

文章编号: 0258-7025(2010)03-0743-05

光斑噪声对星间光通信的影响及抑制算法

陈兴林 郑燕红* 王 岩

(哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 星间光通信系统的捕获、瞄准及跟踪(APT)过程构成了一个切换系统,通过电荷耦合器件(CCD)采集的光斑信息决定了切换的序列以及激活的子系统,对通信连续性有重要影响。分析了光通信中的捕获、瞄准及跟踪过程,建立了系统的切换模型;根据所得的系统模型验证了由于光斑噪声引起的系统切换对通信链路的影响;并提出了将均值滤波、最大类间方差法和连通区域选择法结合对光斑噪声信号进行抑制的算法。仿真结果表明 CCD 采集得到的灰度图像通过该算法处理后,能有效地消除椒盐噪声、高斯噪声以及恒星背景噪声的影响,确保星间光通信过程的连续性。

关键词 光通信;切换系统;抑制算法;光斑噪声

中图分类号 TN929.12 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103703.0743

Influence of Spot Noise in Inter-Satellite Optical Communications and Suppression Algorithm

Chen Xinglin Zheng Yanhong Wang Yan

(School of Aerospace, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The inter-satellite laser communication system that implements for acquisition, pointing and tracking (APT) process, is a switch system which influences the continuity of communication widely. The switch sequence and the active subsystem are determined by the spot image collected by charge coupled device(CCD). In this paper, the process of APT is analyzed in detail. Based on the whole workflow, the switch system model is represented. And the influence of spot noise which mixed into spot image to system performance is verified. The suppression algorithm that cascaded by average value wave filtering, Otsu method and selecting connected area method is proposed for the noise elimination. The simulation indicates that the algorithm is effective for pepper salt noise, Gaussian noise and stellar background noise, and the continuous communication can be got.

Key words optical communications; switch system; suppression algorithm; spot noise

1 引 言

星间光通信系统通过星载终端在外层空间形成通信网络,可容纳数据量大,抗干扰能力强,这使得激光星间链路被广泛研究。光通信系统在控制结构上多采用了粗瞄与精瞄复合控制的方案,建立与保持链路的过程被分为捕获、瞄准及跟踪(APT)3个阶段^[1~3]。为了在光束发散角小的情况下实现链路建立和保持,系统用信标光作为标记,通过电荷耦合

器件(CCD)对信标的定位从而达到远距离精确对准的目的。然而 CCD 采集到的光斑信息往往会受到污染和干扰,影响信标位置精度,导致系统工作状态发生变化。

文献[4]设计实时可调节光积分时间、增益及亮度偏置的特殊相机,通过反馈电路对暗电平进行校正,减小其对成像光斑的影响。文献[5]通过 Bayesian 方法估计 Haar 小波的系数来重构光斑图

收稿日期: 2009-03-17; 收到修改稿日期: 2009-06-11

基金项目: 黑龙江科技攻关计划(GZ06104A)资助课题。

作者简介: 陈兴林(1963—),男,博士,教授,主要从事飞行器控制、智能机器人、计算机控制等方面的研究。

E-mail: chenxl@hit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zhengyh1982cl@yahoo.com.cn

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} -9 & -0.81 & -0.75 \\ 32 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3.1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_f = \begin{bmatrix} -13000 & -5127 \\ 8192 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_f = \begin{bmatrix} 1024 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

由于发送卫星的出射光指向与来自接收卫星的入射光指向在开始建立链路时刻有一个固定的偏差角度,可将其看作阶跃信号,而在扫描捕获、瞄准过程中发送星与接收星在各自轨道运行,具有相对运动,但变化缓慢,因此可看作附加在阶跃信号上小斜率的斜坡信号,仿真过程中以 $u_r = \pi/3 + 0.001h$ 表示, $h=0.1$ s 为仿真时间步长。在扫描阶段,基于阿基米德螺线采用恒定线速度螺旋扫描方式,取 $u_s = 0.0005\theta\cos\theta$,其中 θ 为极角。

当光斑噪声信号不存在,即 $n=0$ 时,捕获、瞄准及跟踪系统的响应曲线如图 2 所示。

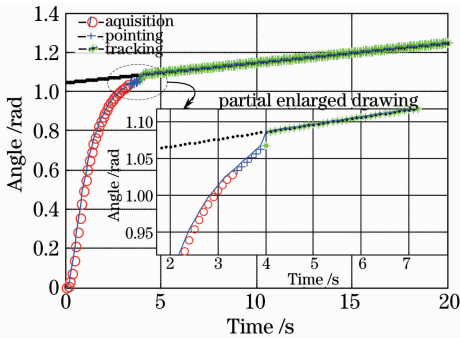


图 2 无噪声影响的切换响应曲线

Fig. 2 Switch system response curve without noise

从图 2 可见约经过 3.5 s 系统进入瞄准阶段,较快实现了信标光捕获,同时经过不到 1 s 的瞄准调整进入跟踪阶段,并能不断跟踪协同卫星的相对运动,能很好地保证通信的持续性。然而以输出能量为 0.01 dBW 的高斯白噪声序列模拟噪声信号 n 作用于系统,其余信号相同时,仿真得到噪声影响下的切换响应曲线如图 3 所示。

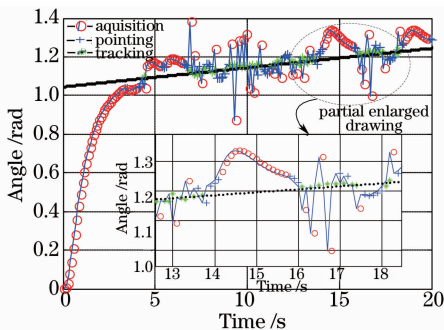


图 3 噪声影响下的切换响应曲线

Fig. 3 Switch system response curve with noise

从图 3 可见,终端根据轨道参数确定的方位轴期望角度通过扫描切换到瞄准阶段,然后切换到跟踪阶段,但由于噪声的存在使信号光跳出 CCD 视域,重新回到扫描阶段,从图中可见整个 APT 系统在捕获、瞄准、跟踪阶段来回切换,破坏了通信的连续性,无法正常进行通信。因此,对采集得到的光斑图像进行噪声消除处理十分必要。

4 光斑噪声抑制算法

对 CCD 采集的灰度图像进行噪声处理,滤除椒盐高斯噪声,结合星历表信息根据区域连通对背景噪声进行判定,提取有效的入射光斑信息,然后再计算光斑坐标,可削弱噪声信号对系统性能的影响。

由于信标光为低频信号,要消除高频噪声可采用平滑滤波器对图像的低频分量进行增强,对高频分量进行削弱以消除图像中的随机噪声。均值滤波对平滑图像具有较好的效果,并且其算法简单,容易满足星载计算机的实时性要求。设光斑灰度图像各点灰度表示为像素坐标 (x,y) 的函数 $f(x,y)$,由均值滤波选择 3×3 邻域的 \mathbf{H}_2 模板。

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} h(-1,-1) & h(-1,0) & h(-1,1) \\ h(0,-1) & h(0,0) & h(0,1) \\ h(1,-1) & h(1,0) & h(1,1) \end{bmatrix} = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

设将 \mathbf{H}_2 模板与以 (x,y) 为中心的 9 个像素点构成的局部图像 $\mathbf{F}(x,y)$ 进行卷积得到的 (x,y) 点的灰度为 $g(x,y)$,则有

$$g(x,y) = \mathbf{F}(x,y) * \mathbf{H}_2 = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 f(x-i,y-j)h(i,j). \quad (5)$$

将(5)式展开可以看到,采用 \mathbf{H}_2 模板, $h(i,j)$ 项均为 2 的方幂,这便于处理器采用移位代替除法运算。

利用均值滤波进行平滑相当于增强了光斑与噪声的对比度,对于大小为 $M \times N$ 的 8 bit 图像,设经均值滤波后灰度值为 g ,由 Otsu 方法^[9],设灰度阈值 T_h 将图像灰度分为两组,则组间的方差可表示为

$$\sigma^2 = \frac{\left[\sum_{g=0}^{255} gn_g \sum_{g=0}^{T_h} n_g - MN \sum_{g=0}^{T_h} gn_g \right]^2}{(MN)^2 \left[MN \sum_{g=0}^{T_h} n_g - \left(\sum_{g=0}^{T_h} n_g \right)^2 \right]}, \quad (6)$$

式中 n_g 表示灰度为 g 的像素点个数。

为了使经均值滤波削弱的噪声信号与有效光斑进一步分离,使(6)式的组间方差最大可实现这一目的,此时得到的阈值 T_h 即为最佳分割阈值。为了减小运算量,可以设定初始阈值 T_{hs} 和终止阈值 T_{he} ,由于 CCD 曝光时间不变,信标亮度也比较稳定,最佳阈值变化不多,因此初始阈值只要比前一幅图像得到的最佳阈值小 $10 \sim 20$,而比终止阈值大 $10 \sim 20$ 即可,这样可避免对 CCD 采集的每幅图像进行全灰度级计算,缩短计算时间。

光斑图像通过均值滤波与阈值分割处理后,椒盐噪声、高斯噪声基本被消除,但可能在采集到的图像信息中还含有面积较大、亮度较高的恒星背景噪声,因此,还需要对图像进行有效区域选择。由于图像信息可被存储为一个二维矩阵,先对其按行搜索,对灰度值大于最佳阈值 T_h 的像素进行标记,然后对第一次搜索得到的标记及其像素坐标再次搜索,若满足

$$|x_k - x_{k-1}| < \epsilon, |y_k - y_{k-1}| < \epsilon, \quad (7)$$

即纵横坐标相距在 ϵ 个像素内且大于最佳阈值 T_h 的点标记为一组,其中 $x_k, y_k, x_{k-1}, y_{k-1}$ 分别表示像素坐标 $x_k = k, y_k = k, x_{k-1} = k-1, y_{k-1} = k-1$ 。这样就实现了把第一次搜索有不同标记,但属于同一区域的子区域进行合并。这样整个图像被标记为有效光斑和恒星背景光斑两个区域,从而根据星历表信息排除恒星背景区域。

5 仿真分析

图 4 为 CCD 采集的 $491 \text{ pixel} \times 656 \text{ pixel}$ 灰度图像,图右上方的光斑为恒星背景,而遍布整个视域的小斑点为椒盐噪声和高斯噪声。图 5 为其灰度值关于横、纵像素坐标的三维图,从中可以更加明显地看到椒盐高斯噪声与恒星背景噪声的灰度分布。

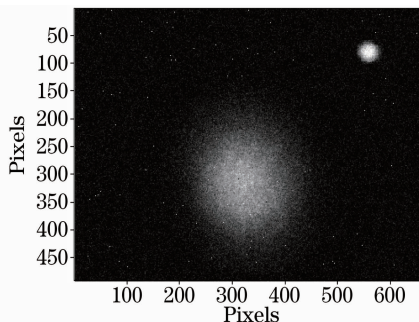


图 4 噪声影响下的光斑图像

Fig. 4 Faculae image with noise

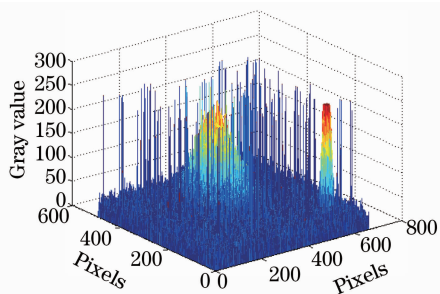


图 5 噪声影响下的灰度三维图

Fig. 5 3 dimension gray figure with noise

利用质心算法可得光斑中心坐标 (x_0, y_0) 为

$$x_0 = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y) x}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y)}, y_0 = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y) y}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y)}. \quad (8)$$

由(8)式可得图 4 所示的入射光不经处理时中心坐标为 $(279, 227, 334, 5290)$ 。利用(4)式对图 4 进行均值滤波后得到光斑中心坐标为 $(279, 1975, 334, 5240)$,可见中心坐标变化不大。这是因为椒盐噪声和高斯噪声的光斑点只是被削弱,并且其大小相对信标光小导致其影响不大,随着有效光斑的减小(如进入跟踪阶段从信标光切换为信号光的情况),其影响会更明显。由(6)式计算最佳分割阈值为 58.0125 ,此时减背景后得到的中心坐标为 $(293, 3807, 342, 8939)$,可见此时纵横坐标均有约 10 个像素的变化。根据(7)式,选择 $\epsilon=5$ 通过对背景分割后的图像进行两次搜索,将图 4 分离为图 6,7。

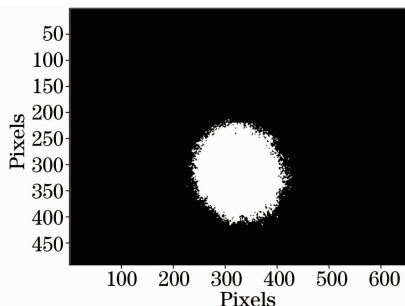


图 6 分离后的有效光斑

Fig. 6 Separated valid faculae

结合星历表信息,剔除恒星背景噪声,通过(8)式计算图 6 所示有效光斑的中心坐标为 $(314, 5029, 321, 7630)$ 。可见在滤除光斑噪声前后光斑坐标有较大变化,反映了对 CCD 采集得到的光斑图像进行处理的必要性。

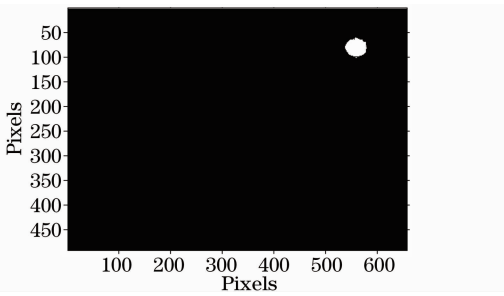


图 7 分离后的恒星背景光斑

Fig. 7 Separated stellar background faculae

6 结 论

分析了光通信中的捕获、瞄准及跟踪过程,建立了系统的切换模型;通过对光通信终端方位轴角度在噪声下的变化阐述了光斑噪声对系统的影响;利用图像平滑处理对灰度图像增强,并采用最大类间方差法动态地确定分割阈值消除椒盐高斯噪声,最后通过连通区域选择排除恒星背景的影响,获得了有效光斑灰度图。仿真表明光斑噪声通过本方案的处理,能有效地削弱噪声的影响,提高系统通信持续性。

参 考 文 献

1 T. Jono, Y. Takayama, K. Ohinata *et al.*. Demonstrations of ARTEMIS-OICETS inter-satellite laser communications[C]. 24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference; San Diego, California, AIAA-2006-5461

2 M. D. C. Pasquale, M. Graziano, F. D. Giuseppe. Intersatellite link for earth observation satellites constellation [C]. *SpaceOps 2006 Conference*, AIAA-2006-5811

3 Mike Borrello. A multi stage pointing acquisition and tracking (PAT) control system approach for air to air laser communications[C]. *American Control Conference, Portland, OR, USA*, 2005. 3978~3980

4 Wang Shifeng, Zhao Xin, Tong Shoufeng *et al.*. APT coarse tracking CCD camera as free space laser communication system [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, **29**(5): 545~547
王世峰,赵馨,佟首峰等.自由空间光通信 APT 粗跟踪 CCD 相机的研制[J]. *兵工学报*, 2008, **29**(5): 545~547

5 Liu Danping, Hu Yu. Laser speckle image denoising with high accuracy centroid [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(8): 56~58
刘丹平,胡渝.提高光斑图像质心精度的去噪方法[J]. *光电工程*, 2005, **32**(8): 56~58

6 Wang Haihong, Zeng Ni, Lu Wei *et al.*. Edge detection of laser imaging radar based on wavelet transform and mathematical morphology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 903~906
王海虹,曾妮,陆威等.基于小波变换和数学形态学的激光成像雷达图像边缘检测[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 903~906

7 Chen Jiechun, Ding Zhenliang, Yuan Feng. Uncertainty evaluation of centroid detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1318~1322
陈杰春,丁振良,袁峰.质心检测不确定度的估计方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1318~1322

8 Yu Siyuan, Han Qiqi, Ma Jing *et al.*. Size selection of dispersive spot imaging on CCD in a satellite optical communication terminal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 69~73
于思源,韩琦琦,马晶等.卫星光通信终端 CCD 成像光斑弥散圆尺寸选择[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 69~73

9 Cheng Wansheng, Zang Xizhe, Zhao Jie *et al.*. Modified strategy to inertia weight in PSO for searching threshold of Otsu rule [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(10): 1908~1912
程万胜,臧希喆,赵杰等.面向 Otsu 阈值搜索的 PSO 惯性因子改进方法[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(10): 1908~1912