

## 卫星激光通信中目标跟踪算法的改进

周琳,艾勇,龚云华

(武汉大学 电子信息学院,湖北 武汉 430079)

**摘要:**分析了用重心法计算光斑能量中心时图像相对光源强度分布失真引入的误差,建立了强度失真模型,引入修正该失真的修正因子,提出了相应的修正算法,并讨论了该修正算法在卫星激光通信跟踪系统中的应用。计算机模拟结果表明,在适当的情况下,计算出的由于像面上强度分布相对光源失真而导致的跟踪角度偏差可增至  $109''$ ,从而证明了在激光卫星通信系统中,修正因子的引入提高了定位、跟踪精度和信道的可靠性。

**关键词:**卫星激光通信; 强度中心; 失真; 修正因子

**中图分类号:** TN929.1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2004)02-0185-04

## Improved target tracking algorithm for satellite laser communication system

ZHOU Lin, AI Yong, GONG Yun-hua

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Energy centroid algorithm is mostly used in center location of light spot, which is effected by the intensity distribution distortion of received light spot compared with that of light source. A distortion model is constructed, and a correcting factor is introduced. The related correcting algorithm is proposed, which modifies the conventional centroid algorithm. The correcting process applied in satellite laser communication is described. Computer simulation verifies that, under some factual circumstance, the angle deviations resulting from neglecting the asymmetrical attenuation of laser illumination can exceed  $109''$ . Therefore, in satellite laser communication, correcting factor introduced improves the locating and tracking precision and the channel reliability.

**Key words:** Satellite laser communication; Intensity centroid; Distortion; Correcting factor

## 0 引言

卫星激光通信具有码率高、保密性好、系统重量轻、可靠性高等优点,使之在通信领域具有广阔的发展前景。星间光链路的建立是由捕获、瞄准和跟踪(PAT)系统来实现的。在实际的激光通信系统中,跟踪精度要求小于  $2 \mu\text{rad}$ ,瞄准精度要求小于  $1 \mu\text{rad}$ <sup>[1]</sup>。

卫星激光通信的跟踪系统中,发射光源采用半导体激光器,其光强分布呈高斯分布,接收端光信号用电荷耦合器件接收<sup>[2,3]</sup>。在APT系统中,图像跟踪方案是:利用光电图像传感器摄取激光光斑图像视频信号,对其进行处理和数字化后,送入计算机进行图像处理和分析,在场景中确定信号光斑,对数字图像进行处理后,计算出角度偏差量,控制天线的轴的姿态,实现通信终端的自动瞄准、捕获和跟踪。其工作原理如图1所示。

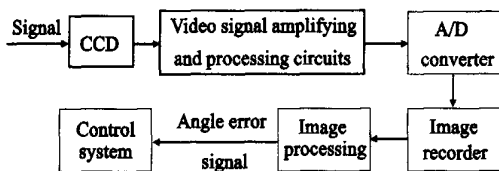


图1 CCD图像偏差信号处理原理框图

Fig. 1 Processing of angle deviation signal from CCD image

由于光在传播过程中受光束变换和大气扰动等影响,发射端点光源发射的激光到达接收端时为一光斑,其能量重心的提取是实现瞄准和跟踪的基础。采用能量重心算法,可以将精度提高到亚像素级精度<sup>[4]</sup>。参考文献[5]提出了一种基于圆拟合的中心检测算法,该算法较重心法速度快,但通信距离较远时,接收光斑远离圆形,不适合采用该算法。

## 1 重心法及其误差分析

为方便计算,以一维情况为例,二维情况可以类推。定义光轴与接收面的交点为坐标原点,接收面上坐标为  $x$  的点处的光强为  $g(x)$ ,整个接收面覆盖的长度范围为  $l$ ,利用重心法可得到接收面上强度的重心:

$$x_c = \frac{\int x g(x) dx}{\int g(x) dx} \quad (1)$$

在图像的生成过程中,由于成像系统和传输介质的不完善,使得像面的光强分布发生变化,典型表现为图像的失真。引起图像失真的原因很多,有传感器的非线性、光学系统的像差、成像设备与物体之间的相对运动及感光胶卷的非线性等。这些因素导致  $g(x)$  偏离完善成像时  $x$  点处的光强,这样,由  $g(x)$  算出的像面强度重心必然偏离目标像点的精确位置。

## 2 图像的失真模型及重心法的修正

设  $f(x)$  为理想成像时像面的灰度分布,可理解为代表光源的原图像,  $g(x)$  是实际得到的失真图像灰度分布,  $n(x)$  为图像生成中的加性噪声,则失真模型可以表示为:

$$g(x) = S[f(x)] + n(x) \quad (2)$$

式中  $S$  是综合所有强度失真因素的函数。该模型如图2所示。

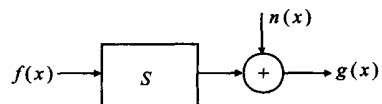


图2 图像的失真模型

Fig. 2 Model of image distortion

修正图像失真的过程就是利用已知的图像  $g(x)$ 、有关  $S$  函数的先验知识和有关噪声的统计性质,对原图像  $f(x)$  做估值,使估算出的图像尽可能接近真实的  $f(x)$ ,即按图2所示的失真过程的逆过程进行。

当图像线性失真时,失真函数是原图像  $f(x)$  的线性函数,设为  $h[f(x)]$ ,在不考虑加性噪声的情况下,失真模型可表示为:

$$g(x) = f(x) \cdot h[f(x)] \quad (3)$$

则: 
$$f(x) = \frac{g(x)}{h[f(x)]} \quad (4)$$

此时重心法则修正为:

$$x'_c = \frac{\int x \cdot \frac{g(x)}{h[f(x)]} dx}{\int \frac{g(x)}{h[f(x)]} dx} \quad (5)$$

通常,图像非线性失真,定义光轴与接收面的交点为坐标原点,接收面内水平和垂直方向分别为  $x$  轴和  $y$  轴,二维失真模型为:

$$g(x, y) = S[b(x, y)] + n(x, y) \quad (6)$$

$$b(x, y) = \iint_{\Omega} h(x, \alpha; y, \beta) f(\alpha, \beta) d\alpha d\beta$$

式中  $h$  函数是成像系统的点扩展函数; $\Omega$  是接收面区域范围。修正过程可以采用最大后验恢复方法。该方法在已知  $g(x, y)$  的前提下,求出后验条件密度  $P(f(x, y) | g(x, y))$ 。设  $\hat{f}(x, y)$  是当  $P(f | g)$  取最大值时的  $f$ ,则  $\hat{f}(x, y)$  代表已知失真图像  $g(x, y)$  最可能的原图像  $f(x, y)$ ,即它是  $f$  的最大后验估值。解法可采用 Hunt 建议的迭代序列:

$$\hat{f}_{k+1} = \hat{f} - h \times S_b \{ \sigma_n^{-2} [g - S(h \times \hat{f}_k)] \} - \sigma_f^{-2} (\hat{f}_k - \bar{f}) \quad (7)$$

式中  $k$  为迭代指数; $S_b$  是由非线性函数  $S$  的导数组成的函数; $\sigma_f^{-2}$  和  $\sigma_n^{-2}$  分别为  $f$  和  $n$  的方差的倒数; $\bar{f}$  是随空间改变的均值,经验表明它是一个常数,但要经过多次迭代才能收敛到最后的解。为简单起见,公式(7)中  $f$ 、 $h$ 、 $g$  的变量  $(x, y)$  都省略了。该式的详细推导见参考文献[6]。用修正后的  $\hat{f}$  取代公式(1)中的  $g$ ,即可修正重心算法。

### 3 重心修正算法的应用

光学系统中,轴外点的像由于其成像光束的孔径角较轴上点小,其光照度随视场角余弦的四次方而降低[7]。

如图 3 所示,设有同一光源(其光亮度为常数), $E$  为光源成像于轴上点  $A$  时的像照度, $E'_w$  为光源成像在轴外点  $B$  时的像照度, $W'$  为此时的视场角,则:

$$E'_w = E \cdot \cos^4 W' \quad (8)$$

卫星通信中激光束在传播过程中,光强一直近似

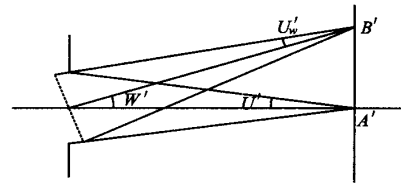


图 3 轴上点的像与轴外点的像

Fig. 3 Images on axis and off axis

保持高斯分布[8]。由公式(8)可知,强度中心对称的高斯光束通过光学系统后,成像点越远离像面原点,强度衰减越大。图 4 是激光传输 40 m 时接收的光斑图,可以看出,光强的分布呈不对称的衰减。用接收光信号强度计算强度重心时,必须予以修正。



图 4 接收光斑的不均匀衰减

Fig. 4 Asymmetrical attenuation of laser spot intensity

取  $h[f(x, y)] = \cos^4 W'$ ,则可修正由此带来的图像强度分布失真。

设接收系统的聚焦透镜焦距为  $f$ ,则易知  $\cos W' = \frac{f}{\sqrt{f^2 + x^2 + y^2}}$ ,由公式(5)可知,修正后的重心  $(x'_c, y'_c)$  为:

$$x'_c = \frac{\int x g(x, y) (f^2 + x^2 + y^2)^2 dx}{\int g(x, y) (f^2 + x^2 + y^2)^2 dx} \quad (9)$$

$$y'_c = \frac{\int y g(x, y) (f^2 + x^2 + y^2)^2 dy}{\int g(x, y) (f^2 + x^2 + y^2)^2 dy} \quad (10)$$

相应修正的跟踪角度如图 5 所示,由于通信两端距离

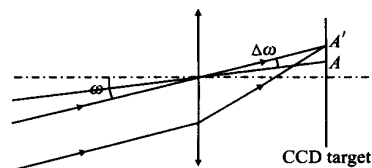


图 5 跟踪角度的修正示意图

Fig. 5 Correction of tracking angle

很远,发射光束以平行光表示,光束方向与接收系统

光轴夹角  $\omega$  即为跟踪角度,  $A(x_c, y_c)$  为常规算法算出的光斑强度重心,  $A'(x'_c, y'_c)$  为修正后的光斑强度重心, 可以看出, 修正的跟踪角度为:

$$\Delta\omega = \frac{\sqrt{(x_c')^2 + (y_c')^2} - \sqrt{(x_c)^2 + (y_c)^2}}{f} \quad (11)$$

若卫星激光通信接收系统前端有放大倍率为  $F$  的望远镜作为接收天线, 由于望远镜对平行光束具有放大角度  $F$  倍的作用, 则修正的跟踪角度为  $\Delta\omega/F$ 。

在实际卫星激光通信系统中, CCD 接收的信号为离散信号, 只要 CCD 像素空间频率足够大, 在无噪声的情况下, 由 CCD 离散信号计算出的重心与实际的光斑重心一致<sup>[9]</sup>。因而上面的结论适用于 CCD 离散信号。

#### 4 模拟验证结果

信号光到达接收端为一均匀光斑, 各点灰度为 100, 接收物镜焦距为 25 mm, CCD 像素尺寸为  $6 \mu\text{m}$  时, 图 6 为不考虑修正因子  $\frac{1}{\cos^4 W}$  时, 计算机模拟算出的角度偏差(单位: 秒)。

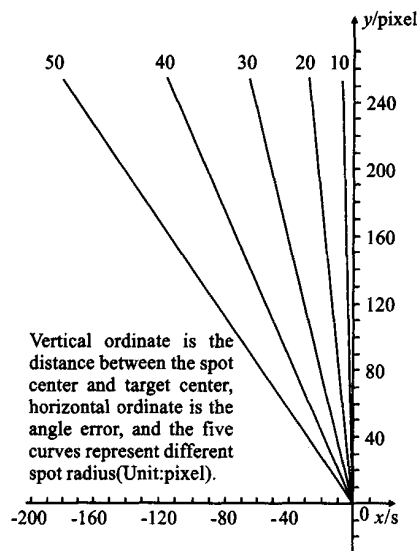


图 6 忽略修正因子导致的角度偏差

Fig. 6 Angle error resulting from neglecting correcting factor

可以看出:

(1) 所有的角度偏差均为负值, 即未修正时算得

的强度重心较修正后靠近像片中心。这是因为成像时越靠近相片边沿的点光照度衰减越大, 修正时必然淡化这种衰减, 使得重心向边沿移动。

(2) 当光斑半径为 40 个像素, 光斑中心偏离像片中心位置的像素数为 240 时, 角度偏差约为  $109''$ , 此值远大于瞄准跟踪精度所要求的微弧级, 证明了引入修正因子的必要性。

(3) CCD 接收光斑中心偏离像片中心位置的像素数一定时, 光斑越大, 角度偏差越大, 且呈线性增长。光斑覆盖面积大, 则光斑上下部分衰减不均匀性大, 则角度偏差大。

(4) 当光斑半径一定、光斑中心偏离像片中心位置的像素数增大时, 角度偏差增大, 但增大程度不明显。但半径过大时, 这种偏差必须考虑。

#### 5 结束语

将 CCD 成像系统的误差列于考虑范围, 提高了位置检测的精度和卫星激光通信的效率。构造不同的修正因子, 可以适用于不同的光学接收系统。

#### 参考文献:

- [1] Kouichi K, Seiji K, Keiichi H, et al. Laser beam acquisition and tracking system for EIS-VI laser communication equipment (LCE) [A]. SPIE[C]. 1990, 1218: 96-107.
- [2] 李贤, 曾广荣, 徐铭. 空间光通信收发端机分析与设计[J]. 电子科技大学学报, 1998, 27(5): 502-505.
- [3] 王海先. 大气中激光通信技术[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(2): 123-127.
- [4] Baba M, Ohtani K, Konishi T. Novel position measurement with subpixel resolution using a charge-coupled device[J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(3): 266-272.
- [5] 孔兵, 王昭, 谭玉山. 基于圆拟和的激光光斑中心检测算法[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(3): 275-279.
- [6] Hunt B R. Bayesian methods in nonlinear digital image restoration [J]. IEEE Trans Computer, 1977, C-26(3): 219-229.
- [7] 王子余. 几何光学和光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1989: 109-112.
- [8] 卢亚雄, 杨亚培, 陈淑芬. 激光束传输与变换技术[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1999: 53-57.
- [9] 束永生, 伍小平. CCD 高精度位置检测重心算法的傅里叶分析[J]. 实验力学, 1995, 10(1): 31-37.