

文章编号: 0253-2239(2009)09-2385-05

# 基于 Hough 变换和颜色特征的预瞄准技术研究

廉 明<sup>1</sup> 富宏亚<sup>1</sup> 付 森<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001  
<sup>2</sup> 哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 为实现激光通信终端地面验证实验中终端的自动对准, 提出了一种基于图像识别的预瞄准方法。该方法首先基于颜色特征提取出图像中的指示光斑与标尺光斑, 根据标尺光斑的尺寸, 建立图像与实物的比例关系, 并预估出目标圆的半径像素值。然后, 基于 Hough 变换原理识别出图像中的通信终端通光中心位置, 并与指示光斑进行比较计算出补偿角度。将补偿角传给运动控制卡, 控制指示光瞄准目标终端。最后, 启动玫瑰曲线扫描, 捕获信标光后完成预瞄准过程。实验结果表明: 该方法能准确识别目标, 计算时间为 0.94 s, 并具有良好的抗干扰能力。基本满足通信终端自动识别、快速对准的设计要求。

**关键词** 图像处理; 预瞄准; Hough 变换; 玫瑰曲线扫描; 模拟平台

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092909.2385

## Study on Precollimation Based on Hough Transforms and Color Character

Lian Ming<sup>1</sup> Fu Hongya<sup>1</sup> Fu Sen<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China  
<sup>2</sup> State Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** In order to realize auto-alignment of terminal in ground laser communication simulation experiment, a precollimation method based on image recognition is proposed. First, indication cursor are extracted and reference cursor according to the color character of image. On the basis of the size of scale facula, the method establishes proportion relation between image and real object is built, and then the radius of target circle is estimated. Then based on Hough transform, the algorithm finds the centre of communication terminal caliber in the picture and calculates compensation angle between the centre and indication cursor. by sending the compensation angle to motion control card, it would make laser directly collimate to the terminal. At last, starting rose scanning and the process is terminated until capturing beacon light. Experimental results indicate that this method can detect the target exactly, and the calculation time is 0.94 s. It has perfect anti-jamming character. The method satisfies the requirements of auto-recognition and rapid collimation between two communication terminal.

**Key words** Image processing; precollimation; Hough transform; rose scanning; simulator

## 1 引 言

空间光通信是以激光为载体进行空间信息传输, 它具有体积小、质量轻、功耗小、安全性高等特点<sup>[1]</sup>。

目前, 美日欧等国均在光通信链路理论及系统研制方面取得了重大突破, 并建立了多个验证系统<sup>[2~4]</sup>。

通信终端的可靠性和抗干扰能力等性能指标是

收稿日期: 2008-10-13; 收到修改稿日期: 2009-02-10

基金项目: 国家 863 计划(2004AA744042)资助课题。

作者简介: 廉 明(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事控制系统开发图像处理、模式识别等方面的研究。

E-mail: lianming\_hit@126.com

导师简介: 富宏亚(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事机电控制系统开发、数字控制技术等方面的研究。

E-mail: hongyafu@hit.edu.cn

设计者关心的问题<sup>[5,6]</sup>。因此,动态光通信仿真实验就成为检验终端通信性能的重要手段。设计一套六自由度链路模拟平台上模拟静止轨道(GEO)和低高度轨道(LEO)卫星的姿态变化,两通信终端完成捕获、瞄准、跟踪等任务,要求通信终端在动态环境下保持链路连接并完成通信<sup>[7,8]</sup>。

在轨卫星通信前通常根据轨道计算出对方位置,并姿态调整对准目标。但在地面实验环境下终端建立连接时并不知道对方位置,而受通信距离短(实际工作中终端距离数万千米,光斑半径数千米),终端无法完成大角度的螺旋扫描等因素影响。初始链路连接比较困难,通常采用点动的方法人为实现终端初期对准,通信光为不可见光,这给操作人员带来极大的麻烦。这种方法效率低且精度不高,无法为终端“粗瞄”提供良好的基础。

本文提出一种基于图像识别和玫瑰曲线扫描的链路连接预瞄准技术。该技术主要分为以下三步骤:1)基于预估参数 Hough 变换和颜色特征提取辨识出图像中的终端通光口径位置坐标及圆心坐标提取指示光斑位置和标尺光斑位置,计算出指示光斑与通光口径圆心的像素差并输出。2)根据像素差计算对应模拟平台方位、俯仰的补偿角,并传到运动控制卡内,模拟平台转动相应的角度使指示光斑瞄准通光口径中心。3)启动玫瑰曲线扫描,当终端的信标光进入对方终端的视窗后停止扫描,预瞄准过程结束。

## 2 图像识别关键算法

### 2.1 边缘检测算法

图像中的边缘是指像素周围有阶跃或屋顶状变化像素的集合,它直观的显示出物体的轮廓,包含丰富的图像信息。常用的边缘检测算法主要以灰度图像为研究对象,通过判断图像中每个像素的某个邻域内灰度的变化,利用边缘导数的规律来检测边缘。常用的边缘检测算子包括梯度算子、Roberts 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子、Canny 算子等等,他们在处理效果上各有特点<sup>[9]</sup>。综合计算量、抗噪声等性能,本文使用 Sobel 算子作为边缘检测方法。Sobel 算子在水平和垂直方向分别使用两个卷积核  $h_1, h_2$  来求灰度图像中每个点的梯度,其中:

$$h_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, h_2 = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

### 2.2 指示光斑和标尺光斑的识别

计算机存储的彩色图片通常由三维矩阵表达,每个像素点的颜色又由  $R, G, B$  三个分量定义, $R, G, B$  由  $0 \sim 255$  的整数值刻画。基于以上特点,只要所关心的颜色与背景有明显区别,就可以通过判断  $R, G, B$  的数值将其提取出来。在链路建立过程中,为了解决通信光不可见所带来的无法瞄准的问题,设置了一道指示激光。该激光由纯红色激光二极管提供,在图片上则是转台上的一个红色光斑。同时,为了标定图片像素与实际尺寸之间的关系,在模拟平台的不同位置分别设置了蓝色和绿色两个发光二极管,如图 1 所示。通过计算两个二极管在图像中的像素差,就可以建立图像中的像素与实际尺寸间的对应关系。

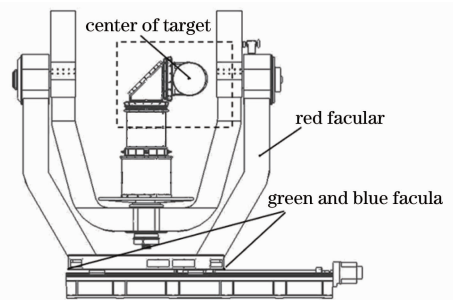


图 1 识别目标示意图

Fig. 1 Schematic of target recognition

### 2.3 预估参数的 Hough 变换

Hough 变换首先于 1962 年由 Paul Hough 提出,目前已经广泛应用于计算机视觉和图像处理。其基本思想是实现一种从图像空间到参数空间的映射,将图像空间内具有一定关系的像元进行聚类,寻找能把这些像元用某一解析形式联系起来的参数空间累积对应点。通过适当提取这些累积的对应点,就可以找到图像空间对应的几何形状<sup>[10,11]</sup>。

以直线检测为例,将直线方程写为  $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$ , 式中,  $\rho$  为原点到直线的距离,  $\theta$  为直线的法线与  $x$  轴的夹角。对图像中的每个点经上式变换到极坐标空间,则过图像空间某点的所有直线对应极坐标空间的一条正弦曲线。这样,寻找图像空间的直线就转化成寻找极坐标空间正弦曲线的交点。通过比较阈值找出参数空间的峰值点,就能找到理想的直线。基于以上思想,将图像空间的像元  $(x, y)$  通过公式  $(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2$  映射到参数空间  $(a, b, r)$ , 根据所要找的圆的半径判断可能圆心  $(a, b)$  并对投票空间投票,其峰值就是所要找的圆心坐标<sup>[12,13]</sup>。

经 Hough 变换检测圆的缺点是计算量大, 计算时间长。本文提出一种预估被检对象参数的方法降低无效圆检测。由于 CCD 焦距、照射角度等因素, 所拍摄的照片中通光口径半径所对应的像素数变化很大, 但总是与转台框架成比例变化。根据此特征标定转台框架尺寸, 并成比例计算出当前图片中通光口径半径所对应的近似像素数作为目标半径。将目标半径加上 2 pixel 作为半径的搜索范围。如图中计算出目标半径为 10 pixel, 则程序在 8 ~ 12 pixel 范围内检测目标。

得到半径范围后将得到的彩色图像转换成灰度图像, 利用边缘检测方法对图像进行二值处理, 提取轮廓作为检测对象。对处理后的图片进行 Hough 变换, 过程如下: 1) 提取象素个数, 建立投票空间; 2) 根据预估值设定检测圆半径, 设定角度循环量; 3) 对每个有效像素计算可能的圆心位置, 如果该圆心合理则对投票空间投票, 判断依据为所计算圆点坐标值为正并位于图片内; 4) 搜索投票空间最大值并求出大于阈值像素的索引号和投票空间层数; 5) 计算出每层空间圆心坐标和半径, 即得到检测圆, 并输出图像。

### 3 平台快速对准方案

#### 3.1 补偿角计算

图 2(a), (b) 分别表示了潜望式终端方位、俯仰转角与距离的对应关系, 图中终端回转半径为  $r$ , 两终端距离为  $l$ ,  $MIN$  为接收端投影面, 此投影面为接收端中心与理性通信位置组成的投影面。 $CO$  为理想通信位置, 此时指示光斑落在  $I$  点; 当终端顺时针转动  $\theta_1$  角, 此时中心由  $C$  点到  $D$  点, 指示光斑落在投影面的  $M$  点; 同理, 终端逆时针转动  $\theta_2$  角, 中心由  $C$  点到  $G$  点, 指示光斑落在投影面的  $N$  点。 $NI$  和  $IM$  距离分别记为  $a$  和  $b$ , 根据相似三角形原理可计算出  $a, b$  与  $\theta_1, \theta_2$  之间的转化关系。

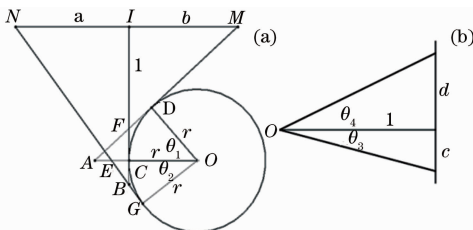


图 2 补偿角计算关系图。(a) 方位角; (b) 俯仰角  
Fig. 2 Framework of calculating compensation angle.  
(a) azimuthal angle; (b) pitch angle

根据图像识别中得出的指示光斑相对接收端中心的像素差可计算出实际的距离差  $a$  和  $b$ 。 $c, d$  为俯仰方向距离, 计算关系如下:

$$\begin{cases} a = l \tan \theta_2 - r / \cos \theta_2 + r \\ b = l \tan \theta_1 + r / \cos \theta_1 - r \\ c = l \tan \theta_3 \\ d = l \tan \theta_4 \end{cases} \quad (2)$$

#### 3.2 互瞄准过程

两平台瞄准是一个反复测量反复瞄准的过程, 在平台 1 瞄准后, 平台 2 的瞄准平台 1 的过程将会使平台 1 的前次瞄准产生误差。本文建立基于状态检测的循环系统, 循环框图如图 3 所示, 过程如下:

- 1) 平台 1 获取图片并计算指示光斑与目标中心的补偿角度。
- 2) 判断补偿角度是否小于设定值, 若是, 说明平台 1 已经瞄准, 转入 6)。
- 3) 根据方位、俯仰补偿角驱动平台 1 电机转动。
- 4) 检测平台 1 位置是否到位, 若否则继续执行 3)。
- 5) 平台 2 获取图片并计算指示光斑与目标中心的补偿角度。
- 6) 判断补偿角度是否小于设定值, 若是说明平台 2 已经瞄准, 结束。
- 7) 根据方位、俯仰补偿角驱动平台 2 电机转动。
- 8) 检测平台 2 位置是否到位, 若否则继续执行 7), 若到位则转入 1)。

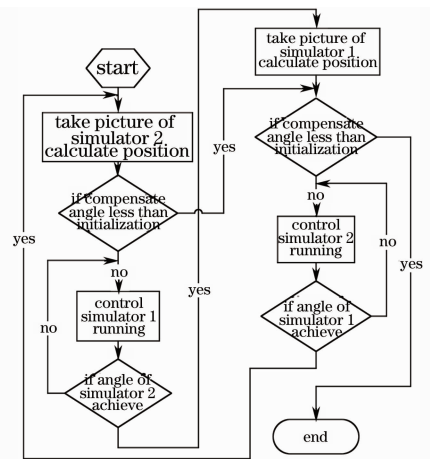


图 3 两平台互相瞄准流程图

Fig. 3 Flow chart of mutual collimation process

#### 3.3 玫瑰曲线扫描原理

目前, 信标光在不确定视场范围内常见的扫描方式有光栅矩形扫描 (Raster)、螺旋扫描 (Spiral)、矩形螺旋扫描 (Raster spiral) 和玫瑰扫描 (Rose)

等<sup>[14]</sup>。写其他几种扫描方式相比,玫瑰扫描在每个扫描周期内可以多次扫描中心区域,即目标出现高概率区域。但同时玫瑰扫描也存在周期长等缺点。

玫瑰型扫描以不同频率正弦(余弦)函数叠加的形式产生调制信号<sup>[15]</sup>,在直角坐标系中表示为

$$\begin{cases} x(t) = \frac{\rho}{2}[\cos(2\pi f_1 t) + \cos(2\pi f_2 t)] \\ y(t) = \frac{\rho}{2}[\sin(2\pi f_1 t) - \sin(2\pi f_2 t)] \end{cases}, \quad (3)$$

其中  $\rho$  为扫描范围,  $f_1, f_2$  分别为调制频率。

由玫瑰曲线的特点可以根据扫描范围和瞬时视场等参数设计玫瑰曲线中的频率  $f_1, f_2$ , 文献<sup>[15]</sup>中给出计算方法如下:

$$\omega = \frac{2\pi\rho}{N} \cos\left(\frac{\pi}{\Delta N}\right), \quad (4)$$

其中  $N = (f_1 + f_2)/f_R, \Delta N = (f_1 - f_2)/f_R, \omega$  为瞬时视场,  $f_R$  为  $f_1, f_2$  的最大公约数,  $N$  玫瑰曲线的花瓣数。

在完成图像瞄准后,启动玫瑰曲线扫描,当终端

发现信标光进入视场后模拟平台停止扫描,此时预瞄准过程结束,控制权交给通信终端。

## 4 实验研究

### 4.1 目标终端提取实验

取静止轨道模拟平台为例,图片尺寸  $480 \text{ pixel} \times 640 \text{ pixel}$ ,计算机配置为 P4 2.8 GHz CPU,512 MB 内存。首先对原始图片进行二值处理,对其应用“Sobel”边缘检测算子得到边缘处理结果,取图 1 虚线框部分作局部放大,如图 4(a)所示。根据前面识别出的标尺距离估计出目标圆相应的半径像素数为 12,调整搜索目标的半径范围。对图 4(a)作 Hough 变换得到识别结果和投票空间如图 4(b),图 4(c)所示,图 4(b)中目标圆心位置亮度最高,表示其得到票数最多,最有可能是要识别的圆心。图 4(c)表示了所有点的投票值,其圆心的投票值为 49,明显高于其他像素点,表明目标被很好的识别出来。所用时间 0.94 s,达到目标快速识别的要求。

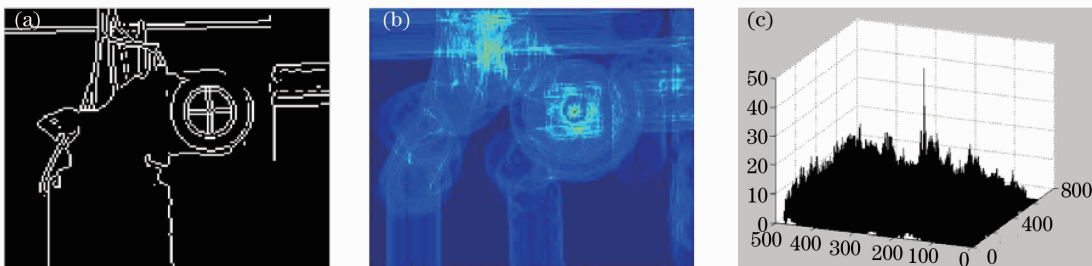


图 4 静止轨道平台识别效果图。(a)边缘处理结果;(b)Hough 变换识别结果;(c)Hough 变换投票空间

Fig. 4 Recognition results of GEO simulator. (a) detected edge result; (b) Hough transform result; (c) Hough voting space

在原始图像中加入‘salt and pepper’型噪声,按照上述方法重新识别,得到边缘检测结果如图 5(a)所示,得到变换结果和投票空间如图 5(b)和图 5(c)所示。由图 5(b)中可以看到算法对噪声点进行了计算和投票,因此一定程度上增大了计算量;由图 5(c)

可以看出目标圆的投票值为 34,虽然与无噪声相比有所降低,但仍明显高于其他像素点的投票值,目标圆仍被很好的识别出来。说明该算法抑制噪声能力较强。所用时间 1.26 s,这主要是由于噪声增大了 Hough 变换所检出的可能圆心数量,但时间增加不多

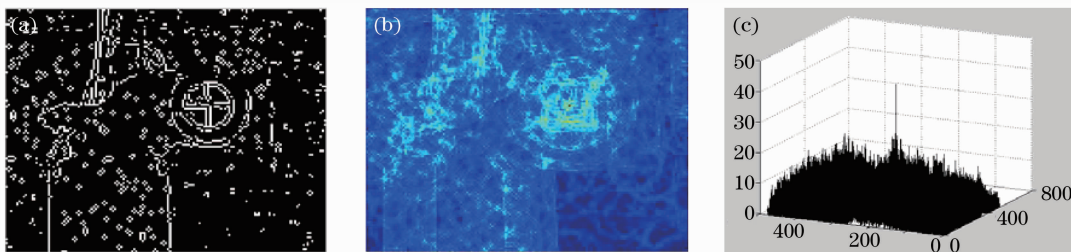


图 5 静止轨道平台加噪声识别效果图。(a)边缘处理;(b)Hough 变换识别;(c)Hough 变换投票空间

Fig. 5 Recognition results of GEO simulator added noise. (a) Detected edge result; (b) Hough transform result; (c) Hough voting space



仍可满足识别的要求。

#### 4.2 玫瑰曲线扫描实验

实验室环境下,假设扫描范围  $\rho$  为  $2^\circ$ ,瞬时视场为  $0.37^\circ$ 。则估算出  $f_1, f_2$  分别为 1.55 Hz 和 1.15 Hz,其最大公约数  $f_R$  为 0.05 Hz。

每个扫描周期内扫描出 54 瓣玫瑰曲线及测得的跟随误差如图 6 所示。其跟随误差(每个采样周期反馈位置与给定位置的差)的峰值为  $\pm 15''$ ,达到精密跟踪要求。

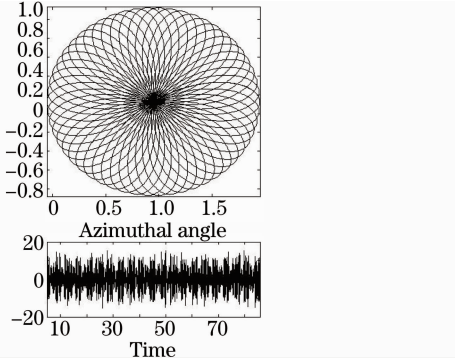


图 6 跟踪玫瑰曲线示意图

Fig. 6 Schematic of following rose curve

## 5 结 论

根据实验环境下根据卫星姿态模拟平台自动对准的要求,提出了一种基于图像识别的预瞄准方法。介绍了预估参数 Hough 变换和颜色特征分类的原理,并设计基于此原理的识别算法。给出了补偿角的计算公式及两平台互相瞄准的过程。最后,给出了静止轨道平台的图像识别结果和平台跟踪玫瑰曲线的轨迹及跟随误差。实验结果表明:该算法具有良好的抗噪声能力,计算时间为 0.94 s,达到了快速准确识别目标的要求。玫瑰曲线扫描的跟随误差小于  $\pm 15''$ ,能够保证终端捕获目标。该预瞄准方法为实验环境下的链路连接打下良好基础。

### 参 考 文 献

1 Liu Liren. Laser communications in space II test and verification techniques on the ground[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 147~155  
 刘立人. 卫星激光通信 II 地面检测和验证技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 147~155

2 A. Biswas, K. E. Wilson, S. Piazzolla *et al.*. Deep space optical communications link availability and data volume [C]. *SPIE*, 2004, **5338**: 175~183  
 3 Wu Feng, Zhou Yanping, Yu Siyuan. Bidirectional acquisition technology based on space imaging in inter satellite optical communications [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(6): 700~704  
 武 风,周彦平,于思源. 基于空间成像的卫星光通信双向捕获技术[J]. *光电子 • 激光*, 2006, **17**(6): 700~704  
 4 S. Lee, W. Aleander, G. G. Ortiz, Sub-micro radian pointing system design for deep-space optical communication [C]. *SPIE*, 2001, **4272**: 104~111  
 5 Chen Jing, Ai Yong, Tan Ying. Improved free space optical communications performance by using time diversity [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(11): 797~799  
 6 V. Sidorovich. Optical counter-measures and security of free-space optical communication links [C]. *SPIE*, 2004, **5614**: 97~108  
 7 Zhang Leihong, Yang Yan. The moving characteristics of directional driving motor in space tracking system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 332~336  
 张雷洪,杨 艳. 空间激光跟踪中指向驱动电机运动特性研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 332~336  
 8 V. Vilnrotter, C.-W. Lau, M. Srinivasan *et al.*. Optical array receiver for deep-space communications [C]. *SPIE*, 2004, **5338**: 163~174  
 9 Jin Pengfei. Improved algorithm for Sobel edge detection of image [J]. *J. Appl. Opt.*, 2008, **29**(4): 625~628  
 靳鹏飞. 一种改进的 Sobel 图像边缘检测算法 [J]. *应用光学*, 2008, **29**(4): 625~628  
 10 Zhao Guixia, Huang Shan. An improved randomized Hough method of circle detection [J]. *Computer Technology and Development*, 2008, **18**(4): 77~79  
 赵桂霞,黄 山. 一种基于随机 Hough 变换圆检测的改进算法 [J]. *计算机技术与发展*, 2008, **18**(4): 77~79  
 11 Shang Fei, Wang Fenggui, Tian Di. A method for circle detection based on right triangles inscribed in a circle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 739~743  
 商 飞,王丰贵,田 地. 一种基于圆内接直角三角形的圆检测方法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 739~743  
 12 Shu Zhilin, QI Feihu. A novel algorithm for fast circle detection using randomized Hough transform [J]. *Computer Engineering*, 2003, **29**(6): 87~89  
 束志林,戚飞虎. 一种新的随机 Hough 快速圆检测算法 [J]. *计算机工程*, 2003, **29**(6): 87~89  
 13 Zeng Jiankui, He Zishu, Mathini Sellathurai. Modified Hough transform for searching radar detection [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, **5**(4): 683~686  
 14 Yu Siyuan, Ma Jing, Tan Liying. Methods of improving acquisition probability of scanning in inter satellite optical communications [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(1): 57~62  
 于思源,马 晶,谭立英. 提高卫星光通信扫描捕获概率的方法研究 [J]. *光电子 • 激光*, 2005, **16**(1): 57~62  
 15 Y. H. Guo, Z. K. Qi. Estimation of IFOV of Rosette scan system [J]. *J. Beijing Institute of Technology*, 2000, **9**(3): 302~306