \eta(L-\eta)/(2kL)] d\eta \tag{4}$$

式中  $\phi_n(K)=0.033C_n^2 K^{-11/3}$ ,为湍流功率谱  $K$  为空间波数  $\bar{\chi}$  为对数振幅起伏  $\chi$  的平均值,与对数振幅方差  $\sigma_x^2$  的关系为  $\bar{\chi} = -\sigma_x^2$ 。  $(\chi(s) - \bar{\chi})$  为零均值、协方差函数为  $B_x(s)$  的高斯随机变量,产生方法见参考文献 [7]。

### 2 耦合光功率

设耦合光学系统的焦距为  $f$  根据衍射理论,单模光纤端面平面上点  $(x_b, y_b)$  的光场振幅为

$$E_b(x_b, y_b, \varepsilon_x, \varepsilon_y) = \frac{1}{i\lambda f} \exp(ikf) \exp[ik(x_b^2 + y_b^2)/2f] \iint E_a(x_a, y_a) \exp[ik(\varepsilon_x x_a + \varepsilon_y y_a)] \exp[-ik(x_a x_b + y_a y_b)/f] dx_a dy_a \tag{5}$$

其中  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  为  $x$  及  $y$  方向上 FSM 倾斜校正的角度 这里忽略了 CCD 支路上的分光损耗。单模光纤的模场分布为

$$E_{f,b}(x_b, y_b) = \sqrt{2/(\pi w_b^2)} \exp[-(x_b^2 + y_b^2)/w_b^2] \tag{6}$$

其中  $w_b$  为单模光纤模场半径,则耦合进单模光纤中的光功率为<sup>[4]</sup>

$$P_b = | \iint E_b^*(x_b, y_b, \varepsilon_x, \varepsilon_y) E_{f,b}(x_b, y_b) dx_b dy_b |^2 \tag{7}$$

直径为  $D$  的接收孔径所接收的光功率为

$$P_a = \iint I_0 \exp[2\chi(x_a, y_a)] dx_a dy_a \tag{8}$$

$P_a$  的平均值  $P_a = \pi(D/2)^2 I_0$ ,令  $\beta = \pi D w_b / (2\lambda f)$ ,在无湍流的理想情况下,当  $\beta=1.12$  时  $P_b/P_a = 81.45\%$ ,这是平面波到单模光纤所能达到的最大耦合效率<sup>[3]</sup>。湍流存在时,耦合效率会降低。

### 3 跟踪算法

需倾斜校正的角度  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  通过 CCD 测量,CCD 上的光场振幅分布为

$$E_c(x_c, y_c) = \frac{\sqrt{F}}{i\lambda f_c} \exp(ikf_c) \exp[ik(x_c^2 + y_c^2)/2f_c] \iint E_a(x_a, y_a) \exp[-ik(x_a x_c + y_a y_c)/f_c] dx_a dy_a \tag{9}$$

式中  $F$  表示 CCD 成像支路上的分光比。CCD 上相应的光强分布为  $I_c(x_c, y_c) = |E_c(x_c, y_c)|^2$ ,其在第  $(m, n)$  个像元上产生的信号电子数为  $\chi(m, n)$ ,由于噪声的影响  $\chi(m, n)$  是随机起伏的,设由噪声引起的  $\chi(m, n)$  的起伏标准差为  $\sigma_{ic}$ ,并假设每个像元的  $\sigma_{ic}$  相等。 $\sigma_{ic}$  中不包括湍流引起的起伏,因为湍流引起的起伏频率相对较低,其影响可以消除。

#### 3.1 质心跟踪算法

在基于 CCD 的跟踪系统中,多采用质心算法,质心位置  $(c_x, c_y)$  为

$$c_x = \frac{\sum_m \sum_n m \delta \chi(m, n)}{\sum_m \sum_n \chi(m, n)} \tag{10}$$

$$c_y = \frac{\sum_m \sum_n n \delta \chi(m, n)}{\sum_m \sum_n \chi(m, n)}$$

式中  $\delta$  为像元间距。FSM 倾斜校正的角度为  $\varepsilon_x = c_x/f_c, \varepsilon_y = c_y/f_c$ 。

#### 3.2 高斯模板匹配算法

在  $D/r_0$  较大时,焦平面上的光斑会破碎成多个小光斑,这时质心跟踪算法的性能比较差。如图 2 所示,如

FSM 的校正角度根据质心位置确定,耦合进光纤中的光功率可能会很小,而此时如 FSM 处于最优倾斜位置,耦合光功率可能还比较大,最优  $(\varepsilon_x, \varepsilon_y)$  是使式(7)中的耦合光功率  $P_b$  最大的位置。由于式(7)是单模光纤模场与光场振幅的重叠积分,而 CCD 是强度探测器,实际最优位置难以获得。这里提出一种高斯模板匹配算法,可以接近最优性能,这种高斯模板为单模光纤的高斯型光强分布在 CCD 平面上所对应的光强分布形状,模板的  $1/e^2$  点半宽为  $f_c w_b / f_b$ ,其数学表达式为

$$TP(\varepsilon_x, \varepsilon_y, x_c, y_c) = \exp\left\{-2\left(\frac{f_b}{w_b}\right)^2\left[(x_c/f_c - \varepsilon_x)^2 + (y_c/f_c - \varepsilon_y)^2\right]\right\} \quad (11)$$

搜索使  $\sum_m \sum_n (m, n) TP(\varepsilon_x, \varepsilon_y, m\delta, n\delta)$  最大的  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  值,作为 FSM 的倾斜校正角度。

### 4 仿真结果

取  $C_n^2 = 2.2 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ , 水平横向连接距离  $L = 500 \text{ m}$ , 经计算得到对数振幅方差  $\sigma_x^2 = 0.125$ , Fried 参数  $r_0 = 3.35 \text{ cm}$ , 另外,耦合系统参数  $\beta = 1.12$ 。高斯模板的大小为  $9 \times 9$  像元,在无湍流时,CCD 上的光斑大小应与模板大小相当。图 3(a)~(c)所示为接收孔径直径  $D$  分别为  $r_0, 2r_0, 4r_0$ ,不考虑电路噪声的影响时,采用质心算法及高斯模板匹配算法的耦合光功率与接收孔径所接收的平均光功率之比  $P_b/P_a$  的衰落特性。图中同时给出了采用倾斜校正耦合所能得到的最好性能,该最好性能是直接根据式(7)搜索偏转角度使耦合功率最大得到的。从图中可以看出,在  $D/r_0 = 1$  时,质心算法和高斯模板匹配法基本都可实现最优倾斜校正。随着  $D/r_0$  的增大,质心算法的性能变差,不能实现最优倾斜校正,引起严重的衰落。这主要是由光斑破碎,质心算法不能获得正确的校正位置引起的。而此时如采用高斯模板匹配算法仍可跟踪到与模板最匹配的一个光斑,实现最优倾斜校正,明显降低了耦合光功率的衰落。

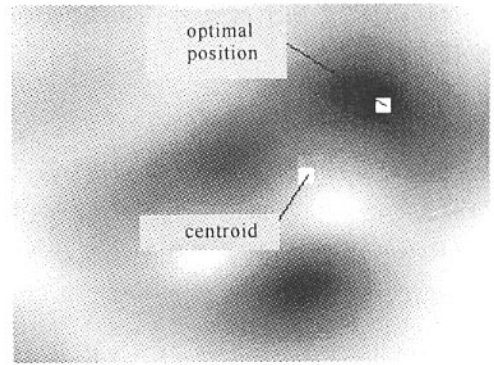


Fig. 2 Broken spot on CCD  
图 2 CCD 上破碎光斑示意图

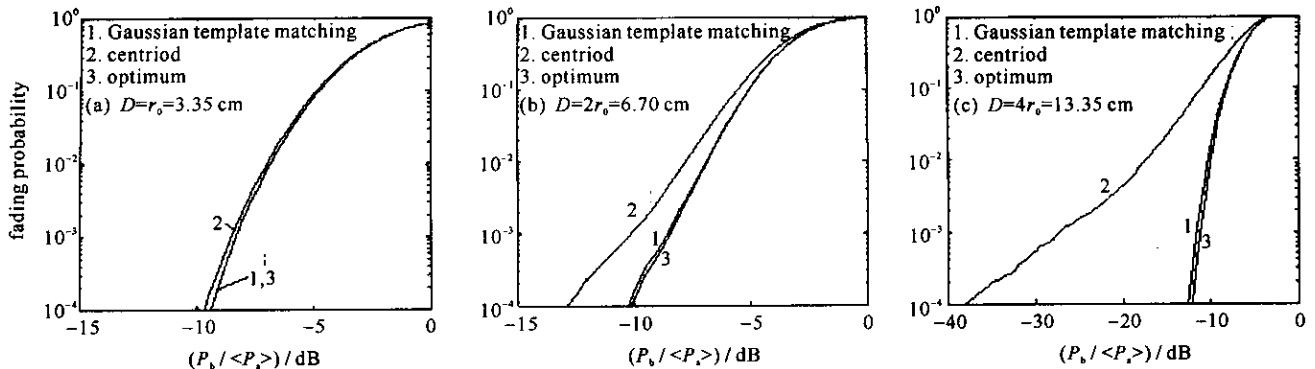


Fig. 3 Fading probability of coupling efficiency  
图 3 耦合效率的衰落概率

图 4 为孔径平均效应后接收孔径平面上所接收的光功率  $P_a$  的衰落情况,条件同图 3。由于大的接收孔径具有更强的孔径平均效应,衰落较小。比较图 3 与图 4 可以看出由于空间光耦合引起的功率损失情况。

图 5 为采用不同大小的接收孔径时耦合光功率  $P_b$  的衰落情况,条件同图 3,耦合功率归一化为  $D = r_0$  的接收孔径所接收的平均光功率。从图中可以看出,对于某一要求的衰落概率,如采用质心算法,并不是接收孔径越大越好,而存在一个最佳值。当天线直径太大时,这时虽然由于孔径平均效应,  $P_a$  的起伏较小,但由于  $D/r_0$  增大,相位起伏会引起很深的衰落,反而需要更高的发射功率以克服衰落,因此选择合适的天线直径是很重要的。在要求衰落概率小于  $10^{-4}$  时,  $D = 2r_0$  天线性能优于  $D = r_0$  天线,但  $D = 3r_0$  天线性能就会比  $D = 2r_0$  天线差。由于  $C_n^2$  是非常不确定的,受气象条件的影响,其变化范围非常大,因此  $r_0$  也会经常变化,这就使孔径直径  $D$  的选择更加困难。如采用高斯模板匹配算法,在很大的  $D/r_0$  范围内,都可避免大直径天线性能低于小直径天线的不利情况。

对于高码率的光通信系统,接收端的光功率基本不会低于  $10^{-5} \text{ mW}$ 。如 CCD 探测器上分光 10%,则 CCD

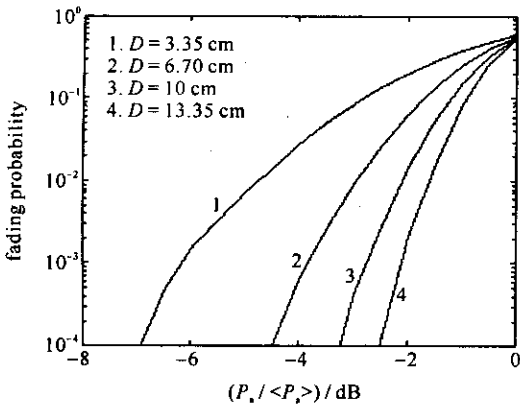


Fig. 4 Fading probability of aperture received power

图 4 接收孔径平面上的功率衰落概率

接收的光功率为  $10^{-6}$  mW, 取 CCD 帧频为 10 kHz, 量子效率为 50%, 则一帧内的信号光产生的电子约为  $4 \times 10^5$  个。图 6 为在信号电子数为  $4 \times 10^5$ ,  $D/r_0 = 3$  时, 电路噪声及光斑大小对最优倾斜校正性能的影响。光斑大小为  $9 \times 9$  及  $4.5 \times 4.5$  像元, 每个像元信号的噪声标准差  $\sigma_{ic}$  分别取 4 000, 400 及 0 个电子。噪声可包括电路噪声、背景噪声等, 折换为相应的电子数。噪声越大, 跟踪性能越差, 在  $10^{-4}$  衰落概率处, 如  $\sigma_{ic} = 4 000$ , 光斑大小为  $9 \times 9$  像元, 性能劣化 2.5 dB, 如  $\sigma_{ic} = 400$ , 性能劣化 0.5 dB。如采用较小的  $4.5 \times 4.5$  像元光斑, 在  $\sigma_{ic} = 4 000$  时, 由于较小的光斑提高了光斑图像的信噪比, 跟踪性能增强, 并且光斑像元数的减小也降低了运算量, 但像元数的减小同时也使 CCD 的位置分辨率降低。

### 5 结论

湍流波前的振幅起伏及相位起伏都会引起空间光到单模光纤耦合功率的衰落。增加接收孔径直径虽然可以抑制振幅起伏引起的衰落, 但在  $D/r_0$  较大时, 由于波前相位畸变严重, 焦平面上光斑破碎, 它将成为耦合功率衰落的一个更重要的因素。对于采用 CCD 探测器作跟踪传感器的波前倾斜校正耦合系统, 在  $D/r_0$  较大时, 质心跟踪算法不能准确地跟踪最优倾斜校正位置, 耦合功率衰落严重。在一定的衰落概率要求下, 出现大直径的接收孔径性能不及小直径接收孔径的情况, 采用高斯模板匹配算法可以在  $D/r_0$  较大时, 实现最优倾斜校正, 降低了耦合功率的衰落深度, 增加了接收孔径的选择灵活性。高斯模板算法实际上是一种相关算法, 与质心算法相比, 运算量更大, 但由于相关运算本身具有极强的抗噪能力, 降低了对数据预处理的要求。

### 参考文献：

[ 1 ] Jeong M C, Lee J S, Kim S Y, et al.  $8 \times 10 - \text{Gb/s}$  terrestrial optical free-space transmission over 3.4 km using an optical repeater[ J ]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, **15**( 1 ) : 171-173.

[ 2 ] Panak D L, Doucet M A. Fiber coupled transceivers in point-to-point and point-to-multipoint optical wireless systems[ C ]//Proc of SPIE. 2001, **4530** 7-17.

[ 3 ] Ruilier C. A study of degraded light coupling into single-mode fibers[ C ]//Proc of SPIE. 1998, **3350** 319-329.

[ 4 ] Winzer P J, Leeb W R. Fiber coupling efficiency for random light and its applications to lida[ J ]. *Opt Lett*, 1998, **23**( 13 ) : 986-988.

[ 5 ] 向劲松, 陈彦, 胡渝. 大气湍流对空间光耦合至单模光纤的影响[ J ]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**( 3 ) : 377-380. ( Xiang J S, Chen Y, Hu Y. Influence of atmospheric turbulence on coupling space light into single mode fiber. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**( 3 ) : 377-380 )

[ 6 ] Thibault S, Lacoursière J. Advanced fiber coupling technologies for space and astronomical applications[ C ]//Proc of SPIE. 2004, **5578** #0-51.

[ 7 ] Roddier N. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials[ J ]. *Opt Eng*, 1990, **29**( 10 ) : 1174-1180.

[ 8 ] 翁宁泉, 吴毅, 汪建业, 等. 利用湍流廓线获得斜程大气相干长度的实验研究[ J ]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**( 3 ) : 273-276. ( Weng N Q, Wu Y, Wang J Y, et al. Experimental study of obtaining atmospheric coherent length from turbulence profile. *High Power Laser and Particle Beams*,

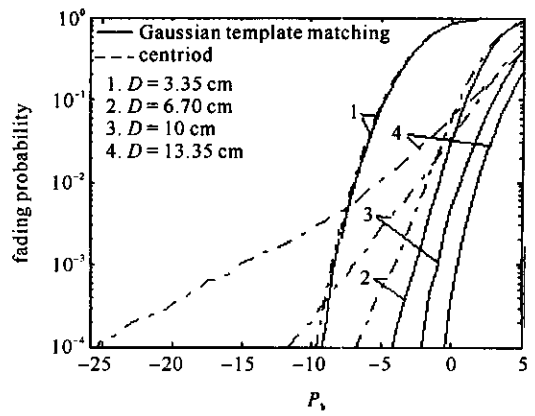


Fig. 5 Fading probability of coupled power

图 5 耦合光功率的衰落概率

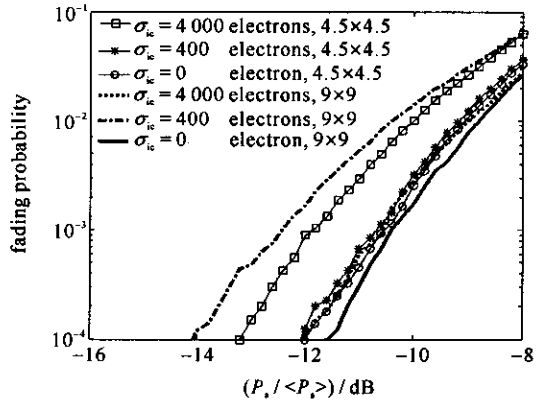


Fig. 6 Influence of detector noise

图 6 探测器噪声的影响 ( $D/r_0 = 3$ )

2004 , 16( 3 ) 273-276 )

- [ 9 ] Lawrence R S , Strohbehn J W. A survey of clear-air propagation effects relevant to optical communications[ J ]. *Proc of IEEE* , 1970 , 58( 10 ) :1523-1545.

## Tracking algorithms for coupling space light distorted by turbulence into single mode fiber

XIANG Jing-song , YAO Zhou-shi , HU Yu

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

**Abstract :** By simulating amplitude and phase fluctuations induced by atmospheric turbulence , signal fading for coupling space light into single mode fiber is studied in wavefront tip-tilt corrected system. Tracking algorithm of CCD image is studied. Simulation results show that when the ratio of the receiving aperture to the Fried 's parameter is large , the performance of tip-tilt corrected system using centroid tracking algorithm is very poor and the signal fading depth is very large. A gaussian template matching tracking algorithm is proposed and by using this algorithm , the signal fading depth can be reduced greatly when the ratio of the receiving aperture to the Fried 's parameter is large , and that the disadvantage of the performance of large aperture may be inferior to that of small aperture can also be avoided which may occur using centroid tracking algorithm.

**Key words :** Wireless optical communication ; Atmospheric turbulence ; Optical coupling ; Signal fading ; CCD detector ; Tracking algorithms