

文章编号: 1672-8785(2025)06-0001-09

红外微分探测器: 超越 BLIP 极限的新模式

陆 卫 李向阳 李 宁 张 燕 马 丁
王继强 甄红楼 周孝好 王少伟

(中国科学院上海技术物理研究所, 红外科学与技术全国重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 尽管长波红外成像技术在陆地遥感、天文学等应用中至关重要, 但其面临着来自压倒性热背景辐射的根本性挑战。这种背景光子通量常常将传统探测器推向其背景限制性能 (Background-Limited Performance, BLIP) 的极限。此时主要的限制因素并非探测器固有的噪声, 而是背景本身的散粒噪声。本文论证了一个关键的分类, 以区分两种表面相似但本质迥异的探测架构——差分探测器和微分探测器。根据探测器的应用和实现途径可知, 传统差分探测器的背景光电流为可探测的信号差异设置了一个由背景决定的阈值, 而微分探测器则是一种在物理感知层面直接对目标物理量的差异进行测量的器件: 只有微弱的差值信号被积分, 导致极大量的累加采样, 因此可将信噪比提升至前所未有的水平。特别介绍了基于量子阱红外光电探测器 (Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP) 的微分探测技术路径。QWIP 以其极低的暗电流、精准的电学可控性和内禀的光谱选择性, 为实现高性能长波红外微分探测器提供了理想的物理基础, 并已在实验中取得显著进展。最后利用费雪信息理论和克拉默-拉奥约束为微分探测器提供了严格的理论支撑。

关键词: 差分探测器; 微分探测器; 量子阱红外光电探测器; 长波红外; 背景限制性能

中图分类号: TN215; TP391 **文献标志码:** A

DOI: 11.3969/j.issn.1672-8785.2025.06.001

收稿日期: 2025-06-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFA0715500)

作者简介: 陆卫 (1962-), 男, 浙江宁波人, 研究员, 博士, 主要从事红外物理、红外光电器件及其空间应用研究。E-mail: luwei@mail.sitp.ac.cn

Infrared Differential Detectors: A New Paradigm Beyond the Limits of BLIP

LU Wei, LI Xiang-yang, LI Ning, ZHANG Yan, MA Ding, WANG Ji-qiang,
ZHEN Hong-lou, ZHOU Xiao-hao, WANG Shao-wei

(State Key Laboratory of Infrared Science and Technology, Shanghai Institute of Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Although long-wavelength infrared imaging technology is crucial in applications such as terrestrial remote sensing and astronomy, it faces a fundamental challenge from the overwhelming thermal background radiation. This background photon flux often pushes conventional detectors to the limits of their background-limited performance (BLIP). The main limiting factor here is not the intrinsic noise of the detector, but the shot noise of the background itself. In this paper, a key classification is demonstrated to distinguish between two superficially similar but fundamentally different detection architectures (difference detector and differential detector). According to the application and implementation of the detector, the background photocurrent of the conventional difference detector sets a background-determined threshold for the detectable signal difference, while the differential detector is a device that directly measures the differences of the target physical quantities at the physical perception level. Only the weak difference signals are integrated, resulting in extensive cumulative sampling to improve the signal-to-noise ratio to an unprecedented level. In particular, the differential detection technology path based on the quantum well infrared photodetector (QWIP) is introduced. QWIP provides an ideal physical basis for realizing high-performance long-wavelength infrared differential detectors with its extremely low dark current, precise electrical controllability and intrinsic spectral selectivity, and has made significant progress in experiments. Finally, Fisher information theory and Cramer-Rao bound are used to provide rigorous theoretical support for differential detectors.

Key words: difference detector; differential detector; quantum well infrared photodetector; long-wavelength infrared; background-limited performance

0 引言

红外成像,特别是在长波红外大气窗口(8~14 μm),对于众多科学、工业和国防领域都是不可或缺的^[1-2]。然而,地面长波红外成像系统面临着一个极端挑战:目标信号通常只是叠加在由 300 K 环境温度产生的巨大热背景辐射之上的微小温度或发射率差异。这种高光子通量意味着大多数红外光电探测器的最终性能并非受其内部噪声(如热噪声或暗电流噪声)的限制,而是受背景光子本身固有的量子散粒噪声的限制。这种工作状态被称为红外光电探测器的 BLIP 极限^[3]。

为了探测微弱目标或细微变化,一种常用策略是从信号图像中减去参考图像。这催生了两种截然不同的架构理念——红外差分探测器和红外微分探测器。本文旨在对其探测特性进

行对比分析。红外差分探测器采用传统方法,由红外焦平面阵列按顺序或者并行地采集两幅独立的图像(比如包含目标的场景和参考场景),接着在后处理中对产生的模拟或数字信号进行减法运算^[4]。而红外微分探测器则是一种新的架构,它在光被转换为积分电荷之前,在光电转换的物理层面上执行减法。类似的除背景干扰架构在激光探测中已有研究,即通过干涉或其他方式组合“信号”和“参考”光场,使巨大的、共有的激光背景被抵消。在理想情况下,这种探测器只感测两者之间的差异^[5]。

尽管两种方法都旨在分离差分信号,但我们将证明红外差分探测器架构在高背景辐射环境中面临一个严重且通常无法突破的物理瓶颈——探测器读出电路的满阱容量(Full-Well

Capacity, FWC)^[6]。本文展示了红外微分探测器架构通过规避这一限制, 在灵敏度和信息获取方面提供了根本性的优势, 证明了其作为一种更优越的红外探测器类别的独特性。

1 红外微分探测器架构的原理与实现

1.1 红外差分探测器的动态范围瓶颈

红外差分探测器是一种直观且常见的架构, 其核心思想如下: 分别独立地测量两个或多个包含信号与背景的总量, 接着在后续的电子电路或数字软件中对这些测量结果进行减法运算, 以期得到信号的差值。然而, 这种“先积分后减法”的模式存在两个根本性的物理缺陷: (1) 动态范围与积分时间的相互制约; (2) 量化噪声与数字累加的失效。

1.1.1 动态范围与积分时间的相互制约

现代红外焦平面阵列由一个探测器阵列和一个读出集成电路(Readout Integrated Circuit, ROIC)混合而成。每个像素在 ROIC 中都包含一个积分电容, 用于在曝光期间累积光生电荷。该电容可存储的最大电荷量即为其满阱容量。这是一个有限值, 通常在数万到数百万个电子之间^[7]。在长波红外波段, 来自环境热背景的光子通量是巨大的。这个背景红外光通量 Φ_B 产生一个大的光电流 I_B , 迅速填满积分阱。为防止饱和, 积分时间 t_{int} 必须保持极短。如果满阱容量为 N_{well} 个电子, 背景光电流每秒产生 I_B/e 个电子(其中 e 是电子的电荷值), 则最大积分时间为 $t_{\text{int,max}} \approx N_{\text{well}} \cdot e / I_B$ 。这一约束是差分探测器架构在高红外光通量场景中的核心弱点。

为了提高信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR), 采用标准的信号平均技术, 即采集并平均 K 个独立的帧^[8]。信噪比与平均次数的平方根成正比: $(\text{SNR})_K = K^{1/2} \cdot (\text{SNR})_1$ 。然而由于背景迫使 t_{int} 非常短, 在合理的观测时间内可以采集和平均的帧数 K 受到严重限制。这为可实现的信噪比设置了一个硬性上限。因此, 差分探测器存在一个最低可探测信号阈值。如果信号差异微弱到在短暂的 $t_{\text{int,max}}$ 内产

生的电荷小于系统的固有噪声基底, 那么它就无法被可靠地探测到, 因为降低噪声的主要手段——增加积分时间是不可用的。

1.1.2 量化噪声与数字累加的失效

为了增大有效的 K 值, 人们可以通过快速读出积分满的电荷, 并在计算机中进行数字累加, 以规避满阱容量的限制。然而, 这种方法引入了另一个更为隐蔽的瓶颈——量化噪声^[9]。在读出电路中, 模拟信号(即积分电容上的电压)需通过模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)转换为数字信号。一个 n 位的 ADC 将其满量程电压范围划分为 2^n 个离散的量化等级。其中每个等级的宽度, 即最低有效位(Least Significant Bit, LSB), 代表了 ADC 能够分辨的最小电压变化^[10]。

对于差分探测器来说, 若在巨大的背景信号条件下, 则背景信号占据了 ADC 的整个动态范围。这就意味着, 单个 LSB 对应的电压变化往往等效于很多个光电子。如果由目标引起的微弱信号差异所产生的电荷数小于单个 LSB 所等效的电荷数, 那么这个信号在数字化过程中将被完全淹没。ADC 的输出数字码将不会反映这个微弱信号的存在。因此, 对这些读出值进行简单的数字累加, 无异于对一系列几乎不变的数字进行平均, 无法提取出任何有效的信号信息, 导致数字累加策略失效。

1.2 红外微分探测器在大背景干扰下的微弱红外信号探测

与红外差分探测器相比, 红外微分探测器在实际应用中(尤其在背景强、弱信号红外成像场景中)呈现了突破动态范围限制的最低可探测信号阈值的根本性优势。一种实现红外微分探测器的技术路径是应用量子阱红外探测器的光导特性, 如图 1 所示。

图 1 表示两个耦合在一起的光导器件分别获得来自背景红外光的光电流 I_B 和来自背景与目标信号的光电流 $I_B + I_S$ 。当两者达到对背景的精准平衡后, 输出的背景光电流就为零。此时仅仅输出信号光电流, 而且理论上这个可

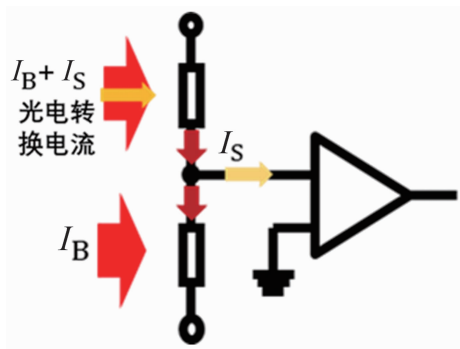


图 1 红外微分探测器的原理图

探测的信号光电流没有下限。在这样的红外微分探测器架构中，它在物理层面的减法操作发生在电荷积分之前，所以通过精确的平衡，巨大的、不包含目标信息的共模背景光电流被抵消掉了。

因此，注入到积分电容中的，仅仅是与目标微弱差异相关的那个极小的差值电流。这带来的好处是，由于注入的电流量极小，积分电容几乎不会被填满。这意味着单次积分时间可以大大延长，或者在固定读出周期内，可以进行极大数量（一个非常大的 K 值）的累加采样。所以微分探测器在原理上不存在一个由背景决定的探测阈值。由于背景被消除，整个动态范围都可用于测量差值。理论上，只要测量时间足够长（即 K 足够大），任何非零的微小差异最终都能从噪声中被提取出来，从而将信噪比提升到足以清晰识别的水平。正是因为它突破了由动态范围所设定的测量阈值，被测量的差

值可以向着数学上无穷小的概念逼近而不会失效。这与微积分中微分是差分极限的思想完美契合。因此，将这种在物理感知层面直接测量差值且不受背景动态范围限制的探测器定义为微分探测器，以区别于受此限制的差分探测器。这在学术研究和技術发展上是合理的。

1.3 长波红外微分探测器的实现路径：QWIP 的独特优势

在将微分探测原理应用于长波红外成像的实践中，选择合适的光电转换材料与器件结构至关重要。中国科学院上海技术物理研究所的近期研究工作表明，QWIP 为实现高性能长波红外微分探测器提供了一条具有独特优势的技术路径^[11]，尤其是应用光电技术的局域化联合调控方法，提升了 QWIP 器件的峰值外量子效率。这为 QWIP 用于微分探测器架构奠定了必要的探测灵敏度基础。如图 2 所示，目前长波红外波段达到的最高峰值外量子效率为 28%。

QWIP 之所以特别适用于微分探测器架构，主要是因为具有以下几个方面的优势：

（1）极低的器件内在噪声。相关研究表明，在我国遥感 37 号卫星上应用的高光谱长波 QWIP 焦平面阵列的像素暗电流可以被抑制到极低水平（约 2 pA），而且进一步将峰值外量子效率从 3% 提升到 20% 时依然可以保持 8 pA 的像素暗电流大小^[11]。这些暗电流值相对于

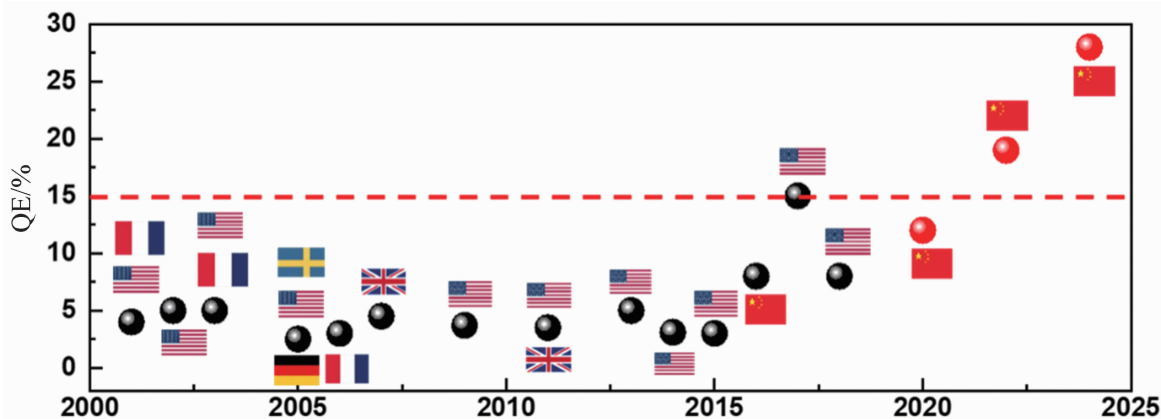


图 2 国内外研究的长波红外 QWIP 器件的峰值外量子效率汇总图（国旗表示该实验数据来自相应国家的研究机构的报道，其中随年份增长各个数据点来自文献[12-25]）

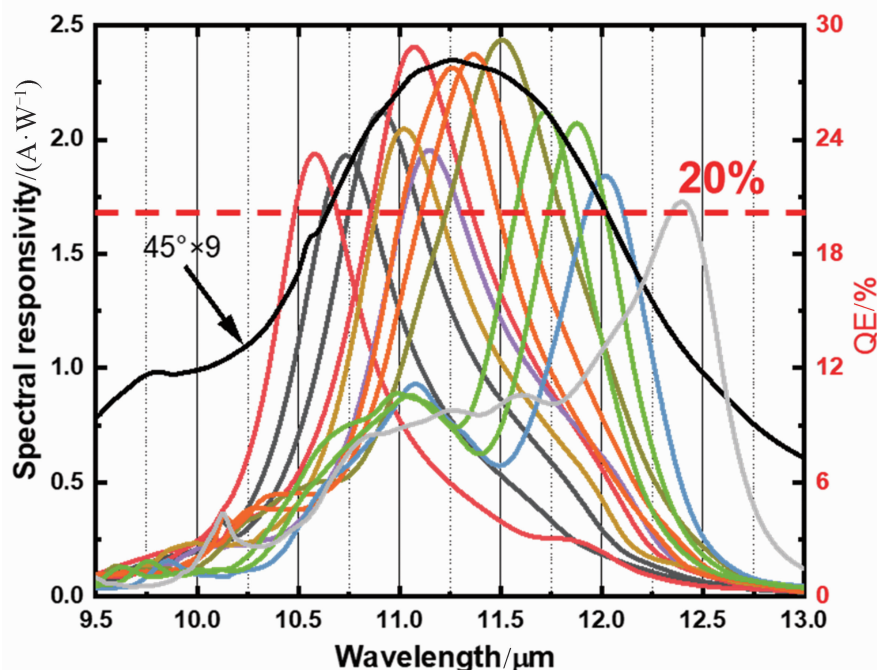


图 3 单片 QWIP 上不同像素在不同微纳结构操控下形成的响应光谱: 每个响应峰的峰值外量子效率均可达到 20% 以上, 并且相对于用黑色表示的该材料形成的标准光耦合结构(45°磨角)数据都有 9 倍左右的提升(注意黑色曲线表达的是其实验值乘以 9 之后的数值)

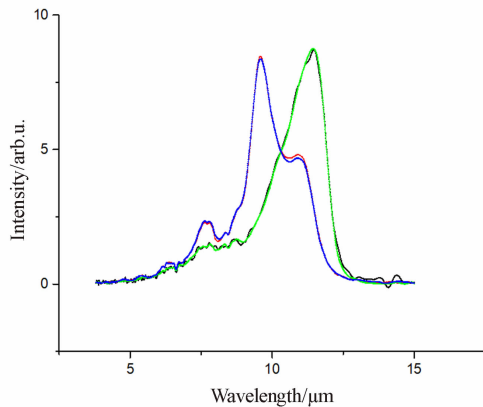
美国陆军研究实验室的报道结果^[18-19]得到了进一步降低, 且极小的器件暗电流确保器件内在噪声可处于很低的状态。在低温工作条件下, 其主要噪声来源是由背景光子涨落引起的散粒噪声, 因此器件内在的噪声(暗电流噪声)远小于背景光电流噪声。这为背景光电流的共模抑制提供了理想的前提: 由于器件本征噪声的干扰极小, 物理减法操作可以更精确地针对背景光电流进行, 从而实现更高的共模抑制比。

(2)精准的电学可控性。QWIP 的光电流增益对其偏置电压敏感且具有线性响应。这一特性提供了一种强大而精准的电学调控手段。通过微调施加在探测器像素上的偏置电压, 可以精确地控制其对背景光电流的响应, 从而在差分结构中实现对共模背景信号的高精度“零点平衡”。这种电学上的可操作性远比机械或光学上的微调更为灵活和稳定。

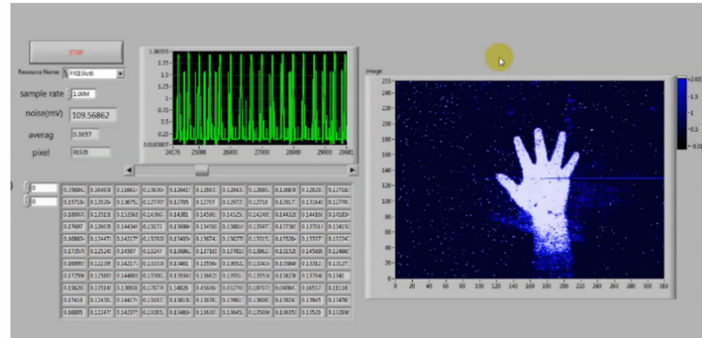
(3)内禀的光谱选择性。通过能带工程和临界耦合等设计, QWIP 可以实现非常高的波长选择性和量子效率(峰值外量子效率可达 20% 以上)。这一点可以清晰地从图 3 中看

到^[11]。于是我们可以构建一对对不同波长或光谱特征具有差异化响应的探测单元。当目标与背景存在温差时, 它们的光谱分布自然不同。因此, 即使两路光路中的总光子通量相同, 其在经过具有特定光谱响应的 QWIP 探测单元后产生的光电流也会存在差异。这样, 一旦利用电学调控将来自背景的宽谱光电流差值精确平衡为零, 任何由目标光谱特征差异引起的非零光电流就会作为纯粹的微分信号被累积下来。

基于以上优势, 中国科学院上海技术物理研究所已成功研制出 320×256 规模的 QWIP 长波红外微分探测器演示器件^[11]。该器件利用两个不同波段(见图 4(a))对目标进行探测。如图 4(b)所示, 在光电转换过程中采用动态平衡对手这一目标进行成像时, 可以预先把背景全部平衡掉, 这样在整个成像中就只有手的图像, 消除了其他背景信号。通过对室温目标的成像演示, 初步验证了该技术路径的可行性。结果表明, 其对目标的识别能力相较于传统差分模式实现了数量级的提升^[11]。这一进



(a)



(b)

图 4 (a)微分探测器采用的两个探测波段(其峰值分别在 $10\ \mu\text{m}$ 波长的两侧); (b)对人手的成像(图像上的散点以及蓝色的线条状横线等都反映着器件的不均匀性或盲点)

展为微分探测器从理论构架走向实际应用(特别是挑战严峻的长波红外领域红外识别技术发展的适用性难题)提供了强有力的实验证据。

1.4 微分探测架构在其他探测技术应用中的实践

得益于量子阱红外探测器的特点,微分探测的概念在长波红外成像器件上实现突破。然而这样的概念也已经在其他物理维度和技术领域得到应用,表明该微分探测架构还有它的普适性,尤其在背景共模信号抑制的技术功能上有相似性。比如,在激光探测领域,作为光学领域最经典的微分探测器,平衡光电探测器在光电流产生之后、任何显著的电子放大之前,直接减去两个光电流,从而高效抑制激光器的相对强度噪声^[26];在磁场探测领域,磁梯度计通过使用两个被固定基线隔开的磁力计,直接测量磁场的空间梯度,对来自远处的、空间均匀的磁场噪声具有天然的免疫力^[27];在波前测量中,共路干涉仪使信号光和参考光在绝大部分路径上重合,从而对机械振动、温度漂移等共模噪声源具有极强的抑制能力^[28];在信号处理的频域中,锁相放大器通过相敏检测技术,仅提取与参考频率完全相同的信号分量,而将所有其他频率的噪声视为被抑制的“共模背景”^[29]。

2 基于信息论的推理

为了给微分探测器的优越性提供更深入的理论依据,我们进行超越传统的信噪比分析,进入信息论的领域。费雪信息理论和克拉默-拉奥约束为我们进行这种严格比较提供了强大的数学工具^[30]。

2.1 费雪信息:可提取信息的度量

费雪信息 $I(\theta)$ 量化了一次测量所携带的关于未知参数 θ 的信息量^[30]。其值越大,意味着从数据中估计 θ 的潜在精度越高。克拉默-拉奥约束将这一概念与实际测量联系起来,它指出任何无偏估计量 θ' 的方差(即测量不确定度的平方)都不能小于费雪信息的倒数^[31],即 $\text{Var}(\theta') \geq 1/I(\theta)$ 。因此,一个测量架构的根本性能可以通过其为目标参数提供的费雪信息量来评估。

2.2 两种架构的信息论对比

下面比较差分探测器架构和微分探测器架构在测量差值参数 $d = A - B$ 时所能提供的费雪信息量。

2.2.1 差分探测器架构

(1)进行两次独立测量,得到观测值 $m_A = A + n_A$ 和 $m_B = B + n_B$;

(2)假设噪声 n_A 和 n_B 是独立的、方差为 σ^2 的高斯噪声;

(3) 差值估计量为 $d' = m_A - m_B = d + (n_A - n_B)$;

(4) 该估计量的方差为 $\text{Var}(d') = \sigma^2 + \sigma^2 = 2\sigma^2$;

(5) 因此该架构提供的关于参数 d 的费雪信息量为

$$I_{\text{diff}}(d) = 1/\text{Var}(d') = 1/(2\sigma^2) \quad (1)$$

2.2.2 微分探测器架构

(1) 进行一次直接测量, 得到观测值 $m_d = d + n_d$ 。

(2) 噪声 n_d 来自一个单一的探测链路, 其方差为 σ_d^2 。在一个设计良好的系统中, σ_d^2 与单个通道的噪声方差相当, 即 $\sigma_d^2 \approx \sigma^2$ 。

(3) 该架构提供的费雪信息量为

$$I_{\text{direct}}(d) = 1/\text{Var}(m_d) = 1/\sigma^2 \quad (2)$$

比较后的结论如下: $I_{\text{direct}}(d) = 2I_{\text{diff}}(d)$ 。这一结果明确表明, 微分探测器在单次测量中保留的关于差值参数的信息量是差分探测器的两倍。差分架构由于其分离的测量过程, 在初始阶段就因引入双倍噪声而永久性地丢失了一半的信息。

2.3 信号平均与信息累积的作用

信号平均是提高测量精度的通用方法。对于 K 次独立测量, 总的费雪信息是单次信息的 K 倍^[26]。然而, 两种架构累积信息的能力却天差地别: 对于差分探测器, 可进行的平均次数 K_{diff} 受到动态范围的严格限制; 对于微分探测器, 由于背景被消除, 理论上平均次数 K_{direct} 可以趋于无穷大。因此, 在实际应用中, 两种架构能够累积的总信息量存在巨大差异:

$$I_{\text{total, direct}} = K_{\text{direct}} \cdot I_{\text{direct}} \quad (3)$$

$$I_{\text{total, diff}} = K_{\text{diff}} \cdot I_{\text{diff}} \quad (4)$$

$$I_{\text{total, direct}} \gg I_{\text{total, diff}} \quad (5)$$

这从信息论的根本层面上为微分探测器在面对高背景、弱信号挑战时的压倒性优势提供了定量的理论表达。

3 结束语

通过对物理原理、现有技术和信息论的综合分析, 我们特将在物理感知层面直接测量差

值、且不受背景动态范围限制的红外探测器定义为红外微分探测器, 以区别于受此限制的差分探测器。这一区分并非简单的术语差异, 而是对两种根本不同的测量模式的界定。红外差分探测器代表了先测量后计算的思路。它受制于各独立通道噪声的叠加, 更在实际应用中被探测器自身的动态范围所束缚, 尤其是在高背景通量的场景下, 存在一个无法逾越的探测下限。而红外微分探测器则体现了在感知中计算的理念。它通过巧妙的物理设计, 在信息被噪声和背景污染之前就提取出核心的差值信息。这种方法不仅在信息论上更为高效, 更关键的是, 它通过消除背景信号对积分电容的影响, 打破了动态范围的枷锁, 使得通过大量信号平均来探测极其微弱信号成为可能。

以量子阱红外探测器为代表的技术路径, 充分利用了其低暗电流和电学可控性等优点, 为红外微分探测器的实现提供了强有力的支持, 并已在实验中验证了其巨大潜力。这方面的技术还需要继续聚焦于红外微分探测器焦平面阵列的工程化实现, 关键挑战包括进一步提升背景抑制的精度和稳定性, 以及开发与之配套的高速、低噪声读出电路, 推动在红外强背景干扰下微弱目标特征识别技术的跨越。

致 谢

本文工作受到国家重点研发计划项目(2021YFA0715500)资助, 在此致谢!

参考文献

- [1] Rogalski A. Infrared and Terahertz Detectors, Third Edition [M]. Boca Raton: CRC Press, 2019.
- [2] Saleem M I, Kyaw A K K, Hur J. Infrared Photodetectors: Recent Advances and Challenges Toward Innovation for Image Sensing Applications [J]. *Advanced Optical Materials*, 2024, **12**(33): 2401625.
- [3] Exosens. Infrared Glossary [EB/OL]. www.exosens.com/all-technologies/infrared-technology/infrared-glossary, 2025.

- [4] Balter S, Ergun D, Tscholl E, et al. Digital Subtraction Angiography: Fundamental Noise Characteristics [J]. *Radiology*, 1984, **152**(1): 195–198.
- [5] RP Photonics. Balanced Photodetection [EB/OL]. www.rp-photonics.com/balanced_photodetection.html, 2025.
- [6] Teledyne Vision Solutions. Full Well Capacity and Pixel Saturation [EB/OL]. www.teledynevision-solutions.com/learn/learning-center/imaging-fundamentals/full-well-capacity-and-pixel-saturation, 2025.
- [7] Hamamatsu Photonics. Full Well Capacity [EB/OL]. www.hamamatsu.com/eu/en/support/glossary/f.html, 2025.
- [8] Keysight Technologies. What Is Averaging in Signal Processing [EB/OL]. www.keysight.com/used/in/en/knowledge/glossary/oscilloscopes/what-is-averaging-in-signal-processing, 2025.
- [9] Xu C, Zhang L, Huang S, et al. Sensing and Tracking Enhanced by Quantum Squeezing [J]. *Photonics Research*, 2019, **7**(6): 14–26.
- [10] Kamada K, Ito Y, Ichihara S, et al. Noise Reduction and Signal-to-Noise Ratio Improvement of Atomic Magnetometers with Optical Gradiometer Configurations [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(5): 6976–6987.
- [11] 中国科学院上海技术物理研究所. 长波量子阱红外探测技术进展交流报告 [R]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2024.
- [12] Gunapala S D, Bandara S V, Liu J K, et al. Quantum Well Infrared Photodetector Research and Development at Jet Propulsion Laboratory [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2001, **42**(3–5): 267–282.
- [13] Costard E, Bois P, Rossi A D, et al. QWIP Detectors and Thermal Imagers [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2003, **4**(10): 1089–1102.
- [14] Gunapala S D, Bandara S V, Liu J K, et al. 1024×1024 Pixel Mid-Wavelength and Long-Wavelength Infrared QWIP Focal Plane Arrays for Imaging Applications [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, **20**(5): 473.
- [15] Costard E, Nedelcu A, Marcadet X, et al. QWIP Development Status at Thales Research and Technology [C]. *SPIE*, 2006, **6206**: 62060D.
- [16] Costard E, Bois P. THALES Long Wave QWIP Thermal Imagers [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2007, **50**(2–3): 260–269.
- [17] Choi K K, Forrai D P, Endres D, et al. C-QWIP Focal Plane Array Sensitivity [C]. *SPIE*, 2009, **7298**: 729807.
- [18] Jhabvala M, Choi K, Waczynski A, et al. Performance of the QWIP Focal Plane Arrays for NASA's Landsat Data Continuity Mission [C]. *SPIE*, 2011, **8012**: 80120Q.
- [19] Choi K K, Jhabvala M D, Forrai D P, et al. Electromagnetic Modeling and Design of Quantum Well Infrared Photodetectors [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, **19**(5): 3800310.
- [20] Markham B, Storey J, Morfitt R. Landsat-8 Sensor Characterization and Calibration [J]. *Remote Sensing*, 2015, **7**(3): 2279–2282.
- [21] Jing Y L, Li Z F, Li Q, et al. Pixel-Level Plasmonic Microcavity Infrared Photodetector [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**(1): 25849.
- [22] Choi K K, Allen S C, Sun J G, et al. Resonant Detectors and Focal Plane Arrays for Infrared Detection [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **84**: 94–101.
- [23] Choi K K, Allen S C, Sun J G, et al. Small Pitch Resonator-QWIP Detectors and Arrays [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **94**: 118–125.
- [24] Nie X, Zhen H, Huang G, et al. Strongly Polarized Quantum Well Infrared Photodetector with Metallic Cavity for Narrowband Wavelength Selective Detection [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, **116**(16): 161107.
- [25] Dong T, Yin Y, Nie X, et al. Narrow-Band and Peak Responsivity Enhanced Metal Microcavity Quantum Well Infrared Detector [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, **121**(7): 073507.

- [26] Trainor D A, Heinrich F, Buberl T, et al. Broadband Interferometric Subtraction of Optical Fields [J]. *Optics Express*, 2019, **27**(3): 2432-2443.
- [27] Luciuk D, Gahbauer F, Gildener-Leapman A, et al. A Miniaturized Magnetic Gradiometer with a High Common-Mode Rejection Ratio [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 43771.
- [28] RP Photonics. Common-Path Interferometers [EB/OL]. www.rp-photonics.com/common_path_interferometers.html, 2025.
- [29] Stanford Research Systems. About Lock-In Amplifiers [EB/OL]. www.thinksrs.com/downloads/pdfs/applicationnotes/AboutLIAs.pdf, 2025.
- [30] Fisher R A. On the Mathematical Foundations of Theoretical Statistics [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series A*, 1922, **222**: 309-368.
- [31] Casella G, Berger R L. Statistical Inference (2nd Edition) [M]. Boca Raton: CRC Press, 2002.