

基于线性雪崩器件的高灵敏红外成像探测技术研究

林长青^{1,3}, 周双喜^{1,2}, 李璐芳^{1,3}, 刘高睿^{1,3}, 孙海彬^{1,3},
张 昱^{1,3}, 林加木¹, 孙胜利^{1,3*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院智能红外感知重点实验室, 上海 200083)

摘要: 随着空间遥感技术的发展, 对红外系统探测灵敏度的要求不断提升高。其中基于线性雪崩器件的红外成像探测技术能有效提升高帧频应用场合下的探测灵敏度。本文基于 512×512 的短波红外线性雪崩探测器组件, 设计了小口径轻量化红外成像系统, 进行了低反偏下的性能测试。测试结果表明, 基于线性雪崩红外探测器的成像系统, 在短积分时间下信噪比 SNR 的提升与倍增因子 M 基本呈线性关系, 该系统的信噪比是相同口径传统相机的 3 倍。

关 键 词: 红外相机; 线性雪崩; 高灵敏度; 信噪比; 成像探测

中图分类号: TP732.2; TP399

文献标识码: A

Research on highly sensitive infrared imaging detection technology based on linear avalanche device

LIN Chang-Qing^{1,3}, ZHOU Shuang-Xi^{1,2}, LI Lu-Fang^{1,3}, LIU Gao-Rui^{1,3}, SUN Hai-Bin^{1,3},
ZHANG Yu^{1,3}, LIN Jia-Mu¹, SUN Sheng-Li^{1,3*}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Intelligent Infrared Sensing, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: With the development of remote sensing technology, the requirements for the detection sensitivity of infrared systems are continuously increasing. The infrared imaging detection technology based on linear avalanche device can effectively improve the detection sensitivity in high frame frequency applications. Based on the short-wave infrared linear avalanche detector assembly of 512×512, a small-aperture and lightweight infrared imaging system is designed and its performance is tested under low reverse bias. The test results show that the increase of SNR of the imaging system based on the linear avalanche infrared detector is basically linear with the multiplication factor M under short integration time, and the SNR of the system is 3 times that of the traditional camera of the same caliber.

Key words: infrared camera, linear avalanche, high sensitivity, signal-to-noise ratio, imaging detection

引言

红外系统广泛应用于遥感领域。近年来, 遥感技术的发展对红外系统的探测灵敏度、时间分辨率、空间分辨率、光谱分辨率等要求越来越高。其中, 为提升空间红外系统的探测灵敏度, 往往需要

提升系统的信噪比, 其本质上是提升有效信号幅度、抑制系统噪声, 常用的方法有增大单体相机光学口径提升聚光能力、在轨拼接增加成像仪器等效光学口径、采用面阵凝视模式替代光机扫描模式以增加积分时间、时间延迟积分技术(TDI)等, 这些技

收稿日期: 2024-04-18, 修回日期: 2024-06-05

Received date: 2024-04-18, Revised date: 2024-06-05

基金项目: 中国科学院院重点项目(KGFZD-145-23-04); 上海市浦江人才(23PJ1414800)

Foundation items: Supported by the Key project of Chinese Academy of Sciences (KGFZD-145-23-04); Shanghai Pu Jiang Program (23PJ1414800)
作者简介(Biography): 林长青(1980-), 男, 福建莆田人, 博士, 研究员, 主要研究领域为红外光电信号实时获取与处理. E-mail: xmulc@126.com

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

术往往都对空间红外相机的资源提出新的需求。随着光电子器件的发展,当红外探测器工作于线性雪崩区,其灵敏度比传统焦平面显著提升^[1-6],具有响应快、灵敏度高^[7-8]的特点;另外,由于碲镉汞具有电子和空穴离子化系数差异极大的物理特性,可以有效降低倍增过程产生的过剩噪声^[9-11],有利于实现线性模式高灵敏度探测。因此,基于线性雪崩红外探测器的高灵敏红外成像探测技术也逐渐得到应用^[12-13]。

本文分析了红外系统的噪声来源,设计了基于512×512的短波红外线性雪崩探测器的小口径红外成像系统,并进行了标定和试验,验证了其在短积分时间高帧频应用场景下能有效提升信噪比。

1 红外系统信噪比分析

1.1 影响红外系统信噪比的主要参数

信噪比是红外系统的核心指标之一,与红外系统的探测灵敏度密切相关,其定义为系统信号功率与噪声功率的比值。当红外系统对远距离小尺寸目标进行成像时,目标往往呈现点或斑状,即点目标,考虑点目标在像元上的分布,引入能量集中度,则计算点源信噪比公式如下:

$$\text{SNR} = \frac{\delta \pi D_0 J \rho \tau_a \tau_0 D^*}{4 F H^2 \sqrt{\Omega \Delta f}} \quad (1)$$

其中 δ 为信号过程因子, D_0 为光学口径, J 为目标辐射强度, ρ 为信号能量集中度, τ_a 为大气透过率, τ_0 为光学效率, D^* 为探测器平均峰值探测率, F 为光学系统 F 数, H 为探测距离, Ω 为立体角, Δf 为系统等效带宽。

从公式中可以看出,为提升信噪比,系统往往需要增加光学口径、减小距离、提升探测器 D^* 、降低带宽等。而红外系统设计完成后,针对同一辐射强度的目标,系统SNR已经确定,若光机参数不调整,可提升系统SNR的方法为提升探测器 D^* , D^* 的提升与SNR直接成正比。红外相机系统信息流程图如图1所示。

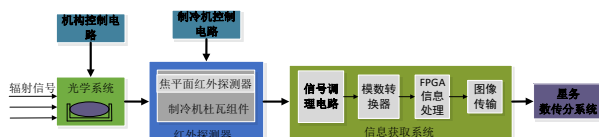


图1 红外相机系统信息流程图

Fig. 1 Information flow diagram of infrared camera system

1.2 基于线性雪崩器件的系统信噪比

雪崩二极管 APD (Avalanche Photodiode) 是一种在反向电压作用下^[14],光电流成倍增长^[15]的高速、高灵敏度的光电二极管^[16],是一种高速、高灵敏度的光子探测器件,是基于器件内载流子碰撞离子化雪崩放大^[17]的物理机理来实现的。APD 在加反向电压后,探测器内部有增益放大作用,电子或空穴在强电场下加速输运过程中与半导体晶格原子发生碰撞,将原子外层电子碰撞电离并产生次生载流子,产生载流子数目指数式急剧放大。这种效应使得探测器内部产生电信号增益,在器件内实现光电信号放大,主要用于远程光提讯、激光测距等近红外波段的弱光检测^[18-19]。

APD 的噪声由等效负载电阻热噪声、暗电流散弹噪声和光生电流散弹噪声等三部分组成^[18]。 M 为倍增因子^[20], F 为剩余噪声因子,噪声因子反映了倍增因子的随机起伏噪声。噪声对 APD 探测性能最直接的影响是通过信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 来体现的^[21]。

噪声等效功率 (NEP) 定义为给定带宽下信噪比为 1 时入射到探测器上的红外辐射功率。噪声等效光子数 (NEPh) 定义为给定带宽下信噪比为 1 时所对应的入射光子数,值越小探测器的灵敏度越高,计算公式如下:

$$\text{NEPh} = \frac{\text{NEP} * t_{\text{int}}}{h * \frac{c}{\lambda}} \quad (2)$$

$$D^* = \frac{\sqrt{A_d * \Delta f}}{\text{NEP}} \quad (3)$$

得到:

$$\text{NEPh} = \frac{\lambda * \sqrt{A_d * t_{\text{int}}}}{h * c * D^*} \quad (4)$$

其中 λ 为波长(单位 cm), A_d 为光敏元面积(单位 cm^2), t_{int} 为测试时的积分时间(单位 s), h 为普朗克常数 6.6256×10^{-34} (单位 $\text{W} \cdot \text{s}^2$), c 为光速 3×10^{10} (单位 cm/s), D^* 为归一化探测率(单位 $\text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}} \cdot \text{W}^{-1}$)。

APD 探测器的总噪声由暗电流噪声、光电流噪声和电路及系统噪声几部分构成,因此如果要准确评估光电雪崩芯片的暗电流噪声光子数,应该在暗场冷屏条件下(与暗电流引起的噪声相比,光电流噪声 J_{flux} 和电路噪声此时可以忽略不计),测量在偏压下相应雪崩增益的 GNDC 和剩余噪声 F 因子,通过下式计算获得 NEPh^[18],其中 M 为倍增因子。

$$NEPh_{\text{雪}} = \sqrt{\frac{M^2 \cdot F(M) \cdot (GNDC + J_{\text{flux}}) \cdot A_d \cdot \frac{t_{\text{int}}}{q} + \text{readoutnoise}^2}{M \cdot \eta \cdot FF_{\text{ug}}}} \approx \frac{\text{readoutnoise}}{M \cdot \eta \cdot FF_{\text{ug}}} \quad (5)$$

传统探测器的 NEPh 公式^[18]如下所示:

$$NEPh = \sqrt{\frac{(GNDC + J_{\text{flux}}) \cdot A_d \cdot \frac{t_{\text{int}}}{q} + \text{readoutnoise}^2}{\eta \cdot FF_{\text{ug}}}} \approx \frac{\text{readoutnoise}}{\eta \cdot FF_{\text{ug}}} \quad (6)$$

由公式(1)、式(4-6)得出:

$$\frac{NEPh}{NEPh_{\text{雪}}} = \frac{D_{\text{雪}}^*}{D^*} = \frac{SNR_{\text{雪}}}{SNR} \approx M \quad (7)$$

通过上述可得:雪崩探测器在短积分时间 T_{int} 较小高帧频应用场合,并且读出电路噪声 readoutnoise 不能忽略不计的情况下, readoutnoise^2 远远大于

左侧公式,因此 M 倍增因子与 NEPh 成反比,得出 M 倍增因子与 D^* 成正比,与 SNR 成正比。通过与传统探测器的 NEPh 和 D^* 以及 SNR 的比较,得出雪崩探测器 SNR 的传统探测器 SNR 的 M 倍关系。

在弱小目标高帧频探测的应用场景下,积分时间较小,对于探测器而言,不放大的状态下,器件噪声的主要来源不是光子噪声而是读出噪声和系统噪声。当处于倍增模式下,信号放大 M 倍,光子噪声放大 $M \times F$ 倍,但由于积分时间较小,光子噪声仍小于电路读出噪声和系统噪声,器件总噪声的增量可忽略,所以信噪比提升至 M 倍。

综上,雪崩探测器的灵敏度相对传统焦平面器件有显著的提升,甚至可实现对单个光子的极灵敏探测。

2 基于线性雪崩的红外成像系统设计

2.1 成像系统组成

成像系统主要由光学系统、信息获取系统、探测器组件等组成。其中光学系统口径 190 mm 的两反光学结构,系统焦距 1 141 mm,光学结构形式如图 2 所示。

光学系统的结构参数如表 1 所示,其中,系统通光口径遮挡比约为 9%。

光学系统传函如图 3 所示。

2.2 信息获取系统

红外信息获取系统以 XILINX 公司 FPGA 为核

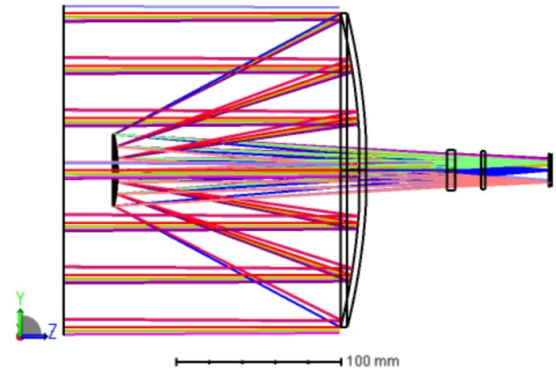


图2 光学结构光路图

Fig. 2 Optical structure light path diagram

表1 光学系统的结构参数表

Table 1 Structural parameters of the optical system

性能项目	参数	备注
口径	190 mm	中心遮挡直径 45 mm
焦距	1141 mm	
波段	2.5~3.4 μm	
视场	0.7°×0.7°	
传函	大于 0.4	
能量集中度	大于 50%	
畸变	1.79%	

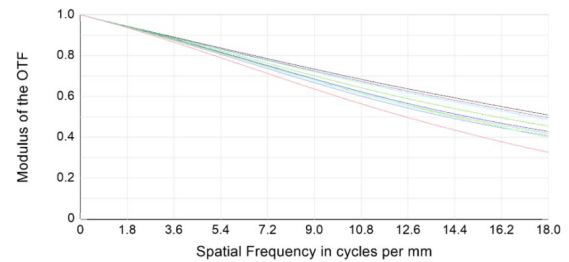


图3 光学系统传函图

Fig. 3 Optical system function diagram

心器件,采用高量化位数的 ADC 进行数据采集,并通过千兆以太网进行数据传输。系统框图如 4 所示。

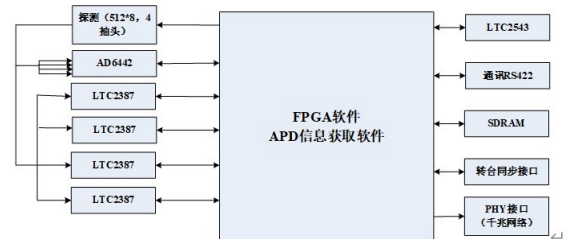


图4 红外信息获取系统框图

Fig. 4 Block diagram of information acquisition system

探测器驱动时序由 FPGA 产生,驱动频率 5 MHz, FPGA 采用 XILINX 公司的 SPARTAN 6 系列 XC6SLX45-2FGG676I; ADC 选用高分辨率高速模数转换器 LTC2387,最高转换速率 15 MSPS,分辨率为 18 位,信号量化范围为 8196 mV,电路增益为 5.9,前端信号调理图如图 5 所示。由于探测器采用了 4 个抽头输出,因此需要 4 片 LTC2387 进行数据采集。信号前端采用低噪运放 AD8608 和宽带高速运放 AD8042 进行信号调理,搭建了二阶巴特沃斯低通滤波器,带宽为 3~5 倍上升沿时间的倒数,这里取 20 MHz。探测器驱动时序图如图 6 所示,经软件仿真得出探测器第一个像元数据读出控制时序符合要求,如图 7 所示。

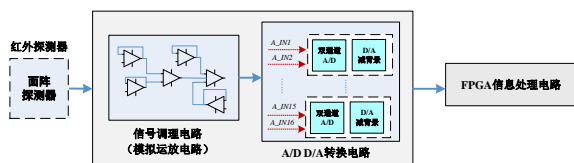


图5 前端信号调理图

Fig. 5 Front-end signal conditioning diagram

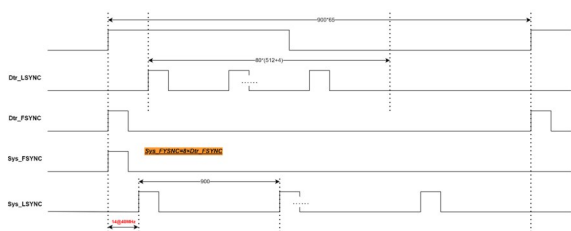


图6 探测器驱动时序图

Fig. 6 Timing diagram of detector drive

在实验室条件下进行了电子学信息获取部分与探测器耦合后的噪声测试,噪声分布图如图 8 所示,系统下传 18 位的测试数据,含探测器噪声的系统噪声约 14 LSB,噪声分布大致满足高斯分布,表明系统未引入其他干扰,噪声直方图如图 9 所示。

2.3 数据采集系统以及数据处理方法

数据获取后送 FPGA 的 FIFO,进行格式编排,外扩了 SDRAM 用于图像累加平均处理,累加数为 8 帧;输出数据可通过指令切换原始数据和累加平均后数据,输出接口为千兆以太网,通过 UDP 协议进行数据传输,每包有效字节 1 000 个,以太网控制器采用 RTL8211E-VB,采用 RGMII (Reduced Gigabit Media Independent Interface) 模式,采用 4 位数据接口,工作时钟 125 MHz,数据在时钟的双沿传输。数据传输状态机如图 10 所示。

数据采集和控制框图如图 11 所示。

数据采集系统通过千兆以太网口接收相机数据,在上位机进行数据解析、显示、存储。同时,通过预置的非均匀性校正参数,对图像进行在线实时非均匀性校正,消除固定图形噪声、校正响应非均匀性,预置的参数来自实验室两点法黑体定标计算值。

数据处理方法主要是对采集的数据进行非均匀性校正。其中非均匀性校正的方法大致可分为两类:基于标定技术的算法和基于场景技术的算法^[22]。基于标定技术的算法是指在实验室内利用均匀的高温 and 低温黑体对红外焦平面进行标定,从而计算出增益和偏移系数的方法,常见的算法有两点法和扩展两点法^[23]。此类算法结构简单,易于硬件实现,但是它没有补偿各探测元差别性漂移的能力^[23]。基于场景技术的算法不需要黑体标定,而是利用场景的统计特性,获得每个像素的校正系数,典型的算法有时域高通滤波法、恒定统计法以及人工神经网络法等^[23]。因为校正系数的获取和成像过程是同时进行的,因此,基于场景技术的校正算法均有一定的漂移跟踪和补偿能力。但是,基于场景的校正算法计算量大、收敛速度慢、依赖场景的运动、难以硬件实现^[23]。

通过两点法,可以有效地校正红外图像中的固定模式噪声,提高图像质量。当采用两点法进行非均匀校正时,在响应低端和高端校正效果不理想,

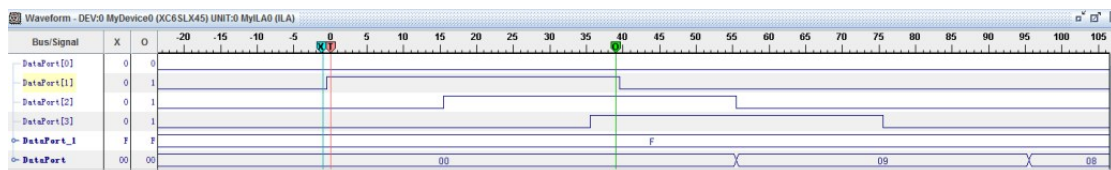


图7 探测器第一个像元数据读出控制时序

Fig. 7 Detector first image metadata read control timing

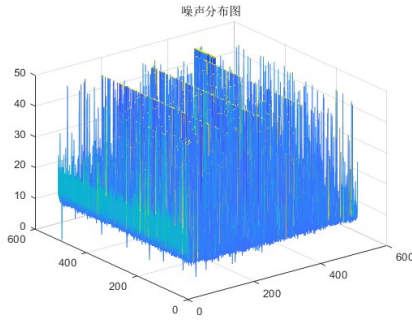


图8 噪声分布图

Fig. 8 Noise profile

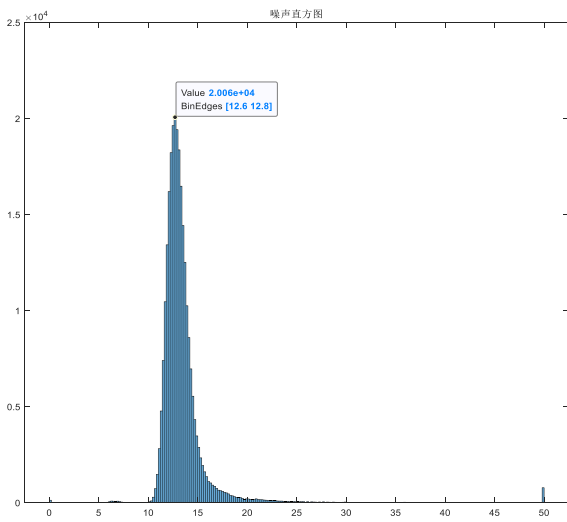


图9 噪声直方图

Fig. 9 Noise histogram

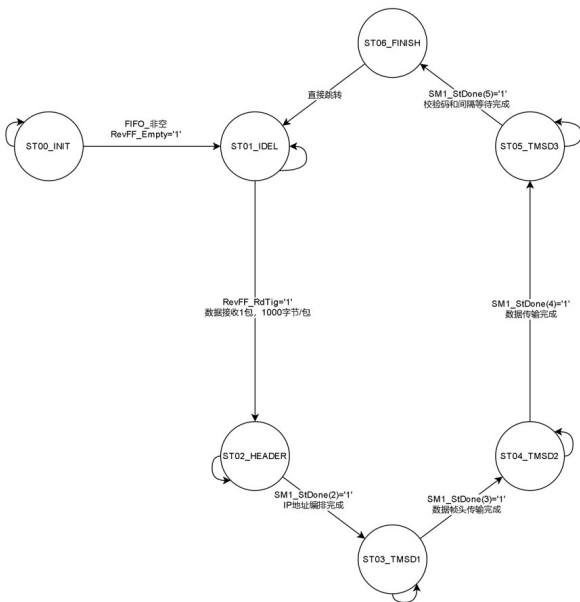


图10 数据传输状态机

Fig. 10 Data transmission state machine

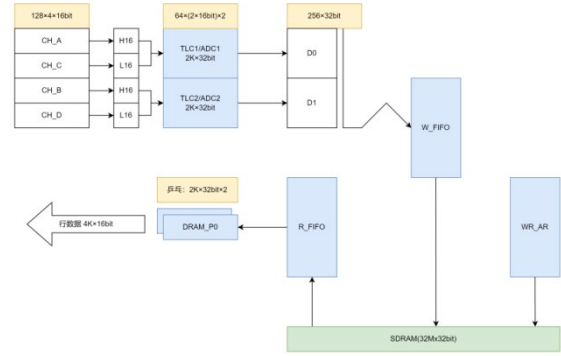


图11 数据采集和控制框图

Fig. 11 Data acquisition and control block diagram

经分析,是由于场景动态范围过大,超出探测器非线性响应区导致,因此后续在高灵敏度应用场合,需考虑定标和场景结合的校正方法,本文主要研究灵敏度的提升途径,因此对非均匀性校正仅做两点定标法校正。

假定探测器第 i 像元 ϕ_i 的响应为 $V(\phi_i)$,校正后的输出为 $Y(\phi_i)$,则实验室两点法的校正过程为:

1) 设置面源黑体温度点 $T_0=25^\circ\text{C}$,将相机对准面源黑体,采集逐像元响应数据 $V_L(\phi_i)$,计算其面阵响应的均值 V_L ;

2) 设置面源黑体温度点 $T_1=85^\circ\text{C}$,将相机对准面源黑体,采集逐像元响应数据 $V_H(\phi_i)$,计算其面阵响应的均值 V_H ;

3) 计算非均匀性校正系数 K_i 和 B_i ,计算公式为

$$K_i = \frac{V_H - V_L}{V_H(\phi_i) - V_L(\phi_i)} \quad (8)$$

$$B_i = \frac{V_L \cdot V_H(\phi_i) - V_H \cdot V_L(\phi_i)}{V_H(\phi_i) - V_L(\phi_i)} \quad (9)$$

4) 通过两点法校正后的输出为

$$Y(\phi_i) = K_i \cdot V(\phi_i) + B_i \quad (10)$$

在成像的同时进行了邻域盲元替换,盲元定义为像元时间噪声大于均值的2倍、响应小于均值的50%。为充分利用AD动态范围,上位机显示图像时可进行高低位切换,实验室两点法校正和上位机图像显示如图12和图13所示。

通过搭建原理样机,对系统非均匀性进行测试,如图14和图15所示,经过两点校正后,系统非均匀性校正前为7%,校正后1.4%。验证了大规模探测器和高集成度信息获取架构耦合后,系统能实现高速数据的采集和处理。由于探测器是各模块

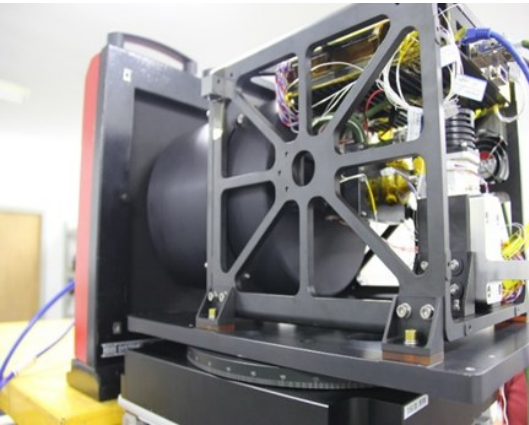


图12 实验室两点法校正
Fig. 12 Laboratory two-point method calibration

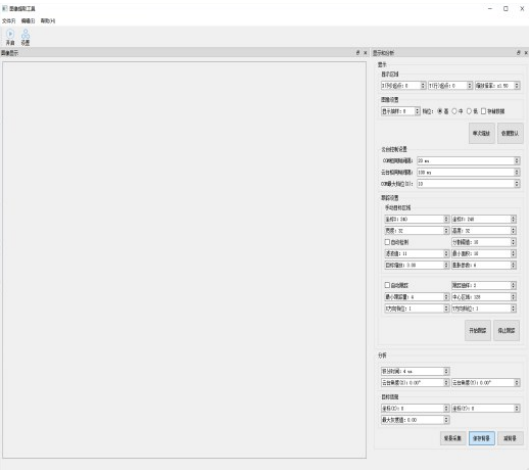


图13 上位机软件界面
Fig. 13 Upper computer software interface

拼接而成,视场内的光通量也是不均匀的,因此直接用两点法校正后,其残余非均匀性偏大,后续可以进一步通过两点多段法进行提升非均匀性校正效果。

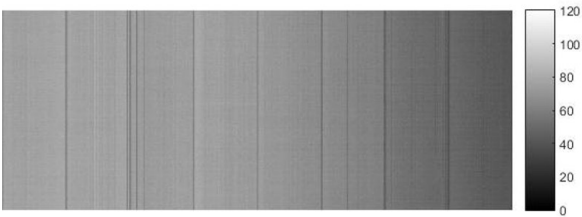


图14 非均匀性校正前图像
Fig. 14 Image before non-uniformity correction

3 试验结果

3.1 实验室性能标定

本文红外探测器采用中国科学院上海技术物

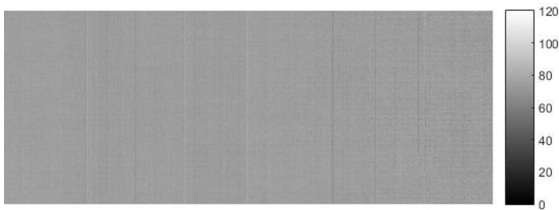


图15 非均匀性校正后图像
Fig. 15 Image after non-uniformity correction

理研究所研制的512×512短波线性雪崩红外探测器。该器件实测截止波长4.1 μm。在安装相同滤光片状态下,该器件无增益的灵敏度与截止波长为3.3 μm的传统探测器相当。

512×512短波线性雪崩探测器测试性能如表2所示。

表2 512×512线性雪崩短波红外探测器性能指标表
Table 2 512×512 liner avalanche short-wave infrared detector performance index table

探测器偏压(V)	0.1	1	2	3
平均波段响应率 (V/W)	8.94×10 ⁹	1.10×10 ¹⁰	1.81×10 ¹⁰	3.04×10 ¹⁰
噪声(mV)	0.69	0.62	0.66	0.79
平均波段探测率 (cm·Hz ^{1/2} /W)	1.42×10 ¹²	1.92×10 ¹²	2.99×10 ¹²	4.13×10 ¹²
盲元率	0.56%	0.61%	0.68%	0.90%
响应率非均匀性	7.46%	7.24%	7.90%	9.00%
平均增益因子	/	1.23	2.02	3.40

在常温常压下,对器件同一积分电容下,黑体响应与偏压关系进行了系统测试。黑体设置为25℃和85℃,积分时间设置在短积分时间,分别从100 μs到400 μs,对不同积分时间不同偏压下的响应进行了测试,如图16所示。测试结果表明,随着探测器偏压的增加,系统响应率逐渐增强。通过参数配置,在较低的偏置电压下,对于同一红外相机,信号能显著成倍增强,而系统噪声几乎保持不变,即系统信噪比在短积分时间应用场景下能迅速提升。

在真空环境下,利用低温黑体,对相机进行响应标定,数据表明,基于线性雪崩效应的红外系统响应线性度良好,如图17和图18所示。

短波通道和中波通道分别在考核目标辐射能量下,采集某组成像参数条件下的黑体图像数据,将其时间域上的噪声定义为系统基础噪声。信噪比的定义为信号功率与噪声功率的比值,在相机中

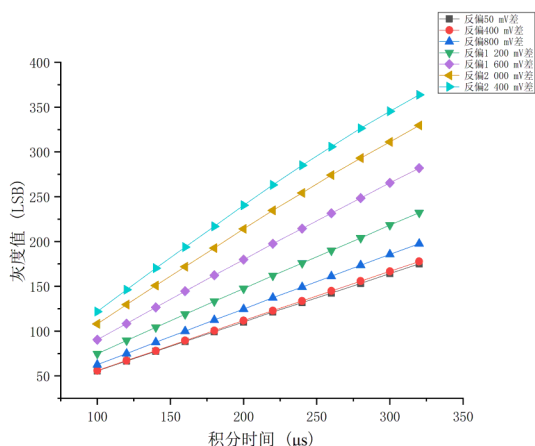


图 16 不同积分时间不同偏压下的黑体响应

Fig. 16 Blackbody response under different integration times and different bias

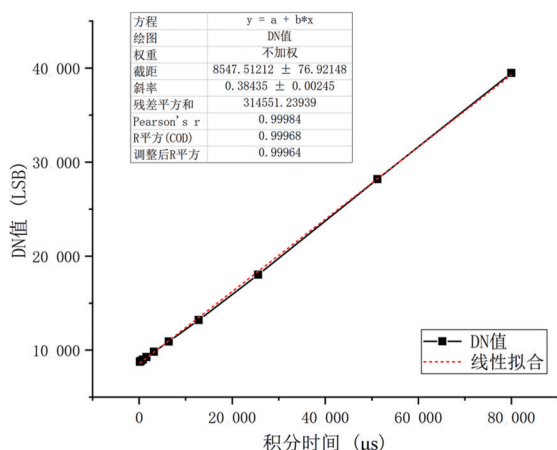


图 17 黑体响应与积分时间线性度关系

Fig. 17 Relation between blackbody response and integration time linearity

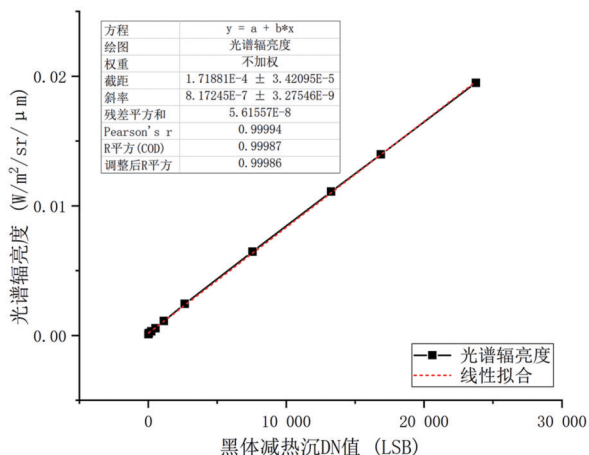


图 18 黑体响应与光谱辐射亮度线性度关系

Fig. 18 Relation between blackbody response and spectral radiance linearity

一般定义为信号输出灰度值与噪声灰度值的比值,公式如下:

$$\text{SNR} = \text{DN}_{\text{signal}} / \text{DN}_{\text{noise}}, \quad (11)$$

式中,SNR为考核点信噪比, $\text{DN}_{\text{signal}}$ 为相机信号输出灰度值, DN_{noise} 为噪声灰度值。

通过实验室条件下,测试黑体(255 K)各状态下的信噪比,测试值如表3所示。

表3 (255 K)各状态下的信噪比和等效噪声辐射强度

Table 3 Signal-to-noise ratio and equivalent noise radiation intensity at each state(255 K)

积分时间 / μs	反偏电压 / mV	黑体响应 DN 值	噪声 DN 值	信噪比
6 400	100	47.26	11.72	4.03
12 800	100	97.14	11.81	8.23
25 600	100	199.42	12.05	16.54
51 200	100	406.66	12.26	33.17
80 000	100	648.28	12.75	50.86
6 400	3 000	126.99	12.79	9.93
12 800	3 000	259.03	13.57	19.08
25 600	3 000	543.20	15.37	35.34
51 200	3 000	1 138.22	18.41	61.82
80 000	3 000	1 849.97	21.67	85.38

3.2 外场试验

在阴云条件下(光照强度约为400 lx),利用同一套相机,分线性雪崩模式和常规成像模式,在相同的积分时间下对机场降落的飞机进行对比观测,图像显示高8 bit,成像距离为5~7 km。从原始图像对比度上观察,线性雪崩模式下,成像对比度明显优于常规模式。对比飞机蒙皮与天空背景的差值可以看出,线性雪崩模式下目标背景均值差为14.90,而常规模式下为4.16,两者比值约3.5,基本与倍增因子一致。外场成像试验采集图像参数如表4所示,成像图像如图19和图20所示。

表4 外场成像试验采集图像参数

Table 4 Image parameters collected in the filed image test

项目	线性雪崩模式	常规模式	
偏压	2.4 V	0.1 V	
积分时间	5 ms	5 ms	
成像距离	5 km	5 km	
背景均值Bg_mean	300.60	196.58	蓝框(11×11)
目标均值Tg_mean	285.70	192.42	红框(11×11)
灰度差	14.90	4.16	



图 19 阴雨条件下常规模式飞机成像图
Fig. 19 Conventional mode aircraft imaging under cloudy and rainy conditions



图 20 阴雨条件下雪崩模式飞机成像图
Fig. 20 Avalanche mode aircraft imaging under cloudy and rainy conditions

在晴朗的大气条件下(光照强度约为 10 000 lx),对远程运动的飞机进行后视成像试验,试验结果表明,采用线性倍增模式后,在 2 ms 的短积分时间下,最远观测距离达到了 237 km。外场成像试验采集图像参数如表 5 和表 6 所示,成像图像如图 21 和图 22 所示。

表 5 晴朗天气下线性倍增模式对飞机成像条件 1
Table 5 Imaging conditions of aircraft by linear multiplication mode in clear weather 1

航班号	CA977
航空公司	中国国际航空
机型	空客 A330-243
实际起降时间	2023 年 12 月 1 日, 14:50-20:46
起飞降落地点	北京首都 T3-雅加达苏加诺哈达 T3
观测最远距离	88.8 km



图 21 晴朗天气下线性倍增模式对飞机成像图 1
Fig. 21 Imaging of aircraft by linear multiplication mode in clear weather 1

表 6 晴朗天气下线性倍增模式对飞机成像条件 2
Table 6 Imaging conditions of aircraft by linear multiplication mode in clear weather 2

航班号	CZ3602
航空公司	南方航空
机型	空客 A320-271N
实际起降时间	2023 年 12 月 1 日, 15:29-19:21
起降地点	沈阳仙桃 T3-广州白云 T2
观测最远距离	237 km

4 结论

本文利用线性雪崩红外探测器提升了红外相机的信噪比,分析了基于线性雪崩器件的红外系统信噪比影响因素,构建了噪声耦合模型,分析表明当探测器读出噪声不可忽略时,利用线性雪崩红外探测器能提升红外相机的信噪比,适用于短积分时间应用场景。测试结果表明,在短积分场景下,应用线性雪崩器件进行成像探测,信噪比的提升基本与器件的倍增因子同步,通过设置合适的偏压调整器件倍增因子,能获得数倍信噪比的提升。外场试验也表明应用了线性雪崩器件的红外相机,灵敏度得到明显提升,该方法有助于提升红外系统探测灵敏度。

References

[1] YAO Li, YANG Bo-Jun, PENG Jian, *et al.* Research on single photon detector in quantum communication[J]. Optical communication technology, 2007, **31** (01): 47-48. (姚立, 杨伯君, 彭建, 等. 量子通信中单光子探测器的研究[J]. 光通信技术), 2007, **31** (01): 47-48.

[2] PENG Jian, FENG Xue-Dong, YANG Bo-Jun, *et al.* Per-



图22 晴朗天气下线性倍增模式对飞机成像图2

Fig. 22 Imaging of aircraft by linear multiplication mode in clear weather 2

- formance analysis of SAGM single photon detector in Quantum Communication [J]. Semiconductor technology, 2006, **31**(11):851-855.(彭建,冯雪冬,杨伯君,等.量子通信中SAGM型单光子探测器性能分析[J].半导体技术), 2006,**31**(11):851-855.
- [3] COVA S, GHIONI M, ZAPPA F, *et al.* A view on progress of silicon single-photon avalanche diodes and quenching circuits[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2006, **6372** (4): 63720I-63720I-12.
- [4] JACKSON C, MATHEWSON A, COHEN M J, *et al.* Improvements in silicon photon counting modules [J]. *Proc SPIE*, 2005, **5726**: 69-76.
- [5] LAWRENCE W G, CHRISTIAN J F, SQUILLANTE M R. Development and characterization of CMOS avalanche photodiode arrays [J]. *International Society for Optics and Photonics*, 2005
- [6] KARVE G, ZHENG X, ZHANG X, *et al.* Geiger mode operation of an In_{0.53}Ga_{0.47}As-In_{0.52}Al_{0.48}As avalanche photodiode [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, **39**(10):1281-1286.
- [7] ZHAO Hui-Ling. Research on weak photoelectric signal detection technology of APD [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.(赵慧玲. APD微弱光电信号探测技术研究[D].长春:长春理工大学, 2010.
- [8] Mehmet N, XU Ji-Hong. Low noise APD Bias circuit [J]. *Foreign Electronic Components*, 2002, **000**(009): 74-75. (MehmetNalbant,徐继红.低噪声APD偏置电路[J].国外电子元件), 2002, **000**(009):74-75.
- [9] LI Yi-Jian. Experimental Study on APD circuit Simulation and Excess Noise Factor [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.(李奕健. APD电路模拟与过剩噪声因子实验研究 [D].武汉:华中科技大学, 2013.
- [10] YANG Jian-Rong. Physical Technology of Mercury Cadmium telluride Materials [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.(杨建荣.碲镉汞材料物理技术)[M].北京:国防工业出版社, 2012.
- [11] LI Hai-Bin. Research on preparation technology of Mercury Cadmium telluride electron avalanche photodetector [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011.(李海滨.碲镉汞电子雪崩光电探测器制备技术研究[D].上海:中国科学院上海技术物理研究所), 2011.
- [12] CHANG Chao. Measurement and Analysis of Noise Characteristics of AlGaAs Avalanche Photodiode [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.(常超. AlGaAs雪崩光电二极管噪声特性测试及分析 [D].上海:中国科学院上海技术物理研究所), 2015.
- [13] WANG Yong-Gang. Research on Low noise front-end electronics of APD Detector [J]. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2006, **26** (3): 280-283. (王永纲. APD探测器低噪声前端电子学研究[J].核电子学与探测技术), 2006,**26**(3):280-283.
- [14] SU Zhen, LIANG Xiao-Long, Bi Shan-Peng. Determination method of optimal multiplication factor for APD sensor under multiple noise factors [J]. *Natural Science Edition of Communication University of China*, 2012, **19**(4): 36-40.(苏震,梁小龙,毕善鹏.APD传感器在多重噪声因素作用下最优倍增因子的确定方式[J].中国传媒大学学报自然科学版), 2012,**19**(4):36-40.
- [15] LIU Hui-Luo. Research and design of photodetector circuit based on APD [J]. *Modern Electronics Technique*, 2009, **32**(13):177-180.(刘辉路.基于APD的光电探测器电路研究与设计[J].现代电子技术), 2009,**32**(13): 177-180.
- [16] XUE Ling-Yun. Study on noise characteristics of avalanche photodiode APD [J]. *Southern Agricultural Machinery*, 2017, **48**(22): 67.(薛凌云.雪崩光电二极管APD的噪声特性研究[J].南方农机), 2017,**48**(22):67.
- [17] LI Hao. Study on preparation and noise of mercury cadmium telluride avalanche photodiode devices [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.(李浩.碲镉汞雪崩光电二极管器件制备及噪声研究[D].上海:中国科学院上海技术物理研究所), 2019.
- [18] ZHOU Shi-Chun. Introduction to Advanced Infrared Photoelectrical Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2015, 186-188.(周世椿.高级红外光电工程导论)[M].北京:科学出版社, 2015,186-188.
- [19] HU Mei-Huang. Signal processing circuit design based on Mercury Cadmium telluride APD [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018.(胡美璜.基于碲镉汞APD的信号处理电路设计[D].上海:中国科学院上海技术物理研究所), 2018.
- [20] WANG Fang. Research on Noise Measurement and application of Avalanche Photodiode [D]. Xi'an: Xidian University, 2011.(王芳.雪崩光电二极管的噪声测试及应用研究[D].西安:西安电子科技大学, 2011.
- [21] LIU He-Xiong, ZHOU Bing, GAO Yu-Chen. Research on noise characteristics and Influencing factors of APD detection system [J]. *Laser Technology*, 2018, **42**(6): 862-867.(刘贺雄,周冰,高宇辰.APD探测系统的噪声特性及其影响因素研究[J].激光技术), 2018, **42**(6): 862-867.

- [22] GU Jing-Liang, WU Jian-Tao, WAN Min. Embedded cooling infrared image processing System based on NIOS II [C]//China Aerospace Science and Industry Corporation. Proceedings of the 9th National Optoelectronic Technology Academic Exchange Conference (Volume 1), 2010.(顾静良,吴剑涛,万敏.基于NIOS II的嵌入式制冷型红外图像处理系统[C]//中国航天科工集团公司.第九届全国光电技术学术交流会论文集(上册),2010.
- [23] ZHU Rui-Fei, WANG Chao, WEI Qun, *et al.* Development of non-uniformity correction system for infrared detector [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, **42**(07): 1669-1673.(朱瑞飞,王超,魏群,等.红外探测器非均匀性校正系统研制[J].红外与激光工程),2013,**42**(07): 1669-1673.