

## 光电目标快速捕获系统设计及其实验研究

肖永军<sup>1</sup>, 林贻翔<sup>2</sup>

- (1. 湖北工程学院 物理与电子信息工程学院, 湖北 孝感 432000;
2. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430079)

**摘要:** 在空间光通信系统中, 终端平台目标光的捕获技术是通信链路建立的一项关键技术。考虑到传统的扫描捕获方式, 系统捕获概率低、且耗时长, 不利于通讯系统链路建立, 因此提出采用 GPS 进行目标快速定位, 搭配水平和俯仰基准传感器, 利用 GSM 网进行无线传输, 进而辅助 APT 系统完成目标捕获的终端技术, 并建立了目标快速捕获系统。基于该系统开展了多项实验研究, 结果表明: 对于固定点捕获, 概率可达 100%; 对于模拟目标运动捕获, 当模拟转速增大时, 捕获平均时间增大, 捕获概率降低, 但仍然能维持在 60% 之上; 对于低速动态捕获, 也能较好地完成系统链路建立需求。

**关键词:** 快速捕获系统; 捕获概率; 水平和俯仰基准角

**中图分类号:** TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2312-06

## Design and experimental study of fast acquisition system for opto-electronic target

Xiao Yongjun<sup>1,2</sup>, Lin Yixiang<sup>2</sup>

- (1. School of Physics and Electronic Information Engineering, Hubei Engineering University, Xiaogan 432000, China;
2. College of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** In the free-space optical communication system, the acquisition technology of opto-electronic target for terminal platform is a key technology to establish a communication link. However, conventional scan method usually leads to low capture probability and the long time consumption, and count against the establishment of the communication link. So the GPS technology was adopted to complete the rapid acquisition, with the level and pitch reference sensor, and GSM network for wireless transmission was adopted. Finally, some acquisition experiments were done. The experimental results showed that the acquisition probability is 100% for fixed-point acquisition. For the simulated target acquisition, the increase of simulation speed could result in the increase of average time and the decrease of capture probability with minimum value of 60%; and the requirement for the link establishment can be satisfied for low-speed acquisition of the locomotive object.

**Key words:** fast acquisition system; acquisition probability; level and pitch reference angle

收稿日期: 2013-11-12; 修订日期: 2013-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(11204220); 湖北省自然科学基金(2013CFC006)

作者简介: 肖永军(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光电跟踪等方面的研究。Email: xiaoyongjun2003@126.com

## 0 引言

在空间光通信系统中,需要由捕获、跟踪和瞄准(Acquisition、Pointing and Tracking,APT)系统完成目标的初始捕获。在接收端,APT系统需根据目标光束的到达角度在一定范围内调节接收天线的视轴指向,从而改变光阑平面的法向量,使其瞄准在目标光场到达的方向上<sup>[1]</sup>。实际上因各种误差存在,通常将光束的到达角度调节到关于接收探测器探测面法向量的一个立体角以内,并达到一定的精度,即认为捕获完成<sup>[2-3]</sup>。

目前,在星间光通信中,“信标光+扫描”的捕获方式是一种相对较稳定的目标捕获方案,应用也最为广泛。其实质是采用发散角较大的信标光,采用一定的扫描方式对目标可能存在的不确定区域进行扫描,以完成捕获过程。近年来,国内外针对该类捕获技术进行一些的报道,如温涛<sup>[4]</sup>等以增加机械控制复杂度为代价提出了新的伺服系统步进扫描方式,并报道该方式具有捕获速度快、灵敏度高、搜索范围大等优点。陈兴林<sup>[5]</sup>等提出了能完全覆盖扫描不确定区域的必要条件,进而提出了抑制平台振动并能完全覆盖不确定区域的最少扫描点搜索算法。根据该算法编写程序对几种扫描方式进行了比较,得出了矩形扫描和矩形螺旋扫描方式点数最少且基本相同的结论。以色列的 Michael Scheinfeild<sup>[6]</sup>等提出了几种可应用于卫星间光通信的扫描方式,但对扫描方式的性能差别未进行分析。参考文献[7]建立了卫星间光通信中单场捕获的理论模型,分析了扫描中影响捕获的主要因素,如扫描范围、扫描行间距等。以上方法均在“信标光+扫描”的捕获方式上对扫描算法进行了相关改进,但因受捕获时间和捕获概率限制,其很难应用于较大的不确定空域目标捕获。近期,有报道采用GPS辅助APT系统完成光通信目标的初始捕获<sup>[8-11]</sup>,较大地降低捕获时间,同时提升了捕获概率,但均无详细的系统设计及实验数据报道。

针对于此,在实验室现有条件下,搭建了光电目标快速捕获系统,开展了GPS辅助捕获的理论及实验研究,并对实验数据进行了相关分析。

## 1 基于GPS定位的指向角计算算法

以单轴水平角计算为例,如图1所示, $n_A$ 是通信终端A自身视轴法线方向,其与正北方向的夹角为 $\theta_A$ ,在空间激光通信链路中,A端需要指向B端方可建立通信链路。

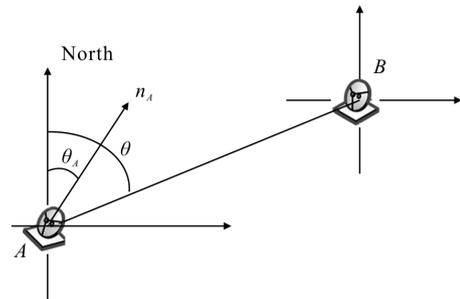


图1 实际调整角计算示意图

Fig.1 Sketch map for actual adjustment angle

使用GPS实时定位和无线传输系统进行坐标换算,计算相对调整角 $\theta$ 。由于自身终端的相对调整角 $\theta$ 是以视轴的正北和水平为基准,然而在实际应用中,终端指向不可能初始就指向正北和水平,还需实时测量A端通信机的初始俯仰和方位角。根据以上原理,最终A端指向B端的调整角为 $\pm\theta \pm \theta_A$ ,B端在A端的象限不同时,前端符号会相应地改变。

## 2 光电目标快速捕获系统设计

### 2.1 系统总体设计

系统设计框图如图2所示,整个系统由控制核心、电子罗盘、加速度传感器模块、GPS模块、和GSM模块组成,其中,控制核心为高性能STM32单片机,其通过SCI异步串行口1与上位机(TMS320F2812)相连,用于与上位机进行控制通信。电子罗盘模块KMZ51用于测量水平轴指向与正北的夹角,三轴加速度传感器用于测量自身终端俯仰轴与水平的夹角,两个角度测量模块分别采用I2C和SPI同步串口与Cortex-M3单片机进行通信,可为接收终端提供自身姿态参考信息。GPS模块用于负责通信终端定位(含通信双方终端),定位信息可通过单片机的SCI异步串行口2进行读取。GSM模块负责传输GPS的定位信息。

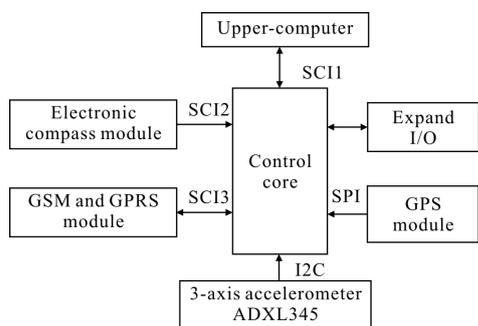


图 2 捕获系统设计总体框图

Fig.2 Overall diagram for acquisition system

## 2.2 正北基准传感器模块

正北基准角传感模块(电子罗盘)以高精度磁阻传感器 KMZ51 作为核心传感器。工程应用中,该电子罗盘输出引脚高电平电压及供电电压均为 +5 V,而控制核心 STM32 单片机和 TMS320F2812 外围引脚电压均为 +3.3 V,因此需要进行电平转换。考虑到 SPI 通信时钟不高,则选用三态缓冲器 74LS245 进行双向数据电平转换。以 74LS245 为核心的转换电路连接如图 3 所示,当片选  $\bar{G}$  为低电平时,DIR="0",信号由 B 向 A 传输;同理,DIR="1",信号由 A 向 B 传输。当  $\bar{G}$  为高电平时,A、B 均为高阻态。实际应用时,直接将  $\bar{G}$  端接地,设置为低电平,从而使 74LS245 处于使能状态,而且把方向控制位 DIR 接高电平,使数据传输方向设置为单向的 A 到 B 传输。

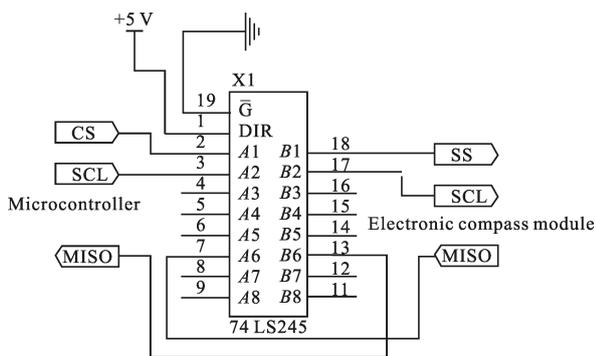


图 3 电平转换电路

Fig.3 Level switch circuit of reference sensor

## 2.3 系统设计软件流程

GPS 辅助捕获系统算法流程如图 4 所示,系统上电即刻对需使用到的 SPI、SCI 和 I2C 等外设进行初始化,之后进入等待状态。当控制核心接收到来自于 TMS320F2812 的数据请求命令时,则通过 SCI 口读取 GPS 模块,以获取自身终端的位置定位信息,

然后将该信息经由 GSM 模块传送至对方终端,同时请求对方定位信息。待接收到对方发送的 GPS 坐标信息之后,从 GSM 接收指令中提取对方 GPS 信息。等待将接收端和对方 GPS 信息整理完成后,再分别通过 SPI 接口和 I2C 接口读取电子罗盘和加速度传感器数据信息,以最终获取当前终端平台视轴指向的水平角和俯仰角信息。

待 GPS 定位和姿态角信息获取均完成之后,控制核心对该信息进行加工成一定格式的数据字节流(因 STM32 单片机计算小数精度较低,角度信息的计算则放置在 DSP 的计算任务中),通过 SCI1 口发送至上位机(TMS320F2812)。

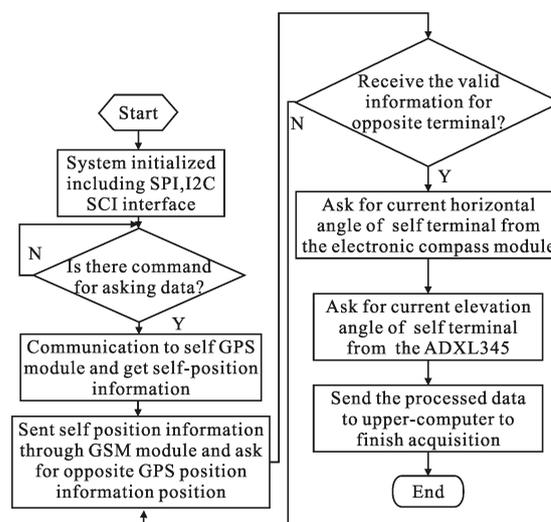


图 4 GPS 辅助捕获系统算法执行流程

Fig.4 Software flow chart for acquisition system

## 3 实验及结果讨论

### 3.1 实验系统及方案

基于上述设计并根据实验实际需求,搭建了快速捕获实验系统<sup>[12]</sup>,如图 5 所示,接收端与发射端为一体,光发射模块发出的信标光经部分光学元件,由卡塞格伦天线以一定的发散角打出,在对方(岳家嘴和东湖湖面上的船)终端上的角反射镜阵列发射回至接收端。

采取以下三种方式进行实验:固定点单向捕获、非机动目标动态仿真单向捕获和动态捕获。其中固定点单向捕获是指捕获双方静止不动(无相对运动),捕获端视轴指向初始位置给出任意偏差或者被捕获端处于不同的随机位置。动态仿真单向捕获实质为采用信标接收端底座下安装的一维旋转位移台的转

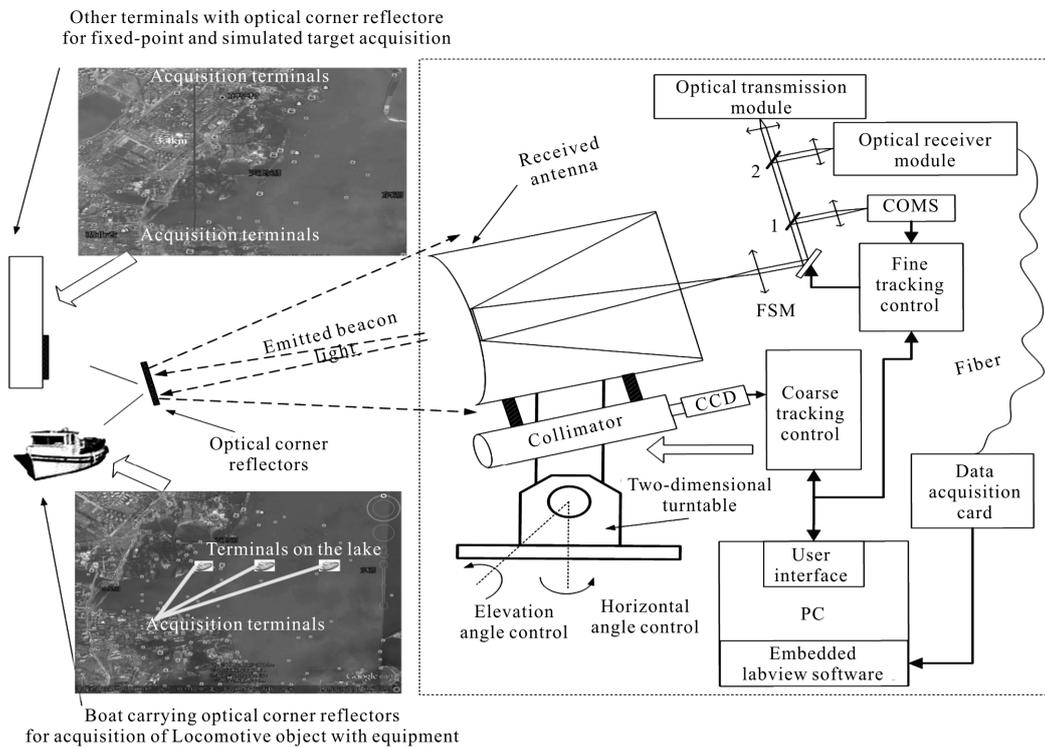


图 5 实验捕获系统示意图

Fig.5 Schematic diagram for experimental system

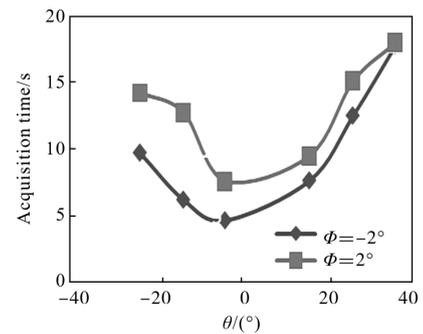
动模拟目标的运动,而真实被捕获目标则静止不动。动态捕获是指接收端(武汉大学工学部主教)固定不动,而信标发射端(东湖湖面船上终端,发射由反射镜阵列反射新标光)在一定区域以一定的速度移动,由于船以直线运行时,在接收端视场上的光斑则在 X、Y 两个方向上移动(真实二维运动)。

实验中,基于 GPS 的信标光+扫描的捕获过程如下:首先根据 GPS 信息计算相对调整角,从而完成初始调整——即指向对方终端的不确定区域的中心,如果期间发现目标,则结束捕获;否则进入第二步——启动扫描程序,系统以不确定区域中心为起点,依照一定步长进行矩形螺旋扫描搜索整个不确定区域,搜索完毕后,如果发现目标,则捕获结束,否则,认为捕获失败。

### 3.2 固定点单向捕获实验及数据分析

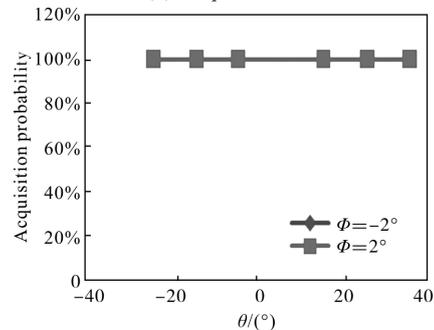
由于俯仰调整角的可调整范围有限,同时为减少初期实验量,分别在两个不同的俯仰调整角( $2^\circ$  和  $-2^\circ$ )下进行了固定点单向捕获实验,为增强数据可信度,记录的每次数据为同参数下的 10 次实验数据平均值。

实验数据如图 6 所示,无论如何变换实验参数,



(a) 捕获时间

(a) Acquisition time



(b) 捕获概率

(b) Acquisition probability

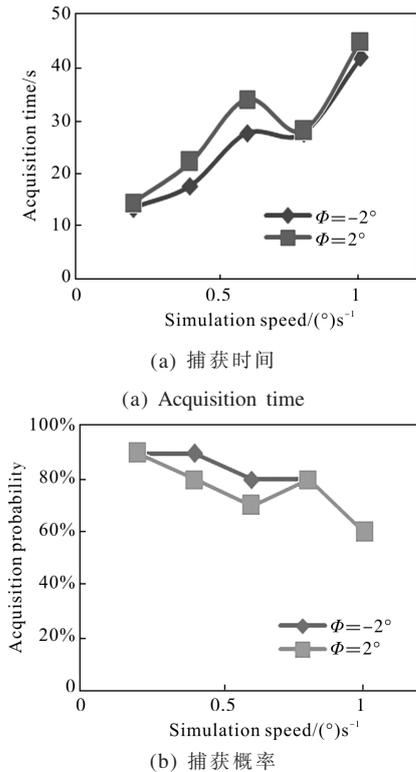
图 6 不同水平、俯仰调整角下单向定点捕获性能

Fig.6 Performance for single-direction acquisition with different horizontal angle  $\theta$  and elevation angle  $\phi$  to be adjusted

其捕获概率均为 100%。捕获实验中,捕获双方之间无相对运动,如采用 GPS 和自身姿态角信息计算实时调整后无目标,也可进入第二阶段(扫描程序),并通过设定扫描范围及步长,完全可以覆盖目标出现的不确定区域,因此可以达到 100%的捕获概率。由于调整初始指向偏差时采用模糊 PID 算法,针对不同调整角,捕获终端运动速度不一致,当调整角绝对量增大时,调整时间则需要相应的延长,但并非非线性关系,这一点从实验数据中也得到了证实。

### 3.3 非机动目标动态模拟捕获数据及分析

对于非机动运动目标动态模拟捕获,系统分别采用了 0.2~1.0(°)/s(步进速度 0.2(°)/s)五个不同的转台转速进行实验。实验数据如图 7 所示,当模拟转速增大时,捕获平均时间会相应的增加,最大增至 45 s;而捕获概率却随着降低,但是最终能维持在 60%之上;不同的俯仰调整角似乎对整个系统捕获概率及捕获时间影响不大,原因为初始调整过程中,终端视轴的水平角和俯仰角是同时调整的,当水平调整角远大于俯仰角时,其主要捕获时间由水平调整角大小决定。



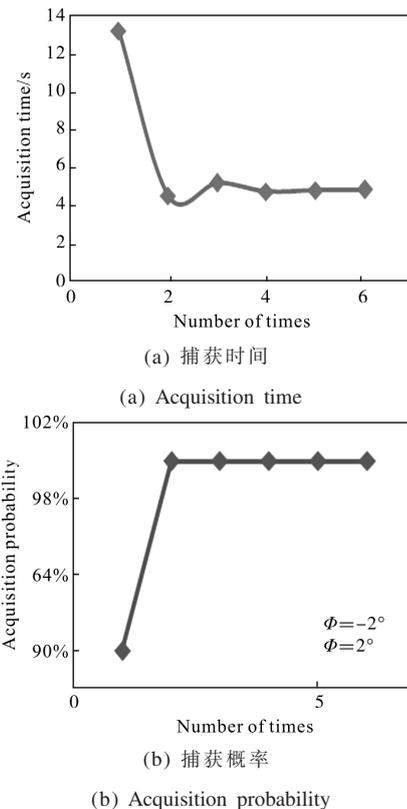
(a) 捕获时间  
(a) Acquisition time  
(b) 捕获概率  
(b) Acquisition probability  
图 7 仿真目标的捕获性能

Fig.7 Performance for simulated target acquisition

### 3.4 低速动态捕获数据及分析

由于动态捕获是在东湖湖面进行,信标接收端不动,而信标发射端运动。因此,采取以下方案,首次启动时,先进行一次捕获,待捕获完成后,信标接收端电机停止;当信标发射端因运动而从接收端 CCD 传感器视场内消失时,再次启动捕获,如此循环。由于条件有限,湖面运动目标恒定速度设置 0.5 m/s,而由于其运动反应在湖面上,不同的直线距离会导致在传感器视场内的角速度有一定的差别。

实验中,记录了循环 6 次的实验数据,其捕获概率及捕获时间如图 8 所示,可见,首次捕获所要耗费的时间较多,一旦成功后,后期由于目标就处于捕获端传感器视场周围,很容易扫描到,所以再次捕获时间短。此外,首次捕获概率稍微较低,而再次捕获的概率高,可达 100%。



(a) 捕获时间  
(a) Acquisition time  
(b) 捕获概率  
(b) Acquisition probability

图 8 低速移动目标的捕获性能  
Fig.8 Performance for low-speed acquisition of locomotive object

## 4 结论

针对搭建的空间光通信信标光快速捕获系统进行了固定点,匀速仿真目标和真实低速动态目标的

单向捕获实验,并得出以下结论:

(1) 对于固定点捕获,成功率为100%,捕获时间随调整角绝对值的增大而增大;(2) 对于非机动仿真目标捕获,当模拟速度增大时,会导致捕获时间延长及捕获概率降低;(3) 对于真实低速动态目标捕获,首次捕获耗时较多,也容易捕获失败,但是对于低速运动目标,捕获概率较高;(4) GPS辅助APT系统完成捕获,可较大幅度地提高捕获概率及降低捕获时间。

但是在实验中也确实遇到了一些问题,如基准传感器数据不稳定、精度不高,实验中仅为单向捕获,与双向捕获有一定的差距,这均是后期实验室研究的方向。

#### 参考文献:

- [1] Fedrizzi A, Ursin R, Herbst T, et al. High-fidelity transmission of entanglement over a high-loss free-space channel[J]. *Nature Physics*, 2009, 5: 389-392.
- [2] Ursin R, Tiefenbacher F, Schmitt-mandebach T, et al. Entanglement-based quantum communication over 144 km [J]. *Nature Physics*, 2007, 3: 481-486.
- [3] Xiao Yongjun, Liu Yanfei, Dong Ran, et al. Experiment study for ATP system of free-space optical communication [J]. *Optoelectronics Letters*, 2011, 7(12): 446-448.
- [4] Wen Tao, Wei Jibo, Ma Dongtang. A step scanning method for laser acquisition in atmosphere laser communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(6): 501-505. (in Chinese)  
温涛, 魏急波, 马东堂. 空间光通信中的步进扫描捕获方式研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(6): 501-505.
- [5] Chen Xinglin, Zheng Yanhong, Jia Qi, et al. Scanning acquisition process of optical communications [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009, 41(11): 34-38. (in Chinese)  
陈兴林, 郑燕红, 贾琪, 等. 星间光通信扫描捕获过程分析 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2009, 41(11): 34-38.
- [6] Michael Scheinf eild, Kopeika N S, Raviv Melamed. Acquisition system for micro satellites laser communication in space [C]//SPIE, 2000, 3932: 166-175
- [7] Yu Siyuan, Ma Jing, Tan Liying, et al. Experimental study of acquisition with antenna scanning in intersatellite laser Links [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, A29 (6): 498-502. (in Chinese)  
于思源, 马晶, 谭立英, 等. 激光星间链路中天线扫描捕获技术实验室模拟研究 [J]. *中国激光*, 2002, A29 (6): 498-502.
- [8] Zhao Xin, Wang Shifeng, Tong Shoufeng, et al. Technology on antenna acquisition for laser communication system between two ground stations [J]. *Optical Communication Technology*, 2008, 32(7): 62-64. (in Chinese)  
赵馨, 王世峰, 佟首峰, 等. 定点激光通信系统天线捕获技术[J]. *光通信技术*, 2008, 32(7): 62-64.
- [9] Zuo Tao, Ai Yong, Nie Guigen, et al. Research on acquisition and pointing in optical communication between satellite and ground station based on GPS [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2010, 21(8): 1184-1188. (in Chinese)  
左韬, 艾勇, 聂桂根, 等. 基于GPS的星地激光通信捕获对准研究[J]. *光电子·激光*, 2010, 21 (8): 1184-1188.
- [10] Lu Gang, Lu Yimin, Deng Tianping, et al. Automatic alignment of optical beam based GPS for free-space laser communication system[C]//SPIE, 2004, 5160: 432-438.
- [11] Yohan Shim, Stuart D Milner, Christopher C Davis. A precise pointing technique for free space optical links and networks using kinematic GPS and local sensors [C]//SPIE, 2007, 6709: 1-12.
- [12] Xiao Yongjun, Ai Yong, Shan Xin, et al. Experiment study for coarse tracking simulation of free-space optical communication between buildings in cities [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2011, 22(10): 1522-1527. (in Chinese)  
肖永军, 艾勇, 单欣, 等. 市内建筑物间无线光通信粗跟踪模拟实验研究 [J]. *光电子·激光*, 2011, 22 (10): 1522-1527.