

文章编号:1004-4213(2011)07-0972-6

# 大气激光通信中稳定跟踪技术研究

刘云清<sup>1</sup>,姜会林<sup>1</sup>,佟首峰<sup>1</sup>

(长春理工大学,长春 130022)

**摘 要:**为了研究大气激光通信中稳定跟踪所采用的器件及有效跟踪方法,分析了光束定位探测器件(电荷耦合器件和四象限光电探测器)的灵敏度特性,结合影响大气激光通信跟踪系统性能的五种大气湍流效应,分别讨论了光束漂移、光强起伏、光斑弥散、到达角起伏及光束扩展的原理.对质心跟踪算法和形心跟踪算法定位准确度的影响进行分析,得到在大气条件下形心算法的跟踪误差小于质心误差的结论,并通过实验进行了验证.

**关键词:**大气激光通信;捕获对准跟踪;大气湍流;质心算法;形心算法

**中图分类号:**TP273

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20114007.0972

## 0 引言

在大气激光通信中,由于通信光功率与速率的限制,光端机视轴高精度对准跟踪是实现通信的前提.空间激光通信中捕获对准跟踪(Acquiring、Pointing and Tracking,APT)系统对光束的定位跟踪常采用四象限光电探测器(Four-quadrant Detector, QD)和面阵电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD).它们的共同特点是都能对信标光探测,通过测量他们的输出电压来判断光斑的中心.两种探测器的探测机理不同,大气对他们的成像影响因素也不同,所采用的跟踪处理方法不同,造成在不同情况下跟踪效果的很大差异<sup>[1]</sup>.目前,在空间激光通信跟踪领域,针对跟踪方法和跟踪器件的研究有很多.文献[2]对影响跟踪准确度的平台振动、大气湍流和背景光综合在一起进行了分析,文献[3]把 CCD 和质心算法结合起来,证明了质心算法的可行性,文献[4]从器件角度论证了影响 QD 探测器跟踪准确度的原因和算法效果.

与国内外研究内容相比,本文主要把大气湍流、跟踪探测器件和跟踪算法结合起来,明确得到了一个工程上可靠的跟踪方法,提供了一个在大气激光精密跟踪中去研究质心算法和形心算法优劣的参考.

## 1 器件对跟踪的影响分析

器件对自身噪音、非线性、灵敏度、背景光干扰、

检测电路噪音等因素会引起光电信号信噪比下降,造成检测误差增大,影响跟踪准确度.

对于双向光束跟踪系统,设激光器所发射的信标光输出功率为  $P_T$ ,最终到达接收器件上功率为  $P_R$ ,发射光学系统的透过率为  $\tau_{OT}$ ,接收光学系统的透过率为  $\tau_{OR}$ ,大气透过率为  $T_0$ ,空间通信的距离为  $L$ ,信标光的发射视场角为  $\theta_{BT}$ , $d$  为接收光学系统孔径,有

$$P_R = P_T \times \tau_{OT} \times \tau_{OR} \times T_0 \times \left(\frac{d}{L\theta_{BT}}\right)^2 \quad (1)$$

由噪音引起的跟踪方差与信噪比的关系为

$$\sigma = \frac{\lambda/d}{\sqrt{S/N}} \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为信标光的波长, $\sigma$  为根据系统跟踪准确度要求噪音引起的跟踪方差, $S/N$  为信噪比.

### 1.1 CCD 跟踪误差分析

#### 1.1.1 CCD 固有噪音分析

CCD 探测器主要的噪音源是光子散弹噪音、暗电流散弹噪音、复位噪音.这些噪音源的量值可以通过 CCD 的噪音等效曝光量来体现.设选择的 CCD 噪音等效曝光量为 NEE.每帧积分时间为  $T_i$ ,CCD 的像元面积为  $s$ .得到单个像元的噪音等效功率为

$$P_N = NEE \cdot s \quad (3)$$

若 CCD 的量子效率为  $\eta$ ,对应的等效光子数为

$$N_N = P_N / E_0 \eta \quad (4)$$

#### 1.1.2 背景光干扰对 CCD 影响分析

背景光干扰主要包括点目标干扰源(如天狼星)

基金项目:国家高技术研究发展计划(No.2008AA7010107)资助

第一作者:刘云清(1970-),男,教授,博士,主要研究方向为自动控制与测试技术. Email:mzliuyunqing@163.com

收稿日期:2010-11-15;修回日期:2011-03-01

和面目标干扰源(如太阳和各种因素引起的天空背景光).这里仅讨论天空背景光对于信噪比的影响.当跟踪信标光波长为  $\lambda=0.8\ \mu\text{m}$ ,得到在此波长功率谱密度为

$$\phi=0.3\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}\cdot\text{sr}\quad (5)$$

当跟踪系统光学接收面积  $S$ 、每个 CCD 象单元所接收的视场角  $\theta$ 、对应立体角  $\Omega$  确定,得到到达 CCD 背景光的单个像素单元的等效噪声功率为

$$P_B=\phi\cdot S\cdot\Delta\lambda\cdot\Omega\cdot\tau_{\text{OR}}\quad (6)$$

积分时间内背景噪声到达 CCD 一个像元的能量为

$$E_B=T_1\times P_B\quad (7)$$

背景噪声等效电子数为

$$N_B=P_B/E_0\eta\quad (8)$$

若已知 CCD 动态范围  $D_r$ ,则饱和信号等效电子数为

$$N_{\text{SS}}=D_r\times N_N\quad (9)$$

CCD 的信噪比表达式为

$$S/N=\frac{N_s}{\sqrt{N_s+N_B+N_N}}\quad (10)$$

式中  $N_s$  为信号等效电子数,将前面的对应参量带入得到  $N_s$ ,对应的平均功率为

$$P_R=(N_s/T_1)\times E_0\quad (11)$$

选取参量  $\tau_{\text{OT}}=0.5$ ,  $\theta_{\text{BT}}=3\ \text{mrad}$ ,  $\lambda=0.8\ \mu\text{m}$ ,  $\theta=4\ \mu\text{rad}$ ,  $d=0.25\ \text{m}$ ,  $\text{NEE}=14\ \text{pJ}/\text{cm}^2$ , CCD 像元面积  $S=16\ \mu\text{m}\times 16\ \mu\text{m}=2.56\times 10^{-6}\ \text{cm}^2$ ,  $D_r=2\ 500$ ,  $T_0=0.2$ ,  $\tau_{\text{OR}}=0.5$ ,  $\eta=0.2$ ,  $L=2\times 10^4\ \text{m}$ ,  $T_1=0.5\ \text{ms}$ ,则发射功率  $P_T=1\ \text{W}$ ,  $S/N=41$ ,噪声引起的跟踪方差为  $\sigma=0.5\ \mu\text{rad}$ .

## 1.2 QAPD 跟踪误差分析

### 1.2.1 QAPD 固有噪声分析

将 QD 上各项噪声看成独立的随机噪声并服从统计规律,则输出的总均方噪声  $N$  为

$$N=\left[4\Delta f\frac{KT}{R_L}+\Delta fe(i_B+i_D)+\frac{\pi\lambda^2 r_T^4}{4R^2 S}+4.192(S)^{1/6}\cdot r_T C_n^2 K^{-2} i_1^2 +\Delta fe i_{\text{BS}}^2 +\frac{\pi\lambda^2}{16S\phi} i_{\text{BS}}^2\right]^{1/2}\quad (12)$$

式中第一项为热噪声,第二项为背景噪声,第三项光斑噪声,第四项大气湍流噪声,第五项为大气后向散射噪声,第六项为大气散射引起的光斑噪声.  $K$  为玻尔兹曼常量,  $T$  为工作环境的绝对温度,  $R_L$  为负载电阻,  $e$  为单位电荷,  $R$  为探测器直径,  $S$  为光学系统接收面积,  $\phi$  为  $0.8\ \mu\text{m}$  附近的天空背景光功率谱密度,  $\Delta\lambda$  为滤波器带宽,  $\Delta f$  为信号带宽,  $r_c$  为通信距离,  $I_D$  为探测器暗电流,  $\sigma$  为大气能见度  $23\ \text{km}$  时大气衰减系数,  $\alpha$  为大气能见度  $23\ \text{km}$  时大气散射系

数,  $c$  为光速,  $\Delta t$  为系统响应时间,  $F(\pi)$  为大气能见度  $23\ \text{km}$  时散射函数,  $R_0$  为探测器灵敏度.在大气中第五、六项引起的噪声忽略不计,主要计算前四项噪声.

当取  $K=1.38\times 10^{-23}\ \text{J}/\text{K}$ ,  $T=273\ \text{K}$ ,  $R_L=1\ 000\ \Omega$ ,  $e=1.6\times 10^{-19}\ \text{C}$ ,  $R=4\ \text{mm}$ ,  $S=0.05\ \text{m}^2$ , 天空背景光功率谱密度  $\phi=0.3\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}\cdot\text{sr}$ ,  $\Delta\lambda=3\ \text{nm}$ ,  $\Delta f=2\times 10^7\ \text{Hz}$ ,  $r_c=4.5\times 10^7\ \text{m}$ ,  $I_D=0.1\ \text{nA}$ ,  $\sigma=0.08$ ,  $M=1$ ,  $R_0=0.65\ \text{A}/\text{W}$ ,  $\alpha=0.07$ ,  $\Delta t=4\times 10^{-6}\ \text{s}$ ,  $F(\pi)=0.0152$ ,得到

$$i_n=1.73\times 10^{-8}\ \text{A}, i_{\text{Bn}}=7.5\times 10^{-15}\ \text{A}$$

$$i_{\text{Dn}}=1.8\times 10^{-11}\ \text{A}$$

$$i_1=P_R\times R_0=P_T\times\tau_{\text{OT}}\times\tau_{\text{OR}}\times T_0\times\left(\frac{d}{L\theta_{\text{BT}}}\right)^2\times$$

$$R_0=2\times 10^{-11}\ P_T\times R_0$$

如要求位置检测误差应小于  $0.5\ \mu\text{rad}$ ,信号电流有

$$0.5\times 10^{-6}\leq\frac{\pi r}{2fS/N}=\frac{\pi r}{2fi_1/i_s}$$

得到  $P_T\geq 3.3\ \text{W}$ .

### 1.2.2 QAPD 探测非线性误差分析

令提取到的光电流信号与 QD 四个象限在坐标轴上的分布对应,分别为  $I_a, I_b, I_c, I_d$ .设光斑在 QD 四个光敏面上的面积分别为  $S_a, S_b, S_c, S_d$ ,光功率分别为  $E_a, E_b, E_c, E_d$ .设光斑中心位置坐标为  $(x_0, y_0)$ ,光斑半径为  $r$ ,  $d_x, d_y$  分别为  $X, Y$  轴上提取的位置误差信号,则有

$$d_x=\frac{(I_a+I_d)-(I_b+I_c)}{I_a+I_b+I_c+I_d}=\frac{(E_a+E_d)-(E_b+E_c)}{E_a+E_b+E_c+E_d}\quad (13)$$

光斑面积可利用几何知识求出

$$S_a=x_0 y_0 +\frac{y_0}{2}\sqrt{r^2-y_0^2} +\frac{x_0}{2}\sqrt{r^2-x_0^2} +\frac{r^2}{2}\left(\frac{\pi}{2}+\arcsin\frac{y_0}{r}+\arcsin\frac{x_0}{r}\right)\quad (14)$$

可以得到

$$d_x=\frac{(S_a+S_d)-(S_b+S_c)}{S_a+S_b+S_c+S_d}=\frac{1}{\pi r^2}\left(2r^2\arcsin\frac{x_0}{r}+2x_0\sqrt{r^2-x_0^2}\right)\quad (15)$$

可以看出,由于光斑大小、光斑实际位置的影响,由偏移量解算公式计算所得的光斑位置与光斑实际位置并不呈线性关系.仅当光斑离开坐标原点很小时,即  $|x_0|, |y_0|$  均远小于光斑半径  $r$  时,才有

$$d_x=\frac{1}{\pi r^2}\left(2r^2\frac{x_0}{r}+2rx_0\right)=\frac{2x_0}{\pi r}\quad (16)$$

因此 QD 探测带来非线性误差,在高准确度跟

踪中必须考虑.

## 2 湍流对激光在大气中传输的影响

湍流对激光在大气中的传输影响通常表现为光束漂移、光强起伏、弥散斑增加、到达角起伏、光束扩展等现象.

### 2.1 大气湍流引起的光束漂移

由于光束漂移影响,到达接收端的光束波前相位发生畸变,低频变化使光斑中心产生光漂移现象,高频变化产生光斑扩散现象,对于较强湍流条件,甚至产生光斑破碎和光斑空洞现象,将额外引入较大检测误差,进而降低跟踪准确度.大气散斑引起的视轴抖动方差与链路距离、接收口径、大气折射率结构常量对应关系满足

$$\sigma_{\beta}^2 = \frac{1.093 \cdot L \cdot C_n^2}{D^{1/3}} \quad (17)$$

式中, $L$  通信距离, $D$  接收光学口径, $\sigma_{\beta}$  为视轴抖动方差, $C_n^2$  为大气折射率结构常量.

当  $D=0.25$  m,对于弱湍流( $C_n^2=10^{-17}$ ,对应海拔 5 km 高空)天气,20 km 链路通信,大气引起的视轴抖动方差小于  $1 \mu\text{rad}$ ,对于强湍流( $C_n^2=10^{-14}$ ,接近地面演示链路)天气,大气引起的视轴抖动方差已经达到  $10 \mu\text{rad}$ ,对跟踪准确度产生较强的影响.

### 2.2 大气湍流引起的光强起伏效应

大气湍流导致传输的激光光束光强起伏,使入射到探测器上的光强变化,造成信噪比变化,影响跟踪准确度.使用修正 Rytov 近似方法,对于高斯光束传播<sup>[5]</sup>,有

$$\sigma_i^2(l_0, L_0, C_n^2, D) = \exp [\sigma_{\text{inr}}^2(l_0, C_n^2, D) - \sigma_{\text{inr}}^2(l_0, L_0, C_n^2, D) + \sigma_{\text{iny}}^2(l_0, C_n^2, D)] - 1 \quad (18)$$

式中  $l_0$  为湍流内尺度, $L_0$  为湍流外尺度, $C_n^2$  为大气折射率结构常量, $D$  为接收器孔径直径, $\sigma_{\text{inr}}^2$  和  $\sigma_{\text{iny}}^2$  分别为大尺度起伏方差和小尺度起伏方差.由式(18)可知,光强起伏方差  $\sigma_i^2$  依赖于湍流内尺度、湍流外尺度、大气折射率结构常量和接收器孔径直径四个参量.

图 1 给出了不同接收孔径尺寸条件下的光强起伏数据分析结果,大接收孔径的直径  $D=200$  mm,小接收孔径的直径  $D=43$  mm,传输距离约为 12.6 km.由图 1 可知,对于 43 mm 的接收孔径来说,光强分布接近于负指数分布,在探测光强信号的采样中存在大量接近于 0 的数据点,这表明大气湍流造成激光信号产生深度衰落;相比较而言,200 mm 接收孔径输出的光强起伏分布呈现出明显的对数正态分布特征,正规化光强起伏方差  $\sigma_{\text{inr}}^2$  也减小为 0.23.这表

明接收孔径面积的增加可以明显减小激光信号的衰落深度.所以,大孔径接收是一种有效的大气湍流影响抑制技术.

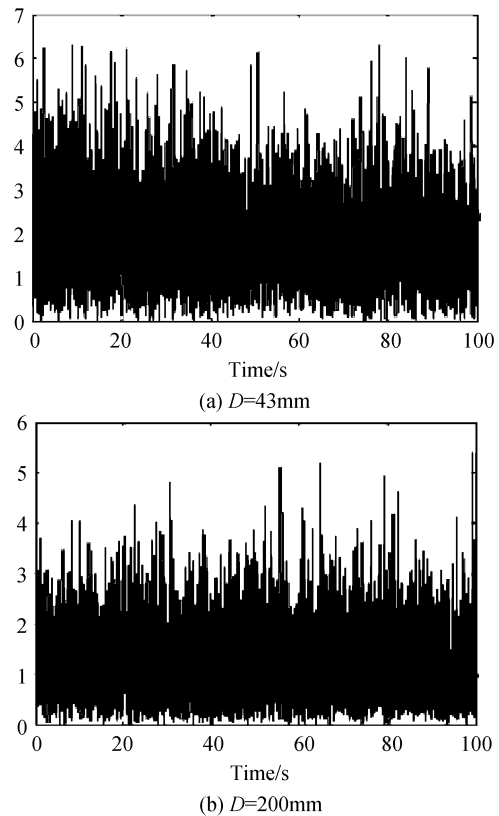


图 1 不同孔径的光强方差统计

Fig. 1 Irradiance fluctuation variance of different aperture diameter

大气湍流引起的相位起伏会降低光学系统对通信光的聚焦性能,使得接收机焦平面上的光斑面积增加.对平面波采用 Von Karman 折射率起伏谱,可得均匀传播路径下的相位起伏方差<sup>[6]</sup>

$$\sigma_s^2 = 0.782 L k^2 C_n^2 L_0^{5/3} \quad (19)$$

式中  $L$  为传输距离, $k=2\pi/\lambda$  为光波波数, $C_n^2$  为大气折射率结构常量, $L_0$  为湍流外尺度.假设  $L=1$  km, $C_n^2=3 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ , $L_0=1$  m, $\lambda=810$  nm,则  $\sigma_s=38$ ,大约相当于 6 个周期.

相对于衍射极限光斑,相位起伏将导致焦平面上的光斑面积增大  $(D/r_0)^2$  倍.图 2 为在接收孔径的直径  $D=200$  mm,传输距离约为 12.6 km 条件下焦平面光斑弥散情况.通过对光斑图像进行阈值化,求取灰度值大于阈值的像元个数  $N$ ,用  $N$  来近似地表征光斑面积大小, $N$  越大表明焦平面上的光斑尺寸越大.正规化的光斑尺寸起伏方差为 0.13.可以看出,光斑面积随时间上下起伏,其统计分布近似服从正态分布.

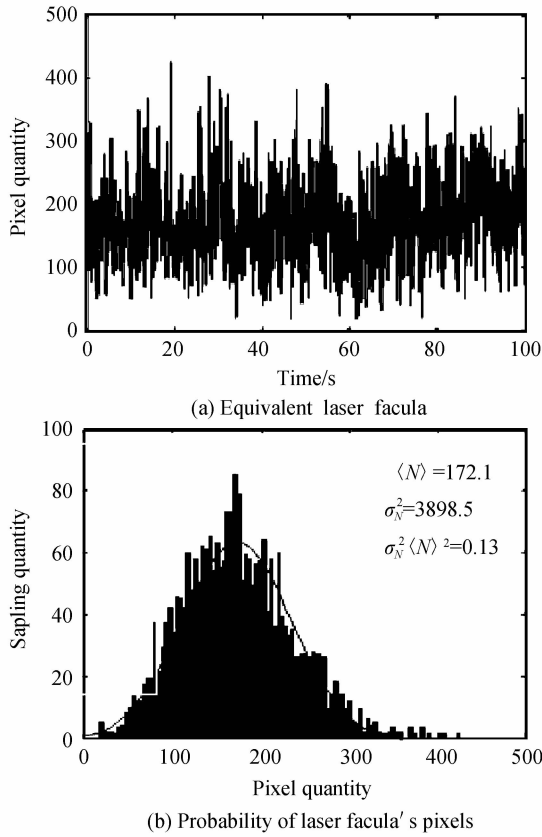


图2 光斑弥散测量数据统计

Fig. 2 Measurement statistics for dispersive spot imaging

### 2.3 到达角起伏引起光斑抖动

相位起伏中和接收口径尺寸相当的倾斜分量将使光波的总体入射方向发生变化,表现为到达角起伏.到达角起伏会导致光学接收机焦平面上的聚焦光斑产生抖动,这可等效为收、发光端机视轴之间产生的随机对准误差,会影响跟踪准确度.到达角定义为

$$\beta = \Delta l / D \quad (20)$$

式中  $\Delta l$  为光程差,  $D$  为接收口径直径<sup>[6]</sup>. 光波经过大气湍流传输距离  $L$  后,有限孔径接收条件下的到达角起伏可写为<sup>[7]</sup>

$$\sigma_\beta^2 = \pi^2 L \int_0^\infty d\kappa \int_0^1 \kappa^3 \Phi_n(\kappa) H(\kappa, \xi) d\xi \quad (21)$$

式中,  $\xi$  为归一化距离坐标,  $\Phi_n(\kappa)$  为大气折射率起伏功率谱,  $H(\kappa, \xi)$  为权重函数. 平面波的权重函数为

$$H_p(\kappa) = \left\{ 1 + \frac{2\pi}{(\kappa f)^2} \sin \left[ \frac{(\kappa f)^2}{2\pi} \right] \right\} A(D\kappa/2) \quad (22)$$

式中  $D$  为接收孔径,  $A(x) = [2J_1(x)/x]^2$  是由圆孔平均引入的 Airy 函数,  $J_1(x)$  是一阶贝塞尔函数.

对于平面波传播,到达角起伏方差可写为  $\sigma_\beta^2 = 2.91 C_n^2 L D^{-1/3}$ , 其中  $D \gg (L/k)^{1/2}$ ,  $C_n^2$  为大气折射率结构常量,  $L$  为激光传播距离,  $k$  为光波波长; 对于球面波传播,到达角起伏方差可写为

$\sigma_\beta^2 = 1.09 C_n^2 L D^{-1/3}$ ; 对于高斯波束传播,到达角起伏方差可近似为<sup>[8-9]</sup>

$$\sigma_\beta^2 \cong 1.093 C_n^2 L D^{-1/3} \left[ a + 0.618 \Lambda^{11/6} \left( \frac{k D^2}{L} \right)^{1/3} \right] \quad (23)$$

式中  $a = (1 - \Theta^{8/3}) / (1 - \Theta)$ . 在接收机焦平面上,聚焦光斑的脱靶量方差  $\sigma_s^2 = \sigma_\beta^2 f^2$ ,  $f$  为接收光学系统的焦距. 图3为接收孔径的直径  $D = 200$  mm, 传输距离约为 12.6 km 条件下到达起伏角的结果,其到达起伏角方差  $\sigma_\beta^2 = 7.5 \mu\text{rad}$ .

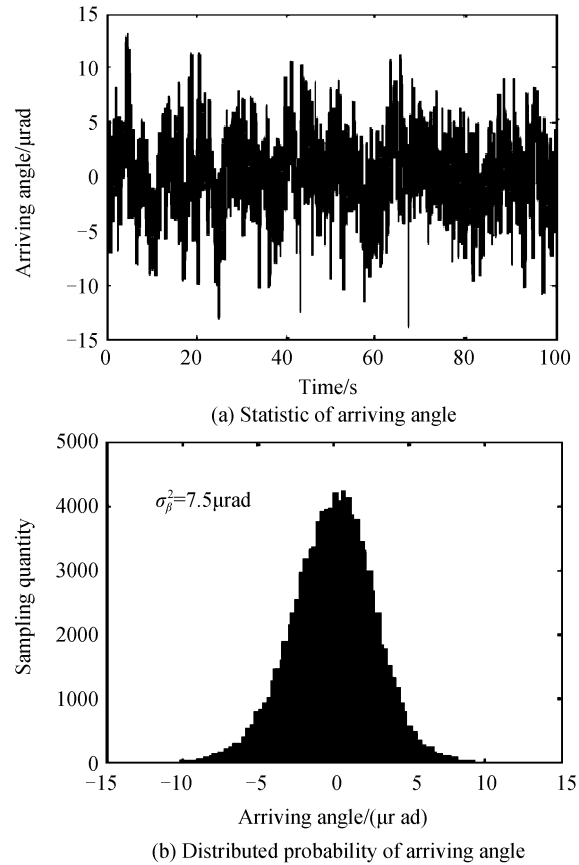


图3 到达角引起抖动测量数据统计

Fig. 3 Measurement statistics for dither of arriving angle

### 2.4 光束扩展引起光能损失

比光束直径小的涡旋会导致光束发生扩展,使得光束在大气湍流中传播比在真空中发散得更快.因此,对于相同的通信距离,为了保证探测信噪比,在大气湍流中所要求的激光发射功率比真空中大.当一束高斯光在大气湍流中传输时,光束扩展导致光束半径增加,光束的有效半径  $W_e$  可以写为<sup>[10]</sup>

$$W_e = W(1 + \zeta)^{1/2} \quad (24)$$

式中  $W$  为在真空中传输时接收面上的光束半径,  $\zeta$  定义为

$$\zeta = 4\pi^2 k^2 L \int_0^\infty \kappa \Phi_n(\kappa) \left[ 1 - \exp \left( -\frac{\Delta L \kappa^2 \xi^2}{k} \right) \right] d\kappa d\xi \quad (25)$$

在弱湍流区,接收平面上的光束半径为  $W_e \approx W(1 + 1.33 \sigma_\beta^2 \Lambda^{5/6})^{1/2}$ ; 在强湍流区,接收平面上的光

束半径为  $W_e \approx W(1 + 1.63\sigma_1^2 \Lambda^{6/5})^{1/2}$ .  $\Lambda_0 = 2L/(kW_0^2)$  为发射平面上的光束参量,  $k$  是光波波数,  $W_0$  是发射光束初始半径.

### 3 跟踪算法检测误差分析

在大气激光通信中常用质心和形心算法, CCD 可以采用形心算法和质心算法, 而 QD 只能采用质心算法, 因此研究算法对跟踪准确度的影响对选择器件有重要参考价值.

以图像中某个点作为中心点  $O$  建立  $XY$  轴平面坐标系, 质心坐标为<sup>[11-12]</sup>

$$\bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^m x_k f(x_m, y_m) - \sum_{l=1}^n x_l f(x_l, y_l)}{\sum_{i=1}^m f(x_i, y_i) + \sum_{x=1}^n f(x_x, y_x)}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^m y_k f(x_m, y_m) - \sum_{l=1}^n y_l f(x_l, y_l)}{\sum_{i=1}^m f(x_i, y_i) + \sum_{x=1}^n f(x_x, y_x)} \quad (26)$$

形心算法是二值化或阈值化的质心算法. 为了求取形心的具体位置, 首先应先设定一个背景阈值, 以把背景和目标分离开, 其表达式为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^m x_k F(x_m, y_m) - \sum_{l=1}^n x_l F(x_l, y_l)}{\sum_{i=1}^m F(x_i, y_i) + \sum_{x=1}^n F(x_x, y_x)}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^m y_k F(x_m, y_m) - \sum_{l=1}^n y_l F(x_l, y_l)}{\sum_{i=1}^m F(x_i, y_i) + \sum_{x=1}^n F(x_x, y_x)} \quad (27)$$

#### 3.1 接收光强起伏对质心形心算法的影响

从上面的分析可知, 接收光强起伏只是对光斑成像的重心影响较大, 即影响了单位像元的能量密度函数(或灰度函数)  $f_1(x, y)$  的分布, 而对图像的面积  $A$  和形状影响很小. 设由于光强起伏  $f(x, y)$  变为  $f_1(x, y)$ , 则光斑质心为

$$\bar{y}_1 = \frac{\sum_{k=1}^m y_k f_1(x_m, y_m) - \sum_{l=1}^n y_l f_1(x_l, y_l)}{\sum_{i=1}^m f_1(x_i, y_i) + \sum_{x=1}^n f_1(x_x, y_x)} \quad (28)$$

求出的质心位置与理想情况下求出的质心位置发生了变化.

而只要  $T$  选择合适, 其像元的个数不发生变化, 求出的形心位置与理想情况下求出的形心位置相同. 同理, 到达角起伏对质心算法和形心算法的影响相同.

#### 3.2 光束漂移对质心形心算法的影响

从光束漂移产生的机理看, 光束漂移使光斑图像整体发生了偏移, 而  $f(x, y)$  不变化. 因此我们可以假设发生光束漂移时, 分别向左和向上偏移了  $n_1$  和  $m_1$  个像元, 则光束漂移后形心整体分别向左和

向上偏移了  $n_1$  和  $m_1$  个像元, 质心算法与质心算法得到的结果基本相似.

#### 3.3 焦平面光斑弥散对质心形心算法的影响

焦平面光斑弥散使处于光学系统焦平面上的探测器光斑面积增加, 面积增大  $(D/r_0)^2$  倍, 这将使光斑形状发生变化. 设  $j = (D/r_0)^2$ , 则中心点  $X$  轴左边有  $j_n$  个成像单元, 每个成像单元的灰度值  $f(x_l, y_l)/j$ , 每个单元  $X, Y$  方向坐标编号分别为  $x_l, y_l$ , 中心点  $X$  轴右边设有  $j_m$  个成像单元, 每个成像单元的灰度值  $f(x, y)/j$ , 每个单元  $X, Y$  方向坐标编号分别为  $x_k, y_k$ , 其总能量不发生变化, 则弥散斑对质心位置和形心位置的影响与理想情况下求得结果基本一致.

图 4 是对某一阶段大气激光传输的图像跟踪记录曲线, 表 1 为用形心算法和质心算法求得的抖动方差, 表明在有大气影响的条件下, 形心算法求得的方差比质心算法求得的方差小.

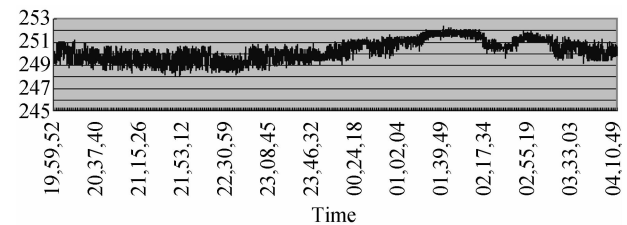


图 4 大气中激光传输变化数据

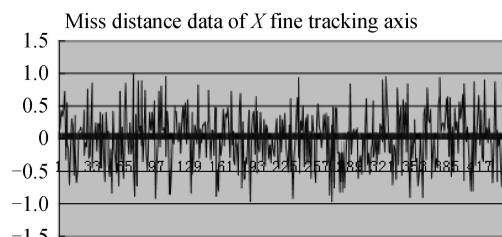
Fig. 4 Data of laser propagation in atmosphere

表 1 不同算法统计结果

Table 1 Results of centroid localization algorithm and shape center capturing algorithms

	Shape center capturing algorithms	Centroid localization algorithm
X mathematical expectation	346.394 6	347.618
X variance	1.181 77	1.812 92
Y mathematical expectation	251.758 5	249.448 8
Y variance	1.154 529	1.978 925
XY variance	1.652 101	2.683 808

在完成的“十五”、“十一五”国家“863”重点项目的空地激光通信演示验证项目中, 采用 CCD 器件和形心算法取得了野外通信距离 20 km, 跟踪准确度  $4 \sim 10 \mu\text{rad}$  ( $3\sigma$ ) 的效果, 图 5 为跟踪残差曲线.



Miss distance(CCD pixels) Sampling quantity(100Hz)

图 5 大气激光通信精跟踪残差曲线

Fig. 5 Fine tracking error of X axis in atmospheric laser communication system

## 4 结论

通过理论分析和实践验证,和前期的研究相比,明确了在大气激光通信中精密跟踪器件采用 CCD 跟踪效果优于 QD 跟踪效果和形心算法跟踪残差优于质心算法跟踪残差的结论,对大气环境中光电式精密跟踪的器件选择和方法提供了一个明确的参考.

### 参考文献

- [1] 饶瑞中. 光在湍流大气中的传播[M]. 安徽科学技术出版社, 2005.
- [2] HAN Cheng, BAI Bao-xing, YANG-Hua-min, *et al.* Primary environment influence factors to tracking precision in space-ground laser communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 89-94.  
韩成, 白宝兴, 杨华民, 等. 空地激光通信跟踪准确度主要外界影响因素研究[J]. 光子学报, 2010, **39**(1): 89-94.
- [3] LI Xiao-feng, LUO Tong, DENG Ke, *et al.* Analysis and experiment of CCD-applied spatial optical communications light spot position locating gravity center calculation[J]. *Optical Communication Technology*, 2004, **6**: 13-15.  
李晓峰, 罗彤, 邓科, 等. 采用 CCD 的空间光通信光斑位置提取重心算法的分析及实验[J]. 光通信技术, 2004, **6**: 13-15.
- [4] ZHAO Xin, TONG Shou-feng, LIU Yun-qing, *et al.* Application research on four-quadrant detector in space laser communication system [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(1): 46-49.  
赵馨, 佟首峰, 刘云清, 等. 四象限探测器在空间激光通信中应用研究[J]. 光电子·激光, 2010, **21**(1): 46-49.
- [5] ZHOU Ya-lin, AI Yong, ZUO Tao, *et al.* Experimentation of real-time acquisition and tracking of free space laser beam and analysis of the result[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 943-947.  
周亚霖, 艾勇, 左韬, 等. 空间光束实时捕获、跟踪实验与分析[J]. 光子学报, 2005, **34**(6): 943-947.
- [6] VETELINO F S, YOUNG C, ANDREWS L. Scintillation: theory vs. experiment[C]. *SPIE*, 2005, **5793**: 166-177.
- [7] MASINO A J, YOUNG C Y, ANDREWS L C, *et al.* Mean irradiance: experimental and theoretical results[C]. *SPIE*, 2005, **5793**: 178-184.
- [8] Prospects for Precision Active Tracking Using a Quadrant Detector, (J. F. WaLRER), AD A022714.
- [9] WANG Yong, YU Lei, ZHANG Ya-bin, *et al.* Influence of fog on atmospheric laser communication system and the relevant methods[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3275-3278.  
王勇, 于蕾, 张雅彬, 等. 雾对大气激光通信系统的影响及克服方法[J]. 光子学报, 2009, **38**(12): 3275-3278.
- [10] ZHANG Yi-xin. Aperture-averaged angle-of-arrival of light propagating through atmospheric turbulence [J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(2): 53-54.  
张逸新. 湍流大气传输光束的孔径平均到达角起伏[J]. 激光杂志, 2008, **29**(2): 53-54.
- [11] TAO W, Z Zhao-wen, W Ji-bo. A novel method to improve spatial resolution of acousto-optic deflector [J]. *Optoelectronic Letters*, 2006, **2**(1): 34-36.
- [12] LI Yu-feng, HAO Zhi-hang. Research of hyper accuracy subpixel subdivision location algorithm for star image[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(5): 666-669.  
李玉峰, 郝志航. 星点图像超准确度亚像元细分定位算法的研究[J]. 光学技术, 2005, **31**(5): 666-669.

## Stabilizational Tracking Technology for Atmospheric Laser Communication System

LIU Yun-qing<sup>1</sup>, JIANG Hui-lin<sup>1</sup>, TONG Shou-feng<sup>1</sup>

(Changchun Science and Technology University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Aiming at stabilizational tracking technology for atmospheric laser communication system, sensitivity characteristics of the beam position detectors (CCD and QD) were analyzed. Five kinds of turbulence effects such as beam wander, intensity fluctuations, dispersed spot, angle of arrival fluctuation and beam spreading for tracking precision and their mathematical models were discussed. Then, simulation results of turbulence effects under various conditions were analyzed. Both the theoretical analysis and the experimental results show that tracking error of shape center capturing algorithms is less than tracking error of centroid localization algorithm.

**Key words:** Atmospheric laser communications system; Acquisition Pointing Tracking (APT); Atmospheric turbulence; Centroid localization algorithm; Shape center capturing algorithms