文章编号：1672-8785(2025)03-0016-07

中长波双波段红外焦平面探测器驱动电路设计

张 禹 宫 宸 魏洪苗 刘纪洲 李 红

（华北光电技术研究所，北京 100015）

摘 要：双波段红外焦平面探测器是未来发展趋势之一，在越来越多的场景中得到应用。针对中长波双波段红外焦平面探测器的驱动电路进行设计，提出了包括双模式驱动电路、独立动态范围调整电路、低模拟信号调理电路、双衬底切换电路、电源驱动电路和分布式积分的设计方法。该驱动电路能够对红外焦平面探测器敏感元输出的模拟信号进行有效变换，同时给红外焦平面探测器提供所需的偏置电压和驱动时序。本文所设计的中长波双波段红外焦平面探测器驱动电路在中波和长波图像融合后具有良好的成像效果。

关键词：双波段；红外焦平面探测器；驱动电路；分布式积分；图像融合

中图分类号：TP391.41 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1672-8785.2025.03.003

Design of Driving Circuits of Mid- and Long-Wave Dual-band Infrared Focal Plane Detectors

ZHANG Yu, GONG Chen, WEI Hong-miao, LIU Ji-zhou, LI Hong

(*North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China*)

Abstract: Dual-band infrared focal plane detectors are one of the future development trends and are being used in more and more scenarios. Aiming at the design of the driving circuit for the mid- and long-wave dual-band infrared focal plane detector, the design method proposed includes a dual-mode driving circuit, an independent dynamic range adjustment circuit, a low analog signal conditioning circuit, a dual-substrate switching circuit, a power driving circuit and distributed integration. The driving circuit can effectively transform the analog signal output by the sensitive element of the infrared focal plane detector, and provide the required bias voltage and driving timing to the infrared focal plane detector. The driving circuit of the mid- and long-wave dual-band infrared focal plane detector designed in this paper has a good imaging effect after the mid-wave and long-wave images are fused.

Key words: dual-band; infrared focal plane detector; driving circuit; distributed integration; image fusion

收稿日期：2024-12-30

作者简介：张禹(1989-)，女，河北承德人，硕士研究生，主要研究方向为红外热像仪机芯电路设计。E-mail：zy18301237913@sina.cn

0 引言

当前，战场环境日趋复杂。红外热成像技术是解决战场透明度的重要手段，它也兼具一定的揭伪能力。随着伪装技术的广泛应用，伪装材料可有效隐藏单波段的辐射信息，从而达到“隐身”目的。传统的单波段红外热成像技术在揭伪方面逐渐乏力。伪装材料由于工艺的限制，可“隐身”的波段比较有限。而采用双波段融合的技术途径可实现深度揭伪，因此双波段红外焦平面探测器将成为未来发展方向之一。

国外对双波段红外热成像技术研究较早[1]，美、德、法、英等国先后基于单波段探测器开发了双波段红外热成像系统，其技术相对成熟[2-3]。国内的制冷型红外探测技术起步较晚，但近年来发展势头迅猛，部分制冷型红外焦平面探测器的性能已可比肩国外[4]。在此基础上，国内的多家企业也将目光转向双波段红外热成像技术。中国电子科技集团公司第十一研究所、昆明物理研究所和武汉高德红外有限公司等相继研发了基于单波段探测器的双波段制冷型红外焦平面探测器，并已初步实现工程化应用。

本文先从红外热成像系统进行分析，给出红外成像电路的结构，然后提出中长波双波段红外焦平面探测器驱动电路的设计方法。

1 红外热成像系统

红外热成像系统主要由机械结构、光学系统(含红外物镜、变倍镜、补偿镜、反射镜等)、电机和参考源、红外焦平面探测器、红外成像电路等几部分组成，如图 1 所示。

2 红外焦平面探测器驱动电路设计

红外成像电路在设计上遵循组件化、模块化的总体设计思路，主要分为信号处理电路、接口和控制电路、制冷机电源电路以及红外焦平面探测器驱动电路，如图 2 所示。

红外焦平面探测器驱动电路需要给红外焦平面探测器提供其正常工作所需的偏置电压和驱动时序[5]，从而将红外焦平面探测器敏感元输出的模拟信号转换成数字信号，并能够正常输出和最终成像。因此，它是红外焦平面探测器与信号处理电路之间的桥梁。红外焦平面探测器驱动电路作为红外成像电路中信号处理电路的前级，直接与红外焦平面探测器相连，其性能的优劣直接影响并决定了红外热成像系统的整体性能指标，同时也决定着红外焦平面探测器使用的安全性。

3 中长波双波段红外焦平面探测器的驱动电路设计

中长波双波段红外焦平面探测器驱动电路与传统单波段红外焦平面探测器驱动电路相比

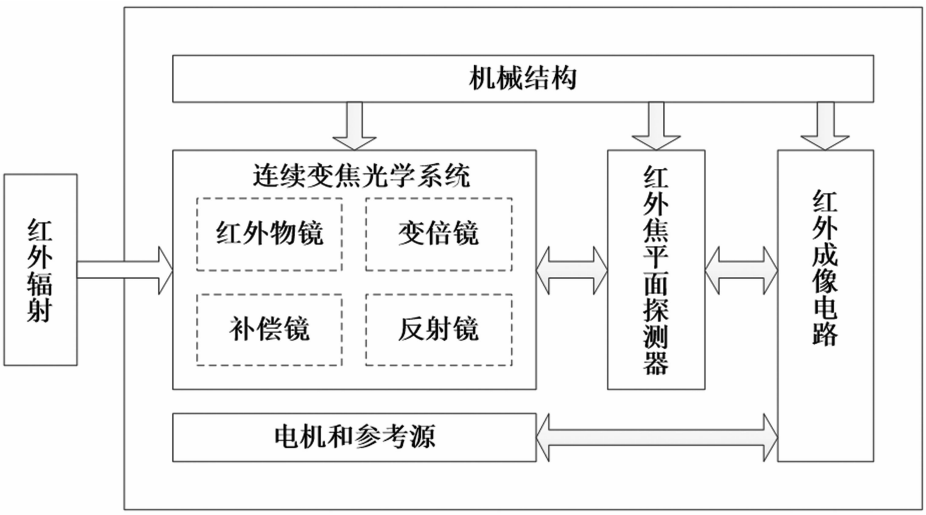

图 1 红外热成像系统组成框图

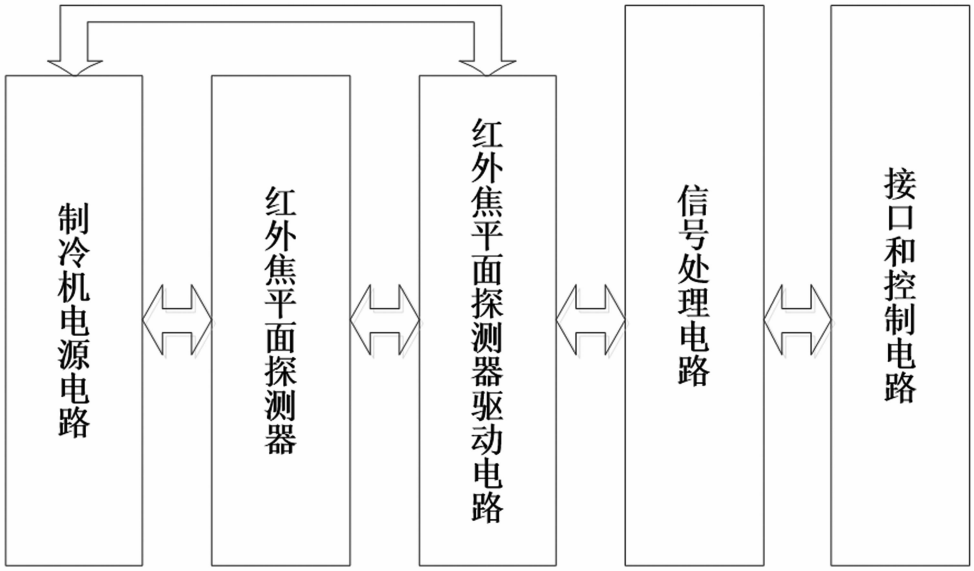

图 2 红外成像电路组成框图

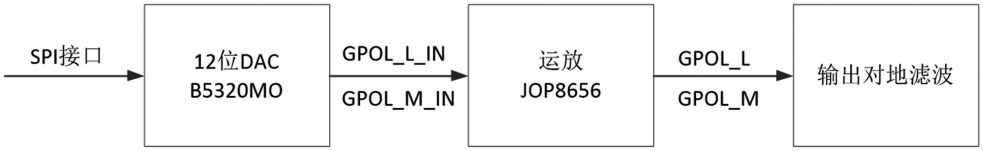

图 3 传统的 GPOL 电路设计方法

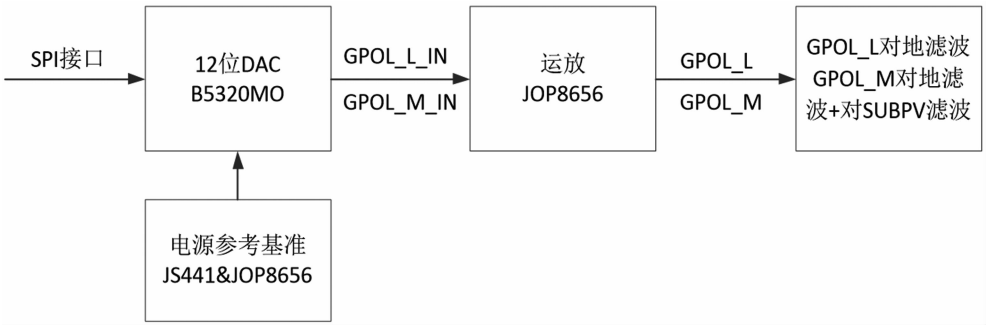

图 4 改进后的 GPOL 电路设计方法

有较大区别。本文针对中长波双波段探测器驱动电路中的关键电路进行详细说明。

3.1 N-on-P、P-on-N 双模式同时驱动电路

光伏(Photovoltaic，PV)二极管可以分为两种结构形式：以 P 型硅为衬底的 PV 二极管(N-on-P)和以 N 型硅为衬底的 PV 二极管(P-on-N)[6]。两种类型的二极管对应的 PV 二极管衬底(SUBPV)的电学电平分别为低电平(0 V)和高电平(5 V 或 3.3 V)。中长波双波段探测器内部的中波和长波读出电路分别采用了以上两种 PV 二极管结构[7]。红外焦平面探测器中 PV 二极管偏置(GPOL)电压是其到 SUBPV 的相对值，中波红外焦平面探测器的 GPOL(GPOL_M)电压为 3.5～5 V，相对的 SUBPV 电压为 5 V；长波红外焦平面探测器的 GPOL(GPOL_L)电压为 0～2 V，相对的 SUBPV 电压为 0 V。在单波段探测器驱动电路设计中，只会出现一种形式的 GPOL 电路设计。而中长波双波段探测器驱动电路中需要同时对两种形式的 GPOL 电路进行设计。

根据单波段探测器驱动电路的设计方法，中长波双波段探测器驱动电路中传统的 GPOL

电路设计方法如图 3 所示。本文改进后的 GPOL 电路设计方法如图 4 所示。

对 GPOL 电路进行了两点改进：一是将数字-模拟转换（Digital-to-Analog Conversion，DAC）器件 B5320MO 的电源采用噪声更小、精度更高的电平基准芯片，这样可以充分保证 DAC 内部电路基准电平的稳定性，进而提高 GPOL 的信号质量；二是 GPOL_M 输出电路由原来的对地滤波，增加对 SUBPV 滤波，充分保证中长波双波段探测器中 PV 二极管对其自身 SUBPV 的稳定性。

3.2　中波和长波独立动态范围调整电路

由中长波双波段红外探测器手册可知，中波和长波红外焦平面探测器模拟信号（简称中波和长波模拟信号）输出特征如表 1 所示。可以看出，中波和长波模拟信号的输出范围不一致。若采用传统 8 通道（中波模拟信号输出 4 个通道，长波模拟信号输出 4 个通道）的电路设计方案，中波和长波模拟信号输出的动态范围为 0.7～4.4 V，幅值为 3.7 V。若采用统一的处理架构，则模拟信号动态范围调整阶段需要对模拟信号进行大幅度衰减，相当于每个波段信号在模拟-数字转换（Analog-to-Digital Conversion，ADC）阶段均未达到满量程使用，降低了信号的精度，导致成像效果受到影响。

中波模拟信号经过 ADC 变换至数字信号后衰减，如式（1）所示：

$$\frac{3.5\ \mathrm{V}-0.7\ \mathrm{V}}{3.7\ \mathrm{V}}\times ADC_{\mathrm{range}}=0.81ADC_{\mathrm{range}} \tag{1}$$

长波模拟信号经过 ADC 变换至数字信号后衰减，如式（2）所示：

$$\frac{4.4\ \mathrm{V}-1.6\ \mathrm{V}}{3.7\ \mathrm{V}}\times ADC_{\mathrm{range}}=0.76ADC_{\mathrm{range}} \tag{2}$$

改进后的电路设计中，将 8 通道模拟信号处理分成两部分设计（4 个一组），根据中波和长波不同的输出范围分别进行变换。这样可以充分利用 ADC 的转换精度，提高成像质量。该设计中针对中波和长波模拟信号的变换设置了两组基准电平，保证中波和长波模拟信号电路中信号变换和调整的灵活性。

3.3　接近截止区的低模拟信号调理电路

由于中波模拟信号输出的低电平只有 0.7 V，在模拟信号处理中，增加了运算放大器的负电源，以保证模拟信号变换过程中的信号完整性。模拟信号变换过程中，需要特别注意运算放大器正电源和负电源的上电顺序。

3.4　高速低噪声双衬底切换技术

中长波双波段红外探测器的中波和长波模拟信号采用交替模式进行输出。在中波模拟信号输出时，需要给 SUBPV 提供一个 5 V 模拟信号（或 5 V 模拟电源）；在长波模拟信号输出时，需要给 SUBPV 提供一个 0 V 模拟信号（或 0 V 模拟电源）。SUBPV 信号要求噪声极低，SUBPV 严重影响红外热成像系统的热灵敏度指标——噪声等效温差（Noise Equivalent Temperature Difference，NETD）。SUBPV 信号要求切换速度响应较快，对应波段的积分必须从 SUBPV 稳定切换完成后才能开始。这对红外焦平面探测器驱动电路设计提出了难题，因为低噪声和快速切换是一对矛盾的指标。经过多轮方案对比、讨论和测试，针对 SUBPV 需求进行了双通道模拟信号双衬底切换电路的设计。电路框图如图 5 所示。

表 1　模拟信号输出特征

电学名称	典型低电平	典型高电平
中波模拟信号输出 OUTM1、OUTM2、OUTM3、OUTM4	0.7 V（对应饱和电流）	3.5 V（对应零电流）
长波模拟信号输出 OUTL1、OUTL2、OUTL3、OUTL4	1.6 V（对应零电流）	4.4 V（对应饱和电流）

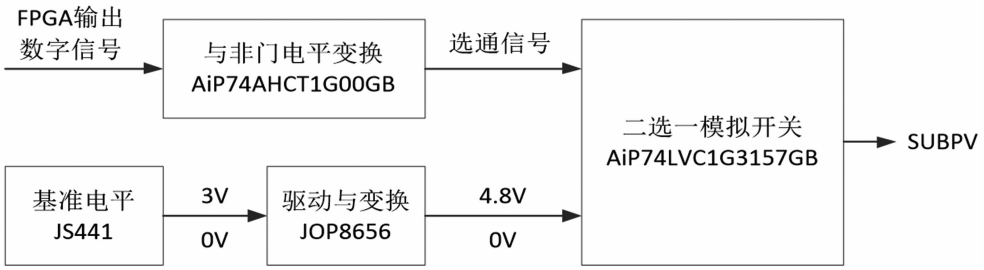

图 5 双衬底切换电路框图

表 2 国产 1763 芯片性能对比

参数	公司 1 国产 1763 芯片	公司 2 国产 1763 芯片
电压压差 I_{load}=500 mA	0.45 V(最大)	0.32 V(典型)，0.45 V(最大)
输出电压噪声	—	20 μV(RMS)
纹波抑制比	50 dB(最小)	50 dB(最小)，65 dB(典型)

电路设计中需要将原有探测器手册中的 5 V 高电平降至 4.8 V 使用，充分保证全温度范围内运算放大器 JOP8656 工作在线性区且提供的模拟信号噪声小于 4 nV/Hz$^{1/2}$；模拟开关提供纳秒级的转换速率，可以保证不同衬底之间的切换速度，满足中长波双波段红外探测器的使用需求。此外，模拟信号被模拟开关选通后的输出不可以再次滤波，模拟信号需要就近连接至红外焦平面探测器的管脚，以避免影响切换速度。

3.5 低噪声电源驱动电路

中长波双波段红外探测器由于其特殊的制造工艺，对红外焦平面探测器模拟电源和数字电源的质量要求较高。考虑到国产化设计，选用低噪声线性稳压器 LT1763 对应的国产化产品为红外焦平面探测器提供电源。由于国产器件的不确定性，对公司 1 和公司 2 的国产 1763 芯片进行了性能参数对比及实验验证(见表 2)。

从手册上分析，两种国产 1763 芯片的性能参数基本一致。将它们应用在红外焦平面探测器驱动电路上，进行实际测量。结果表明，公司 1 芯片的输出电压纹波和噪声比公司 2 芯片的大，使用公司 2 芯片的红外热成像系统成像后的图像质量更好。因此采用公司 2 生产的 1763 芯片进行后续探测器电源偏压的设计。国产线性稳压器的实测性能指标与产品手册可能存在偏差。通常线性稳压器的性能好坏直接影响红外热成像系统的最终图像质量。在选型阶段应该选用较成熟的产品，并选用较为市场化的通用封装。

3.6 中波和长波分布式积分

中长波双波段红外探测器读出电路采用了基于快照方式的设计方法，两个波段的探测器信号读出方式均为先积分后读出(Integrate Then Readout，ITR)。另外，中长波双波段探测器增加了同时读出控制信号(ROSYN)。当中波电路和长波电路分别完成积分工作后，拉高 ROSYN 即可控制中波数据和长波数据同时读出。中长波双波段探测器读出电路的时序图如图 6 所示。

实际测试过程中，采用先中波再长波的探测器积分时间配置时序。由于两个波段的积分时间存在先后差异，对运动目标成像时，生成的中波图像和长波图像可能出现时间错位现象，表现为算法融合后的中长波图像存在重影，即错误地凸显了由于积分时间错位产生的信号差异，如图 7 所示。

因此，为了解决以上问题，对积分时间时序进行了重新设计，提出了全新的中波和长波分布式积分方法。其时序图如图 8 所示。

在时间上，将中波的积分时间分割为 n 份，长波的积分时间分割为 $n+1$ 份，分别作为中波、长波分布式积分的最小时间单位。在

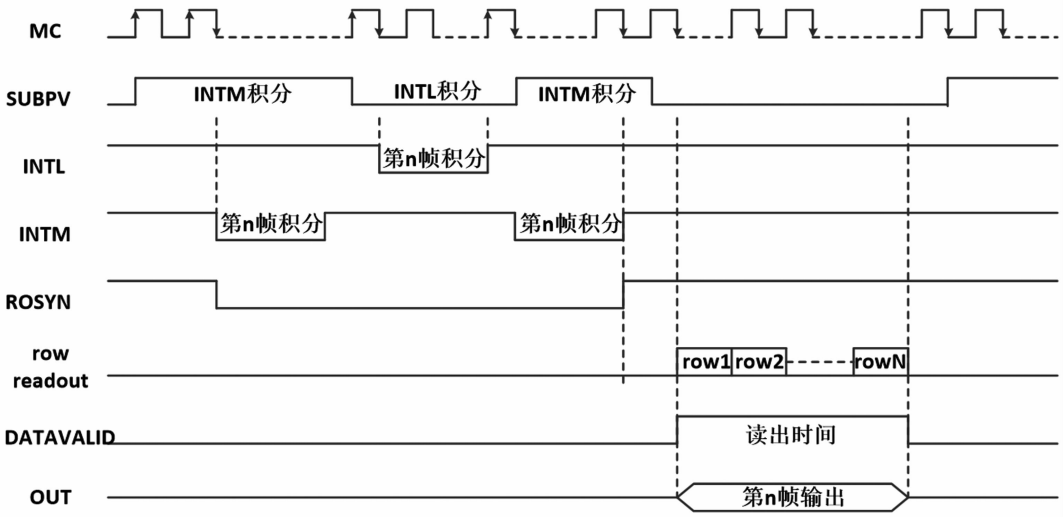

图 6 中长波双波段探测器读出电路的时序图

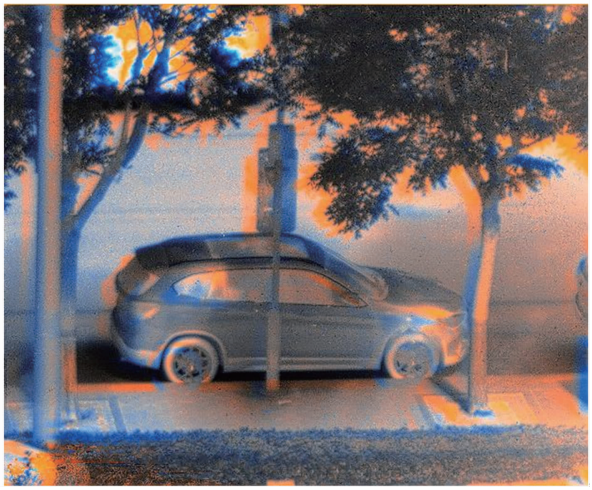

图 7 中长波图像存在重影现象

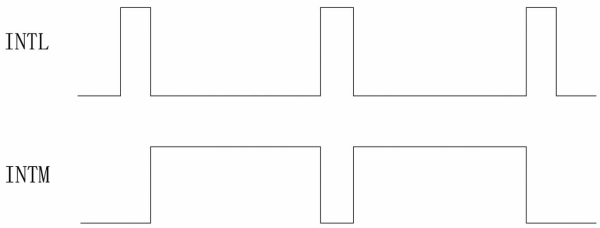

图 8 中波和长波分布式积分

生成积分时间信号时，依次按长波、中波、……、长波的次序发送。中波的积分时间和长波的积分时间完全分散，而且通过程序设计，可以适应任意不同长度的中长波积分时间组合。经过测试，这种分布式积分时间方法可以完全消除因中波和长波积分时间不同而产生的重影现象，如图 9 所示。

图 9 分布式积分消除重影

此外，受中波和长波衬底切换速度的影响，中波和长波积分时间切换过程中必须保证衬底稳定后再积分。因此分布积分不易过多，否则会造成积分时间利用率低，影响整机信噪比。

4 结束语

本文对红外焦平面探测器驱动电路进行了深入分析，提出了适用于中长波双波段红外焦平面探测器驱动电路的一系列设计方法。与传统单波段红外焦平面探测器驱动电路相比，该电路对中波和长波都具有更好的适应性，可以极大地降低不同波段之间的切换噪声，有效地改善了电路性能，提高了中波和长波图像融合后的图像质量。

参考文献

[1] 赵志刚，王鑫，彭汀海，等. 国外中长波双波段红外成像技术的发展及应用 [J]. **红外技术**，2020，**42**(4)：312-319.

[2] Donald F K，Jason S G，Adam M K，et al. 3rd-generation MW/LWIR Sensor Engine for Advanced Tactical Systems [C]. *SPIE*，2008，**6940**：1-12.

[3] Munzberg M，Breiter R，Cabanski W，et al. Dual Color IR Detection Modules，Trends and Applications [C]. *SPIE*，2007，**6542**：1-8.

[4] 刘铭，邢伟荣，刘京生，等. 中/长波双色二类超晶格红外探测器技术 [J]. **激光与红外**，2022，**52**(12)：1843-1847.

[5] 吴和然，周云，张宁，等. 非制冷红外探测器低噪声驱动和处理电路的设计研究 [J]. **红外技术**，2011，**33**(9)：505-508.

[6] 郝斐，赵硕，杨海燕，等. 长波 p-on-n 镉汞红外焦平面器件研究进展 [J]. **红外**，2022，**43**(4)：1-8.

[7] Radford W A，Patten E A，King D F，et al. Third Generation FPA Development Status at Raytheon Vision Systems [C]. *SPIE*，2005，**5783**：331-339.