

高灵敏度 II 类超晶格长波红外探测系统研究

饶鹏^{1*}, 张磊², 赵云峰^{1,3}, 陆福星^{1,3}, 许佳佳⁴, 王芳芳⁴

1. 中国科学院智能红外感知重点实验室, 上海 200083;
2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;
3. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
4. 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘要: 以 II 类超晶格 320×256 长波红外探测器为核心部件, 开发了一套高灵敏度长波红外探测系统. 介绍了 II 类超晶格红外探测器的技术指标及系统的主要结构和工作方式. 为充分发挥该红外探测器的灵敏度, 设计了高灵敏度信息获取系统, 并介绍了该信息获取系统的软硬件设计. 该信息获取系统采用了自适应信号调理技术, 以降低信息获取噪声, 提升探测系统的灵敏度和动态范围. 最后对整套长波红外探测系统开展了信息获取噪声测试、系统性能测试及外场成像实验. 实验结果表明: 长波红外探测系统的信息获取噪声低至 0.065 mV , 系统的噪声等效温差 (NETD) 达到 19.6 mK , 黑体探测率为 7.72×10^{10} , 外场成像质量良好, 图像细节清晰, 对比度高. 该长波红外探测系统有利于推动 II 类超晶格红外探测器在高灵敏度长波红外遥感探测中的应用.

关键词: 光电探测系统; 长波红外; 高灵敏度; II 类超晶格

中图分类号: TN21 文献标识码: A

Research on high sensitivity type-II superlattice long wavelength infrared detection system

RAO-Peng^{1*}, ZHANG-Lei², ZHAO Yun-Feng^{1,3}, LU Fu-Xing^{1,3}, XU Jia-Jia⁴, WANG Fang-Fang⁴

1. Key Laboratory Of Intelligent Infrared Perception, Chinese academy of sciences, Shanghai 200083, China;
2. Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094, China;
3. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
4. Key Laboratory of Infrared Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A high-sensitivity long wavelength infrared detection system was developed based on the type-II superlattice 320×256 long wavelength infrared detector. The technical specifications of the type-II superlattice infrared detector and the main structure and working mode of the infrared system are introduced. In order to give full play to the sensitivity of the infrared detector, a high-sensitivity information acquisition system was developed. The software and hardware design of the information acquisition system is introduced. The information acquisition system adopted an adaptive signal conditioning technology to reduce information acquisition noise and improve sensitivity and dynamic range of the infrared system. Finally, the information acquisition noise test, system performance test and outfield imaging experiment are carried out for the whole long wavelength infrared detection system. The experimental results show that the information acquisition noise of the long wave infrared detection system is 0.065 mV , the NETD is 19.6 mK , and the blackbody detectivity is 7.72×10^{10} . The quality of outfield imaging is good, the details of the images are clear and the contrast is high. The long wavelength infrared detection system is conducive to the application of type-II superlattice infrared detectors in high sensitivity long wavelength infrared remote sensing.

Key words: photoelectric detection system, long wavelength infrared, high-sensitivity, type-II superlat-

收稿日期: 2018-05-03 修回日期: 2018-12-07

Received date: 2018-05-03 revised date: 2018-12-07

基金项目: 预研项目 (30502030101)

Foundation items: Supported by the pre-research project (30502030101)

作者简介 (Biography): 饶鹏 (1977-) 男, 研究员, 博士, 主要从事光电系统工程方面的研究工作. Email: Peng_rao@mail.sitp.ac.cn

tice

PACS: 84.30.-r

引言

红外遥感技术利用探测场景的温度和发射率差异形成的红外辐射差实现目标探测识别,具有覆盖范围广、隐蔽性好、抗干扰能力强、全天候工作和可识别伪装目标的特点,在气象观测、环境监测、地球资源勘探以及目标侦察等领域广泛应用^[1-3]。随着第三代红外探测器技术的不断发展,红外遥感探测系统向着更高探测灵敏度的方向发展,以实现更高的探测能力,满足弱目标的探测需求^[4]。

目前应用最广泛的是碲镉汞探测器,为了获取更好的红外探测材料,InAs/GaSb II 类超晶格材料于 1987 年被用于红外探测^[4-5]。II 类超晶格红外探测器具备量子效率高、暗电流低、器件均匀性好以及覆盖波段范围广(3~30 μm)的优点,有较大的应用前景和发展潜力^[6-8]。德国的 AIM 和 IAF 在 2006 年开发了 384×288 II 类超晶格中波双色探测器,波段为 3~4 μm 和 4~5 μm,NETD 达到 12 mK 和 22 mK^[9]。2009 年美国 Raytheon 和 JPL 研发了 1 024×1 024 II 类超晶格长波红外探测器,探测率达到 1.1×10¹¹^[10,11]。2012 年美国的西北大学研发了 1 024×1 024 II 类超晶格长波红外探测器,在制冷温度 68 mK 时 NETD 达到 22.5 mK,量子效率约 78%^[12,13]。中国科学院半导体所研制了截止波长达到 10 μm 和 16 μm 的 II 类超晶格探测器材料^[14],中国科学院半导体所等还研制了 640×512 的 II 类超晶格长波探测器^[15-17];西安电子科技大学研究了规模为 128×128 的短波红外探测器^[18];上海技术物理研究所的陈建新、周易等也研制了截止波长为 12.50 μm 的长波 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器^[19,20]。上述研究表明了 II 类超晶格探测器在中波和长波红外波段的高性能、低暗电流和高工作温度的优点,是研制高灵敏度长波红外探测系统的重要基础。因此,以上海技术物理研究所研制的 II 类超晶格长波红外探测器为核心部件,构建了一套高灵敏度长波红外探测系统,并通过实验验证了该系统的各项性能。

1 长波红外探测系统概述

1.1 II 类超晶格长波红外探测器介绍

该长波红外探测系统的核心组件是上海技术物理研究所研制的 II 类超晶格面阵型长波红外探测

器^[21],其部分性能指标如表 1 所示。杜瓦组件如图 1 所示。该探测器的响应波段为 8~12 μm,采用 CTIA 型读出电路,封装在微型金属杜瓦中,内置集成式制冷机,工作温度约 65 K,有 4 路模拟输出通道。

表 1 II 类超晶格长波红外探测器的技术指标
Table 1 Technical indexes of the type-II superlattice LWIR detector

参数	规格
像元尺寸	30 μm×30 μm
像元规模	320×256
响应波段	8~12 μm
数据读出方式	1 路、2 路或 4 路读出
主时钟频率	<5 MHz
最小积分时间	5.1 μs
满阱电荷容量	18Me-
工作温度	65 K

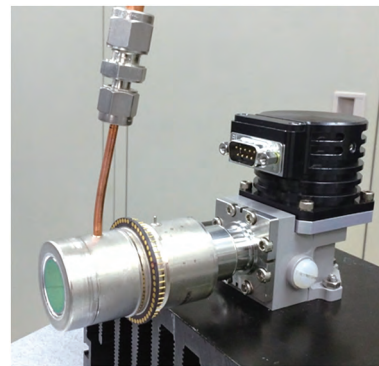


图 1 II 类超晶格长波红外探测器杜瓦组件

Fig. 1 The type-II superlattice LWIR detector dewar components

1.2 系统主要结构

该长波红外探测系统的主要结构如图 2 所示。场景的红外辐射经过光学系统后聚集在红外探测器上,通过光敏元的光电转换并将信号传递给读出电路,最后输出模拟图像信号至信息获取系统。信息获取系统除对红外探测器提供模拟偏压和数字时序驱动外,最主要的功能是对探测器输出的模拟图像信号进行减偏置、放大和滤波等信号调理并进行 AD 转换。该信息获取电路采用了自适应信号调理技术,内置数字-模拟转换器(DAC)和可调增益放大器(VGA),可动态调节偏置电压和放大倍数,从而自适应捕捉红外场景变化,实现降低信息获取系统噪声、提高系统动态范围的目的。信息获取系统将数字

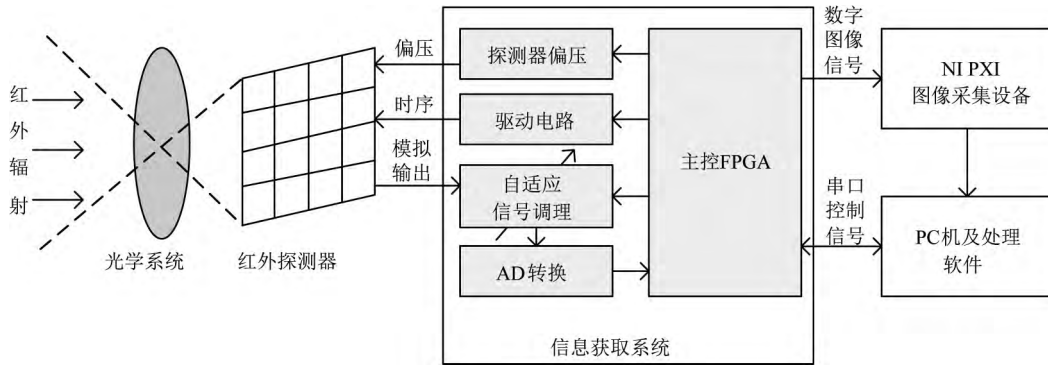


图2 长波红外探测系统的结构
Fig.2 Structure of the LWIR detection system

化的红外图像信号传输至 NI PXI 图像采集设备,并最终传输至 PC 机完成处理和存储等操作. PC 机通过 RS232 串口发送指令,以控制该探测系统的工作状态.

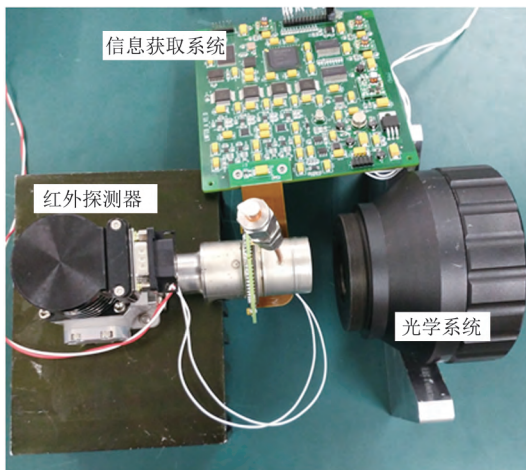


图3 长波红外探测系统的实物图
Fig.3 Physical map of the LWIR detection system

系统所采用的光学系统的谱段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$, 焦距为 100 mm, 口径为 50 mm, 光学透过率为 85%. 系统采用的图像采集卡为 NI PXI-7952R 和 NI 6583 组成的 FlexRIO 模块进行图像采集, 可提供 16 路 200 MHz 的 LVDS 信号的采集通道, 能够满足系统高帧频图像实时传输和显示的要求.

2 高灵敏度信息获取系统设计

2.1 FPGA 信号处理软件设计

主控 FPGA 选用 Xilinx 公司的 XC6SLX45, 完成数据传输处理和系统控制功能, 各功能模块框图如图 4 所示, 主要实现的功能包括:

1) 串口接收/发送模块通过 RS232 接口与 PC

机通信, 接收和发送各类指令, 例如开关机控制, 积分时间改变, 读出通道选择等;

2) 总体控制模块根据串口传来的指令控制 FPGA 各模块的工作状态;

3) 时序驱动模块产数字驱动信号 (CLK、DATA、FSYNC 和 LSYNC), 并由外部驱动电路转换到探测器所需的数字电平;

4) 调理参数更新模块根据探测器输出的信号电压范围, 动态调节调理参数, 并通过 VGA 控制模块和 DAC 控制模块设置 VGA 和 DAC 的工作状态;

5) 调理后的模拟信号在 ADC 控制模块的控制下, 经 ADC 转换为数字信号;

6) 图像预处理模块结合外部的 SRAM 和 FLASH 资源, 对原始的数字图像信号进行非均匀性校正和盲元补偿等预处理操作, 并经图像传输模块通过 LVDS 接口传输至后端的 NI PXI 图像采集设备.

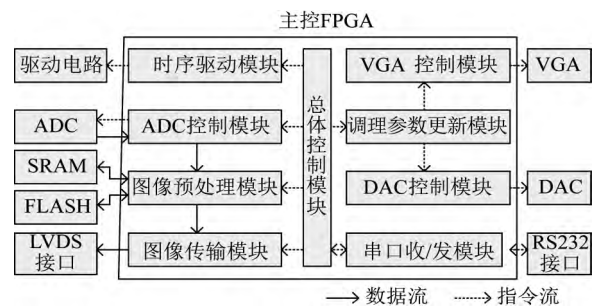


图4 FPGA 软件结构
Fig.4 Structure of the FPGA signal processing software

2.2 偏置电压电路设计

该 II 类超晶格红外探测器共需要 5 种直流工作电压, 包括 3 种精度要求较高的偏置电压和两种探测器供电电压, 如表 2 所示.

表 2 偏置电压参数

Table 2 Bias voltage parameters

名称	定义	电压	电流	噪声设计值
VPOS	模拟电源	5.5 V	<25 mA	<20 μ V
VPD	数字电源	5.5 V	<1 mA	<20 μ V
VREF	参考电平	1.6 V	<1 mA	<2.8 μ V
IMSTR_ADJ	总电流调节	3.6 V	<1 mA	<2.8 μ V
VDET_ADJ	探测器偏置调节	4.9 V	<1 mA	<2.8 μ V

其中, 数字电源 VPD 和模拟电源 VPOS 对噪声的要求相对较低, 选用 LT1763 电源芯片, 其噪声电压的 RMS 值小于 20 μ V. 其余三个偏置电压 VREF、IMSTR_ADJ 和 VDET_ADJ 直接影响光敏二极管的工作状态, 对探测器的噪声和动态范围有重要作用, 应尽量提高其电压稳定性, 降低噪声和温度漂移等影响. 因此这三个偏压的电路设计中, 采用基准电压源产生高精度电压, 然后用电阻分压网络产生所需电压, 最后通过低噪声运放构成的电压跟随电路进行隔离和缓冲, 产生偏置电压 VREF 的电路原理图如图 5 所示. 该电路采用的高精度基准电压源为 ADR4550 芯片, 该芯片可输出 5 V 直流电压, 电压漂移小于 0.02%, 噪声电压小于 2.8 μ V.

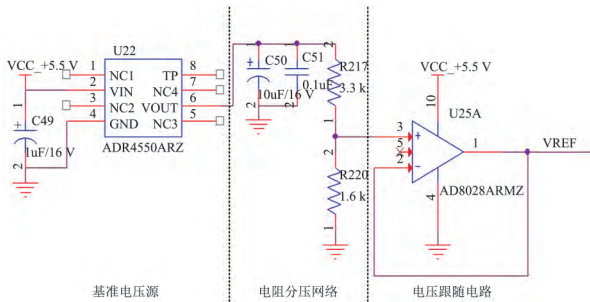


图 5 偏压产生电路原理图

Fig.5 Schematic diagram of the bias generating circuit

2.3 自适应信号调理及 AD 转换电路设计

该信息获取系统采用自适应参数可调的模拟调理电路. 图 6 是该信号调理电路及 AD 转换电路的结构图. 该信号调理电路采集探测器输出的模拟信号, 同 DAC 产生的偏置电压在减法电路中进行差分操作, 并由单端转差分电路转换为差分信号, 后经可调增益放大电路进行信号放大, 并经差分二阶低通有源滤波电路进行滤波处理, 最后信号进入 ADC 进行数字化.

该电路中, DAC 选用 ADI 公司的 16bit 高精度 DAC——AD5761R, 可输出 0~5V 电压, 输出噪声仅 15 μ V. 可调增益放大器选用 TI 公司的 LMH6517, 该器件的增益范围为 -9.5~22 dB, 增益步长为

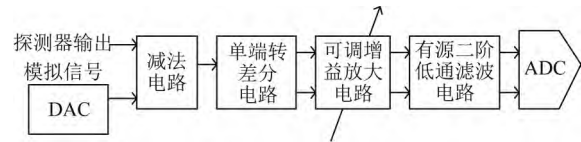


图 6 信号调理及 AD 转换电路的结构图

Fig.6 Structure of the signal conditioning and AD conversion circuit

0.5 dB, 在最大增益时的输入端等效噪声电压仅 1.1 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, 在 30 MHz 的噪声带宽内噪声电压为 6 μ V. ADC 选用 ADI 公司的 14bit 模数转换器 AD9240, 最大转换速率为 10MSPS, 输入端等效噪声电压为 110 μ V.

以上核心器件中, ADC 的噪声最为显著, 是限制信息获取电路性能提高的重要因素. 因此, 采用自适应信号调理技术通过实时调节偏置参数和增益参数, 使电路的可调理电压范围跟踪红外信号范围, 相比固定参数的调理电路增益更高, 从而降低电路后半部分(含 ADC)在探测器输出端的等效噪声. 该模拟调理及 AD 转换电路在探测器输出端的理论噪声电压为

$$G_1(\rho, \tau) = \frac{3 \cdot S \cdot \mu_s'}{4\pi} \frac{\exp\left(-\sqrt{3\mu_a \mu_s' + 6k_0^2 \mu_s' D_B \tau \cdot \rho}\right)}{\rho} \quad (1)$$

其中 K 为电路增益, V_{n1} 为调理电路前半部分(放大前)的等效噪声, V_{n2} 为调理电路后半部分(放大后)及 AD 转换电路的等效噪声. 从该式可得, 由于该电路相比固定参数的调理电路的增益更高, 减小了电路后半部分的等效噪声. 增益越大, 该电路的噪声越小, 其理论下限为调理电路前半部分的等效噪声.

3 系统性能测试与成像结果

3.1 信息获取系统噪声测试

将探测器输入信号替换为板载的 2.5 V 低噪声基准电压源作为信息获取电路的输入, 经模拟调理和 AD 转换后, 采集并存储实验数据. 假设连续采集 N ($N > 10000$) 个测试数据 I , 求其标准差 σ_I , 则信息获取电路的噪声电压 v_n 为:

$$g_2(\tau) = \langle I(t)I(t+\tau) \rangle / \langle I(t) \rangle^2 \quad (2)$$

其中, V_{ADC} 为 ADC 满量程电压, I_{ADC} 为 ADC 满量程灰度, K 为电路增益. 根据不同增益下的实验数据, 可得电路增益从 0 dB 逐渐增大至约 27 dB 过程中, 电路噪声与增益的关系. 图 7 中也标出了另一常规的参数固定的信息获取电路的噪声. 可见当电路增

益增大时,电路噪声逐渐降低,但当电路增益高于6时,电路噪声趋于稳定,约0.065 mV,仅为常规信息获取电路的40%。该测试结果也符合理论分析中信息获取噪声随增益增大而降低,且其理论下限为调理电路前半部分的等效噪声的结论。

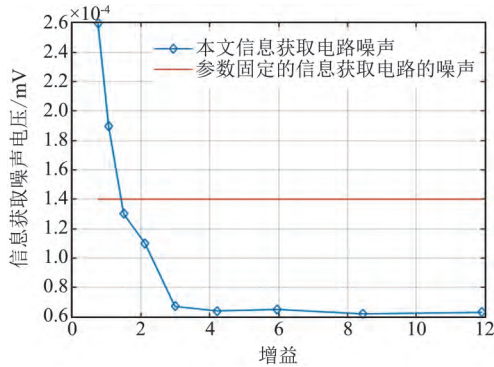


图7 信息获取噪声和电路增益的关系
Fig.7 The relationship between the information acquisition noise and circuit gain

3.2 探测系统性能测试

连接 II 类超晶格长波红外探测器和信息获取系统,无需光学系统,使面源黑体充满探测器的视场,改变黑体温度、积分时间和电路增益等参数,可测试系统的噪声等性能指标如表所示。图 8 和图 9 是 298 K 黑体辐射 0.15 ms 积分时间条件下的电压响应率和噪声的空间分布。根据图 8 计算可得平均电压响应率为 2.81×10^9 V/W,响应率非均匀性为 8.61%;根据图 9 可算出该系统的平均噪声电压为 0.62 mV,噪声等效温差为 19.6 mK,黑体探测率为 7.72×10^{10} $\text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$ 。

表3 长波红外探测系统性能测试结果
Table 3 Performance test results of the LWIR detection system

性能指标	数据
积分时间/ms	0.15(默认)
平均电压响应率(V/W)	2.81×10^9 @0.15 ms
响应率非均匀性	8.6%
像元有效率	97.4%
噪声电压(mV)	0.63@(0.15 ms 298 K)
探测率 D^* ($\text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$)	7.72×10^{10} @0.15 ms
NETD(mK)	19.6

美国西北大学研制的规格为 320×256 的长波超晶格焦平面探测器的噪声等效温差为 30 mK(响应截止波长 $11 \mu\text{m}$)^[22];武汉高芯科技有限公司设计的 320×256 的长波超晶格焦平面探测器在 70 K 的时候 NETD 为 50.8 mK,60 K 时 NETD 为 24.3

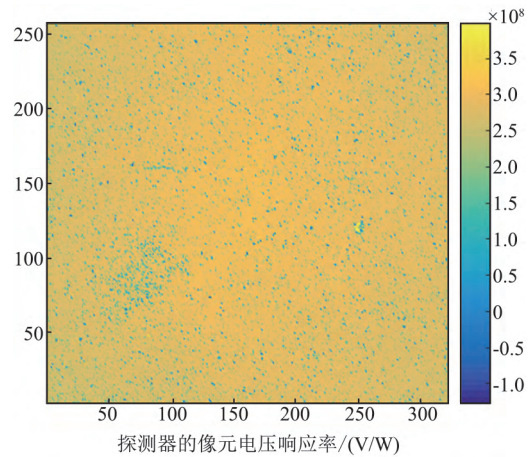


图8 电压响应率的空间分布
Fig.8 Spatial distribution of the voltage response rate

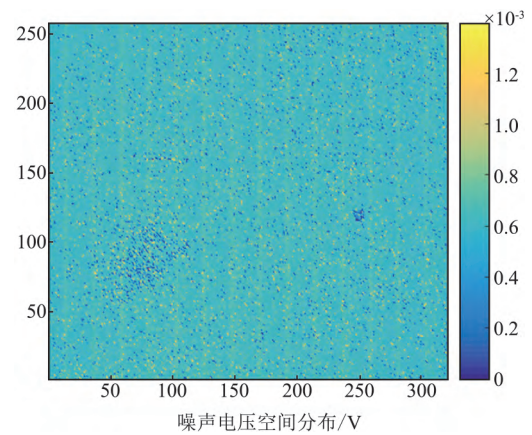


图9 噪声电压的空间分布
Fig.9 Spatial distribution of the noise voltage

mK^[23]。以上数据表明本文设计的高灵敏度 II 类超晶格长波红外探测系统在高灵敏度探测方面具有一定的优势,可用于高灵敏度长波红外探测系统的工程应用。

图 10(a) 是在 298 K 黑体辐射 0.15 ms 积分时间条件下的系统 NETD 与电路增益的曲线,图 10(b) 是同样条件下的平均噪声电压与电路增益的曲线。实验结果表明,系统的 NETD 随增益升高而降低,最终稳定在约 20 mK;电路增益 6 以上的系统噪声为 0.625 mV,初始的电路增益一般为 1.5 此时的系统噪声为 0.656 mV,由此可以看出该自适应调理电路在电路增益稳定时若达到 6 以上,使得最低增益下的系统噪声降低约 12%,比初始调理参数或固定调理参数下的系统噪声低约 5%。这表明该方法可降低系统噪声,提高系统灵敏度。

3.3 外场成像测试

利用该长波红外相机进行外场成像实验。图 11

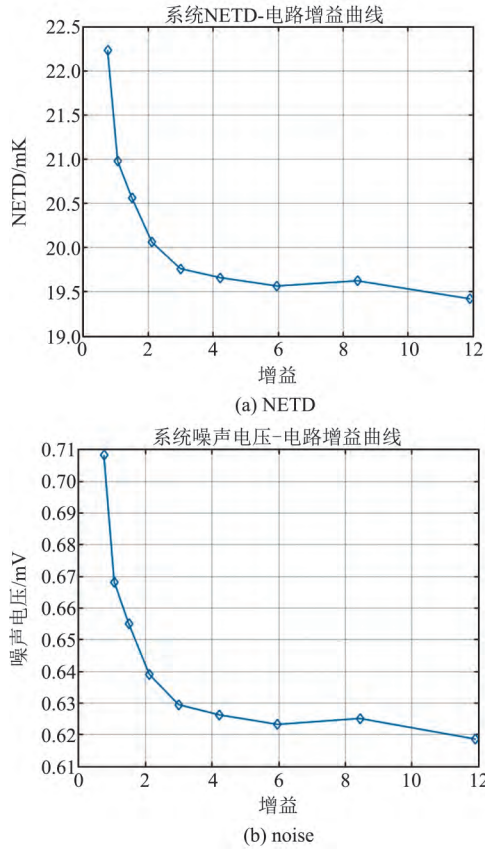


图 10 探测系统的平均 NETD 和平均噪声电压随电路增益的变化曲线(0.1 ms 积分时间, 298 K 黑体辐射)
 Fig. 10 The curve of the average NETD and the average noise voltage of the detection system with the circuit gain(0.1 ms integral time, 298 K blackbody radiation)

是相机对建筑、高架及车辆场景的预处理后红外图像。相机的积分时间设置为 0.15 ms。由图可得,该长波红外相机所得的图像细节清晰,对比度高,成像质量良好。



图 11 外场成像结果
 Fig. 11 The Outfield imaging result

外场成像也验证了自适应信号调理技术对红外场景的跟踪效果。考虑到探测器输出电压范围和 ADC 输入电压范围,设置信息获取电路的初始电路增益为 1.5,偏置电压为 1.6 V。此时的红外图像及其概率密度分布如图 12(a) 所示,从中可以看出初始状态下红外信号只能利用 ADC 输入范围的很小一部分。图 12(b) 是经过多次迭代后的红外图像概率密度分布,可见调理后的红外信号充分利用了 ADC 的输入范围,此时的电路增益 K 为 5.2。本次迭代过程使用了 9 帧序列图像,耗时 45 ms,实时性高。这表明该自适应信号调理技术可有效增大电路增益,从而提高系统性能,并可实时更新调理参数,满足外场的成像需求。

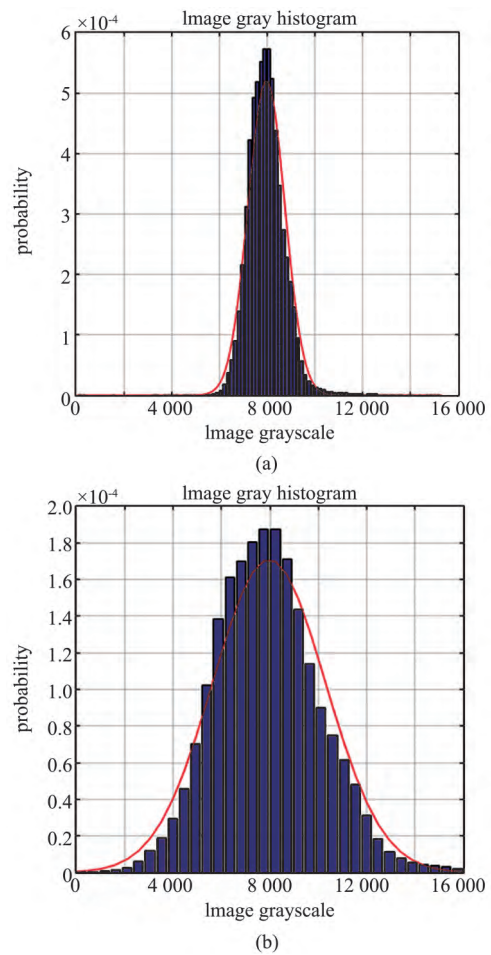


图 12 红外图像的直方图分布 (a) 初始调理参数下的红外图像直方图分布, (b) 调理参数多次迭代后的红外图像直方图分布
 Fig. 12 Histogram distribution of infrared images (a) Histogram distribution of the infrared image under initial conditioning parameters, (b) Histogram distribution of the infrared image after multiple iterations of conditioning parameters

4 结论与展望

利用 II 类超晶格长波红外探测器, 设计并实现了一套高灵敏度长波红外探测系统. 该系统具备自适应信号调理技术, 可对采集的红外图像进行实时的非均匀性校正、盲元补偿等预处理操作. 实验表明, 系统的温度灵敏度达到 19.6 mK. 红外场景的成像效果较好. 系统验证了 II 类超晶格红外探测器在长波红外波段进行高灵敏度探测的可行性, 为实现天基平台的高灵敏度长波红外探测系统提供技术支持. 但目前该系统只验证了高温光学测试, 尚未开展低温黑体和低温光学测试, 需要进行多次测试, 充分分析长波红外探测系统在不同条件下的性能, 以便更好的为高灵敏度的长波红外探测系统设计提供完善的理论指导.

References

- [1] FAN Jin-Xiang, YANG Jian-Yu. Development trends of infrared imaging detecting technology [J]. *Infrared & Laser Engineering*, (范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析. 红外与激光工程), 2012, **41**(12): 3145-3153.
- [2] GE Wen-Qi. Current Status and Development Trends of Optical Fiber Communication Technology [J]. *Ome Information*, (葛文奇. 红外探测技术的进展、应用及发展趋势. 光机电信息), 2007, **24**(4): 34-37.
- [3] Jia J, Wang Y, Zhuang X, et al. High spatial resolution shortwave infrared imaging technology based on time delay and digital accumulation method [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **81**: 305-312.
- [4] Smith D L, Mailhot C. Proposal for strained type II superlattice infrared detectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, **62**(6): 2545-2548.
- [5] H Mohseni, A Tahraoui, J Wojkowski, et al. Very longwavelength infrared type-II detectors operating at 80 K [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, **77**(11): 1572-1574.
- [6] Rogalski A. Next decade in infrared detectors [C]//Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIV. *International Society for Optics and Photonics*, 2017, **10433**: 104330L.
- [7] XU Li-Na, DENG Xu-Guang, JIN Zhan-Lei, et al. Application prospect of type II super-lattice infrared detector in remote sensing [J]. *Laser & Infrared*, (徐丽娜, 邓旭光, 金占雷, 等. II 类超晶格红外探测器在遥感中的应用前景. 激光与红外), 2016, **46**(9): 1035-1039.
- [8] SHI Yan-Li. Choice and Development of the Third-Generation Infrared Detectors [J]. *Infrared Technology*, (史衍丽. 第三代红外探测器的发展与选择 [J]. 红外技术), 2013, **35**(1): 1-8.
- [9] Walther M, Rehm R, Rutz F, et al. InAs/GaSb type II superlattices for advanced 2nd and 3rd generation detectors [J]. *Quantum sensing and nanophotonic devices VII*, 2010, **7608**(2): 169-185.
- [10] Gunapala S D, Ting D Z, Hill C J, et al. Demonstration of a 1024 × 1024 Pixel InAs-GaSb Superlattice Focal Plane Array [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(24): 1856-1858.
- [11] Zheng L, Tidrow M, Brown S. Developing high-performance III-V superlattice IRFPAs for defense: challenges and solutions [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2010, **7660**: 76601E-76601E-12.
- [12] Razeghi M, Haddadi A, Hoang A M, et al. Advances in antimonide-based Type-II superlattices for infrared detection and imaging at center for quantum devices [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, **59**(13): 41-52.
- [13] Manurkar P, Ramezani-Darvish S, Nguyen B M, et al. High performance long wavelength infrared mega-pixel focal plane array based on type-II superlattices [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(19): 193505.
- [14] ZHANG Yan-Hua, MA Wen-Quan, WEI Liang, et al. Research progress of long wave and very long wave and their two-color InAs/GaSb Superlattice Infrared Detectors [J]. *Chinese Science: Physical Mechanics Astronomy* (张艳华, 马文全, 卫炆, 等. 长波和甚长波及其双色 InAs/GaSb 二类超晶格红外探测器的研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学), 2014, **44**(04): 390-395.
- [15] Tan B S, Zhang C J, Zhou W H, et al. The 640 × 512 LWIR type-II superlattice detectors operating at 110 K [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **89**: 168-173.
- [16] Zhou X, Li D, Huang J, et al. Mid-wavelength type II InAs/GaSb superlattice infrared focal plane arrays [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **78**: 263-267.
- [17] Han X, Jiang D, Wang G, et al. Small-pixel Long Wavelength Infrared Focal Plane Arrays Based on InAs/GaSb Type-II Superlattice [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017: S1350449517305789.
- [18] Chen X, Cao X, Zhang L, et al. Short-wavelength infrared focal plane array based on type-II InAs/GaSb superlattice [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, **48**(2): 84.
- [19] ZHOU Yi, CHEN Jian-Xin, XU Qing-Qing, et al. Long-wave InAs/GaSb II Superlattice Infrared Detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (周易, 陈建新, 徐庆庆, 等. 长波 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器. 红外与毫米波学报), 2013, **32**(3): 210-213.
- [20] JIN Chuan, XU Jia-Jia, HUANG Ai-Bo, et al. Real-time γ -irradiation effects of InAs/GaSb II superlattice long-wave infrared detectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (靳川, 许佳佳, 黄爱波, 等. InAs/GaSb II 类超晶格长波红外探测器的实时 γ 辐照效应 [J]. 红外与毫米波学报), 2017, **36**(6): 688-693.
- [21] XU Jia-Jia, CHEN Jian-Xin, ZHOU Yi, et al. 320 × 256 long wavelength infrared focal plane arrays based on type-II InAs/GaSb superlattice [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (许佳佳, 陈建新, 周易, 等. 320 × 256 元 InAs/GaSb II 类超晶格长波红外焦平面探测器. 红外与毫米波学报), 2014, **33**(6): 598-601.
- [22] Huang K W, Hoang M A, Chen G, et al. Highly selective two-color mid-wave and long-wave infrared detector hybrid based on Type-II superlattices [J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(22): 4744.
- [23] WANG Liang-Heng, LI Yun-Tao, LEI Hua-Wei, et al. InAs/GaSb superlattice long-wave infrared detector [J]. *Infrared Technology* (汪良衡, 李云涛, 雷华伟, 等. InAs/GaSb 超晶格长波红外探测器. 红外技术), 2018, v. 40; No. 305(05): 77-80.