

# 基于 nA 级电流信号的多通道高精度采集系统设计

闫静纯, 富 帅, 苏浩航, 荣 鹏, 申一伟

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

**摘要:** 在大气成份和含量探测的傅里叶变换光谱探测技术中, 红外探测器输出的电流信号一般极其微弱。本文针对电流信号频率为 kHz 级、电流强度在 nA 级的多元型红外探测器, 通过分析系统噪声来源, 选取高精度、低噪声的精密集成运算放大器, 合理选取电路参数, 设计了一种多通道微弱电流信号高精度采集电路。通过对电路性能进行分析, 结果表明, 该系统可以精确采集到 nA 级的 1 kHz 微弱电流信号, 系统的噪声低, 满足设计要求。

**关键词:** 微弱电流信号; 高精度; 低噪声; 数据采集系统

**中图分类号:** TN23      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2021)05-0417-05

## Design of Multi-channel High Precision Data Acquisition System Based on nA Level Current Signal

YAN Jingchun, FU Shuai, SU Haohang, RONG Peng, SHEN Yiwei

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In the Fourier transform spectrum detection technology of atmospheric composition and content detection, the output current signal of infrared detector is generally very weak. In this paper, a multi-channel weak current signal high-precision acquisition circuit is designed by analyzing the source of system noise, using high-precision and low-noise integrated operational amplifier, and reasonably selecting circuit parameters. An analysis of the circuit performance shows that the system can accurately acquire the nA level 1kHz current signal, and meet the requirements of weak signal detection.

**Keywords:** weak signal, high-precision, low noise, data acquisition system

### 0 引言

随着对大气成份和含量的探测需求越来越大, 要求越来越高, 基于干涉型的傅里叶变换光谱探测技术由于具有光通量大、谱段范围宽、光谱分辨率高等诸多优势, 已成为国内外红外光谱探测技术的发展热点。

在傅里叶变换光谱探测技术<sup>[1-2]</sup>中, 大气红外辐射信号具有信号幅值低、动态范围大、探测精度要求高的特点, 对探测系统的抗干扰能力、噪声抑制水平、量化位数等有很高要求。目前微弱信号探测的研究多集中在微弱电压信号检测, 杜沂东<sup>[3]</sup>、王建宇<sup>[4]</sup>、李军雨<sup>[5]</sup>等针对微弱电压信号的放大电路设计进行了分析。李辉<sup>[6]</sup>等针对单路信号带宽百赫兹以内的 pA 级微电流检测系统设计进行了研究。本文针对电流信号频率为 kHz 级、电流强度在 nA 级的多元型红外探测

器<sup>[7-8]</sup>, 设计了一种多通道微弱电流信号高精度采集电路, 并分析了电路性能, 进一步完善了微弱电流信号探测的研究。

### 1 采集系统总体方案设计

多通道微弱电流信号高精度采集电路总体方案设计如图 1 所示。探测器输出的微弱电流信号经过电流电压转换电路转换为电压信号, 再经过二级放大滤波将混杂在电压信号中的高频噪声进行滤波去除, 并将有效信号放大到 AD 器件的最大输入范围, 后经过 A/D 器件进行模数转换后生成相应的数字信号, 再传输到数据处理部分进行数据处理编排, 最后上传到上位机进行数据处理及分析。

为了扩大电路的动态范围, 模拟部分均采用高压供电芯片, 且均为正负双电源供电, 以保证零点附近的信号可有效采集, 并能降低电源噪声。

收稿日期: 2020-08-26; 修订日期: 2020-12-25.

作者简介: 闫静纯 (1986-), 女, 河北衡水人, 工程师, 主要从事空间红外视频电子学方面的研究工作。E-mail: yanjingchun\_12@163.com.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0500703)。

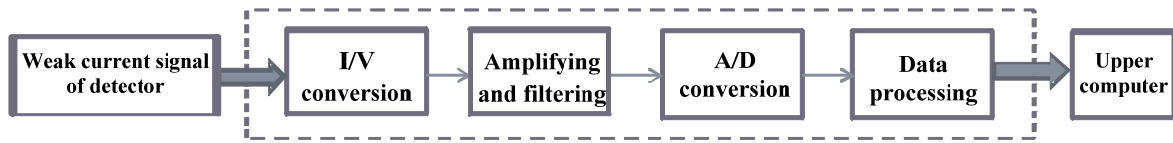


图1 微弱电流信号采集系统的总体方案

Fig.1 General scheme of weak current signal acquisition system

## 2 电路分析设计

### 2.1 电流-电压转换电路

电流-电压转换电路（即  $I/V$  转换电路）是将待采集的微弱电流信号转换并放大到一个较大的电压信号，后续系统再对此电压信号进行滤波放大采集处理。由于探测器输出的电流信号非常微弱，极易受到噪声的干扰，此环节的噪声水平直接影响了整个采集系统，所以需要进行精细的设计。

#### 1) 方案选取

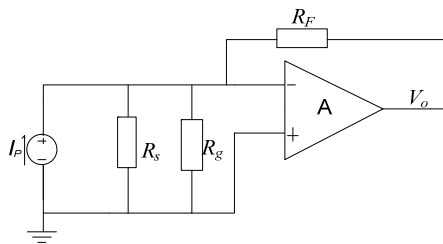
电流电压转换电路<sup>[9]</sup>一般有两种。一种如图 2(a)所示，电阻  $R_s$  作为采样电阻，直接与探测器输出相连，将电流信号转换为相应的电压信号，然后再通过放大电路进行二次放大。

此电路中采样电阻承担电流电压转换的任务，但实际上有效的电阻是  $R_s$  与探测器内阻  $R_d$  的并联值，此时需要探测器内阻远远大于采样电阻  $R_s$ 。在微弱信号采集系统中，有效电阻需要很大，至少为  $M\Omega$  级，但探测器内阻很少能达到很高的阻值，故此方法不适用于  $nA$  级微弱电流信号采集。

另一种是利用高输入阻抗运放的跨阻放大电路，如图 2(b)所示，由于运放的输入阻抗很高，输入运放的电流几乎为 0，电流基本都会流过反馈电阻  $R_F$ ，实现输出电压信号  $V_o = I_p \times R_F$ 。这个电路可以将微弱的电流信号精准地转换为相应的电压信号。

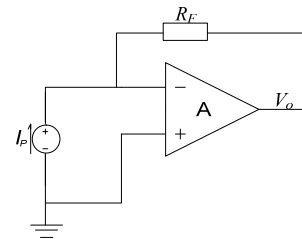
#### 2) 器件选择

电流电压转换的典型电路如图 3 所示，该电路主要包括 4 种噪声源：运放电压噪声密度、运放电流噪声密度、反馈电阻的热噪声以及探测器体电阻的热噪声。若想获得低噪声电路需要降低这 4 种噪声。



(a) 采样电阻型  $I/V$  转换电路

(a) Sampling resistance type  $I/V$  circuit



(b) 跨阻型  $I/V$  转换电路

(b) Transresistance type  $I/V$  circuit

图2  $I/V$  转换电路

Fig.2  $I/V$  conversion circuit

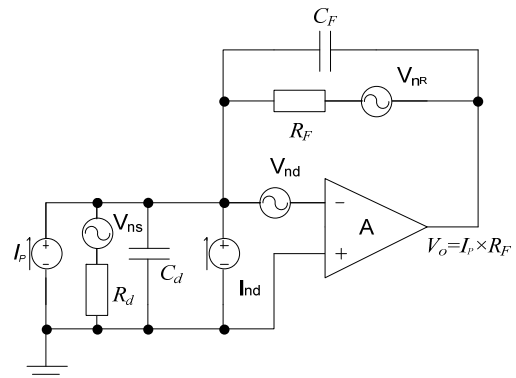


图3 典型  $I/V$  转换电路原理图

Fig.3 Schematic diagram of typical  $I/V$  conversion circuit

在选择运放时，选用低电压噪声密度、低电流噪声密度、低偏置电流、低温漂的高精度运放，从而降低运放的噪声。本文选用的精密运放的电压噪声密度为  $1.8 nV/\sqrt{Hz}$ ，电流噪声密度为  $1.2 pA/\sqrt{Hz}$ ，输入偏置电流仅为  $5 pA$ ，且温度特性良好 ( $< 1 \mu V/^\circ C$ )。供电电压最大为  $\pm 15 V$ ，且为小封装，可节省电路板面积。

在选择反馈电阻时，由于  $I/V$  转换电路的输出电压  $V_o = I_p \times R_F$ ，反馈电阻  $R_F$  直接影响着输出电压的幅值。在微弱电流采集系统里，为了得到大转换增益，反馈电阻应尽量大，以便放大到适合后端 AD 的输入电压范围。但电阻会产生热噪声，热噪声  $V_n^2 = 4k_bTRB_w$ ，以  $V^2/Hz$  为单位，其中  $V_n$  是噪声电压； $k_b$  是玻尔兹曼常数， $1.38 \times 10^{-23} J/K$ ； $T$  是温度， $K$ ； $R$  是电阻； $B_w$  是带宽。当电阻阻值越大，热噪声越大。故需要在电压放大及热噪声大小之间折中处理，且需

要选择低温漂低噪声的高精度电阻。

在选取反馈电容时,由于 IV 转换电路负端直接与探测器输出相连,探测器的输出电容、布线的分布电容以及运放负端的电容会与反馈电阻引起输出电压相位滞后,并且过大的反馈电阻还会造成运算放大器的不稳定。加入反馈电容后,会对电路进行一个相位补偿,并会使电路更加稳定,还可以降低反馈电阻上的等效噪声带宽,起到抑制电路噪声的作用。

### 3) 抗干扰设计

由于微弱电流信号的放大电路前端更容易拾取干扰,会引入很多噪声,影响输出信号的质量,所以在实际电路中需要做更多的抗干扰屏蔽措施。

在 PCB 设计时,IV 转换电路输入端信号走线尽量短,且在中间层走线,在信号线的上下参考层均设计为地参考层,起到屏蔽干扰的作用,减少运放前端引入的干扰。

采用等电位的漏电流噪声抑制技术对 IV 转换电路进行屏蔽保护,即在敏感引脚外围设置保护环,且保护环的偏置电压与敏感引脚相同,这样漏电流就会通过保护环流向模拟地,因而不会对输入产生干扰,降低 IV 转换电路外部波动电压经电路板引入的微小电流波动,从而提高系统的电流分辨力。并在每片芯片的电源管脚处添加滤波电容,以减少电源噪声的影响。

在电路板噪声敏感部位通过使用电磁屏蔽材料做成屏蔽盒,来屏蔽外部噪声对信号的干扰,大大提高电路系统的抗干扰能力。

### 2.2 二级放大滤波及高精度 AD 数据采集

由于待采集的电流信号非常微弱,所以整个采集系统的总增益是非常大的,而单个运放增益又不宜过大,所以系统采用二级放大的方式,放大滤波<sup>[9]</sup>电路如图 4 所示。根据系统要求,二级放大倍数为 1000 倍。该环节主要根据系统带宽设定电路参数,从而实现对信号带通滤波,滤除带外噪声,保证系统信噪比。

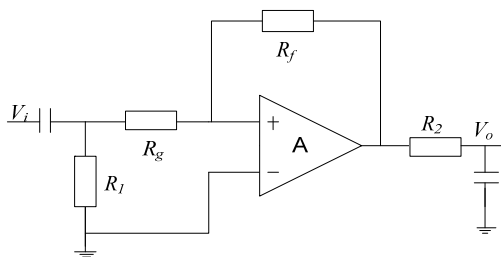


图 4 放大滤波电路

Fig.4 Amplifying and filtering circuit

设计多通道高精度信号同步采集系统,必须对待

测信号进行高分辨率的模数转换 (ADC: analog-to-digital conversion),且选择多通道器件。本文选用的是 8 通道模数转换芯片,量化位数为 16 bits,可支持 8 通道同步采样。供电电压最大为 +15 V,差分输入电压范围: ±20.48 V (最大值),电压范围大,有利于提高动态范围;片内具有采样保持功能,满足同步采集的要求。

其芯片功能框图如图 5 所示。

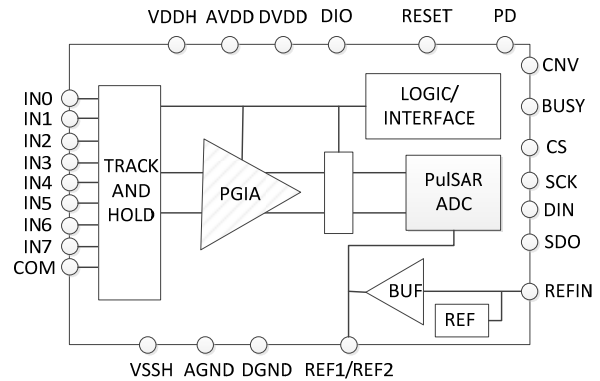


图 5 模数转换器件功能框图

Fig.5 Function block diagram of analog-to-digital converter

## 3 系统性能分析测试

### 3.1 交流传输特性分析

为了更好地分析系统的交流传输特性,使用 Multisim14.1 对设计电路进行仿真,图 6 所示为电流电压转换电路中  $R_F$  分别为 100 MΩ、10 MΩ、1 MΩ,反馈电容  $C_F=0$  pF 的情况下得到的采集系统交流传输特性曲线。从图中可以看出,在一定频率范围内,系统可以根据设计要求将电流放大,但随着频率升高,由于运放的开环增益的限制使得放大倍数在某一频率  $f_c$  开始下降。

从图 6 中可以看到在  $f_c$  附近有个尖峰,这是由于运放的输入端寄生电容与反馈电阻在传递函数中构成极点,导致频率特性发生变化,影响放大电路的稳定性。

通常采用相位补偿的方法,在反馈电阻  $R_F$  两端并联一个小电容  $C_F$ ,构成零点使得相位超前来补偿输入端寄生电容所带来的相位变化。

选择  $R_F=1$  MΩ 并在其两端并联不同的反馈电容  $C_F$  (0 pF、1 pF、5 pF、10 pF),得到仿真结果如图 7 所示。从仿真图中可以看出,只需要很小的电容量就会对频率特性产生很大影响。电容越大, -3 dB 带宽越小。根据系统要求,选择 1 pF 反馈电容。

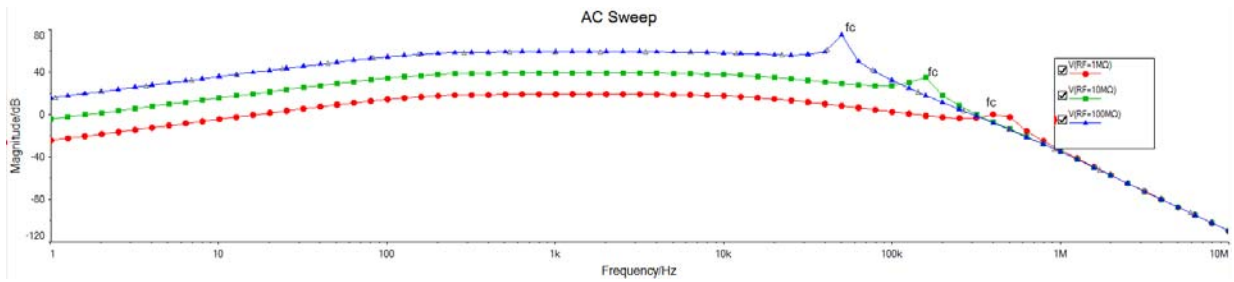


图 6 不同反馈电阻下的系统交流传输特性

Fig.6 AC transmission characteristics of systems with different feedback resistors

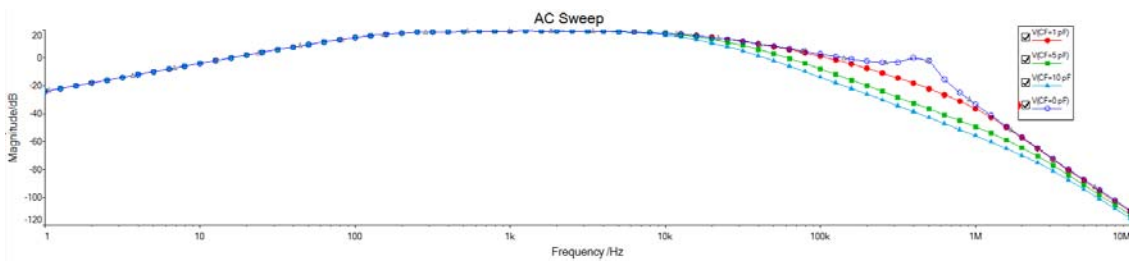


图 7 不同反馈电容下的系统交流传输特性

Fig.7 AC transmission characteristics of systems with different feedback capacitors

### 3.2 输入输出信号测试

本文实验中采用信号源与电阻分压网络的方式产生微弱电流信号来初步验证采集系统的性能，具体方案是：信号发生器输出正弦电压信号，经电阻分压网络后，产生待测的微弱正弦电流信号（电流信号幅值为 4 nA、频率为 1 kHz），经过 IV 转换，二级放大，AD 转换及数据合成后，在图采接收端采集到的 raw 格式图像如图 8 所示。可以看出，采集系统可以准确的采集到 1 kHz 的 nA 级微弱电流信号。

### 3.3 采集系统的噪声测试：

为验证采集系统电路的噪声性能，在不加探测器的情况下对整个采集系统的噪声进行了测试。将采集系统的最前级即 IV 转换电路的输入端连接器使用铜箔纸屏蔽起来，防止引入干扰，采集经过 IV 转换，二级放大，模数转换及数据合成后的数据，对上位机

图采设备采集后的 raw 格式图像进行统计分析，并计算其标准差即整个采集系统的电路噪声。图 9 所示为系统的放大倍数为  $10^9$  时，上位机图采设备采集到的 48 通道噪声情况，其中横坐标表示系统的 48 路通道，纵坐标表示采集到的电路噪声。从图中可看出电路噪声为 30 mV 左右。

### 3.4 加探测器的干涉信号测试

在对采集系统电路进行了充分的输入输出信号测试及噪声测试后，加上电流型探测器，并配上前置光学系统及高灵敏度干涉仪系统，进行了红外辐射干涉信号的采集。图 10 为黑体辐射源温度为 300 K 时，经数据采集系统电流电压转换后测得的干涉信号波形图。从测得的波形分析，数据采集系统可以正确地探测到红外辐射干涉信号。

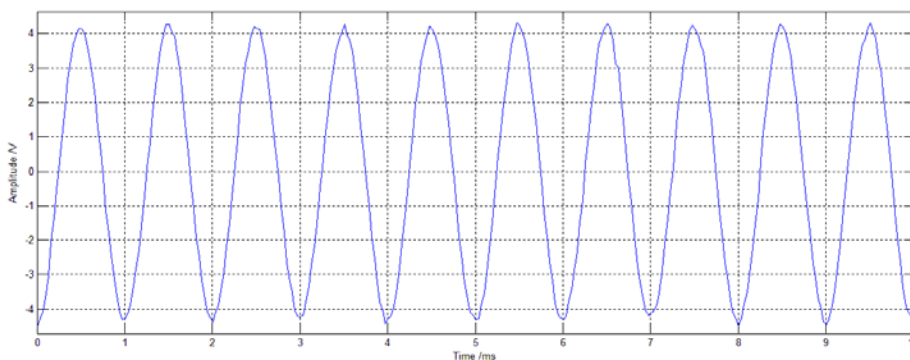


图 8 接收端采集到的 1 kHz 信号

Fig.8 1 kHz signal collected by receiver

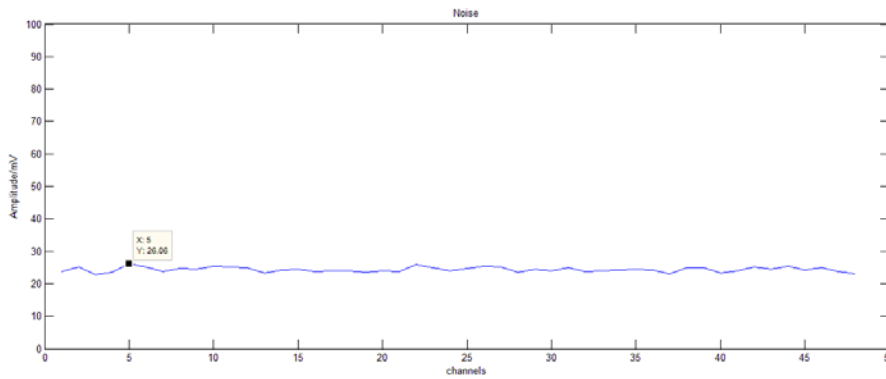


图9 48通道噪声情况 Fig.9 48 channel noise

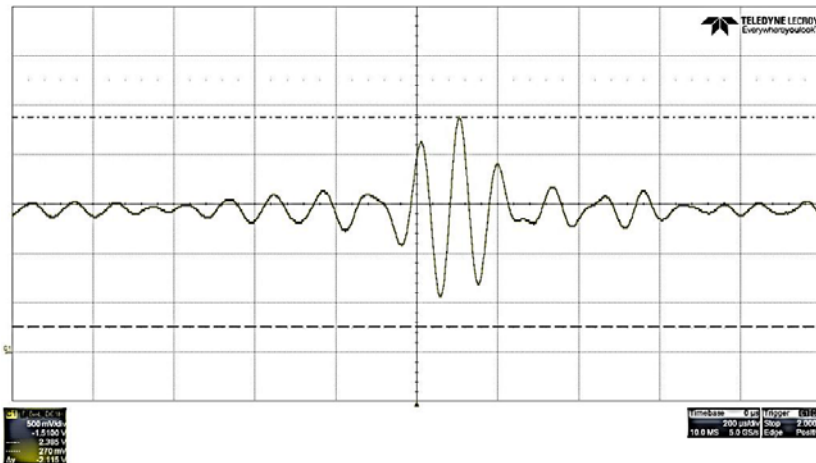


图10 干涉信号波形图 Fig.10 Interference signal waveform

#### 4 结论

本文利用低噪声的高精度运放、高分辨率的多通道模数转换器件,合理选择电路参数,设计了一种多通道微弱电流信号高精度采集电路,并进行抗干扰设计。通过对电路性能进行分析,可知该电路可以精确采集到 nA 级的 1kHz 微弱电流信号,系统的噪声低,满足设计要求,对微弱电流信号探测电路设计具有实际指导意义。

#### 参考文献:

[1] 董欣,徐彭梅,侯立周. 大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪设计与实现[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(3): 29-37.  
DONG Xin, XU Pengmei, HOU Lizhou. Design and Implementation of Atmospheric Infrared Ultra-spectral Sounder[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(3): 29-37.

[2] Griffiths P R, De Haseth J A. *Fourier Transform Infrared Spectrometry*[M]. New Jersey: John Wiley & Sons. Inc., 2007: 161-175.

[3] 杜沂东. 低噪声微弱信号放大电路的设计[J]. 电工技术, 2018(5): 115-120.  
DU Yidong. Design of low noise and weak signal amplification circuit[J]. *Electric Engineering*, 2018(5): 115-120.

[4] 王建宇. 微弱信号高精度线性放大电路的设计[J]. 电子设计工程, 2014, 22(22): 94-96.  
WANG Jianyu. The design of weak signal high-precision linear amplifier circuit[J]. *Electronic Design Engineering*, 2014, 22(22): 94-96.

[5] 李军雨,吴晗平,吕照顺,等.基于 FPGA 的紫外通信微弱信号放大器设计[J]. 激光与红外, 2014, 44(10): 1143-1148.  
LI Junyu, WU Hanping, LV Zhaoshun, et al. Design on weak signal amplifier of UV communication based on FPGA[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(10): 1143-1148.

[6] 李辉,刘鲲.一种 pA 级高性能微电流检测系统的设计[J]. 计量技术, 2014(6): 10-13.  
LI Hui, LIU Kun. Design of pA level high performance micro current detection system[J]. *Measurement Technique*, 2014(6): 10-13.

[7] 邵秀梅,龚海梅,李雪,等.高性能短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展[J]. 红外技术, 2016, 38(8): 629-635.  
SHAO Xiumei, GONG Haimei, LI Xue, et al. Developments of High Performance Short-wave Infrared InGaAs Focal Plane Detectors[J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(8): 629-635.

[8] 王成刚,东海杰,刘泽巍,等.“高分五号”卫星多谱段集成 TDI 线性红外探测器[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(3): 80-84.  
WANG Chenggang, DONG Haijie, LIU Zewei, et al. Development of Multispectral TDI Linear Infrared Detector for GF-5 Satellite[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(3): 80-84.

[9] 严明,李刚,郭明安.微电流信号的高带宽调理技术及应用[J]. 电子学报, 2017, 45(9): 2292-2295.  
YAN Ming, LI Gang, GUO Mingan, et al. High Bandwidth Signal Modulation Technique for Micro Current Signal[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(9): 2292-2295.

[10] 李旭辉,吴晗平,李军雨,等.近地层紫外动态目标探测微弱信号放大器设计[J]. 红外技术, 2014, 36(6): 471-474.  
LI Xuhui, WU Hanping, LI Junyu, et al. Design of Weak Signal Amplifier for UV Dynamic Target Detection in the Surface Layer[J]. *Infrared technology*, 2014, 36(6): 471-474.