

一种空间可展开天线天基光学监视系统

孙洋, 李杰, 张舸, 马伟, 邱乐德

(西安空间无线电技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 为了大型可展开天线可靠、精准地在轨展开, 研究了一种天基光学监视系统。通过该系统不但可以实时监测天线展开情况, 还可以进行天线展开的动力学分析, 为大型可展开柔性机构设计、异常发现与分析等提供必要信息。在分析系统任务特点的基础上, 介绍了监视系统方案, 包括相机方案、视频传输方案、图像处理及射频调制方案, 并对运动目标图像检测识别技术以及展开动力学分析技术等系统关键技术进行研究, 进行了运动目标图像识别试验和天线展开动力学分析试验。试验结果证明系统对天线靶标的运动识别以及靶标动力学分析有很好的效果, 证明了该系统可以有效地完成大型可展开天线的监测任务。

关键词: 光学监视系统; 空间可展开天线; 关键技术; 试验

中图分类号: V474 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3304-06

Space visual-monitor system for deployable antenna

Sun Yang, Li Jie, Zhang Ge, Ma Wei, Qiu Ledu

(Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: To establish large deployable antenna reliably and accurately in space, a space visual-monitor system was researched. Using the system, the deployment of the antenna could be monitored real-time, and an analysis was made for dynamics on the deployment process, which was very necessary for designing large flexible deployable structures, detecting the anomalies and analyzing the possible reason. Based on the research on system task, the system project was introduced, including camera choice, visual information transfers way, image processing method and analog modulating scheme. Not only the key technology was researched, including image detection and recognizing for moving target and deploying dynamics analysis way, but also the validity of the technology by experiment was verified. The result of the experiment proved the space visual-monitor system including the key technology could complete the task of monitoring, measurement and analysis.

Key words: visual-monitor system; space deployable antenna; key technology; experiment

收稿日期: 2015-03-05; 修订日期: 2015-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(11402196)

作者简介: 孙洋(1982-), 男, 硕士, 主要从事卫星通信系统设计方面的研究。Email: mydog916@126.com

0 引言

为了提高空间天线增益,获取更好的通信效果,减小地面终端的尺寸,大型可展开天线已经应用于各类航天器上。由于可展开天线的口径很大(十余米甚至数十米),展开机构和网面处理十分复杂,在轨展开过程中具有一定风险。天基光学监视系统对于大型可展开天线可靠、精准地展开十分必要,其不但可以对天线的展开过程实时监视,确定天线展开过程是否顺利及展开到位与否,还可以获取微重力条件下复杂柔性机构的动力学信息,对于设计大型柔性机构的提供必要的在轨数据^[1-3]。

尽管使用张力传感器和速度传感器是获取可展开天线的动力学特征的直接方法,但由于大型可展开机构具有很大的自由度,必须采用大量的传感器才能全面监测展开状态,而在展开过程中,数量巨大的传感器本身就会对天线的展开造成一定的影响,而且大量的传感线路也是顺利获取信息的不稳定因素。

与张力传感器和速度传感器相比,应用天基光学监视系统有如下几个优势,首先,不需要大量的传感线路,降低了系统复杂性并提高了可靠性;其次,光学监视系统可以独立于展开机构,对于天线展开没有影响;再次,监视信息可以很方便地与其他方式相结合,对天线展开进行多角度信息获取^[4-5]。实际上,除了大型可展开天线之外,天基光学监视系统已经越来越多地应用于各类空间系统,具体如下:

(1) 神舟飞船系列:神舟 5 号以后,神舟系列飞船都采用了视频监视系统,除了监视生活舱、星箭分离等过程外,神舟 7 号还配置了一台相机,专门监视宇航员舱外活动情况;(2) 嫦娥系列:嫦娥二号卫星搭载 3 台监视相机,用来监视星箭分离、太阳翼展开、发动机点火等关键飞行动作,监视卫星飞行过程中的重要活动;嫦娥三号着陆器和玉兔号月球车,都配备了多台相机,实时或准实时传输设备图像和月球表面图像。

1 光学监视系统任务特点

与其他航天监视系统相比,大型可展开天线光学监视系统有如下特点:

(1) 视场范围大

由于天线机械口径很大(十几米甚至数十米),

而且监视相机距离观察目标变化比较大,从最远点的数十米到最近点数米,相差十几倍,因此要求相机视场范围大,如何使相机在覆盖宽视场的同时保证视场失真最小,是一个需要解决的问题^[4-7]。

(2) 高精度运动特性分析

一般监视系统的主要关注内容为刚性目标的轮廓信息,动力学特性简单,易于分析。对于大型可展开天线来说,由于反射面多为柔性,具有大范围透光特性,动力学特性复杂,在像素不高的条件下(受制于相机等),对监测对象进行高精度运动特性分析,难度很大^[6]。

(3) 小型化、轻型化

监视功能属于大天线展开的辅助设备,小型化、轻型化要求高。

2 光学监视系统方案

2.1 相机选择及配置方案

相机的方案需要从视频效果、采集数据量大小、技术继承性、工程实现可行性等角度考虑。为了确定相机方案,进行了模拟天线展开的视频采集试验,对试验结果分析表明,采用分辨率为 xx 万像素的黑白 CMOS 相机可以满足天线展开过程监视的任务要求,技术成熟,可靠性高。在工程实现上,考虑到会有数小时的太阳光进入相机视场,为避免过强光照影响图像传感器、损伤成像器件,还采取了增加挡光片、滤光片等方案,保证既能抗太阳光长时间照射,又不影响对天线成像。

为了实现对大型天线网状反射面、展开机构的全方位监视,扩展视场范围,保证监视内容的完整性,系统需要配置多台相机,通过对相机的布局和视场进行设计和仿真,确定了相机的数量、布局等配置方案。

2.2 视频传输方案

从系统小型化、轻型化、低功耗等角度考虑,监视系统对地数传通道和天线借用测控通道相关设备。由于测控通道的数据传输能力有限,必须尽可能的降低数据速率才能借用该通道进行图像数据传输。

结合相机像素、帧速率、量化位数、相机数量,可得到视频原始数据率为数十兆,如此高的数据速率对地实时传输对系统压力很大,因此考虑从采用视频压缩和分时传输两个方面降低数据速率。

分时传输需要制定传输策略，保证最需要的数据及时下传，并将不能实时传输的数据进行存储以保证数据不丢失。

对于视频压缩，目前可选的通用编码方案有 MPEG-2/MPEG-4/H.263/H.264 和静态压缩等，压缩方案的选择，一方面争取较大的压缩比，一方面保证视频图像的质量。

2.3 图像处理与发射方案

相机产生的数据，被压缩后，需要经过传输控制、格式封装、存储、编码等处理，调制到工作频段，这部分工作由监视系统的图像发射机完成，监视系统的数据流程如图 1 所示。

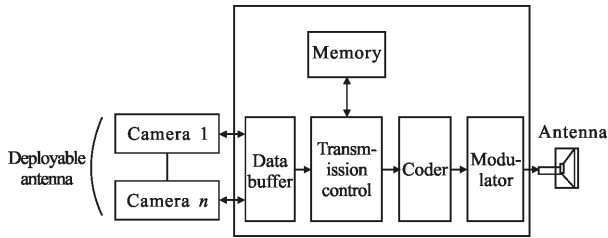


图 1 监视系统数据流程图

Fig.1 Monitor system data flow

2.4 系统工作流程

天线展开过程监视系统工作流程如图 2 所示。

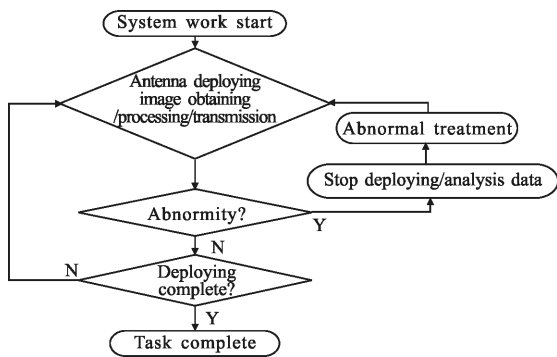


图 2 监视系统工作流程图

Fig.2 Monitor system work flow

3 系统关键技术

3.1 运动目标图像检测识别技术

天线反射面是柔性材质，为了监测天线展开过程并确定展开是否到位，需要在天线反射面轮廓和发射面骨架处设置靶标作为关键点，以此来监测目标的运动情况。对于光学监视系统来说，靶标的运动

目标检测和识别是监视能否顺利完成的关键所在。要正确监测天线靶标的运动和位置，首先要求监视图像中靶标具有足够的分辨率，满足检测要求；其次，靶标与背景要有一定的区分度，这要求能获得高质量图像并具有高的图像对比度；最后，有效的运动目标检测识别算法也十分重要，既要保证能准确检测到有效目标，降低漏检率和误检率，又要保证检测到的位置精度达到检测指标要求。

3.1.1 图像互相关算法

利用设置的靶标，通过计算相关图像与采样图像的互相关，可以实现运动目标检测和识别，具体方法如下：

(1) 获取相关图像 A ， $A(i, j)$ 表示第 i 行、第 j 列相关图像像素（靶标位置）；(2) 获取采样图像 B ， $B(i, j)$ 表示第 i 行、第 j 列采样图像的像素，要求 B 与 A 的时间间隔足够短，保证靶标仍在图像范围内；做图像 A 与图像 B 的互相关，公式如下：

$$C(m, n) = \sum_{i=M_1}^{M_2} \sum_{j=N_1}^{N_2} A(i, j) \cdot B(i+m, j+n) \quad (1)$$

式中： $C(m, n)$ 为相关图像 B 移动 m 行和 n 列后和采样图像 A 的互相关。假如 $C(m, n)$ 在 m_0 和 n_0 处具有一个峰值点，则以一个像素的精度，用 m_0 和 n_0 确定对象的位置。

3.1.2 检测识别试验

为了验证图像互相关算法的有效性，确定分辨率能否满足检测识别需求，确定背景对比度、图像模糊程度对检测识别的影响，进行了检测识别试验，图 3~图 5 为运动目标检测识别结果图，图中 3 个亮点为靶标。

目标像素：16×16；背景对比度：20%、35%、50%、70%；高斯半径（目标向外模糊数值的大小）：0.5、1、1.5、2；图像信噪比：5 dB、10 dB、15 dB、20 dB。

表 1 不同背景对比度、高斯半径、信噪比识别情况

Tab.1 Identification results of different contrast,

Gauss radius and SNR

Contrast	Result	Gauss radius	Result	SNR/dB	Result
20%	Wrong	0.5	Right	5	Wrong
35%	Right	1.0	Right	10	Right
50%	Right	1.5	Right	20	Right
70%	Right	2.0	Wrong	30	Right

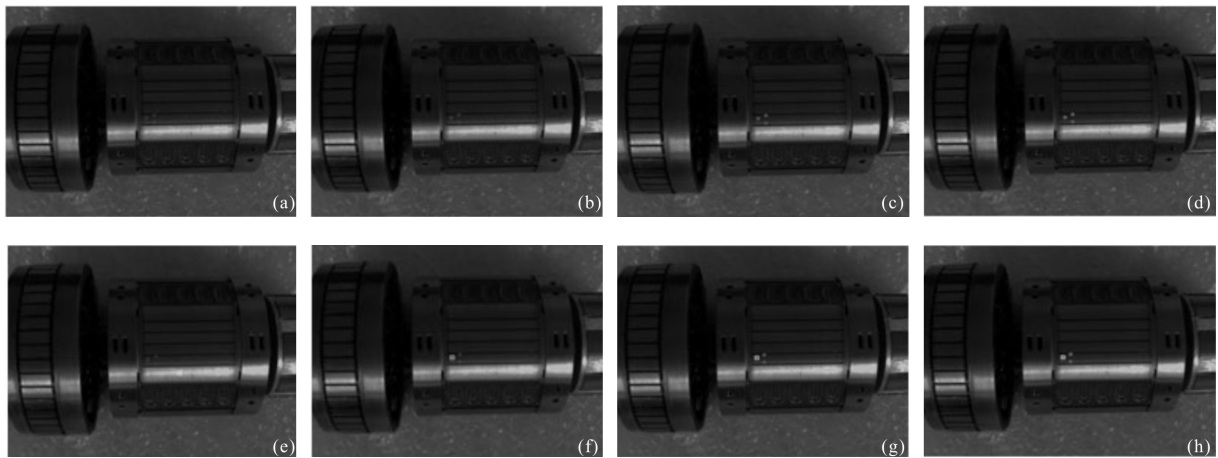


图 3 不同背景对比度识别情况(20%/35%/50%/70%)

Fig.3 Identification results of different contrast(20%/35%/50%/70%)

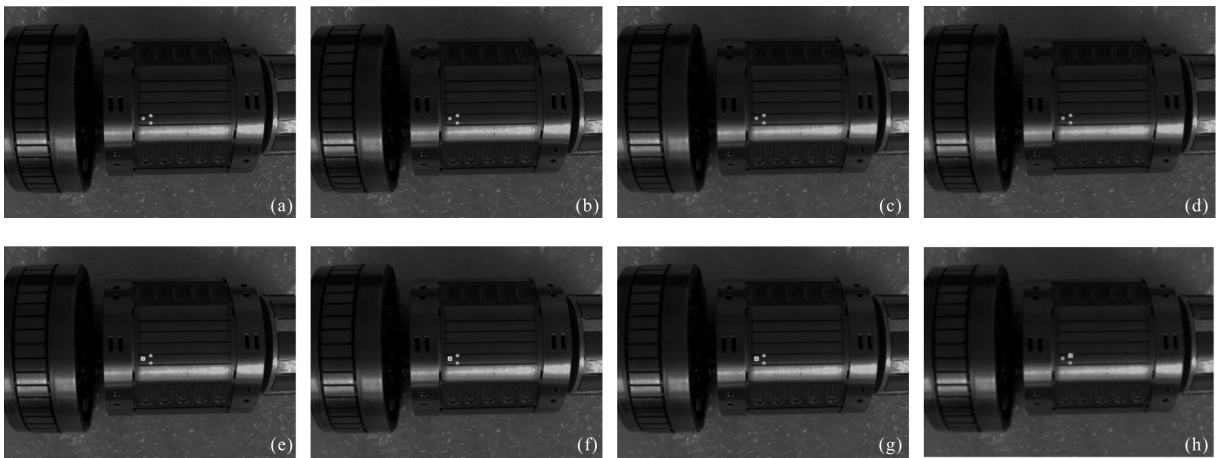


图 4 不同高斯半径识别情况(0.5/1/1.5/2)

Fig 4 Identification results of different Gauss radius (0.5/1/1.5/2)

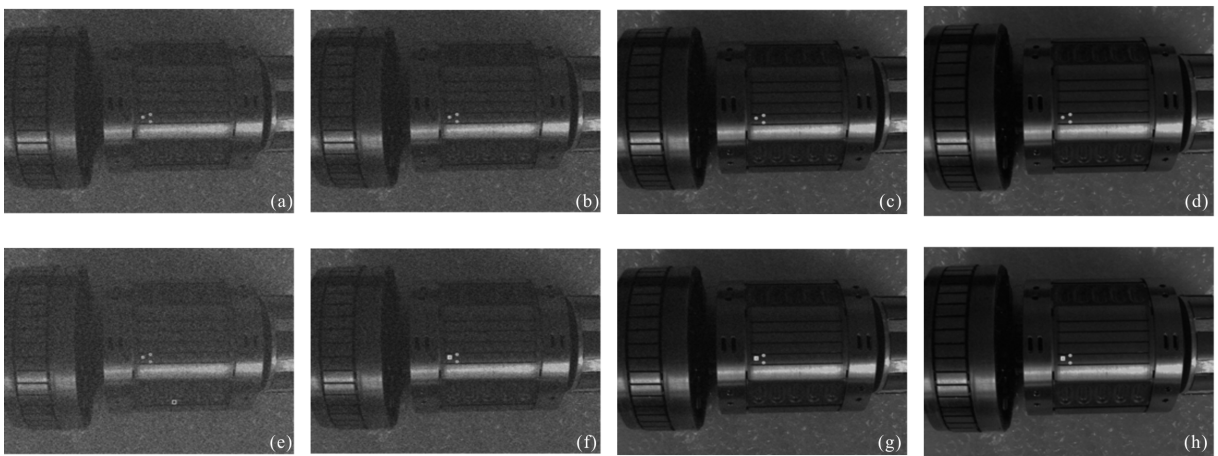


图 5 不同信噪比识别情况(5 dB/10 dB/15 dB/20 dB)

Fig.5 Identification results of different SNR(5 dB/10 dB/15 dB/20 dB)

3.1.3 试验结论

根据以上试验结果,配置 XX 万像素相机,数

据压缩后,在轨状态下的背景对比度图像模糊程度及信噪比条件下,利用图像互相关算法可以有效地

对运动目标(面积为 XX 的靶标)进行检测识别。

3.2 展开动力学分析技术

利用互相关算法,不仅可以对运动靶标的位置进行检测识别,还可以结合靶标速度的变化情况,得到天线展开的动力学特性。

为了明确靶标运动的相对特性,按以下方法定义了相对速度和速度互相关函数:

(1) 计算 t 时刻与 $t+\Delta t$ 时刻图像的互相关,得到两幅图像目标位置变化量为 $m(t)$ 和 $n(t)$ 。

(2) 计算相对速度 $V(t)$,方法为:

$$V(t) = \frac{\sqrt{m^2(t)+n^2(t)}}{\Delta t} \quad (2)$$

(3) 定义速度互相关函数 $R(\tau)$,计算公式为:

$$R(\tau) = \frac{\sum V_a(t) \cdot \sum V_b(t+\tau)}{\sqrt{\sum V_a(t)^2} \cdot \sqrt{\sum V_b(t+\tau)^2}} \quad (3)$$

式中: $V_a(t)$ 为目标 A 的相对速度; $V_b(t)$ 为目标 B 的相对速度,并对其进行了归一化。

利用上述参数,可以对天线展开的动力学特性进行分析,某次天线展开试验中的动力学分析情况如下:

在天线展开机构上设置 3 个靶标,分别记为 Mark A、Mark B、Mark C,在天线展开前,A、B、C 均处于静止状态,在天线展开瞬间(时间起点 0),锁紧装置解锁,展开机构开始运动,产生较大的震动,采用互相关方法可以得到 A、B、C 的震动情况,如图 6 所示(目标运动随时间变化图)。

图中,横坐标为时间,纵坐标为互相关的像素参数。由图可知,展开开始后震动是持续减弱的,在展开机构刚开始展开时,震动频率约为 0.2 Hz,其主要由锁紧装置解锁产生;在展开过程中,震动频率约为 0.05 Hz,其主要由展开机构引起;在展开停止后,震动频率约为 0.05 Hz,也是展开机构停止运动产生的。通过标记 Mark A、Mark B、Mark C 的运动轨迹,还

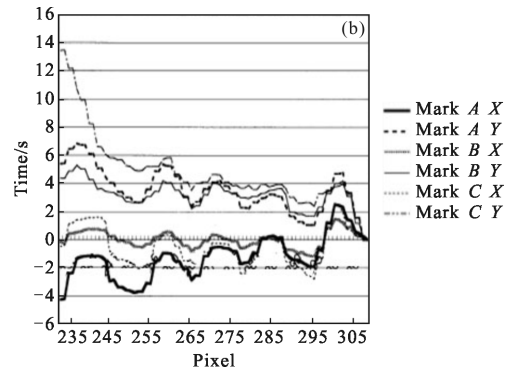
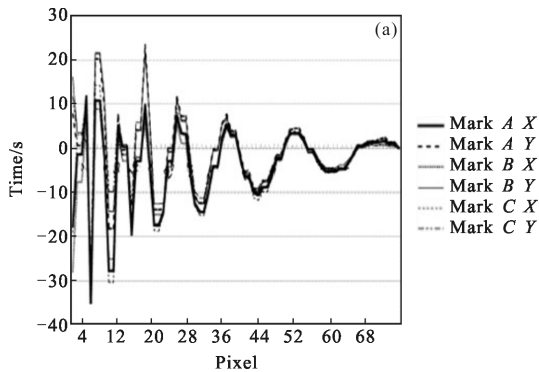


图 6 靶标震动(展开过程中及展开结束后)

Fig.6 Vibrations of markers observed(deploying/deployed)

可以及时发现展开过程中出现的异常,并可以对其分析。在某次天线展开试验过程中,出现展开功能异常,如图 7 所示(靶标运动轨迹图)。

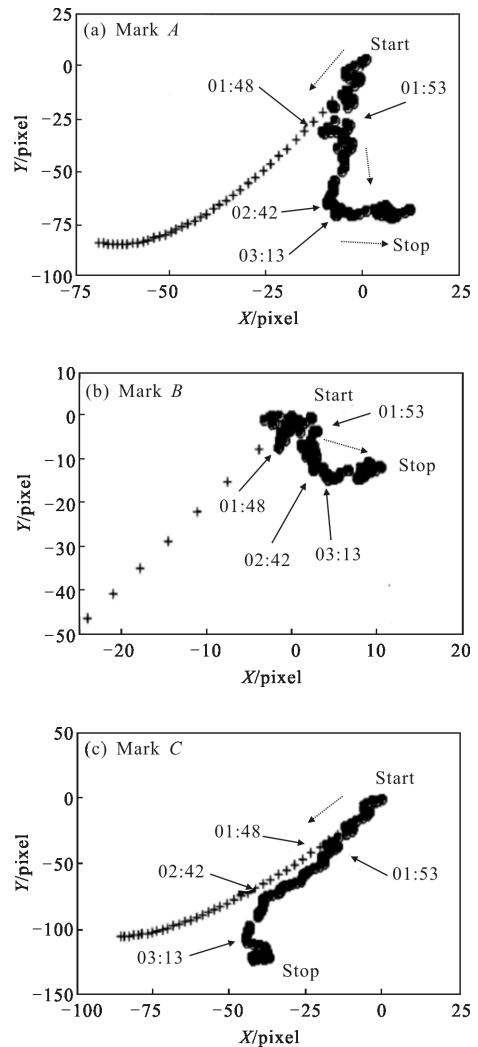


图 7 天线展开异常的靶标轨迹与展开正常轨迹模型对比

Fig.7 Markers' trajectories and expected trajectories

图中表示实际轨迹,表示正常展开轨迹模型。由图中可以看到,展开开始阶段,实际轨迹与模型一致性很好,表明展开正常。在 01:48 时刻,二者偏差突然增大(3 个靶标现象一致),说明异常发生,在 01:53、02:42、03:13 这 3 个时刻,实际轨迹方向均有较大改变,说明展开机构和反射面受到外力影响。

通过相对速度和速度互相关函数,可以进一步对展开过程进行动力学分析,为展开特性和异常分析提供大量信息,这里不再详述。

4 结束语

大型可展开天线的展开机构和网面处理是天线在轨展开的重点关注对象,甚至影响到航天任务的成败。为了对天线的展开状态实时监测,获取微重力条件下天线展开的动力学信息,对异常及时发现和分析,文中介绍了一种天基光学监视系统,对系统方案和关键技术进行重点讨论,并对采用的图像互相关算法进行了描述,并给出了实验结果,通过结果可以看到,该监视系统及其采用的关键技术,可以对大型可展开天线在轨展开进行实时监测和动力学分析。该系统已经将其应用于型号任务中,取得了很好的效果,为后续型号任务积累的经验。

参考文献:

- [1] Kuroda S, Kataoka M, Takano T, et al. Characteristics of the large deployable antenna aboard HALCA in-orbit [C]// Proceedings of the International Symposium on Antennas and Propagation, 2000, 2: 505-508.
- [2] Ueno K, Atobe M, Ide T. ETS-VIII S-band antenna feed system and electrical properties [C]// Proceedings of the International Symposium on Space, Technology and Science, 2000, 22: 1493-1498.
- [3] Kimura S, Okuyama T, Yoshioka N, et al. Robot-aided remote inspection experiment on STS-85 [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36: 1290-1297.
- [4] Kimura S, Takahashi M, Okuyama T, et al. A fault-tolerant control algorithm for space hyper-redundant manipulators standing on decentralized autonomous architecture [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1998, 28: 521-527.
- [5] Kimura S, Tsuchiya S, Kakegai T, et al. Fault adaptive kinematic control using multi-processor system and its verification using a hyper-redundant manipulator [J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2001, 13: 540-547.
- [6] Yan Yong, Yao Jinsong. Design and analysis of dynamic characteristics of the optical satellite vibration fixture [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S): 43-46. (in Chinese)
闫勇,姚劲松. 光学小卫星振动夹具设计及动特性分析 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(S): 43-46.
- [7] Han Qijin, Zhang Xuewen, Qiao Zhiyuan, et al. Wide dynamic radiometric calibration of GF-1 PMS sensors using multi-test sites [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 127-129. (in Chinese)
韩启金,张学文,乔志远,等. 高分一号卫星 PMS 相机多场地宽动态辐射定标 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(1): 127-129.