

# 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<sup>1,3</sup>, 周双喜<sup>1,2</sup>, 李璐芳<sup>1,3</sup>, 刘高睿<sup>1,3</sup>, 孙海彬<sup>1,3</sup>,  
张昱<sup>1,3</sup>, 林加木<sup>1</sup>, 孙胜利<sup>1,3\*</sup>

(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, 实际应用对红外系统探测灵敏度的要求不断提高。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, 并对其进行了低反偏下的性能测试。测试结果表明, 基于线性雪崩型红外探测器的成像系统, 在短积分时间下信噪比(Signal-to-Noise Ratio, 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<sup>1,3</sup>, ZHOU Shuang-Xi<sup>1,2</sup>, LI Lu-Fang<sup>1,3</sup>, LIU Gao-Rui<sup>1,3</sup>, SUN Hai-Bin<sup>1,3</sup>,  
ZHANG Yu<sup>1,3</sup>, LIN Jia-Mu<sup>1</sup>, SUN Sheng-Li<sup>1,3\*</sup>

(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 space 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 signal-to-noise ratio (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 with the same aperture.

**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(Signal-to-Noise Ratio, SNR), 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以提升聚光能力、

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

在轨拼接以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、采用时间延迟积分(Time Delay Integration, TDI)技术等。这些技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时,其灵敏度比传统焦平面显著提升<sup>[1-6]</sup>,具有响应快、灵敏度高<sup>[7-8]</sup>的特点;另外,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<sup>[9-11]</sup>,有利于实现线性模式高灵敏度探测。因此,基于线性雪崩型红外探测器的高灵敏红外成像探测技术也逐渐得到应用<sup>[12-13]</sup>。

本文分析了红外系统的噪声来源,设计了基于512×512的短波红外观型雪崩型探测器的小口径红外成像系统,并对其进行了标定和试验。结果表明,该系统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,则计算点源信噪比的公式如下:

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

其中 $\delta$ 为信号过程因子, $D_0$ 为光学口径, $J$ 为目标辐射强度, $\rho$ 为信号能量集中度, $\tau_a$ 为大气透过率, $\tau_0$ 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, $\Omega$ 为立体角, $\Delta f$ 为系统等效带宽。

从式(1)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 $D^*$ 、减小带宽等。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,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。

### 1.2 基于线性雪崩器件的系统信噪比

雪崩二极管(Avalanche Photodiode, APD)是一种在反向电压作用下<sup>[14]</sup>,光电流成倍增长<sup>[15]</sup>的高

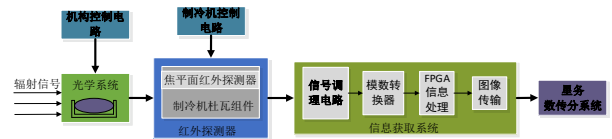


图1 红外相机系统信息流程图

Fig. 1 Information flow diagram of infrared camera system

速、高灵敏度光电二极管<sup>[16]</sup>,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<sup>[17]</sup>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的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,产生的载流子数目呈指数式急剧增加。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,主要用于远程光通讯、激光测距等近红外波段的弱光检测<sup>[18-19]</sup>。

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<sup>[18]</sup>。 $M$ 为倍增因子<sup>[20]</sup>; $F$ 为剩余噪声因子,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SNR体现的<sup>[21]</sup>。

噪声等效功率( $N_{EP}$ )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( $N_{EPH}$ )定义为给定带宽下信噪比为1时所对应的入射光子数,其值越小探测器的灵敏度越高,计算公式如下:

$$N_{EPH} = \frac{N_{EP} \times t_{int}}{h \times \frac{c}{\lambda}}, \quad (2)$$

$$D^* = \frac{\sqrt{A_d \times \Delta f}}{N_{EP}}, \quad (3)$$

得到:

$$N_{EPH} = \frac{\lambda \times \sqrt{A_d \times t_{int}}}{h \times c \times D^*}, \quad (4)$$

其中 $\lambda$ 为波长(单位为cm), $A_d$ 为光敏元面积(单位 $\text{cm}^2$ ), $t_{int}$ 为测试时的积分时间(单位s), $h$ 为普朗克常数( $6.6256 \times 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2$ ), $c$ 为光速( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ), $D^*$ 为归一化探测率(单位为 $\text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}} \cdot \text{W}^{-1}$ )。

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 $J_{in}$ 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增益归一化暗电流(Gain

Normalized Dark Current, GNDC)和剩余噪声因子 $F$ ,通过计算获得 $N_{EPh}^{[18]}$ 。

$$N_{EPh \alpha} = \sqrt{\frac{M^2 \cdot F(M) \cdot (GNDC + J_{flux}) \cdot A_d \cdot \frac{t_{int}}{q}}{M \cdot \eta \cdot FF_{ug}}} + N_{readout}^2$$

$$\approx \frac{N_{readout}}{M \cdot \eta \cdot FF_{ug}}, \quad (5)$$

传统探测器的 $N_{EPh}$ 公式<sup>[18]</sup>如下所示:

$$N_{EPh} = \sqrt{\frac{(GNDC + J_{flux}) \cdot A_d \cdot \frac{t_{int}}{q}}{\eta \cdot FF_{ug}}} + N_{readout}^2$$

$$\approx \frac{N_{readout}}{\eta \cdot FF_{ug}}, \quad (6)$$

由公式(1)、式(4)~(6)得出:

$$\frac{N_{EPh}}{N_{EPh \alpha}} = \frac{D_a^*}{D^*} = \frac{SNR_a}{SNR} \approx M \quad (7)$$

通过上述分析可得: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 $N_{readout}$ 能忽略不计的情况下, $N_{readout}^2$ 远远大于左侧公式,因此 $M$ 倍增因子与 $N_{EPh}$ 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 $N_{EPh}$ 和 $D^*$ 以及SNR的比较,得出雪崩探测器的SNR是传统探测器SNR的 $M$ 倍。

在弱小目标高帧频探测的应用场景下,积分时间较短。对于探测器而言,在不放大的状态下,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。在倍增模式下,信号放大 $M$ 倍,光子噪声放大 $M \times F$ 倍,但由于积分时间较短,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,所以信噪比提升至原来的 $M$ 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 基于线性雪崩器件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。其中光学系统采用口径为190 mm的两反光学结构,系统焦距为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%。光学系统传递函数如图3所示。

### 2.2 信息获取系统

红外信息获取系统以XILINX公司现场可编程

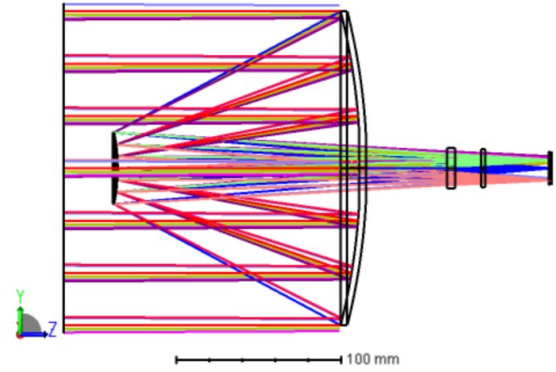


图2 光学结构光路图

Fig. 2 Light path diagram of optical structure

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	1 141 mm	
波段	2.5~3.4 $\mu\text{m}$	
视场	$0.7^\circ \times 0.7^\circ$	
传递函数	大于0.4	
能量集中度	大于50%	
畸变	1.79%	

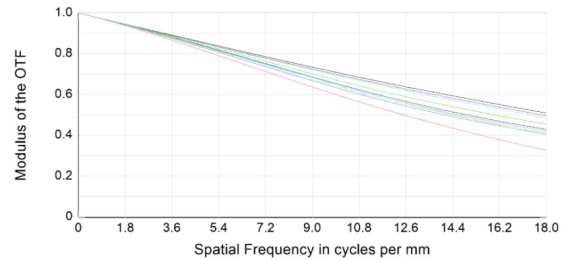


图3 光学系统传递函数图

Fig. 3 Transfer function of optical system

逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)为核心器件,采用高量化位数的模拟数字转换器(Analog to Digital Converter, ADC)进行数据采集,并通过千兆以太网进行数据传输。系统框图如图4所示。

探测器驱动时序由FPGA产生,驱动频率为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,最高转换速率为15 MSa/s,分辨率为18位,信号量化范围为8 196 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

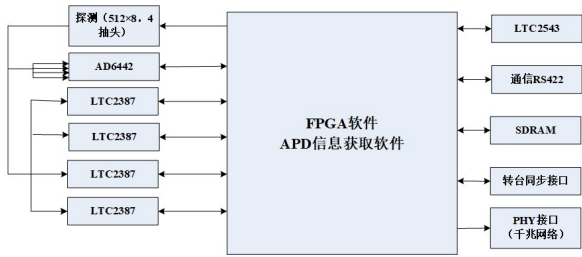


图4 红外信息获取系统框图

Fig. 4 Block diagram of information acquisition system

据采集。信号前端采用低噪运算放大器AD8608和宽带高速运算放大器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。

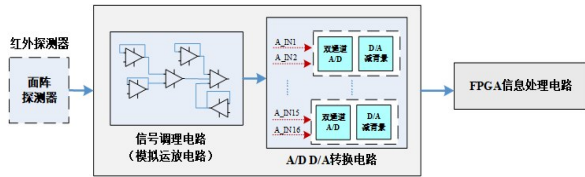


图5 前端信号调理图

Fig. 5 Front-end signal conditioning diagram

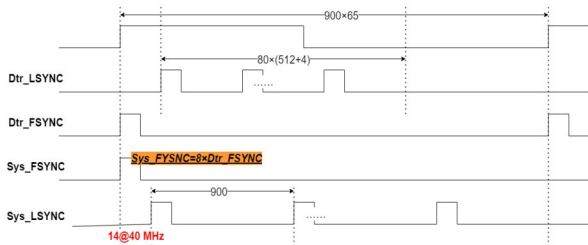


图6 探测器驱动时序图

Fig. 6 Timing diagram of detector driver

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 $14L_{sb}$  ( $L_{sb}$ 为最低有效位),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。



图7 探测器第一个像元数据读出控制时序

Fig. 7 First image metadata read control timing of detector

### 2.3 数据采集系统以及数据处理方法

获取数据后将数据送入FPGA的先入先出队列(First Input First Output, 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的数据,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,吉比特介质独立接口(Reduced Gigabit Media Independent Interface, RGMII)模式,采用4位数据接口,工作时钟为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得到的黑体定标计算值。

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<sup>[22]</sup>。基于标定技术的算法是指在实验室内利用均匀的高温和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<sup>[23]</sup>。此类算法结构简单,易于硬件实现,但是它们没有补偿各探测元差别性漂移的能力<sup>[23]</sup>。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算法等<sup>[23]</sup>。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,此类算法计算量大、收敛速度慢,依赖场景的运动,难以通过硬件实现<sup>[23]</sup>。

通过两点法,可以有效地校正红外图像中的固

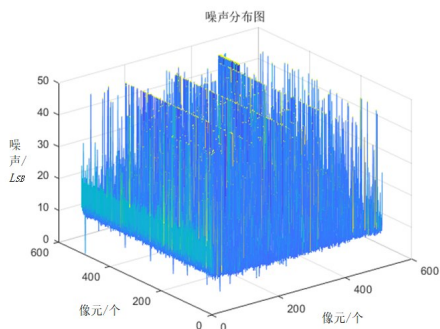


图8 噪声分布图  
Fig. 8 Noise profile

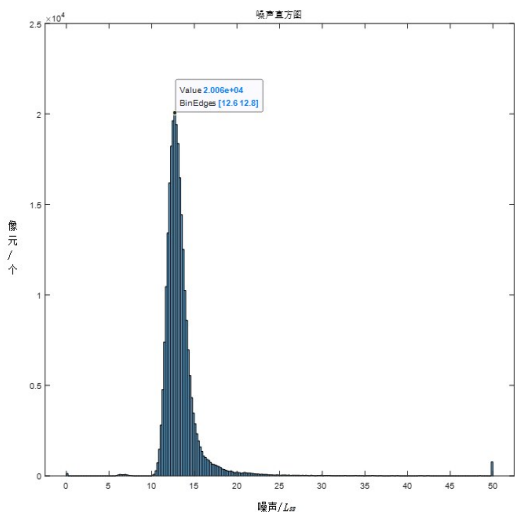


图9 噪声直方图  
Fig. 9 Noise histogram

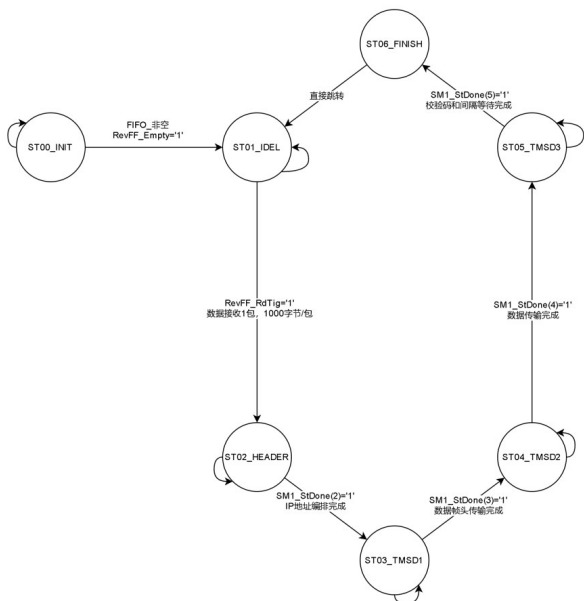


图10 数据传输状态机  
Fig. 10 Data transmission state machine

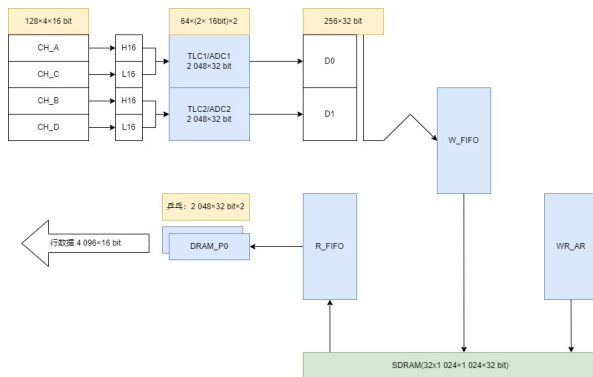


图11 数据采集和控制框图  
Fig. 11 Data acquisition and control block diagram

定模式噪声,提高图像质量。当采用两点法进行非均匀性校正时,在响应低端和高端校正效果不理想。经分析可知,这是由于场景动态范围过大,超出探测器非线性响应区导致的。因此后续在高灵敏度应用场合,需考虑定标和场景相结合的校正方法。本文主要研究灵敏度的提升途径,因此仅采用两点定标法进行非均匀性校正。

假定探测器第*i*个像元 $\phi_i$ 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 $T_0=25\text{ }^\circ\text{C}$ ,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 $T_1=85\text{ }^\circ\text{C}$ ,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2倍均值、响应小于 $\frac{1}{2}$ 均值的像元。为充分利用A/D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

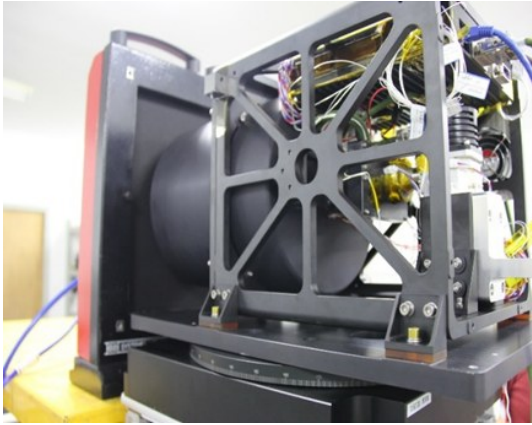


图12 实验室两点法校正

Fig. 12 Laboratory calibration by two-point method

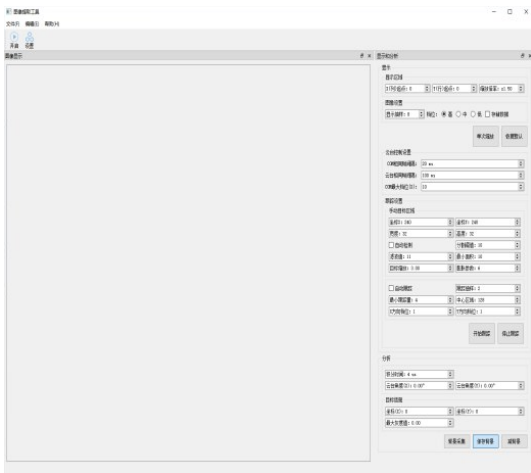


图13 上位机软件界面

Fig. 13 Software interface of two-point method

均匀性由7%减至1.4%。结果表明,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 非均匀性校正前的图像

Fig. 14 Image before non-uniformity correction

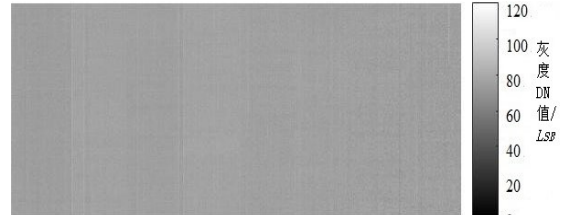


图15 非均匀性校正后的图像

Fig. 15 Image after non-uniformity correction

### 3 试验结果

#### 3.1 实验室性能标定

本文采用中国科学院上海技术物理研究所研制的512×512线性雪崩短波红外探测器。该器件的实测截止波长为4.1 μm。在安装相同滤光片的状态下,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线性雪崩短波红外探测器的测试性能如表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 Performance index table of 512×512 linear avalanche short-wave infrared detector

探测器偏压/V	0.1	1	2	3
平均波段响应率/(V/W)	$8.94 \times 10^9$	$1.10 \times 10^{10}$	$1.81 \times 10^{10}$	$3.04 \times 10^{10}$
噪声/mV	0.69	0.62	0.66	0.79
平均波段探测率/( $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ )	$1.42 \times 10^{12}$	$1.92 \times 10^{12}$	$2.99 \times 10^{12}$	$4.13 \times 10^{12}$
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,对器件在同一积分电容下的,黑体响应与偏压关系进行了系统测试。黑体温度设置为25 °C和85 °C,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,系统响应率逐渐提高。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

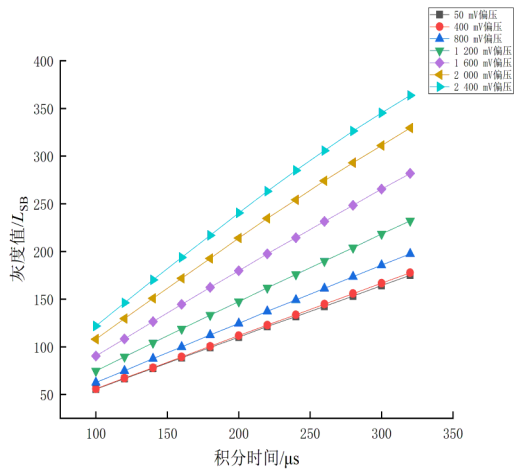


图 16 不同积分时间不同偏压下的黑体响应  
Fig. 16 Blackbody response under different integration times and different bias

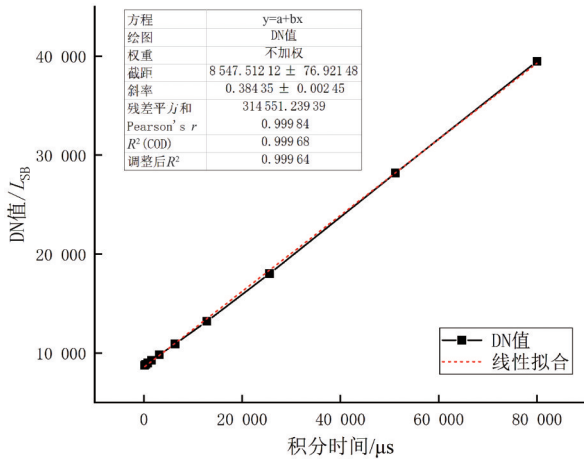


图 17 黑体响应与积分时间线性度的关系  
Fig. 17 Relation between blackbody response and integration time linearity

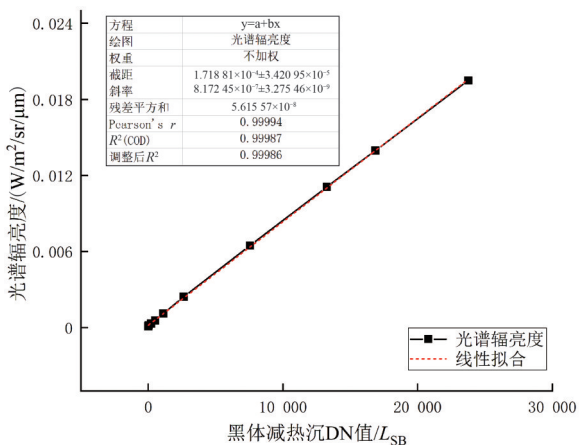


图 18 黑体响应与光谱辐亮度线性度的关系  
Fig. 18 Relation between blackbody response and spectral radiance linearity

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:

$$SNR = DN_{\text{signal}}/DN_{\text{noise}} \quad (11)$$

其中,SNR为考核点信噪比,DN<sub>signal</sub>为相机信号输出灰度值,DN<sub>noise</sub>为噪声灰度值。

在实验室条件下,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,基于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,A/D 量化位数大于 8bit,成像距离为 5~7 km。从原始图像对比度上观察到,线性雪崩模式下,成像对比度明显优于常规成像模式。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,而常规成像模式下为 4.16,两者比值约为 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。

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4 外场成像试验采集图像参数

Table 4 Image parameters collected in the field 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 $B_{g\_mean}$	300.60	196.58	蓝框(11×11)
目标均值 $T_{g\_mean}$	285.70	192.42	红框(11×11)
灰度差	14.90	4.16	



图19 阴雨条件下常规成像模式飞机成像图

Fig. 19 Aircraft image under cloudy and rainy conditions conventional imaging mode



图20 阴雨条件下线性雪崩模式飞机成像图

Fig. 20 Aircraft image under cloudy and rainy conditions linear avalanche mode

## 4 结论

本文利用线性雪崩型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

表5 晴朗天气下线性倍增模式对飞机成像条件1

Table 5 Imaging condition 1 of aircraft by linear multiplication mode in clear weather

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

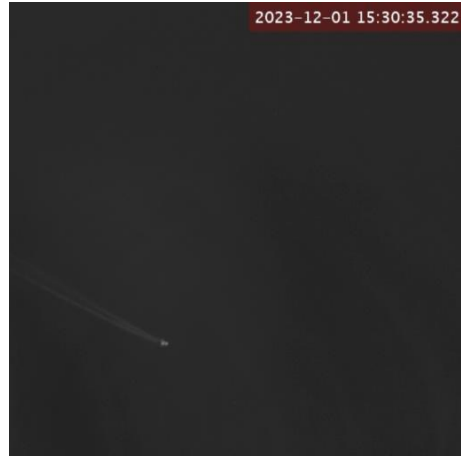


图21 晴朗天气下线性倍增模式对飞机的成像图1

Fig. 21 Image 1 of aircraft by linear multiplication mode in clear weather

表6 晴朗天气下线性倍增模式对飞机的成像条件2

Table 6 Imaging condition 2 of aircraft by linear multiplication mode in clear weather

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

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,线性雪崩型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,在短积分时间场景下,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的灵敏度得到明显提升,该方法有助于提升红外系统的探测灵敏度。



## References



图 22 晴朗天气下线性倍增模式对飞机的成像图 2

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

- [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.* Performance 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*, 2006, **6372**: 637201-637212.
- [4] JACKSON C, MATHEWSON A, COHEN M J, *et al.* Improvements in silicon photon counting modules [J]. *Proceedings of 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: 108461555.
- [6] KARVE G, ZHENG X, ZHANG X, *et al.* Geiger mode operation of an  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}-\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  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. (Mehmet Nalbant, 徐继红. 低噪声 APD 偏置电路 [J]. *国外电子元件*, 2002, **9**: 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. (李奕键. 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 AlGaIn avalanche photodiode [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (常超. AlGaIn 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**(7): 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**(7): 1669-1673.)