

## 微型长波近红外物联网节点及实验研究

王绪泉<sup>1,2</sup>, 黄松奎<sup>1,2\*</sup>, 于月华<sup>1,2</sup>, 叶捷敏<sup>1,2</sup>, 邵秀梅<sup>1,2</sup>, 方家熊<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术联合国家重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

**摘要:**研制基于线性渐变滤光片和 InGaAs 焦平面的微型化物联网节点, 实现长波近红外光谱数据的采集和无线传输, 针对节点的波长范围、分辨率、波长准确性和波长稳定性等参数指标开展性能研究实验. 实验结果表明, 节点的波长范围为 950~1700 nm, 光谱分辨率随波长增加而增大, 约为峰值波长的 1%, 与滤光片特性相符, 波长准确性优于 1.3 nm, 波长重复性优于 0.1 nm, 可以满足物联网中的近红外光谱分析应用需求.

**关键词:**光谱学; 物联网节点; InGaAs 焦平面阵列; 线性渐变滤光片; 无线通信

**中图分类号:** TN219 **文献标识码:** A

## A compact long-wavelength near-infrared IOT node and its performance experiments

WANG Xu-Quan<sup>1,2</sup>, HUANG Song-Lei<sup>1,2\*</sup>, YU Yue-Hua<sup>1,2</sup>, YE Jie-Min<sup>1,2</sup>,  
SHAO Xiu-Mei<sup>1,2</sup>, FANG Jia-Xiong<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** A compact IOT node based on linear variable filter and InGaAs focal plane array was presented. The long-wavelength near-infrared spectral data can be collected and transferred with wireless communication method. Performance experiments were carried out to test the parameters of the node, such as wavelength range, spectral resolution, wavelength accuracy and stability. Experimental results demonstrate that the wavelength range is from 950nm to 1700 nm, and the spectral resolution is approximately 1% of peak wavelength. The wavelength accuracy and wavelength stability are less than 1.3 nm and 0.1 nm respectively. The proposed node can meet the demand of near infrared spectral analysis in IOT applications.

**Key words:** spectroscopy, IOT node, InGaAs focal plane array, linear variable filter, wireless communication

**PACS:** 07. 57. Ty

### 引言

近红外光谱分析具有快速、无损、可多组分同时检测等优点, 已经在农业、食品、化工等多领域取得广泛应用<sup>[1-3]</sup>. 近红外区域可以进一步划分为 700~

1100 nm 的短波近红外波段和 1100~2500 nm 的长波近红外波段. 受制于材料特性, 在短波区域多采用 Si 传感器, 在长波区域则多采用 InGaAs 或 PbS 传感器. 相比于短波近红外波段, 长波近红外波段包含更丰富的光谱信息, 有更高的科研和实用价值<sup>[4]</sup>.

收稿日期: 2017-05-30, 修回日期: 2017-10-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61376052)

**Foundation items:** Supported by The General Program of National Natural Science Foundation of China (61376052)

**作者简介 (Biography):** 王绪泉(1989-), 男, 山东济南人, 助理工程师, 硕士学位, 主要研究领域为光传感器应用技术. E-mail: wangxq@mail.sitp.ac.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: huangsl@mail.sitp.ac.cn

**Received date:** 2017-05-30, **revised date:** 2017-10-22

近年来,物联网技术在智慧农业、智能家居和智慧城市等众多领域取得飞速发展.传统物联网的感知层对物质成分获取和感知能力匮乏,而现有的长波近红外光谱设备,不同程度的受到光学系统体积、光纤探头、数据线和电源线限制,体积较大,价格昂贵.虽然这些设备有向微型化发展的趋势,但是直接作为物联网节点应用,仍存在移动性差、成本高等诸多问题,迫切需要一种具有微型化特征的长波近红外物联网节点.

线性渐变滤光片是利用先进的光学镀膜技术在特定方向上制成的楔形镀层.由于膜层厚度不同,光穿透滤光片的中心波长在楔形方向产生线性变化,从而起到分光作用.在前期的工作基础中,我们已经得到了成熟、高性能的线列 InGaAs 焦平面传感器<sup>[5-6]</sup>.将线性渐变滤光片与线列 InGaAs 焦平面传感器的光敏芯片相耦合,可以得到紧凑、稳固、无移动部件的分光结构,有助于实现光学系统和整机的微型化设计,国外近年来已出现了基于此结构的微型化光谱仪<sup>[7]</sup>.我们采用英国 Vortex 公司生产的线性渐变滤光片,与现有的线列 InGaAs 焦平面耦合,共同封装在焦平面传感器的金属管壳内部.所选择的线性渐变滤光片波长范围为 900 ~ 1 700 nm,与室温下 InGaAs 焦平面的响应波段相匹配.基于此结构,进一步完成了长波近红外波段物联网节点的微型化设计和实验研究,在物联网节点内部实现了近红外光谱数据的采集和无线传输.形成的微型化节点样机无移动部件,且具有较高的性能指标和稳定性,可以为物联网向长波近红外光谱分析领域扩展提供技术支持.

## 1 微型长波近红外物联网节点系统介绍

物联网节点隶属于感知层,典型的物联网节点系统由数据采集模块、数据处理和控制模块、通信模块和电源模块四部分组成.微型长波近红外光谱传感物联网节点的系统结构如图 1 所示,包括 900 ~ 1 700 nm波段的线性渐变滤光片、256 × 1 元线列 InGaAs 焦平面传感器、传感器驱动电路、光谱数据采集电路、无线通信模块和锂电池.节点将线性渐变滤光片与光敏芯片相耦合,作为核心分光部件封装于 InGaAs 焦平面传感器的真空管壳内部.采用 Spartan-6 系列 FPGA 设计产生传感器的多路驱动脉冲和数据采集电路的控制信号.无线通信模块采用 MSP430 单片机配合 NORDIC 公司的 nRF905 型射频芯片实现.节点系统采用锂电池供电.

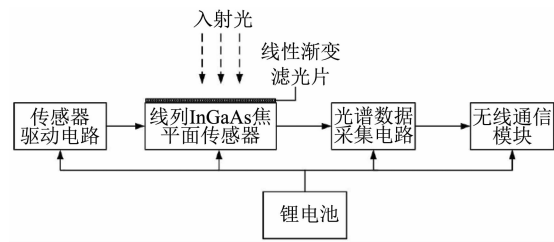


图 1 微型长波近红外物联网节点的系统结构

Fig. 1 Structure diagram of compact long-wavelength near-infrared IOT node

节点的工作模式如下:FPGA 在上电后完成自动配置,产生传感器所需的多路驱动脉冲;入射光经线性渐变滤光片分光后投射在 InGaAs 焦平面传感器的光敏元阵列,完成光电转换后由焦平面传感器的读出电路读出;光谱数据采集电路完成数据的滤波、放大和模数转换;待一帧光谱数据采集完成后启动无线发送程序,远程接收端通过串口将数据送入电脑上位机,完成光谱数据的存储和解析.

节点样机实物如图 2 所示,主体体积为 7 cm × 5 cm × 5 cm, InGaAs 焦平面传感器的像元尺寸 50 μm × 500 μm,像元中心距 50 μm.实测节点电子学系统信噪比优于 1 000:1,典型的测量和传输时间小于 1 s,整机功耗小于 300 mW,光谱数据无线传输距离大于 150 m.

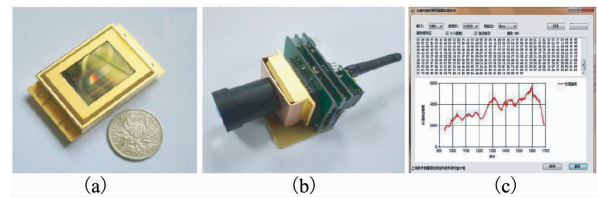


图 2 微型长波近红外物联网节点实物图 (a) 为耦合了线性渐变滤光片的 InGaAs 焦平面传感器 (b) 为节点样机 (c) 为电脑上位机

Fig. 2 Photograph of compact long-wavelength near-infrared IOT node. (a) InGaAs focal plane sensor with the LVF, (b) IOT node, (c) computer software

## 2 实验与讨论

### 2.1 波长范围和分辨率

波长范围是指系统能够有效检测到的光谱范围.采用 HORIBA 公司 iHR550 型单色仪对节点系统进行波长范围测试<sup>[8]</sup>,选取 950 线光栅,设定入口狭缝和出口狭缝均为 4 mm,波长扫描范围为 900 ~ 1 700 nm,步长 1 nm,节点系统在 3 ms 的积分时间下对各波长单色光进行采集.图 3 显示了节点各像

元的相对响应强度,数据表明,节点的有效波长范围约为 950 ~ 1 700 nm,与室温下 InGaAs 器件的响应范围相符.

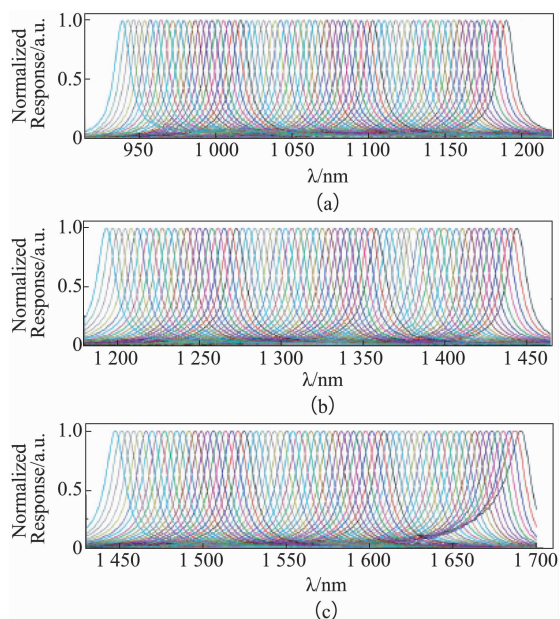


图3 节点各像元的相对响应度  
Fig. 3 Relative spectral responsivity of each pixel

光谱分辨率是指系统区分两个相邻吸收峰的能力,主要取决于分光系统.本节点系统采用每个像元作为一个光谱通道进行波长标定,利用测试单色光谱线的半峰宽进行分辨率的判定.以 1 450 nm 波长处为例,如图 4 所示,对峰值附近的数据进行拟合,得到其半峰宽度为 13.1 nm.测试结果表明,节点系统的分辨率在 11 ~ 16 nm 之间,且随峰值波长增大,半峰宽度增加.在大多数光谱范围内,半峰宽度约为测试峰值波长的 1%,与线性渐变滤光片的分光特性相符.

## 2.2 波长准确性

光谱仪器的波长准确性是指其测定标准物质某一谱峰的波长与该谱峰的标定波长之差,对近红外光谱分析和仪器间的模型传递具有重要影响.目前,大多采用稀土氧化物玻璃作为测量波长准确性的标准物质. SRM2035a 是 NIST(美国国家标准与技术研究院)推出的标准稀土氧化物玻璃,如图 5 所示,其主要包括  $\text{Ho}_2\text{O}_3$  (3.00, mol%),  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  (1.30, mol%),  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  (0.68, mol%) 和  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  (0.47, mol%). 由于稀土元素对不同频率光的选择吸收性, SRM2035a 在近红外波段有多个特征吸收峰<sup>[9]</sup>.

使用节点系统测试 SRM2035a 的吸光度,与其在近红外波段的标准吸收峰对比,以此进行系统波

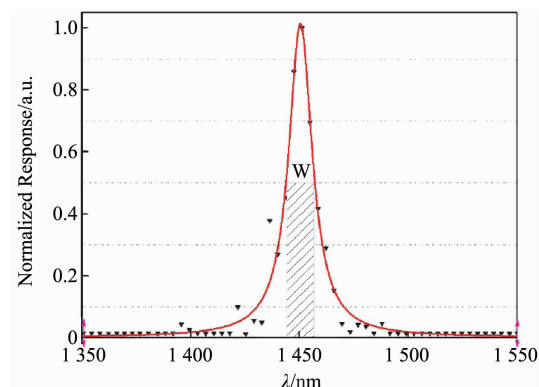


图4 1 450 nm 单色光光谱曲线  
Fig. 4 Curve of 1 450 nm monochromatic light

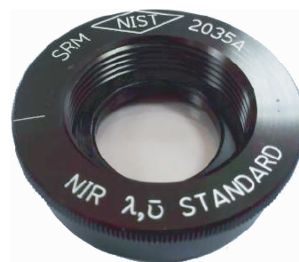


图5 SRM2035a 标准稀土氧化物玻璃  
Fig. 5 SRM2035a standard reference material

长准确性的评价.吸光度是指光线通过溶液或某一物质前的入射光强度与该光线通过溶液或物质后的透射光强度比值的以 10 为底的对数<sup>[4]</sup>.根据定义,吸光度  $A$  可表示为

$$A = \log_{10} \left( \frac{I_0}{I_1} \right) \quad (1)$$

其中,  $I_0$  表示入射光强度,  $I_1$  表示透射光强度.在本系统中,光强  $I$  可以使用 InGaAs 焦平面探测器的响应信号电压  $S_T$  替代.因为系统的模数转换精度为 14 位,参考电压为 4.096 V,所以节点系统采集到的响应信号  $S_N$  可表示为

$$S_N = \frac{S_T \times N}{4.096} \times 2^{14} \quad (2)$$

式中,  $N$  表示光谱数据采集电路的放大倍数.利用节点测试 SRM2035a 吸光度的步骤如下:(1)在无光条件下测试系统噪声信号,记作  $S_{NN}$ ;(2)测试保存入射光信号  $S_{N0}$ ;(3)放置 SRM2035a,使玻璃表面与入射光线相垂直,测试保存透射光信号  $S_{N1}$ .至此,吸光度  $A$  可表示为

$$A = \log_{10} \left( \frac{S_{N0} - S_{NN}}{S_{N1} - S_{NN}} \right) \quad (3)$$

实验得到 SRM2035a 的吸光度曲线如图 6 所示,在 950~1 700 nm 波段共有 6 个吸收峰.表 1 将各谱峰的节点测试波长、Nicolet 6700 型傅里叶变换光谱仪的测试波长分别与标准波长进行对比,结果表明,节点样机的谱峰波长测试误差优于 1.3 nm,峰 5 误差最大,为 1.3 nm,峰 6 误差最小,仅为 0.1 nm,测试结果稍逊色于傅里叶变换光谱仪的 0.5 nm.对比节点样机与傅里叶变换光谱仪的成本、体积和不同的应用需求,可以表明节点样机在整个波长范围内具有较好的波长准确性.

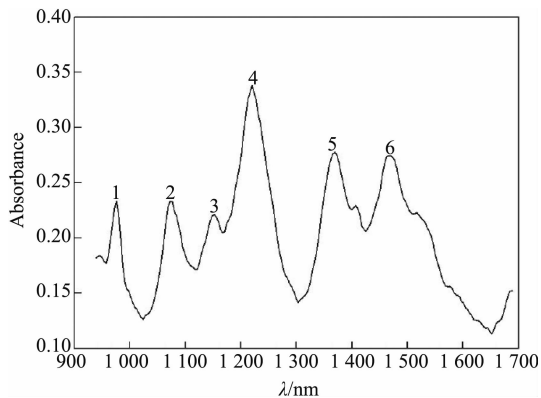


图 6 SRM2035a 的节点测试光谱  
Fig. 6 Absorbance spectra of SRM2035a

表 1 SRM2035a 吸收峰测试值与标准值对比  
Table 1 Comparison between test values and standard values of the absorbance peak wavelength of SRM2035a

编号	标准波长 /nm	节点测试波长/nm	误差/nm	Nicolet 6700 测试波长/nm	误差/nm
峰 1	975.8 ± 0.1	975.0	0.8	976.3	0.5
峰 2	1 075.6 ± 0.1	1 076.0	0.4	1 076.0	0.4
峰 3	1 151.5 ± 0.1	1 152.1	0.6	1 151.1	0.4
峰 4	1 222.2 ± 0.2	1 221.2	1	1 222.4	0.2
峰 5	1 366.8 ± 0.1	1 368.1	1.3	1 367.3	0.5
峰 6	1 469.1 ± 0.2	1 469.2	0.1	1 469.3	0.2

### 2.3 波长重复性

系统的波长重复性是体现其工作稳定性的重要指标,需要在一定时间段内进行多次重复测量.利用节点采集 PHILIPS 的 66430 型家用台灯光谱,在 950~1 700 nm 长波近红外波段内均有显著响应,对应的峰值波长分别为 1 014.4 nm、1 129.5 nm、1 367.3 nm 和 1 532.9 nm,与汞灯在近红外波段的特征峰波长相吻合.为了测试节点的波长稳定性,在系统上电后每隔五分钟对其采集一组光谱数据,连续记录 6 组,所得光谱曲线如图 7 所示.分别对比 6 条谱线的

四个峰值波长,表 2 的结果显示,节点的波长重复性优于 0.1 nm.

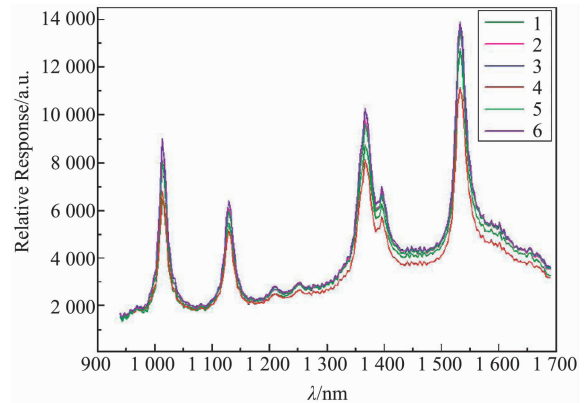


图 7 波长重复性测试光谱图  
Fig. 7 Curves of wavelength stability test

表 2 波长重复性测试结果  
Table 2 Results of wavelength stability test

编号	谱线 1	谱线 2	谱线 3	谱线 4	谱线 5	谱线 6
峰 1/nm	1014.4	1014.3	1014.3	1014.3	1014.3	1014.3
峰 2/nm	1129.5	1129.5	1129.5	1129.5	1129.5	1129.4
峰 3/nm	1367.3	1367.3	1367.2	1367.2	1367.2	1367.2
峰 4/nm	1532.9	1533.0	1533.0	1533.0	1533.0	1532.9

### 2.4 现场应用中的问题讨论

相比于室内的光谱分析设备,物联网节点更多侧重于室外现场应用和在线分析,需要面对更为复杂、苛刻的使用环境.具体来看,主要有环境干扰、供电和光学系统等方面的限制.为了抑制环境干扰,我们沿用了航天型号产品采用的真空金属管壳封装,可以最大程度的减少外界温湿度变化对焦平面传感器造成的影响,并在金属管壳内部加装光阑来抑制环境中杂散光的干扰.节点采用锂电池供电,常规容量的锂电池可支持连续工作十小时以上,配合休眠模式和各种节点自发电技术,可大幅增加待机时间.光学系统是节点现场应用中的一个难点,其设计与光源的选择和现场应用环境息息相关.常规的光源因为功耗问题无法直接应用于物联网节点的内部,我们实验中采用的多种红外光源最小工作电流也要接近 100 mA,已经超过了节点本身的功耗.而采用自然光作为光源则需要考虑具体的应用环境状况,目前小型无人机平台的飞行高度可达 50 m 到 100 m,对节点光学系统的设计提出了极高的要求<sup>[10]</sup>.本文中所有的实验结果均为实验室内利用准直光源测试所得,在下一步的现场应用中要结合具体的环境参数进行光机接口设计和随光强变化的积分时间

自调节技术研究.

### 3 结论

介绍了基于线性渐变滤光片的微型化长波近红外物联网节点,采用线性渐变滤光片作为核心分光元件,与线列 InGaAs 焦平面传感器的光敏芯片相耦合,在物联网节点内部实现了 950 ~ 1700 nm 近红外光谱数据的采集和无线传输. 整机无移动部件,摆脱了光纤、数据线和电源线的限制. 相关实验表明,节点的性能指标达到设计要求,具有微型化、低功耗特点,可以满足多数近红外光谱分析应用,为物联网向长波近红外光谱分析领域扩展提供技术支持.

### References

- [1] CHU Xiao-Li, LU Wan-Zhen. Research and application progress of near infrared spectroscopy analytical technology in China in the past five years [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (褚小立, 陆婉珍. 近五年我国近红外光谱分析技术研究与应用进展. *光谱学与光谱分析*), 2014, **34**(10): 2595 - 2605.
- [2] QIN Hong, MA Jing-Yi, CHEN Shao-Jiang, *et al.* Identification of haploid maize kernel using NIR spectroscopy in reflectance and transmittance modes: a comparative study [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(1): 292 - 297.
- [3] LUYPAERT J, ZHANG M H, MASSART D. Feasibility study for the use of near infrared spectroscopy in the quali-

tative and quantitative analysis of green tea, *Camellia sinensis* [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2003, **478**(1): 303 - 312.

- [4] CHU Xiao-Li. Handbook of Near-Infrared Spectral Analysis Technology [M]. Beijing: China Machine Press (褚小立. 近红外光谱分析技术实用手册, 北京: 机械工业出版社), 2016: 15 - 29.
- [5] XUE Li, HAIMEI Gong, JIAXIONG Fang, *et al.* The development of InGaAs short wavelength infrared focal plane arrays with high performance [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **80**: 112 - 119.
- [6] XING Huang, XUE Li, MING Shi, *et al.* The 1/f noise characteristics of In<sub>0.83</sub>Ga<sub>0.17</sub>As photodiodes with SiN<sub>x</sub> passivation films fabricated by two different techniques [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, **67**: 596 - 599.
- [7] N A O'Brien, C A Hulse, D M Friedrich, *et al.* Miniature Near-Infrared (NIR) Spectrometer Engine for Handheld Applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8374**: 837404 - 1 - 8.
- [8] ZHANG Ya-Guang, ZHUANG Xin-Gang, WANG Xu-Quan, *et al.* Wavelength calibration of a new monolithically integrated spectral sensor [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2017, **36**(1): 15 - 19.
- [9] DAVID L D, STEVEN J C, LINDSEY O, *et al.* Rare-earth glass reference materials for near-infrared spectrometry: sources of x-axis location variability [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2003, **490**: 85 - 98.
- [10] GE Ming-Feng, QI Hong-Xing, WANG Yi-Kun, *et al.* Hyperspectral imaging remote sensing technology based on light weight unmanned helicopter platform [J]. *Infrared and Laser Engineering* (葛明锋, 齐洪兴, 王义坤, 等. 基于轻小型无人直升机平台的高光谱遥感成像系统. *红外与激光工程*), 2015, **44**(11): 3402 - 3407.

(上接第 41 页)

- [7] Qian Feng. Research on the high precision ATP system in satellite-to-earth quantum communications[D]. University of Chinese Academy of Sciences (钱锋. 星地量子通信高精度 ATP 系统研究. 中国科学院大学), 2014.
- [8] ORTIZ G G, LEE S, MONACOS S P, *et al.* Design and development of robust ATP subsystem for the Altair UAV-to-ground lasercomm 2.5-Gbps demonstration[C]. High-Power Lasers and Applications. International Society for Optics and Photonics, 2003: 103 - 114.
- [9] YU Si-Yuan, HAN Qi-Qi, MA Jing, *et al.* Size selection of dispersive spot imaging on CCD in a satellite optical communication terminal[J]. *Chinese Journal of Lasers* (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. *中国激光*), 2007, **34**(1): 69 - 73.
- [10] OSBORNE R W, ZHANG X, WILLET P, *et al.* Effect of sensor pixel size on tracking[J]. *Proc Spie*, 2013, **8857**

(2): 455 - 474.

- [11] LEE S. Pointing accuracy improvement using model-based noise reduction method[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2002, **4635**: 65 - 71.
- [12] ANSARI A H. Digital control design of a CCD-based tracking loop for precision beam pointing[J]. *Proc Spie*, 1994, **2123**: 328 - 333.
- [13] BRACEWELL R. The Fourier transform and its applications[M]. McGraw-Hill Book Co, 2000: 155 - 156.
- [14] HAN Cheng, BAI Bao-Xing, YANG Hua-min, *et al.* Primary environment influence factors to tracking precision in space-ground laser communication [J]. *Acta Photonica Sinica* (韩成, 白宝兴, 杨华民, 等. 空地激光通信跟踪精度主要外界影响因素研究. *光子学报*), 2010, **39**(1): 89 - 94.