

移动激光通信设备伺服稳定系统动态性能优化设计

徐林,蒋祖运,杨乾远,安建欣,申永,蒋宇潇

(中国电子科技集团公司第三十四研究所,广西桂林 541004)

摘要:为提升移动激光通信设备“动中通”环境下二维伺服稳定系统的稳定性,采用陀螺仪安装校正优化方法、电荷耦合器件(CCD)质心优化算法和陀螺仪与 CCD 同向小值快速收敛方法对二维伺服稳定系统的动态性能进行了优化。将优化后的系统通过搭载在六轴摇摆台上在模拟动态环境下使用,验证伺服稳定系统在不同幅值、不同频率的激励条件下稳定性的好坏。试验结果证明:经过优化设计后的系统接收功率波动范围明显变小,同等激励条件下伺服系统的稳定精度得到了明显改善,至少提高 27%以上。

关键词:移动平台;移动激光通信设备;二维伺服稳定系统;稳定精度

中图分类号:TN914 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)08-0038-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.08.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Dynamic performance optimization design of servo stability system for mobile laser communication equipment

XU Lin, JIANG Zuyun, YANG Qianyun, AN Jianxin, SHEN Yong, JIANG Yuxiao

(The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: In order to improve the stability of two-dimensional servo stability system in mobile laser communication equipment "communication in motion" environment, in this paper, gyroscope installation and correction optimization method, charge coupled device(CCD) centroid optimization algorithm, fast convergence of small values in the same direction of gyroscope and CCD and other methods are used to optimize the dynamic performance of the two-dimensional servo stability system. The optimized system is installed on a six-axis swing table to simulate the dynamic environment, so as to verify the stability of the servo stability system under the excitation conditions of different amplitudes and frequencies. The experimental results show that the receiving power variation range of the optimized system is significantly reduced, and the stability accuracy of servo system is improved by at least 27% under the same excitation condition.

Key words: mobile platform; mobile laser communication equipment; two-dimensional servo stability system; stable accuracy

0 引言

近地移动激光通信设备通常搭载在车辆、舰船和飞机等移动平台上实现“动中通”,为了克服外界环境干扰造成激光通信设备接收光功率抖动甚至无光,设备常使用二维伺服稳定系统来隔离干扰。随着通信环境向大容量、长距离和移动平台多样化变化^[1],移动激

光通信设备对二维伺服稳定系统提出了更高的抗湍流、抗雨雾和抗平台振动的稳定要求,一般动态跟踪时的稳定精度需达到微弧度量级。因此,本文提出几种优化算法用于改善二维伺服稳定系统的稳定精度,让系统始终维持在视轴稳定状态。

1 伺服稳定系统工作原理与速度闭环

伺服稳定系统是使设备负载由旋转变压器、陀螺仪反馈的位置和速度等输出被控量能跟随目标视轴任意变化的自动跟踪系统,其系统工作原理图如图 1 所示。该系统根据移动激光通信设备使用的功能分为位置环和速度环 2 种控制模式。在位置环控制模式下,旋转变压器反馈的角度与目标角度比较后传入位

收稿日期:2020-02-24。

作者简介:徐林(1980—),男,河北省石家庄人,学士,高级工程师,主要研究方向是激光通信、伺服控制等方面。负责完成和即将完成国家级、省部级项目 10 余项,获省部级科技进步一等奖 2 项、省部级科技进步三等奖 3 项。



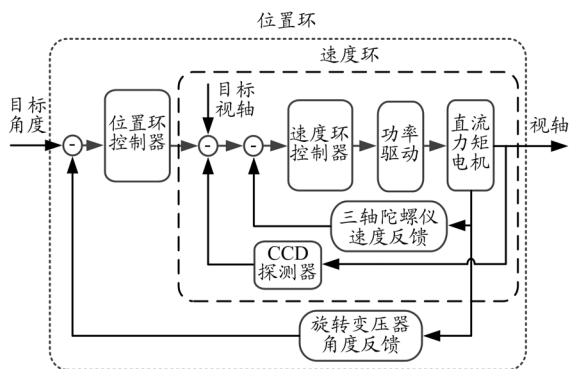


图1 伺服稳定系统工作原理

置环控制器运算,最终经过速度环控制器、功率驱动模块来驱动电机。由于旋转变压器具有动态响应慢、精度高等特点,此闭环控制模式被用于移动激光通信设备的指向、扫描和捕获。当捕获完成后,视轴进入电荷耦合器件(CCD)探测器的视场,伺服稳定系统进入速度环控制模式。在该模式下,陀螺仪反馈的数据与CCD探测器采集的数据比较后进入速度环控制器、经功率驱动模块后驱动电机。由于陀螺仪的动态响应快、精度高,因此需使用速度环实现视轴跟踪功能。

移动激光通信设备的跟踪性能取决于速度环的控制效果,速度环闭环控制流程框图如图2所示。当主控芯片获得陀螺仪与CCD探测器的数据后与初始阈值比较,再进行比例积分(PI)运算产生脉冲宽度调制(PWM)信号控制二维伺服稳定系统,最终将信

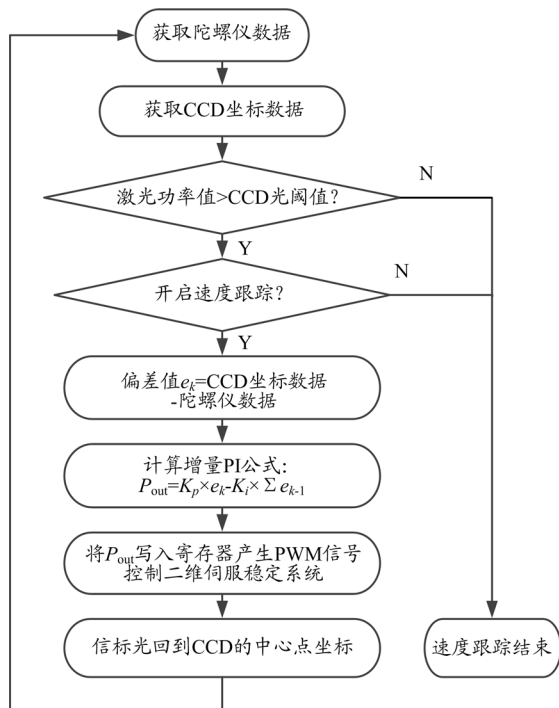


图2 速度环闭环控制流程框图

标光的光轴稳定控制到CCD的中心点坐标上。在闭环控制过程中,如何优化陀螺仪与CCD探测器在动态环境下采集数据的准确性、减小数据误差值,是改善和提高整个系统稳定性好坏的关键。

图2中, e_k 是速度基本偏差, $\sum e_{k-1}$ 是速度累积偏差, K_p 是比例系数, K_i 是积分系数, P_{out} 是总偏差量。

2 陀螺仪安装校正优化方法^[2]

陀螺仪是二维伺服稳定系统重要的角速度传感器件,它所采集到的数据的准确性将直接影响伺服系统的稳定性。由于陀螺仪安装过程中会存在一定的机械安装误差,造成各轴之间的角速度数据采集值存在一定的耦合效应关系,数据准确性降低。这会对二维伺服稳定系统的视轴稳定性带来较大的影响,所以需要在陀螺仪机械安装完成后,进行安装校正优化算法处理,从而尽量减小机械安装误差所带来的影响。

本文给定俯仰轴(Y轴)速度,使俯仰电机以指定的速度旋转,从而获得陀螺仪3个轴的角速度反馈值,如表1所示。

表1 Y轴运动的耦合数据

给定俯仰轴 角速度/(°/s)	陀螺仪 X 轴 角速度/(°/s)	陀螺仪 Y 轴 角速度/(°/s)	陀螺仪 Z 轴 角速度/(°/s)
-10	-0.0555	10.0557	0.1349
-20	-0.0751	20.006	0.181
-40	-0.0752	39.9739	0.322
-80	-0.0838	79.7597	0.5797
-100	-0.0977	99.6696	0.7085
-120	-0.1024	119.5587	0.8447
-140	-0.1023	139.4556	0.9735
-160	-0.1119	159.3264	1.1127
-200	-0.1334	199.1273	1.371

根据表1数据绘制的耦合误差曲线图如图3所示,可以看出随着Y轴角速度增加,耦合到X轴的角速度由-0.0555 %/s减少到-0.1334 %/s,耦合到Z轴的角速度由0.1349 %/s增加到1.371 %/s。由此可见,陀螺仪Y轴角速度对另两轴角速度存在较大的耦合效应。

本文采用同样的方法,给方位电机设置恒定速度旋转时,可以获得方位轴(X轴)对另外两轴的耦合数据以及横滚轴(Z轴)对另外两轴的耦合数据。将采集的数据用最小二乘法拟合出一个标定函数矩阵,即可消除相应的安装误差。标定矩阵函数如式(1)所示,

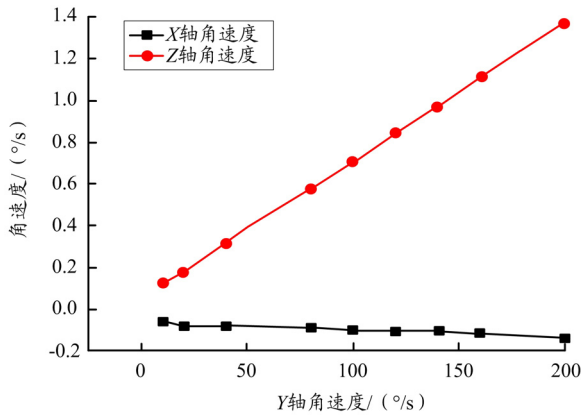


图3 Y轴运动对X轴和Z轴的耦合

$\overline{\omega}_x$ 、 $\overline{\omega}_y$ 和 $\overline{\omega}_z$ 是标定前的3个轴的角速度, ω_x 、 ω_y 和 ω_z 是标定后的3个轴的角速度。

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0003 & 0.0004 & -0.0003 \\ -0.0007 & 1.0042 & 0.0047 \\ 0.0016 & -0.0066 & 1.0023 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \overline{\omega}_x \\ \overline{\omega}_y \\ \overline{\omega}_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

本文将式(1)写入优化算法中,采用与前文相同的测试方法,加给俯仰轴(Y轴)相同旋转角速度后,测量陀螺仪另外两轴(X轴与Z轴)角速度反馈值,根据反馈值绘制出Y轴对X轴与Z轴的耦合数据曲线图,如图4所示。可以看出,随着Y轴角速度增加,耦合到X轴的角速度基本保持在0~0.0152°/s范围内,耦合到Z轴的角速度基本保持在-0.0122~0°/s范围内,这表明各轴间耦合效应被明显抑制,数据采集误差变小。

本文对X轴、Z轴采用同样的优化算法处理,耦合误差也得到了很好的抑制。因此,通过试验证明,经过陀螺仪安装标定优化算法后,二维伺服稳定系统在速度环控制模式运行下,各轴角速度数据采集耦合效应明显被抑制,数据准确性得以提高,系统视轴的稳定性得到了显著改善。

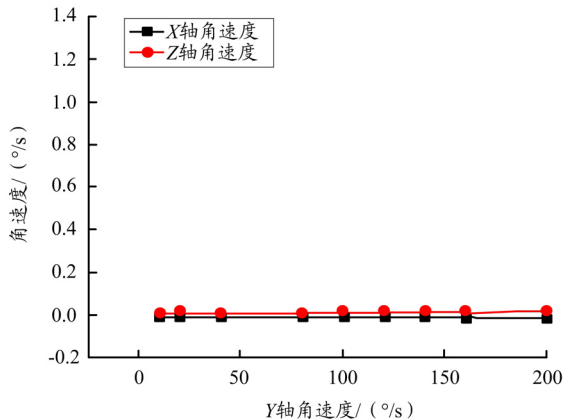


图4 标定后Y轴运动对X轴和Z轴的耦合

3 CCD 质心算法优化方法^[3-4]

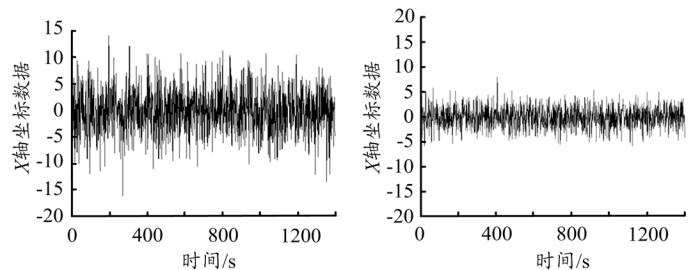
移动激光通信设备主要采用CCD探测器来实现跟踪,从而保证设备始终处于实时稳定跟踪对准状态。但在以往的室外试验中发现,由于激光光束易受近地大气信道能见度、气流湍流等因素影响,CCD探测到的光斑常会出现曝光过强、过弱或光斑跳跃较大等现象,致使CCD采集到的数据误差较大,造成移动激光通信设备二维伺服稳定系统的稳定性变差,设备无法始终保持在稳定跟踪状态。因此,需要对CCD采集到的数据进行算法上的优化处理,以及对速度环PI参数准确调整,来确保CCD采集到的数据的准确性,从而实现二维伺服稳定系统视轴实时保持稳定。

本文在获取CCD图像坐标数据后,采用质心算法来减少信标光光斑坐标数据的采集误差,质心坐标算法公式^[5]为:

$$\begin{cases} x_c = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} x_i \times I_{ij}}{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} I_{ij}} \\ y_c = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} y_j \times I_{ij}}{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} I_{ij}} \end{cases} \quad (2)$$

其中,CCD光斑的像素为 $m \times n$, I_{ij} 为CCD图像上的每一个像素点接收到的光强, x_i 、 y_j 为每一个像素点的坐标, x_c 、 y_c 是计算后的光斑中心点坐标。

为了验证方法的可行性,试验过程中,当移动激光通信设备发射30 dBm信标光功率时,CCD探测器过度曝光成像,此时记录下CCD探测器采集到的坐标数据,如图5(a)所示。加入CCD质心算法优化后,仍然发射30 dBm的信标光功率发射,并记录坐标数据,结果如图5(b)所示。经过对比发现,通过质心算法优化处理后,在同样的试验条件下,CCDX轴坐标数据跳



(a) 优化处理前

(b) 优化处理后

图5 质心算法优化前、后CCD探测器采集的坐标数据

动得到了明显改善,与优化前的视轴稳定性相比,性能得到了很好的提高。

4 陀螺仪与 CCD 同向小值快速收敛算法

CCD 采集的数据经过质心算法优化后,虽然数据误差值得到了明显改善,但在雨、雾和湍流等环境因素的影响下,CCD 呈现的光斑图像还是会受到一定影响,并且随环境因素变差,光斑跳动变大^[9]。同时,由于设备搭载平台随时在移动,二维伺服稳定系统中陀螺仪采集到的角速度数据也在随时变化。在闭环控制条件下,陀螺仪与 CCD 采集到的数据都会关系到系统瞄准视轴的稳定性。因此,如果出现陀螺仪与 CCD 数据矢量方向往一个方向叠加,且陀螺仪对视轴影响比较大时,需要将 CCD 数据进行快速收敛;反之,CCD 数据对视轴影响比较大时,需要将陀螺仪数据进行快速收敛,让系统的视轴快速地恢复到稳定状态。该算法流程图如图 6 所示。

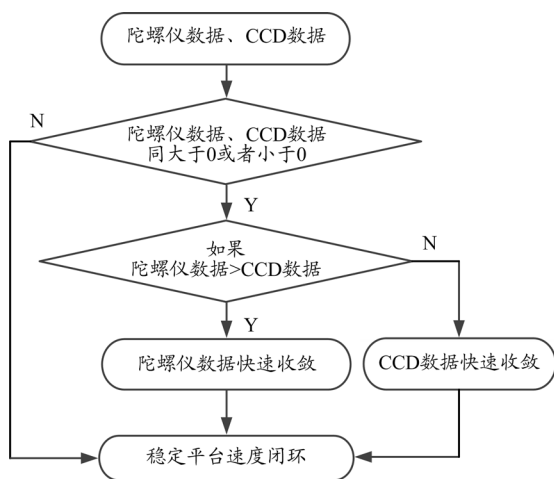


图 6 陀螺仪与 CCD 同向小值快速收敛算法流程图

为了验证该算法的有效性,在尽量减少振动干扰和其它控制误差的试验环境下,本文将 2 台移动激光通信设备拉开一定距离做 2 组通信跟踪试验。其中,一组是在没加入该算法的情况下采集试验数据,由于大气信道的影响,CCD 采集到 X 轴坐标数据如图 7(a)所示;另外一组为加入该算法后,在同样的试验条件下,CCD 采集到 X 轴坐标数据如图 7(b)所示。通过对比 2 组数据可以看出,快速收敛算法对大气信道带来的数据采集误差有良好的抑制效果,二维伺服稳定系统的视轴稳定性得到明显改善。

经过以上优化算法后,只需要对陀螺仪的卡尔曼滤波系数、速度环 PI 参数进行微小的调整,即可让整个系统达到更好的动态跟踪效果。

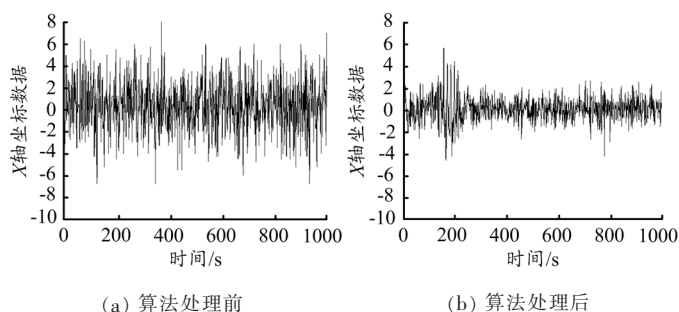


图 7 算法处理前、后的 CCD 相机 X 轴坐标数据变化

5 试验测试与效果

为了验证优化设计的实际使用效果,本文将 2 台移动激光通信设备外场拉远 15 km,开展了设备稳定跟踪性能测试。其中,一台搭载在六轴摇摆台上,模拟设备在移动平台摇晃与振动环境下使用。由于六轴摇摆台可数字化控制每个轴的运动角度和频率,因此更能接近在真实移动平台上的搭载效果。搭载环境如图 8 所示。



图 8 六轴摇摆台搭载条件下测试试验现场照片

试验过程中,在同样的大气信道环境下,当两端移动激光通信设备处于跟踪通信状态时,分别开展了加入优化设计前、后的 2 组试验,2 组设备处于动态环境下进行稳定跟踪性能测试。在六轴摇摆台幅值、振动频率参数设置选择上,本文参考各种移动平台的特点进行了设定。例如,舰船平台通常具有大幅值、低频率的特点,一般选用幅值(频率)分别为 8° (0.33 Hz)、 10° (0.2 Hz)和 20° (0.1 Hz)的摇摆来模拟舰船平台搭载环境;飞机和车辆平台具有小幅值、高频率的特点,

徐林, 蒋祖运, 杨乾远, 等: 移动激光通信设备伺服稳定系统动态性能优化设计

因此, 选用 $1^{\circ} 2 \text{ Hz}$ 、 $3^{\circ} 1 \text{ Hz}$ 和 $6^{\circ} 0.5 \text{ Hz}$ 的摇摆来模拟飞机、车辆平台的搭载环境。每一个频率下的摇摆试验进行 10 min, 获取 1000 个 CCD 光轴坐标数据, 把采集的数据基于数理统计的方法进行 1σ 标准差方法计算, 统计各个频率下加入优化设计前、后的标准差, 结果如图 9 所示。

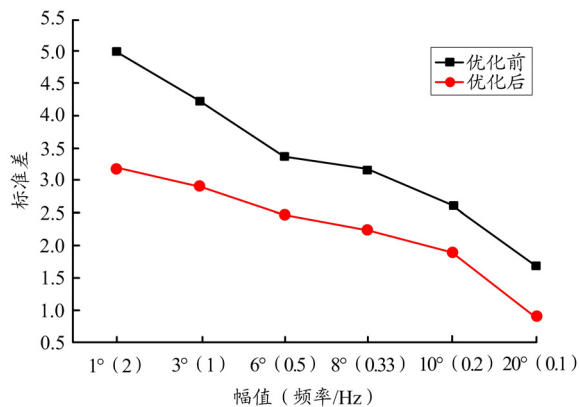


图9 加入优化设计前、后不同频率平台摇摆下的 CCD 光轴标准差

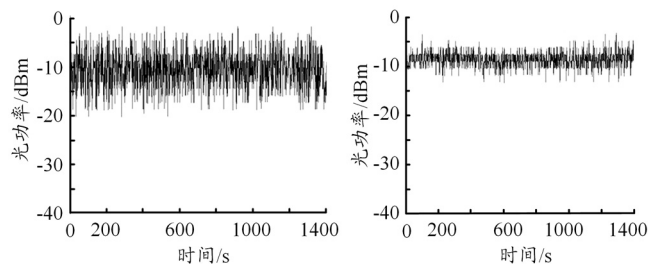
从图 9 可以看出, 在同一幅值和频率下, 优化后的视轴变化明显低于优化前的视轴变化; 在不同幅值和频率下, 小幅值、高频摇摆下的视轴变化大于大幅值、低频摇摆下的视轴变化。

在光学系统中, 每一个 CCD 像素点对应 $21 \mu\text{rad}$ 视轴偏转角。因此, 本文可以计算出一个标准差下的视轴偏转角度, 然后用优化设计前的 CCD 光轴偏转角度减去优化设计后的 CCD 光轴偏转角度得到一个差值, 再把这个差值与优化前光轴 CCD 偏转角度相除, 便得到视轴稳定精度提升率, 如表 2 所示。可以看出, 二维伺服稳定系统的视轴稳定精度提高了 27.18%~49.30%。

表2 激光轴在 1σ 标准差下优化前、后的 CCD 光轴坐标

幅值 (频率/Hz)	未优化 CCD 光轴 坐标标准差值 (偏转角度/ μrad)	优化后 CCD 光轴 坐标标准差值 (偏转角度/ μrad)	视轴稳定 精度提升/%
$1^{\circ}(2)$	5.0033(210)	3.1947(134)	36.19
$3^{\circ}(1)$	4.2398(178)	2.9196(122)	31.46
$6^{\circ}(0.5)$	3.3832(142)	2.4699(104)	27.47
$8^{\circ}(0.33)$	3.1851(133)	2.2466(94)	29.32
$10^{\circ}(0.2)$	2.6353(111)	1.8984(80)	27.18
$20^{\circ}(0.1)$	1.6956(71)	0.8736(37)	49.30

当二维伺服稳定系统的瞄准视轴越稳定, 移动激光通信设备接收到的信号光功率就会越稳定。因此, 本文在试验中各采集了优化设计前、后 2 组 1400 个信号光功率的数据, 得到优化设计前、后的信号光接收功率图, 如图 10 所示。可以看出, 优化后的光功率变化明显小于优化前的光功率变化, 即从另一个角度再次验证了在动态环境下, 二维伺服稳定系统的视轴稳定性能得到了显著改善。



(a) 优化设计前

(b) 优化设计后

图10 优化设计前、后设备接收的信号光功率变化波动图

6 结束语

移动激光通信设备由于具有大容量、抗干扰和高保密等特点, 得到了越来越多人的关注, 但在长距离、不同平台动态环境下使用的稳定性是急需解决的关键问题。本文对影响设备伺服系统稳定性能的各数据参数采集环节进行了优化设计, 通过试验证明了优化设计提升了二维伺服稳定系统的稳定精度。下一步将会对这些关键技术进行更加深入的研究和解决, 在满足大容量、长距离的前提下, 将移动激光通信设备更好地应用于舰船、飞机和车辆等移动平台上。

参考文献:

- [1] 徐林, 申永, 安建欣, 等. 一种无人机机载激光通信设备的研制[J]. 光通信技术, 2018, 42(10): 60-62.
- [2] 范建英, 李杰, 陈文蓉, 等. 高精度数字陀螺仪安装误差标定与补偿方法[J]. 传感技术学报, 2013, 26(4): 525-529.
- [3] 裘兆炳, 艾勇, 单欣, 等. 激光通信 APT 远程控制系统[J]. 光通信技术, 2018, 42(11): 41-44.
- [4] 袁建国, 袁艳涛, 刘飞龙. MEMS 陀螺仪的一种新颖高精度标定算法研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2014, 26(5): 666-669.
- [5] 王轩. 基于 DSP 的光通信 APT 跟踪系统的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2007.
- [6] 吕利霞. 飞机与地面间激光通信 APT 系统引导方法研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2006.