

高斯匹配模型在光轴对准中的新应用

王 贺^{1,2}, 李 平², 母一宁²

(1. 吉林交通职业技术学院, 吉林 长春 130022; 2. 长春理工大学, 吉林 长春 130022)

摘要:为了降低大气湍流和背景光对信标光的干扰,减小湍流对光轴对准精度的影响,在分析高斯光束模型的基础上对光轴对准算法进行了研究。首先分析背景光模型,根据其图像模型动态滤除背景噪声,然后根据光束能量分布做横向与纵向的数学统计。采用贝叶斯判别方法对光斑区域进行判决,进而实现大视场范围内激光光轴的空间滤波,最后在遵循最小二乘原则的前提下进行高斯拟合,获得光斑图像拟合曲线,进而根据每一帧图像的动态曲线完成高斯质心的提取,进一步提高光轴检测精度。通过6.5 km的野外实验证实高斯拟合算法得到的光斑图像精度为18 μrad ,比相同条件下的传统质心拟合精度高出约12 μrad 。

关键词:高斯拟合;光轴对准;光斑检测;空间光通信

中图分类号:TH744 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.06.006

New applications of Gaussian matching model in the optical axis aligned

WANG He^{1,2}, LI Ping², MU Yi-ning²

(1. Jilin Communication Polytechnic, Changchun 130022, China;
2. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to reduce the interference of atmospheric turbulence and background light on the beacon light, and reduce the influence of turbulence on the optical axis alignment accuracy, optical axis alignment algorithm is studied based on the analysis of Gaussian beam model. First the background light model was analyzed, background noise was filtered according to image model dynamic, then horizontal and vertical mathematical statistics was made according to the beam energy distribution. The spot region was judged by Bayesian discrimination, the spatial filtering of the laser optical axis was achieved in the large field of view. Finally, following the least-squares principle, spot image fitting curve was gained by the Gaussian fitting. And then according to the dynamic curve of each frame image, the extraction of the Gaussian centroid was completed, the optical axis detection accuracy was further improved. The accuracy of the spot image was confirmed by 6.5 km field experiments, the obtained spot image accuracy is 18 μrad , it is about 12 μrad higher than traditional centroid fitting accuracy under the same conditions.

Key words: Gaussian fitting; optical alignment; spot detection; space optical communication

1 引言

光轴对准是激光通信的关键技术,误码率是衡量通信传输系统可靠性的重要指标。对于空间激光通信系统而言,光轴对准偏差的减小,会引起信噪比的增加,随着信噪比的增加,误码率呈非线性下降趋势^[1]。因此要提高通信质量,必须提高光轴对准精

度,增加接收功率。为了解决在不同湍流条件下的激光对准这个难题,国内学者提出了很多解决方案。

基金项目:吉林省科技发展计划创新人才培育计划项目(No. 20121302)资助。

作者简介:王 贺(1986-),女,硕士,主要研究网络光通信。
E-mail: der0403030420@163.com

收稿日期:2012-12-10

文献[2]指出,可以采用序列间信息量的分布情况作为检测特征参数来拟合圆心,这种方法对大气湍流和背景光的干扰起到较强的补偿作用,但是在圆心拟合过程中的切换门限值很难确定。文献[3]利用哈特曼-夏克传感器对波前畸变局部的实时探测结果进行圆心拟合。此方法虽然很好地回避强湍流在空间域引入噪声过大这一难题^[3],但是该方法是以牺牲系统的跟踪精度和跟踪带宽为代价的。文献[4]、[5]根据高采样频率下的到达角起伏昼夜观测数据,对曝光时间的平滑作用进行研究。此算法虽然帧频很高,但是帧频与视场这两个指标在原理上相互制约。文献[6]将通信光调制为圆偏振光进行传输,并展开一组验证实验,证明该方法在降低通信噪声方面有着很大的优越性。但在强背景光干扰下却很难分辨出光斑图像,不利于整个通信系统的跟踪和捕获。文献[7]提出利用激光能量密度分布的方法,根据不同区域能量分布的相对大小和位置来判定光斑位置。这种多帧叠加的方法,虽然使光斑图像更加稳定,但降低了整个通信系统的带宽。可见上述方法均存在不足之处,本文根据贝叶斯最优判决准则,提出一种高斯拟合匹配算法,并通过实验证实了这种方法能够使光斑最小均方误差达到最小,而且提高系统通信带宽的同时增大了光轴的对准精度。

2 误差模型分析

在光斑的检测与提取过程中,由于受到大气湍流和背景光等多方面的干扰,造成接收光斑漂移、接收功率闪烁、运动目标与背景对比度相对较低等各种不利影响,使光轴的对准精度降低,信噪比严重下降。

图1是没有强背景光和大气湍流影响情况下的光斑图像。图2是通过水域分割算子对图1的处理结果^[2],可以看出在没有湍流和背景光干扰时采用轮廓提取方法可以较好地检测出光斑轮廓。



图1 室内光斑
Fig.1 indoor spot



图2 理想光斑轮廓
Fig.2 ideal spot contour

图3表明当受到各种干扰时光斑破碎和闪烁情况非常严重,噪声功率上升。图4是通过对图3进行小波去噪得到的图像,这样做虽然可以去除部分的噪声,但当遇到强湍流的时候,破碎的部分光斑可能会被当成噪声滤掉,从而导致误差量增大,跟踪失败^[2]。

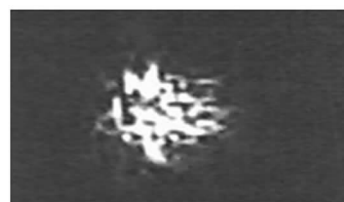


图3 野外破碎光斑
Fig.3 wild broken spot



图4 野外破碎光斑轮廓
Fig.4 field broken spot contour

大气信道对信标光的干扰可以看做是对信标光进行二次调制。这种调制会给成像引入许多频率分量。新增加的频率分量会使得接收端的光斑图像分散,引起光束在传播过程中到达角的起伏效应。从频域角度来看,Airy斑可以用一阶贝塞尔函数描述,由一阶贝塞尔函数特性可知,Airy斑绝大部分的能量集中在低频部分,信标光在指向时Airy斑的低频部分起主要作用,然而湍流所引入的是一个全频段的噪声信号,所以可以通过提高采样频率来滤除高频分量^[2]。根据Komogorow折射率起伏功率谱,平面波在弱大气湍流情况下传播时对数振幅起伏方差为^[8]:

水平均匀链路:

$$\sigma_x^2 = 0.307k^{7/6}L^{11/6}C_n^2 \quad (1)$$

斜程传输路径:

$$\sigma_a^2(L) = 0.56k^{\frac{7}{6}} [\sec\varphi] \int_0^L C_n^2(\eta) (L-\eta)^{\frac{5}{6}} d\eta \quad (2)$$

其中, C_n^2 为大气折射率结构常数; L 为传输距离; k 为波数; φ 为天顶角; $\sec\varphi$ 为斜程路径的修正值。文献[9]、[10]在修正 Rytov 方法给出的大气折射谱的基础上, 不考虑湍流外尺度的影响, 导出了适用于强湍流区的到达角起伏方差表达式, 当散射盘尺度远大于 Fresnel 区尺度 ($L_s \gg \sqrt{L/k}$) 或接收孔径远大于 Fresnel 区尺度 ($D \gg \sqrt{L/k}$) 时, 采用几何光学近似得平面波的到达角起伏方差表达式:

$$\sigma_a^2 = 2.91LC_n^2 D^{\frac{1}{3}} [1 + 2.089Lk^{-1}D^{-2}(\sigma_1^2)^{\frac{6}{5}}] \quad (3)$$

其中, C_n^2 为大气折射率结构常数; L 为传输距离; D 是接收孔径; k 是光波波数; σ_1^2 是 Rytov 方差。由此可知, 在弱湍流区, 到达角起伏幅度随着归一化强度起伏方差增大而增大; 而在强湍流区, 会出现饱和效应, 此时到达角起伏幅度不随归一化强度起伏方差明显变化^[4]。对此, 有很多学者提出补偿方案。例如采用高帧传感器的质心算法^[2], CCD 可对曝光时间内的光能进行积分。从时域角度来看, 有限小的曝光时间对入射波前梯度起调制作用, 所以在时域拥有平滑作用, 具体平滑如图 5 所示。文献[4]从理论分析和试验方面证实了这种平滑作用。

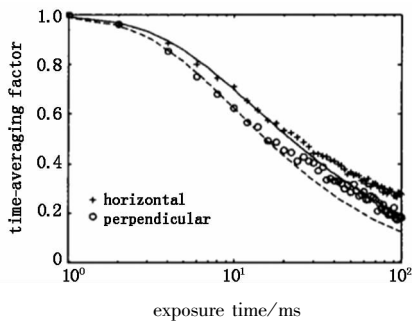


图5 到达角起伏的时间平滑因子随曝光时间的变化规律^[4]

Fig. 5 the variation of time smoothing factor angle of arrival and downs with the exposure time

3 高斯拟合模型

光斑图像特征提取的先验模型主要是质心拟合和形心拟合。传统形心拟合算法受背景光影响小, 对图像的信噪比要求较高。质心拟合的精度高, 但受背景光影响大。CCD 是一种阵列图像传感器, 可对曝光时间内的光能进行积分。利用 CCD 提取光斑图像时, Ariy 斑的光强分布可以用第一类贝塞尔函数来描述。而第一类贝塞尔函数

的形状与按速率衰减的正弦或余弦函数类似, 即接收端的光斑强度图像可以看做是服从高斯分布的随机过程。因此本文利用一种高斯拟合方式对质心拟合做加权处理, 进而实现高精度的光轴对准和到达角测量。

理想情况下, 光斑强度分布图像在 x 和 y 方向均呈高斯分布。背景处理后, 对 x 轴和 y 轴双方向进行直方图投影, 然后对直方图投影进行数理统计。理想直方投影图如图 6 所示, x 轴和 y 轴方向的投影向量服从均值为 μ , 方差为 σ^2 的高斯分布, 即:

$$p(f_i | H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(f_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

其中, H 为有光斑假设, 对其直方曲线进行高斯拟合, 若与实际直方曲线相似度高则将其归入模型中, 并对该模型根据新的像素值进行更新。否则对其做二值化处理。设 x 方向上的投影向量 $f_{x0}, f_{x1}, \dots, f_{x1023}$, y 方向上的投影向量为 $f_{y0}, f_{y1}, \dots, f_{y1023}$, 那么两个方向上最大点的交点 $Q(X_{\max}, Y_{\max})$ 即为拟合函数的上边界:

$$Q(x_{\max}) = \frac{1}{p(f_{xi} | H)} \max f_{xi} \quad (5)$$

$$Q(y_{\max}) = \frac{1}{p(f_{yi} | H)} \max f_{yi} \quad (6)$$

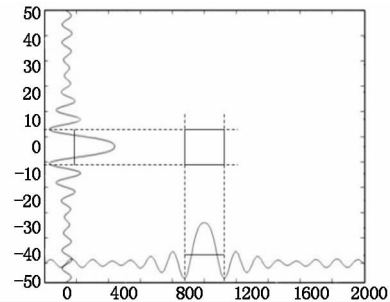


图6 光斑图像提取原理

Fig. 6 spot image extraction principle

图像分割时阈值的选取决定了包含目标像点窗口的大小。阈值选的过小, 所得的高斯图像期望与阈值成反比, 方差与阈值成正比, 接收的光斑面积增大, 引进噪声; 阈值选的过大, 则期望与阈值成正比, 方差与阈值成反比, 造成光斑接收不完整。根据贝叶斯最小错误决策规则, 设光斑强度特征矢量 I , 光斑后验概率 $p(\omega_f | I)$, 非光斑的后验概率 $p(\omega_n | I)$, 则投影后一维光斑图像的判别公式为:

$$I \in \begin{cases} \omega_f & p(\omega_f | I) > p(\omega_n | I) \\ \omega_n & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

其中,是否为光斑强度特征矢量的高斯模型用投影后的直方曲线线性加权值表示。其一维光斑图像的条件概率为:

$$p(I|\omega_f) = \sum_{i=0}^{1023} \frac{l}{i} p(f_i|H); p(I|\omega_n) = \sum_{i=0}^{1023} \frac{l}{i} (1 - p(f_i|H))$$

可计算得到后验概率:

$$p(\omega_f|I) = \frac{p(\omega_f)p(I|\omega_f)}{p(I)} \tag{8}$$

$$p(\omega_n|I) = \frac{p(\omega_n)p(I|\omega_n)}{p(I)} \tag{9}$$

式中, $p(\omega_f)$ 和 $p(\omega_n)$ 分别为是否为光斑图像的先验概率; $p(I)$ 为混合密度函数。将式(8)和式(9)代入到式(7)中得到贝叶斯判别公式如式(10)所示:

$$I \in \begin{cases} \omega_n & \frac{p(I|\omega_f)}{p(I|\omega_n)} > L_m \\ \omega_f & \text{otherwise} \end{cases} \tag{10}$$

式中, $L_m = p(\omega_n)/p(\omega_f)$ 。由欧拉方程求其最优解^[11],得到门限的计算公式如式(11)所示:

$$\gamma = \frac{Q(x_{\max}, y_{\max}) \times 2^7}{L_m} \tag{11}$$

通过阈值判决后得到特定的采样空间,采用高斯拟合的方法,即在遵循最小二乘原则前提下,找到一个理想高斯模型使其趋近于所有的采样点。设所求一维拟合曲线 $\phi(x) = a \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{b}\right)$; 对上式

两边取对数: $L_n y = \left(L_n a - \left(\frac{\mu}{b}\right)^2\right) + \frac{2\mu}{b}x + \frac{-1}{b}x^2$ 。设 $Y = L_n y; A = L_n a - \left(\frac{\mu}{b}\right)^2; B = \frac{2\mu}{b}; C = \frac{-1}{b}$ 。则: $Y = A + BX + CX^2$ 。写成矩阵形式为:

$$\begin{pmatrix} (\varphi_0, \varphi_0) & (\varphi_0, \varphi_1) & (\varphi_0, \varphi_2) \\ (\varphi_1, \varphi_0) & (\varphi_1, \varphi_1) & (\varphi_1, \varphi_2) \\ (\varphi_2, \varphi_0) & (\varphi_2, \varphi_1) & (\varphi_2, \varphi_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (f, \varphi_0) \\ (f, \varphi_1) \\ (f, \varphi_2) \end{pmatrix} \tag{12}$$

选取基函数 $\phi_0 = 1, \phi_1 = x, \phi_2 = x^2$ 。其中 $(\phi_j, \phi_k) = \sum_{i=0}^m \phi_j(x_i) \phi_k(x_i) = \sum_{i=0}^m x_i^{j+k}; (\phi_k, \phi_j) = (\phi_j, \phi_k); (f, \phi_j) = \sum_{i=0}^m y_i x_i^j$ 。

通过代入法代入各点灰度值解出 A, B, C 拟合函数 $\phi(x)$, 进而提高拟合精度。

4 实验

为了验证高斯拟合匹配算法能够得到最优的均

方误差,进行 6.5 km 野外试验。实验系统框图如图 7 所示。

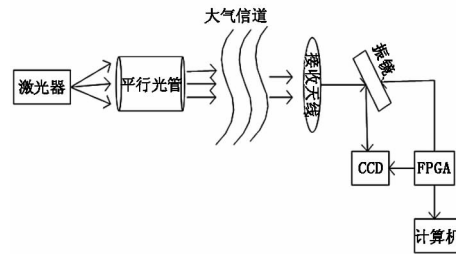


图7 实验系统框图

Fig.7 experimental system block diagram

激光器产生波长 808 nm、功率 100 mV 的激光,通过激光准直系统后经大气信道进行传输。接收端采用口径为 105 mm,焦距为 1365 mm 的卡塞格林系统。CCD 采用 2/3 inch 感光面的 ICX285,帧频为 25 frame/s,像元尺寸为 6.45 $\mu\text{m} \times 6.45 \mu\text{m}$ 。FPGA 控制振镜旋转使其做正弦运动,并用相同时钟采集 CCD 的脱靶量信息,经过图像处理后将脱靶量信息输出到计算机。其一维拟合曲线如图 8、图 9 所示。

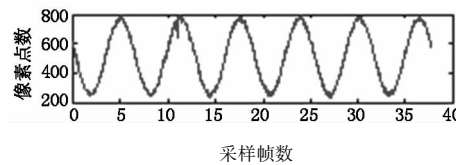
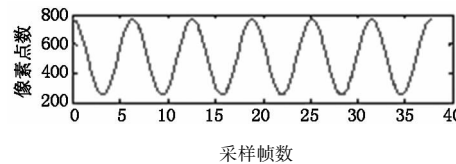


图8 传统质心拟合脱靶量

Fig.8 miss distance of traditional centroid fitting

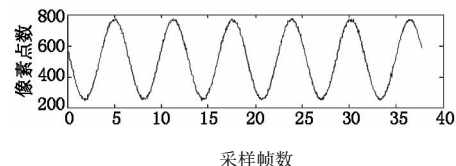
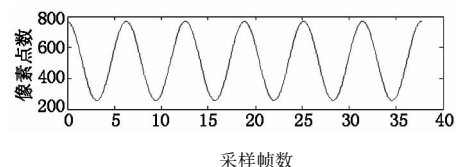


图9 高斯拟合脱靶量

Fig.9 miss distance of Gaussian fitting

图 8 是按照传统质心拟合法得到的一维拟合脱靶量,图 9 是高斯拟合法得到的一维拟合脱靶量。根据均方根公式可得,传统质心拟和算法的均方根误差 $\sigma_0 \approx 0.67$ 个像素点,高斯拟合算法的

均方根误差 $\sigma_1 \approx 0.38$ 个像素点。根据角分辨率 $\omega = \frac{\sigma \times \text{像元长度}}{\text{焦距}}$, 代入数据计算可得质心算法的角分辨率 ω_0 为 $30 \mu\text{rad}$, 高斯拟合的角分辨率 ω_1 为 $18 \mu\text{rad}$ 。由此可见, 高斯拟合算法拟合精度更高。

5 结 论

传统的高斯质心拟合方法是采用固定的高斯模型在质心算法中做加权处理, 而本文所采用的方法是一种根据梯度流所拟合出来的高斯曲线模型做动态加权处理。理论分析和实验结果表明, 在空间激光通信系统中, 高斯拟合匹配方法使得接收端的光斑图像稳定, 拟合精度比传统质心拟合高出 $12 \mu\text{rad}$, 增大了光轴的对准精度, 为大气环境下水平激光通信链路的成功链接提供了可靠的保证。

参考文献:

- [1] Jiang Huilin, Tong Shoufeng, et al. The system and technology of the free space lase communications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011, 6. (in Chinese)
姜会林, 佟首峰, 等. 空间激光通信技术与系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011, 6.
- [2] Mu Yining, Weng Guanyu, Wang He, et al. Study of technique of spot detection based on sequence information fit circle center [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2011, 12. (in Chinese)
母一宁, 温冠宇, 王贺, 等. 基于序列信息圆心拟合的大气激光光斑检测技术 [J]. 空军工程大学学报, 2011, 12.
- [3] Mu Yining, Liu Quan, Yu Lintao. Li Ping of application hartmann technigue in sequence spot detection [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19 (9): 2197 - 2204. (in Chinese)
母一宁, 刘泉, 于林韬. 哈特曼技术在序列光斑检测中的应用 [J]. 光学 精密工程, 2011, 19 (9): 2197 - 2204.
- [4] Gao Chong, Tan L Y, Ma J, et al. Experimental research of angle of arrival fluctuations in free space optical communications [J]. High Power and Particle Beams, 2007, 19 (2): 177 - 181. (in Chinese)
高宠, 谭立英, 马晶, 等. 空间光通信的到达角起伏实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2007, 19 (2): 177 - 181.
- [5] GaoChong, Ma J, Tan L Y, et al. Angle of arrival fluctuation in moderate to strong turbulence [J]. High Power and Particle Beams, 2006, 18 (6): 981 - 894. (in Chinese)
高宠, 马晶, 谭立英. 光束在强湍流区中传播的到达角起伏 [J]. 强激光与粒子束, 2006, 18 (6): 981 - 894.
- [6] Wangy Yali, Duan Jin. Laser spot detection and characteristic analysis in space optical communication [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 37 (7): 166 - 170. (in Chinese)
王亚丽, 段锦. 空间光通信中激光光斑检测与特征分析 [J]. 红外与激光工程, 2007, 37 (7): 166 - 170.
- [7] Duan Jin, Wu Jun, Duanmu Fanyi, et al. Method for measuring laser energy density distribution [J]. Journal of Jilin University: Science Edition, 2009, 47 (2): 311 - 316. (in Chinese)
段锦, 吴君, 端木繁一, 等. 激光能量密度分布的测量方法 [J]. 吉林大学学报, 2009, 47 (2): 311 - 316.
- [8] Lou Yan, Jiang Huilin, Chen Chunyi, et al. Analysis of experimental data of the scintillation fluctuation and spot area in atmosphere laser communication [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40 (3): 515 - 519. (in Chinese)
娄岩, 姜会林, 陈纯毅, 等. 激光大气湍流传输光强起伏及光斑面积实验分析 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40 (3): 515 - 519.
- [9] Conan R, Borgnino J, Ziad A, et al. Analytical solution for the covariance and for the decorrelation time of the angle of arrival of a wave front corrugated by atmospheric turbulence [J]. J Opt Soc Am, 2000, A17 (10): 1807 - 1818.
- [10] Thomasw, Vorontsov M A. Adaptive compensation of atmospheric effects with a high-resolution micro-machined deformable mirror [J]. SPIE, 2002, 4825: 14 - 23.
- [11] 张洪钺, 王青. 最优控制理论应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.