

· 激光物理与器件 ·

太阳光谱仪近红外光电探测系统设计

李小溪, 李 乐, 黄 煜, 杨小虎, 李占峰, 王 彪

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033

摘 要: 针对星载太阳光谱仪近红外波段信号微弱、易受外部环境干扰等特点, 设计了一种基于 InGaAs 红外单元探测器的锁相放大光电探测系统。分析了探测系统的噪声特性, 发现抑制前置放大器的电路噪声对于降低系统噪声至关重要。优化了前置放大器 PCB 布局布线, 采用保护环+保护层+过孔防护等设计, 加强了输入光电流信号保护与屏蔽。利用卤钨灯模拟在轨情况下的太阳光谱强度, 进行了地面试验。结果表明, 探测电路对入射光强度的响应线性度可达 99.95%; 测试波段各波长信噪比较上一代太阳光谱仪均有显著提升。

关键词: 光电探测; 微弱信号; InGaAs 探测器; 噪声; 太阳光谱仪

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A **doi:** 10.14016/j.cnki.jgzz.2024.06.028

Near-infrared photodetection system design for solar spectrum monitor

LI Xiaoxi, LI Yue, HUANG Yu, YANG Xiaohu, LI Zhanfeng, WANG Biao

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

Abstract: The near-infrared signal of the spaceborne solar spectrum monitor is usually weak and susceptible to external interference. To precisely detect the signal, a lock-in photodetection system based on InGaAs infrared detector was designed. The noise characteristics of detection system were analyzed, and it is found that suppressing the pre-amplifier noise can significantly reduce the overall noise. The PCB layout of preamplifier was optimized. Guard rings, a guard plane and a via fence were placed in order to strengthen the guard and shielding of input photocurrent signal. A tungsten lamp was used to simulate the solar spectral intensity in orbit and ground tests were conducted. The results show that the response linearity of the photodetection circuit to the incident light intensity is 99.95%. The signal-to-noise ratio (SNR) of each wavelength within the band is significantly improved compared with the previous solar spectrum monitor.

Key words: photodetection; weak signal; InGaAs detector; noise; solar spectrum monitor

1 引言

太阳是地球外部能量的主要来源, 监测太阳辐射变化对地球气候效应评估、痕量气体反演、太阳物理研究具有重要意义^[1]。星载太阳光谱辐射监测仪器在轨期间往往要经受恶劣的环境考验, 如空间辐射、

高真空、极端温度环境等, 需要仪器具备高精度、高可靠性和高稳定性。

自 20 世纪 70 年代以来, 国外开始陆续发射相关卫星载荷, 近年来代表性的载荷包括 SOLSPEC (Solar Spectrum)^[2], TSIS-1 SIM (Total and Spectral solar Irradiance Sensor - Spectral Irradiance Monitor)^[3], CSIM (Compact Spectral Irradiance Monitor)^[4] 等。2021 年 7 月, 中国科学院长春光机所研制的太阳辐射度光谱仪 (Solar Spectral Irradiance Monitor, SSIM) 搭载风云三号黎明星 (FY-3E) 成功发射^[5], 为我国监测太阳活动引起的地球气候系统能量变化提供了有力的支撑。目前正在研制的下一代 SSIM, 将搭载在风

收稿日期: 2024-01-16

基金项目: 吉林省重点科技研发项目资助 (No. 20210204110YY)、吉林省科技发展计划项目资助 (No. 20220203016SF)

作者简介: 李小溪 (1993-), 女, 硕士, 研究实习员, 主要从事微弱信号检测及空间遥感技术的研究。E-mail: xiaoxi_li0817@163.com

通讯作者: 黄煜 (1979-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间紫外遥感与辐射计量方面的研究。E-mail: ssshycn@yahoo.com.cn

http://www.laserjournal.cn

云三号后续型号中。

下一代 SSIM 相较于上一代产品,在探测性能、工作模式、可靠性等方面提出了更高的要求。FY-3E SSIM 探测的波段包括紫外、可见和近红外,其中近红外波段分为 NIR1(650 nm~1 650 nm) 和 NIR2(1 600 nm~2 400 nm) 两个通道,NIR2 为实验波段。下一代 SSIM 的 NIR2 为正式波段,对通道性能提出了较高的指标要求。根据近年来国内外仪器获得的太阳光谱^[6-7],NIR2 波段的信号强度平均较 NIR1 弱约一个数量级,2 400 nm 处仅约 $6.18 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm})$,信号探测极易受外部噪声干扰。而近红外波段太阳辐照度的年变化量很小,在 10^{-3} 数量级^[8],现有光谱数据具有参考价值。因此,需要设计高精度、低噪声的光电探测系统,以满足 NIR2 通道的性能要求。

本文中设计了一种基于 InGaAs 红外探测器的锁相放大光电探测系统。对探测器和信号处理电路的噪声特性进行分析,发现抑制前置放大器的电路噪声对于降低系统噪声至关重要。优化了前置放大器 PCB 设计,并进行了地面响应线性度和信噪比测试。

2 光电探测系统设计

2.1 近红外通道光学结构

近红外通道主光学系统采用光栅双单色仪结构。太阳入射光经遮光罩、熔石英窗口后,通过聚光镜将入射光会聚以增强入射光能量,入射到漫透射板上,经入射狭缝进入单色仪。入射光在单色仪出缝处形成色散的谱带,电机驱动丝杠摆杆机构带动单色仪光栅转动,使不同波长的单色光透过出射狭缝。出射光通过分色片分成 NIR1 和 NIR2 两路,再分别利用聚光镜会聚减小接收面积,最后由两个探测器分别接收。近红外通道的光路如图 1 所示。

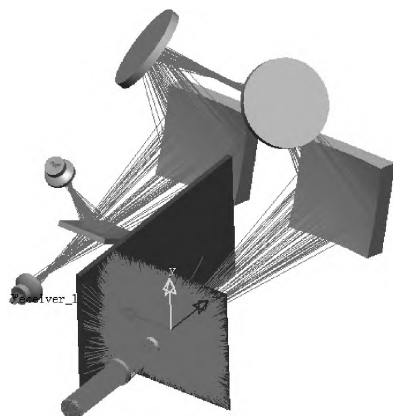


图 1 近红外通道光路

探测器选用扩展波长 InGaAs 红外单元探测器,将入射光转为光电流。探测器主要参数如表 1 所示,其内置两级半导体制冷片,工作温度 -40°C 。

表 1 探测器主要规格参数

参数	典型值
50%截止波长/ μm	2.48
峰值响应度 $R/(\text{A}/\text{W})$	1.2
探测能力 $D^*/(\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W})$	6.2×10^{11}
噪声等效功率 $NEP/(\text{W}/\text{Hz}^{1/2})$	3.0×10^{-13}
等效并联电阻 $R_{\text{PD}}/\text{k}\Omega$	90
结电容 C_{PD}/pF	4 000

2.2 信号探测电路设计

根据近年来太阳光谱数据,考虑光学系统效率、探测器响应度,计算得 NIR2 波段的信号光电流 I_{PD} 在 $0.16 \text{ nA} \sim 1.29 \text{ nA}$ 之间。由于信号微弱,易受低频段 $1/f$ 噪声干扰,且探测器的暗电流超过 10 nA ,远大于信号光电流,若采用直流调制跨阻放大电路会严重影响测量精度。因此,采用锁相放大的电路设计方案,将光信号调制到较高频率,以消除低频噪声和暗电流影响^[9]。

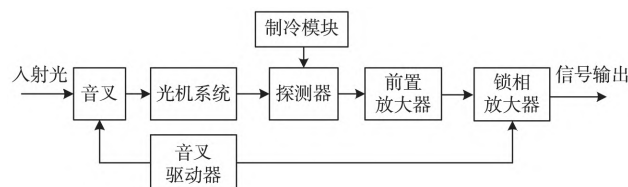


图 2 光电探测系统框图

光电探测系统的框图如图 2 所示。在谱仪入射狭缝处设置了音叉,通过斩光的方式将直流入射光调制为相应频率的交流光信号。考虑到探测器结电容较大,限制了前置放大器带宽,选用频率 325 Hz 的音叉。探测器将光机系统出射光转为光电流,由前置放大器转为电压信号,通过锁相放大器完成相敏检波,输出适合采集的信号。音叉驱动器驱动音叉工作,同时为锁相放大器提供参考信号。制冷模块对探测器靶面制冷,保证其在 -40°C 。

由于探测器输出信号微弱,需要的前置放大倍数较高,为 10^8 量级。前置放大器采用探测器并联负载电阻转为电压,再经两级电压放大的方案。两级放大器均选用超低输入偏置电压运算放大器 OP07,第一级增益为 10^7 倍,第二级增益为 44 倍。

锁相放大器通过相敏检波的方式压缩带宽,减小噪声,并对信号进一步放大。前放输出电压信号通过

多级增益、带通滤波后进入相敏检波器,同时参考信号经移相调整至与带通后信号相位一致,进入相敏检波器中。两路信号相乘后经积分器、低通滤波,转为直流信号,经 V/F 变换转为频率信号输出,频率表征了入射光强度。锁相放大器设计的中心频率为 325 Hz,经积分和低通滤波后带宽限制至 5 Hz,增益约 17 倍。

2.3 系统噪声分析

光电探测系统的噪声来源主要包括探测器噪声和各级电路噪声。由于前放第一级增益远大于后面各级,根据弗里斯公式^[14],后面各级的噪声对总噪声影响极小,可以忽略,因此只分析探测器本身及前放第一级的噪声。其原理示意图如图 3 所示,标注了电路相关的噪声源。虚线框内为探测器等效电路。

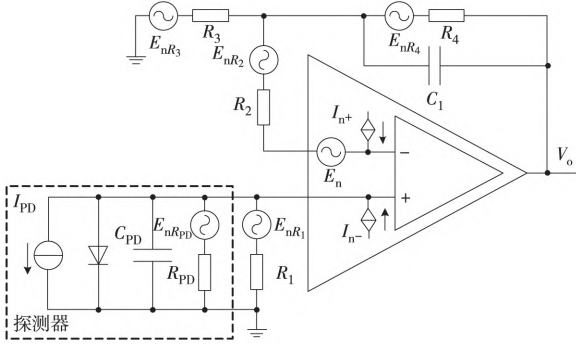


图3 前置放大器第一级原理示意图

系统噪声带宽由锁相放大器决定,为调制频率 325 Hz 两侧共 5 Hz 的带宽,即噪声频带下限 $f_a = 322.5$ Hz,上限 $f_b = 327.5$ Hz。探测器温度 $T_{PD} = 233$ K,电路温度取室温 20 °C 对应的开尔文温度 $T = 293$ K,玻尔兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K,电荷常数 $q = 1.602 \times 10^{-19}$ C。

探测器噪声包括散粒噪声 I_{SH} 、NEP 噪声 I_{NEP} 、探测器电阻热噪声 $I_{nR_{PD}}$,分别表示为

$$I_{SH} = \sqrt{2qI_{PD}(f_b - f_a)} \quad (1)$$

$$I_{NEP} = NEP \cdot R \sqrt{(f_b - f_a)} \quad (2)$$

$$I_{nR_{PD}} = \sqrt{\frac{4kT_{PD}(f_b - f_a)}{R_{PD}}}, \quad (3)$$

探测器总噪声电流为

$$I_{nPD} = \sqrt{I_{SH}^2 + I_{NEP}^2 + I_{nR_{PD}}^2}, \quad (4)$$

在 I_{PD} 取值 0.16 nA ~ 1.29 nA 范围内,计算得 I_{SH} 最大值 0.045 pA,最小值 0.016 pA, I_{NEP} 为 0.5 pA, $I_{nR_{PD}}$ 为 0.44 pA。探测器总噪声电流 I_{nPD} 最大值 0.67 pA,最小值 0.66 pA。

前放第一级电路噪声包括运放电压噪声 E_n 、同相端及反相端电流噪声 I_{n+} 、 I_{n-} 以及各电阻的热噪声。根据叠加定理,电路输出处的总噪声等于各噪声源单独作用的结果。为后文方便表述,令

$$Z_{PD} = R_{PD} // \frac{1}{j2\pi(f_b - f_a) C_{PD}} \quad (5)$$

$$Z_4 = R_4 // \frac{1}{j2\pi(f_b - f_a) C_1} \quad (6)$$

运放电压噪声包括宽带噪声和 $1/f$ 噪声,可表示为

$$E_n = \sqrt{E_{nBB}^2 + E_{n1/f}^2}, \quad (7)$$

其中

$$E_{nBB} = e_{nBB} \sqrt{f_b - f_a} \quad (8)$$

$$E_{n1/f} = e_{n1/f,1\text{Hz}} \sqrt{\ln\left(\frac{f_b}{f_a}\right)}, \quad (9)$$

e_{nBB} 和 $e_{n1/f,1\text{Hz}}$ 分别为运放宽带噪声电压密度和 1 Hz 处 $1/f$ 噪声电压密度。

运放电压噪声对输出噪声电压贡献为

$$E_{O_E_n} = E_n \left(1 + \frac{Z_4}{R_3}\right) \quad (10)$$

类似地,可计算出运放电流噪声 I_n ,取 $I_{n+} = I_{n-} = I_n$,二者对输出端噪声电压贡献分别为

$$E_{O_I_{n+}} = I_{n+} (R_1 // Z_{PD}) \left(1 + \frac{Z_4}{R_3}\right) \quad (11)$$

$$E_{O_I_{n-}} = I_{n-} \frac{R_2 Z_4 + R_2 R_3 + Z_4 R_3}{R_3} \quad (12)$$

电阻 R_1 热噪声电压为

$$E_{nR_1} = \sqrt{4kT(f_b - f_a) R_1}, \quad (13)$$

类似地,可求得其他电阻的热噪声。由于 R_{PD} 在电路输入端与 R_1 并联,与单独作用时噪声不同,其对总噪声贡献需合并到电路中计算。各电阻热噪声对输出端噪声电压贡献分别为

$$E_{O_nR_1} = E_{nR_1} \frac{Z_{PD}}{R_1 + Z_{PD}} \left(1 + \frac{Z_4}{R_3}\right) \quad (14)$$

$$E_{O_nR_2} = E_{nR_2} \left(1 + \frac{Z_4}{R_3}\right) \quad (15)$$

$$E_{O_nR_3} = -E_{nR_3} \frac{Z_4}{R_3} \quad (16)$$

$$E_{O_nR_4} = E_{nR_4} \quad (17)$$

$$E_{O_nR_{PD}} = E_{nR_{PD}} \frac{R_1}{R_1 + Z_{PD}} \left(1 + \frac{Z_4}{R_3}\right) \quad (18)$$

输出端总噪声电压为

$$E_0 = \sqrt{E_{0_{E_n}}^2 + E_{0_{I_n}}^2 + E_{0_{I_{SH}}}^2 + E_{0_{I_{NEP}}}^2 + E_{0_{I_{n_circuit}}}^2 + E_{0_{nR_1}}^2 + E_{0_{nR_2}}^2 + E_{0_{nR_3}}^2 + E_{0_{nR_4}}^2 + E_{0_{nR_{PD}}}^2} \quad (19)$$

折回输入端,得电路贡献的噪声电流为

$$I_{n_circuit} = \frac{E_0}{(R_1 // Z_{PD}) \left(1 + \frac{Z_4}{R_3}\right)}, \quad (20)$$

计算得电路噪声电流为 1.66 pA,其中 R_{PD} 的噪声电流为 0.52 pA,放大电路其他组件的噪声为 1.57 pA。

总噪声电流为

$$I_n = \sqrt{I_{SH}^2 + I_{NEP}^2 + I_{n_circuit}^2}, \quad (21)$$

计算得 I_n 最大值 1.79 pA,最小值 1.73 pA。可以看出,由于探测器 C_{PD} 较大, R_{PD} 较小,其接入电路后导致折合回输入端的电路噪声电流较大,约为探测器噪声的 3 倍,可认为前置放大器第一级电路噪声在总噪声中占据主导地位。

2.4 前置放大器 PCB 设计

由 2.4 节,抑制前置放大器电路噪声能够有效降低系统总噪声。实际应用中,外部漏电流、静电、电磁干扰等因素会给电路引入额外噪声,使得实测信噪比与理论值差距较大。因此需要优化前置放大器 PCB 设计,减小外部干扰。

光电流输入走线极易受漏电流影响,PCB 板材的阻抗多为 $G\Omega$ 级,若不作处理,电源走线与输入走线之间可能产生 nA 级的漏电流。因此,在输入走线周围增加保护环,连接至地电位,从而使漏电流流入保护环,不流入输入走线。输入走线与保护环均作阻焊层开窗处理,保证保护环与漏电流路径的良好接触。此外,在保护环下方增加保护层铜皮,通过过孔连接到表层的保护环,保护过孔包围了整个保护环,以保护侧面漏电流路径。保护设计的布局布线如图 4 所示。

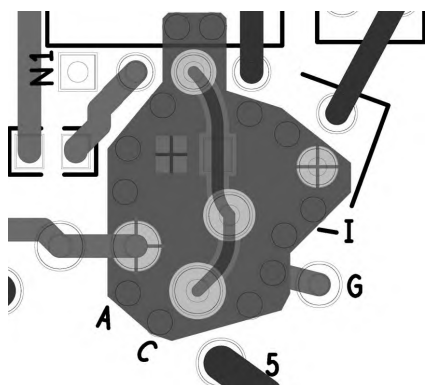


图 4 保护设计布局布线

3 试验和结果

地面试验中,进行了探测电路对入射光强度的响应线性度测试和 NIR2 波段信噪比测试,测试示意图如图 5 所示。卤钨灯和汇聚透镜模拟在轨太阳光谱强度,可变光阑用于微调入射光强,频率采集卡采集并处理探测电路输出的频率信号。

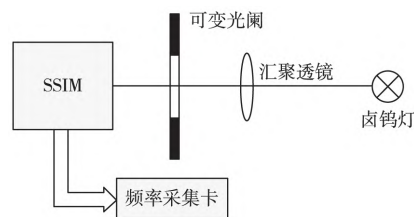


图 5 地面试验示意图

响应线性度测试中,采集不同信号光电流下的输出频率,并进行线性拟合,结果如图 6 所示,探测电路对入射光强度的响应线性度可达 99.95%,满足要求。

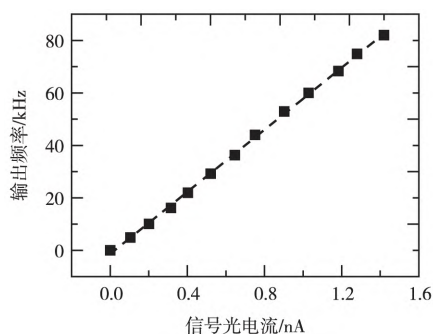


图 6 响应线性度拟合结果

使用标准光源完成系统波长定标和辐射定标,得到仪器在各波长下的光谱响应度,结合近期在轨仪器获得的光谱数据,计算得到 NIR2 波段各测试波长对应光电流。调整卤钨灯、透镜和可变光阑使对应波长光电流等于计算值,实测输出频率的信噪比。信噪比定义为信号与噪声的比值,测试中用均值与标准差比值表示信噪比。

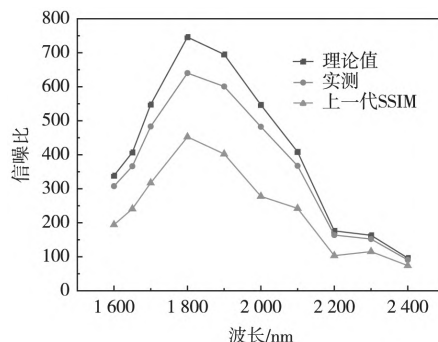


图 7 信噪比测试结果

信噪比测试结果如图 7 所示。各测试波长下的信噪比均满足指标要求,且较上一代 SSIM 有显著提升,更接近理论值。例如,在 1 800 nm 的大信号场景下提升了 42%,在 2 400 nm 的小信号场景下提升了 23%。以上结果表明,设计的光电探测系统具有良好的线性度和噪声特性,能够满足太阳光谱仪的测量需求。

4 结论

本文基于 InGaAs 红外单元探测器设计了一种锁相放大光电探测系统,用于星载太阳光谱仪 1 600 nm~2 400 nm 近红外波段信号检测。介绍了近红外通道光学设计、探测器选型和各电路模块组成,对系统噪声特性进行定量分析,发现抑制前置放大器的电路噪声对于降低总噪声至关重要。针对前置放大器,优化了 PCB 布局布线,加强了输入光电流信号保护与屏蔽。利用卤钨灯模拟在轨太阳光谱强度,进行了响应线性度和信噪比试验。结果表明,探测电路对入射光强度的响应线性度可达 99.95%,测试波段各波长信噪比较上一代仪器均有显著提升。本光电探测系统具有高线性度、低噪声的特性,能够满足太阳光谱仪近红外波段微弱信号检测的需求。

参考文献

- [1] Woods T N, Harder J W, Kopp G, et al. Solar-cycle variability results from the solar radiation and climate experiment (SORCE) mission [J]. Solar Physics, 2022, 297 (4): 43.
- [2] Eftah M, Damé L, Bolsée D, et al. A new version of the SOLAR-ISS spectrum covering the 165 – 3000 nm spectral region [J]. Solar Physics, 2020, 295: 1–16.
- [3] Richard E, Harber D, Coddington O, et al. SI-traceable spectral irradiance radiometric characterization and absolute calibration of the TSIS – 1 Spectral Irradiance Monitor (SIM) [J]. Remote Sensing, 2020, 12(11): 1818.
- [4] Richard E, Harber D, Drake G, et al. Compact spectral irradiance monitor flight demonstration mission [C] //Cube-Sats and SmallSats for Remote Sensing III. SPIE, 2019, 11131: 15–34.
- [5] 雷宽,李乐,黄煜,等. 风云三号黎明星太阳辐照度光谱仪系统噪声与稳定性分析 [J]. 激光杂志, 2022, 43 (4): 17–22.
- [6] Meftah M, Damé L, Bolsée D, et al. A New Solar Spectrum from 656 to 3088 nm [J]. Solar Physics, 2017, 292: 1–21.
- [7] Richard E C, Harber D, Coddington O, et al. Implementation of solar spectral irradiance measurements from the international space station: the TSIS–1 first light and early mission results [C] //AGU Fall Meeting Abstracts. 2018, 2018: SH32B–07.
- [8] 黄雄豪. 高精度太阳直射光谱辐照度仪的研制 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- [9] 韩勇. 光电检测电路的噪声分析与处理 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [10] 高晋占. 微弱信号检测 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.