

文章编号: 1672-8785(2024)12-0001-06

超高灵敏度红外探测器测试评价

王 亮 袁 媛 吴 卿 陈彦冠

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 是评价红外探测器灵敏度的关键指标。通过改变读出电路结构, 提高读出电路的电荷处理能力, 使探测器的 NETD 值从 10 mK 量级提升至 1 mK 以下。当噪声小于 1 个灰度时, 采用现有测试方法得到的 NETD 值较低, 导致整机应用时识别距离评估过高, 与实际结果不符。本文提出的优化方法使测试结果与系统应用指标更符合。经分析认为, 所用探测器更适用于低速目标或者相对静止场景; 与常规探测器相比, 该探测器的识别距离受相同光学温度变化的影响更大。建议用户关注光学温度稳定性的影响。

关键词: 噪声等效温差; 读出电路; 低速目标; 光学温度稳定性

中图分类号: TN213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.12.001

Test Evaluation of Ultra-High Sensitivity Infrared Detectors

WANG Liang, YUAN Yuan, WU Qing, CHEN Yan-guan

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

Abstract: Noise equivalent temperature difference (NETD) is a key indicator for evaluating the sensitivity of infrared detectors. By changing the readout circuit structure and improving the charge processing capability of the readout circuit, the NETD value of the detector is increased from 10 mK to below 1 mK. When the noise is less than 1 gray level, the NETD value obtained by the existing test method is low, resulting in an overestimation of the recognition distance when the whole machine is used, which is inconsistent with the actual results. The optimization method proposed in this article makes the test results more consistent with the system application indicators. After analysis, it is believed that the detector used is more suitable for low-speed targets or relatively static scenes; compared with conventional detectors, the recognition distance of this detector is more affected by the same optical temperature change. Users are advised to pay attention to the impact of optical temperature stability.

Key words: noise equivalent temperature difference; readout circuit; low-speed target; optical temperature stability

收稿日期: 2024-06-12

作者简介: 王亮(1986-), 男, 北京人, 高级工程师, 主要从事制冷型红外探测器评价工作。

E-mail: a491138408@126.com

0 引言

众所周知,制冷型红外焦平面探测器的灵敏度一般用 NETD 标示。而 NETD 表征的物理含义为输出信号等于噪声信号均方根值时辐射温度的变化,具体如图 1 所示。

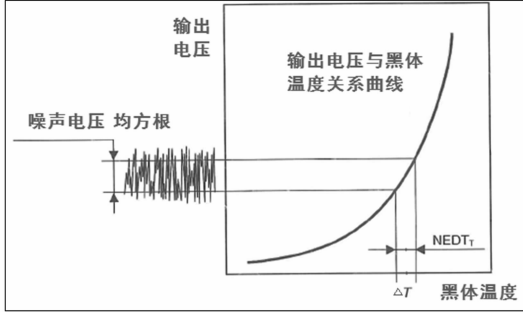


图 1 NETD 示意图

经过分析和实验验证,采用大电荷容量读出电路的探测器的 NETD 指标更低,探测器更灵敏,但也存在一定限制。本文先介绍 NETD 公式并进行深入分解,得到影响其结果的详细参数。通过介绍常规探测器读出电路的电荷容量限制原因以及高灵敏度探测器读出电路提高电荷能力的原理,改进现有 NETD 测试方法,使其更适用于具有大电荷容量读出电路的红外探测器。最后从应用角度提出场景限制和光学要求。

1 NETD 公式分析

为了减小 NETD 值,提高探测器灵敏度,采取的手段通常为降低探测器噪声电压均方根值(以下简称“噪声”)或者增强探测器信号。而探测器噪声受到采集系统噪声、读出电路噪声以及探测器接收的背景噪声的影响。其中,采集系统噪声和读出电路噪声一般为固有噪声;探测器接收的背景噪声受背景辐射信号的影响。因此噪声的降幅有限,即图 1 中噪声宽度压缩有限。为了减小 NETD 值,通常提高信号斜率、降低 ΔT 宽度。在不考虑帧频要求的前提下,可以通过提高积分时间、增加信号斜率的方式来增强信号和降低 NETD 值。

NETD 公式为

$$NETD = \frac{\Delta T}{V_S/V_N} \quad (1)$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad (2)$$

式中, ΔT 为 T_1 与 T_2 的温度差, T_1 为背景温度, T_2 为目标温度(单位为 K); V_S 为探测器在 ΔT 温差下的信号(单位为 V); V_N 为探测器在背景 T_1 时的噪声(单位为 V)。

探测器在一定积分时间内接收两个温度辐射的光子数并将其转换成电压方式输出时,两个电压的差值即为探测器信号。可按照式(3)进行分解:

$$V_S = t_{INT} A_d \frac{(N_{T2} - N_{T1})e}{C} \quad (3)$$

式中, t_{INT} 为探测器的积分时间(单位为 s); A_d 为探测器的像元面积(单位为 cm^2); N_{T1} 和 N_{T2} 分别为背景温度 T_1 和目标温度 T_2 时单位面积(cm^2)上辐射的光子数; C 为读出电路的积分电容(单位为 F)。

N_T 可以通过普朗克黑体辐射公式和玻耳兹曼公式求得:

$$N_T = \int_{\lambda_{on}}^{\lambda_{off}} \frac{2c}{\lambda^4 (e^{hc/\lambda KT} - 1)} \cdot FOV d\lambda \quad (4)$$

式中, h 为普朗克常数, $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; c 为光速, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$; K 为玻耳兹曼常数, $K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; FOV 为探测器组件的视场角(单位为 sr)。

由于系统噪声和读出电路噪声为固定值,在不考虑固定噪声时,探测器噪声可表示为

$$V_N = \frac{e\sqrt{t_{INT} N_{T1} A_d}}{C} \quad (5)$$

将式(3)和式(5)代入式(1),可得到 NETD 的另一种表达方式:

$$NETD = \frac{\Delta T}{\frac{(N_{T2} - N_{T1})\sqrt{t_{INT} A_d}}{\sqrt{N_{T1}}}} \quad (6)$$

当探测器的状态不变、目标与背景辐射温度恒定时, $\frac{\Delta T}{(N_{T2} - N_{T1})\sqrt{A_d}} \frac{1}{\sqrt{N_{T1}}}$ 也就成为了一个常数,

所以 NETD 只与积分时间平方根值的倒数成

正比。因此, NETD 可以随着积分时间的增加而降低。

由于常规读出电路的电荷容量受到读出电路工艺的限制, 以像元间距为 $30\ \mu\text{m}$ 的读出电路为例, 其电荷量一般只能达到 $37\ \text{Me}^-$, 积分时间一般只能达到 $300\ \mu\text{s}$; 继续增加积分时间后, 读出电路容易饱和。基于以上理论, 我们设计了一种大电荷容量读出电路。通过增加读出电路的电荷量, 使之达到 Ge^- 量级甚至更高水平。这样, 积分时间可以提升 100 倍(甚至更多), 使 NETD 降至 $1/10$ 以下。所以常规电路的 NETD 在 $10\ \text{mK}$ 左右。而采用该种电路时 NETD 则可降低到 $1\ \text{mK}$ 左右。

2 大电荷容量读出电路设计

在传统模拟域信号积分的读出电路中, 通过布局在单个像元内的积分电容实现对探测器光电流的积分, 然后将光电流转换成模拟域的电压值并向后端传输, 如图 2(a)所示。传统模拟域积分读出电路的积分电容受限于像元面积。而有限的积分电容会导致积分时间无法增加, 读出电路的电荷处理能力仅能达到十兆数量级, 相应的探测器灵敏度被限制在 $10\ \text{mK}$ 左右, 无法得到进一步提高。

数字像元读出电路在像素单元内完成了模拟信号的数字化, 电荷处理能力不再受积分电容面积的制约。只要像素单元内的数字计数器或数字寄存器的位数足够长, 就可大幅提高像元级数字化读出电路的电荷处理容量, 如图 2(b)所示。因此, 像素级数字化读出电路通过增加组件的积分时间来降低 NETD 值。利用数字像元技术可以将探测器的电荷处理能力提升至 Ge^- 量级(甚至 $10\ \text{Ge}^-$), 并可将其灵敏度提高到毫开级甚至亚毫开级。

3 数字化探测器的 NETD 测试方法分析

由图(1)可知噪声电压等效到温度差值的转换关系。模拟输出模式的探测器在被用户装入成像系统时, 输出电压一般会被转换成数字信号, 即数字灰度值。目前成像系统输出的灰度位数为 16 位, 即灰度输出范围为 $0 \sim 65535$ 。一般红外焦平面探测器的输出电压在 $2.8\ \text{V}$ 左右, 所以成像系统每个灰度值标示的电压值为 $43\ \mu\text{V}$ 。

根据模拟输出电路输出电压和输入电荷的计算公式:

$$U = Q/C \quad (7)$$

式中, Q 为读出电路接收的总电荷量, 单位

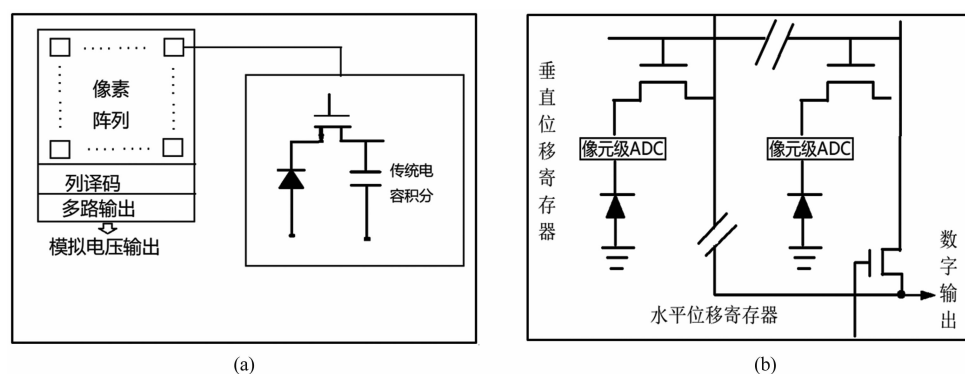


图 2 电路设计图: (a)模拟输出读出电路; (b)数字像元读出电路

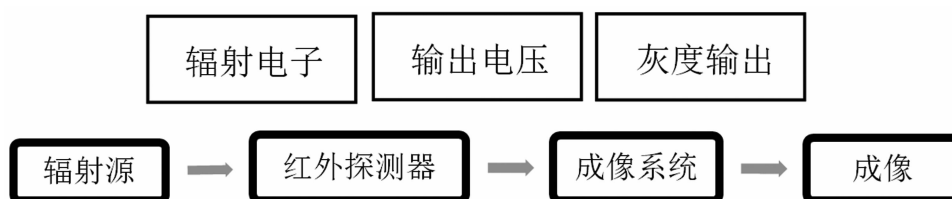


图 3 辐射电子、输出电压以及灰度输出的关系

为 C ； C 为读出电路的积分电容，单位为 F 。

我们可以将探测器输入电荷量与成像系统的输出灰度形成对应关系。辐射电子、输出电压以及灰度输出的关系如图 3 所示。

通过以上公式可将灰度值与辐射电子数相对应，即 1 个灰度值为读出电路的最大处理电荷量除以灰度范围。以像元间距为 $30\ \mu\text{m}$ 的红外探测器为例，读出电路接收的最大电子数量为 $37\ \text{Me}^-$ ，所以 1 个灰度值等于 565 个电子。因此，当探测器接收到背景辐射的光子转换为电子到读出电路时，电子数为 565 的平方（即 318745 个），读出电路输出的噪声电压为 1 个灰度，为探测器成像灰度的最小分辨单位。而 318745 个电子只占读出电路最大处理电荷的 0.86%。探测器在实际应用时，输出电子数至少占总电荷量的 1% 以上，积分时间大于 $3\ \mu\text{s}$ ，噪声电压等效灰度值超过 1 个灰度。所以不会出现探测器噪声输出的灰度值低于 1 的情况（具体数据见表 1）。

表 1 常规模拟电路参数

参数	320×256@	640×512@
	30 μm	15 μm
电荷容量/ Me^-	37	6
输出电压/ V	2.8	2.1
输出灰度	65536	65536
每灰度等效电压/ μV	43	32
每灰度等效电荷	564	92
噪声灰度	5~10	10~15

因此，我们在量化噪声等效的温差时，能够确保该温差产生的电子数量足够达到 1 个灰度的上限，探测器输出图像上该像元的输出灰度能够发生变化，与周围像元的灰度存在差异。

大电荷容量读出电路直接进行数字输出，每一个输出灰度表征的电荷数量超过 1 万个电子。以某款读出电路为例，每位灰度变化需要 1.6 万个电子。当探测器接收的电子数量为 $51.7\ \text{Me}^-$ 时，探测器噪声电子数约为 7400 个，等效灰度为 0.46，噪声灰度计算温差为 7 mK。由于增加 7400 个电子不能使灰

度值进位，目标像元与周围像元的灰度值一样。为了能与周围像元存在差异，至少需要 1.6 万个电子，等效温差为 15.1 mK。所以根据现有国标测试方法得出的 7 mK 数值与实际应用的 15.1 mK 存在很大差异（具体数据见表 2）。

表 2 像素级电路参数

参数	320×256	640×512
电子容量/ Ge^-	9	16
输出位数	16	19
输出灰度	65536	65536
每灰度等效电子	50000	30000
噪声电子	0~5.7 万	0~12 万
噪声灰度	0~2	0~4

由于数字化探测器的输出值为数字灰度信号而非模拟电压信号，在 NETD 测试方法中需要将模拟信号电压 V_s 改为数字灰度 D_s ，模拟噪声电压 V_N 改为数字噪声 D_N ，并规定 1 个灰度电压的最小温差参数。当计算得出的数字噪声 D_N 小于 1 时，探测器的温差应以 1 个灰度值的最小温差参数为准。具体分两种情况：

(1) 当数字化读出电路中探测器噪声大于 1 个灰度时，按照数字化 NETD 的计算方法：

$$\text{NETD} = \frac{\Delta T}{D_s/D_N} \quad (8)$$

式中， D_s 为探测器在 ΔT 温差时的数字灰度信号，单位为灰度 (LSB)； D_N 为探测器在背景 T_1 时的数字噪声，单位为灰度 (LSB)。

(2) 当数字化读出电路中探测器噪声小于等于 1 个灰度时，按照数字化 NETD 计算方法：

$$\text{NETD} = \frac{\Delta T}{D_s} \quad (9)$$

4 数字化探测器应用问题分析 1：积分时间受限，应用场景受限

要使大电荷容量探测器达到高灵敏度的指标，需通过较长的积分时间进行信号累加。当目标移动较慢（在一个积分时间内的移动距离小于一个像元的视场）时，目标能量接收最多，如图 4 所示。

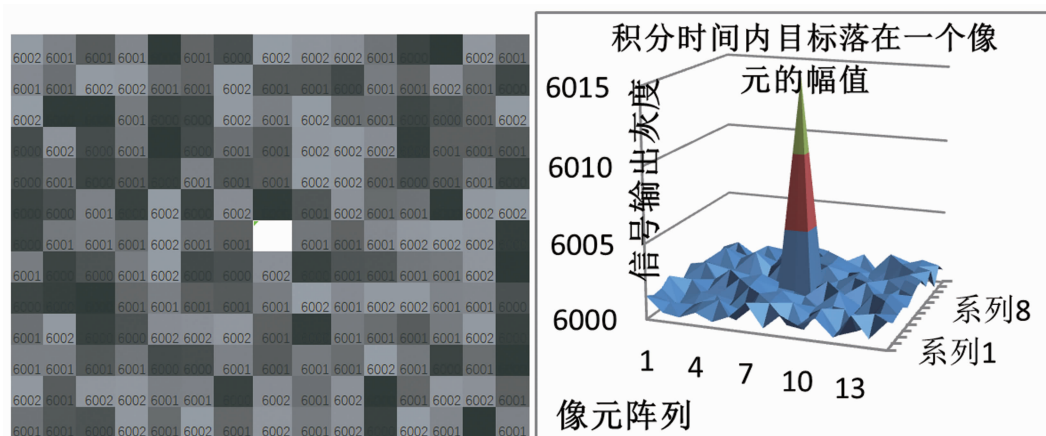


图 4 积分时间内目标集中在 1 个像元的幅值

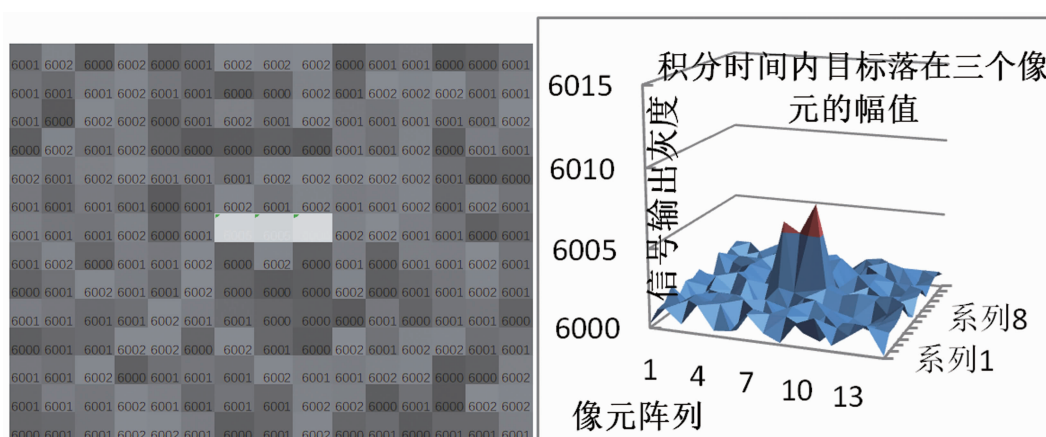


图 5 积分时间内目标集中在 3 个像元的幅值

如果目标移动过快(在一个积分时间内移动多个像元),则目标在每个像元的驻留时间小于积分时间,积分时间利用率不足,导致像元的有效累加信号较少,达不到高灵敏效果(见图 5)。

因此,该类型探测器在实际应用时需要提前评估目标的运动速度和运动轨迹等,确保探测器能够与目标运动状态匹配,达到最佳应用效果。所以结合探测器长积分时间的特点,在静止场景或者慢运动目标识别应用场景下使用该类型探测器可以发挥其最佳性能。

5 数字化探测器应用问题分析 2: 应用光学环境导致无法达到高灵敏效果

红外焦平面探测器在应用中进行图像校正。由于大电荷容量数字化电路的噪声灰度值低,因此图像一致性更好,如图 6 所示。而模

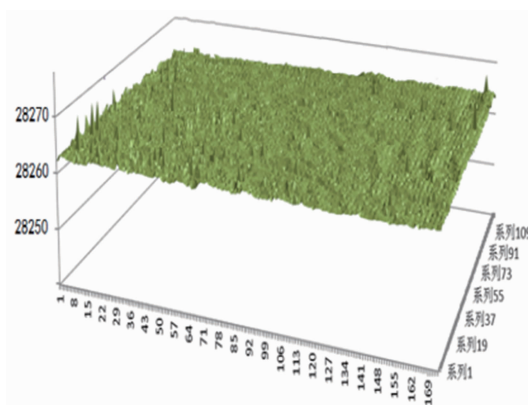


图 6 校正后数字探测器的输出数据

拟电路的噪声灰度值较高,因此图像一致性较差,如图 7 所示。

理论上,光学温度辐射不会对探测器的均匀性造成影响。然而实际光学应用的工作环境温度可从 20℃骤降至-40℃或者提升至 60℃,使得大口径光学镜头发生形变,导致光学系统

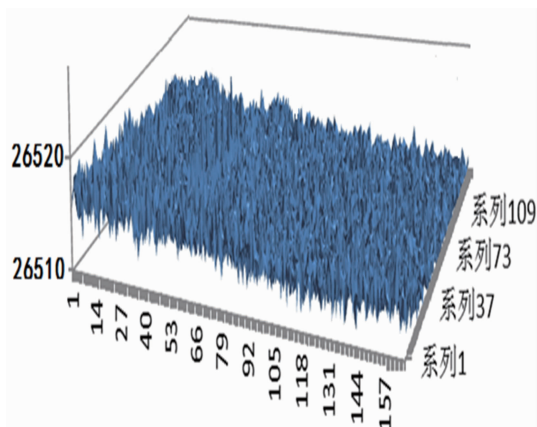


图 7 校正后的模拟信号输出数据

的透过率不均匀。探测器像元阵列接收镜头温度变化产生的能量是不均匀的，而且外界辐射透过镜头后受到镜头形变的影响，光路随之改变，投射到探测器阵列上的能量分布也会不均匀，导致探测器的非均匀性变差。

本文介绍的模拟探测器的时域噪声一般约为 10 个灰度，导致器件校正后的空域噪声也在 10 个灰度左右。当光学温度产生相同变化时，空域噪声提升至 20 个灰度，时域噪声与空域噪声的比值为 1/2。

而高灵敏度探测器的时域噪声一般约为 1 个灰度，导致器件校正后的空域噪声也在 1 个灰度左右。当光学温度产生相同变化时，空域噪声提升至 20 个灰度，时域噪声与空域噪声的比值为 1/20，探测器的灵敏度大幅降低，使得探测器的高灵敏效果无法发挥。因此，在高灵敏度探测器的整机应用时，需要对光学结

构的温度变化进行控制，以免光学辐射变化导致灵敏度下降。

6 结束语

采用大电荷容量数字化电路时，可以通过大幅增加积分时间的方式来提高探测器的灵敏度。由于电荷容量的大幅提升，每灰度对应的电荷增加，积分时间不足以使探测器的输出噪声大于 1 时，采用标准 NETD 测试方法得出的数值与实际应用存在较大差异。本文优化的 NETD 测试方法解决了这个问题，使测试结果更符合实际应用需求；同时也解释了该类型探测器应用的局限性，提醒用户在使用时提前考虑这些限制或者要求，以发挥高灵敏度探测器的最佳性能。

参考文献

- [1] 袁媛, 李敬国, 胡月, 等. 一种高灵敏度数字化 TDI 型红外焦平面读出电路 [J]. *激光与红外*, 2021, **51**(7): 933–937.
- [2] 袁媛, 王静, 李冬冰. 甚高灵敏度红外探测器读出电路实现方法研究 [J]. *激光与红外*, 2019, **49**(6): 715–719.
- [3] Sun Z, Chuang S, Zhu W. Radiometric Calibration Method for Large Aperture Infrared System With Broad Dynamic Range [J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(15): 4659–4666.
- [4] Antoni Rogaiski 著. 周海宪, 程云芳译. *红外探测器* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.