

文章编号:1001-5078(2025)01-0010-08

· 综述与评论 ·

高动态范围红外成像技术研究进展及发展趋势

粟宇路^{1,2,3}, 李泽民¹, 王鑫¹, 丁留琼^{2,3}, 姜海^{2,3}, 李林^{2,3}, 杨帆^{2,3}

(1. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223; 2. 云南省红外探测技术应用重点实验室, 云南 昆明 650217;
3. 昆明北方红外技术股份有限公司, 云南 昆明 650217)

摘要:随着红外技术的发展, 红外相机被越来越多地应用到军事、安防、医学、农业等领域。由于红外场景具有辐射差异大的特点, 为适应各种场景需要, 通常要求红外相机具有高动态范围成像性能。本文介绍了近二十年来国内外公开报道的典型的高动态范围红外成像技术的基本原理及其特点。基于当前技术的发展现状, 本文也预测了高动态范围红外成像技术在今后一段时期内的发展趋势。

关键词:红外成像; 高动态范围; 超帧; 读出集成电路

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2025.01.002

Research progress and development trends of high dynamic range infrared imaging technology

SU Yu-lu^{1,2,3}, LI Ze-min¹, WANG Xin¹, DING Liu-qiong^{2,3}, JIANG Hai^{2,3}, LI Lin^{2,3}, YANG Fan^{2,3}

(1. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;

2. Yunnan Key Laboratory of Infrared Detection Technology Application, Kunming 650217, China;

3. Kunming North Infrared Technology Co., Ltd, Kunming 650217, China)

Abstract: With the development of infrared technology, infrared cameras are more and more used in military, security, medicine, agriculture and other fields. Since infrared scenes have the characteristics of large differences in infrared radiation, infrared cameras are usually required to have a perfect imaging performance of high dynamic range, in order to adapt to the needs of various scenes. This paper introduces the basic principle of typical high dynamic range infrared imaging technology reported in the past 20 years and their characteristics. This paper also predicts the development trend of high dynamic range infrared imaging technology in the future period based on the current development status of it.

Keywords: infrared imaging; high dynamic range; superframe; ROIC

1 引言

不同于可见光成像, 红外成像技术接收的是场景辐射或反射的红外光信号, 自然界中凡是高于绝对零度的物体均能产生红外辐射。因此, 红外成像不仅可以克服弱光或者无光环境下可见光探测目标信息的技术困难, 而且其具有完全被动成像能力, 可克服主动成像带来的位置暴露, 增强探测装置的隐蔽能力。基于上述优势, 红外成像技术被越来越广

泛应用于军事、工业、医学、安防、农业等领域, 如机载/车载/单兵红外光电侦察设备、石油化工行业油气泄漏监测、医学影像学红外成像人体病理筛查、森林火灾预防监控、农作物病虫害防护监测。然而, 现实中的红外成像场景是多种多样、千变万化的。例如: 同一场景中, 可能同时存在天空、水面等弱红外辐射背景, 也存在飞机、轮船等较强红外辐射目标; 同一场景前后时刻红外辐射差异较大, 如炸弹爆炸

前后的战场环境、发生火灾前后的居民楼房等。因此,为了适应这些复杂多变的应用场景,红外成像系统需要具有较宽辐射强度范围的探测能力。事实上,受限于红外探测器噪声水平、信号承载能力等因素的制约,红外系统的成像动态范围并不宽。为了拓展红外成像系统的动态范围,高动态范围红外成像技术成为了红外领域重要的研究方向之一,受到了越来越多的关注。

一般来说,红外成像系统动态范围可定义为:系统可探测最大输入信号与最小信号的比值。因此,要提高红外系统的成像动态范围,实现高动态范围成像,存在两种途径:第一种途径是提高系统可探测的最大输入信号,这个最大可探测信号往往跟探测器的曝光时间有关,在曝光时间固定的情况下,主要取决于探测器感光单元的势阱大小;第二种途径是降低系统可探测的最小信号,这个最小可探测信号通常跟探测器的噪声水平有关,噪声水平越低,则能够探测的信号越小,小于噪声水平的信号会被噪声所淹没而难以探测。然而,受限于材料特性、器件工艺水平等因素影响,通过增大探测单元的响应势阱或者降低探测器的噪声水平,使红外系统获得的高动态范围成像能力是有限的,并不能保证在各种情况下均满足人们的使用需求。因此,通过各种手段来提升红外系统的高动态范围成像能力,至今仍是红外成像领域众多研究人员追求的目标。下面本文将梳理近二十年来,国内外公开报道的典型高动态范围红外成像技术,为后续希望涉足该技术领域的相关科研人员提供参考。

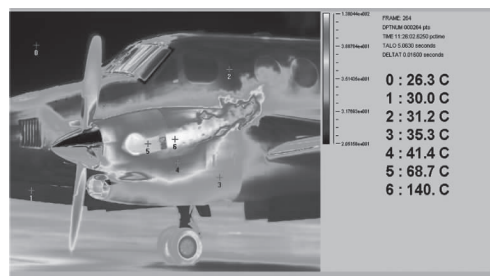
2 高动态范围红外成像技术

2.1 超帧技术实现高动态范围成像

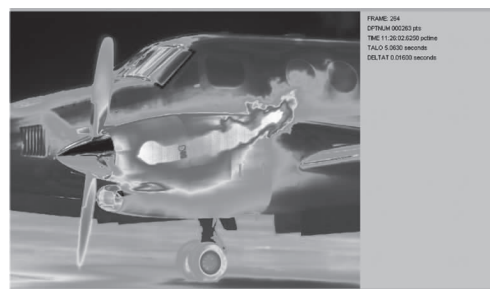
2.1.1 电子超帧技术

2005年,美国FLIR系统公司的Austin A. Richards等人提出了一种基于循环积分时间的电子超帧成像技术^[1],以提升红外相机的成像动态范围。该电子超帧技术基本成像原理如下:在一个周期内,先后设置四个不同的探测器积分时间采集场景信息获得四幅子帧图像,这四个积分时间从长到短分别是2000 μs 、500 μs 、125 μs 和30 μs ,可兼顾低温目标细节和高温目标细节;采用超帧生成算法将四幅子帧图像融合成一幅高动态范围图像。超帧生成算法先对最长积分时间的子帧进行判断,如果存在饱和像元,则检测第二长积分时间的子帧对应位置像元

是否饱和,如果没有饱和,则算法停止,如果饱和,则检测第三长积分时间的子帧对应位置像元是否饱和,依此类推,直至场景中所有像元均不饱和为止。该超帧技术实现的高动态范围成像效果如图1所示,其中图1(b)为积分时间为2 ms的子帧图像,从图中可以看出发动机温度最高的排气羽流部分(白色)出现饱和;图1(a)为超帧技术获得的高动态范围图像,排气羽流部分未见饱和。



(a) 超帧图像



(b) 子帧图像

图1 超帧成像效果和积分时间为2000 μs 的子帧成像效果^[1]

Fig. 1 A superframe image and the 2000 μs integration time subframeimage^[1]

2014年,加拿大Telops公司的FrédéricMarcotte等人基于其高速中波热像仪FAST-IR 1500(如图2所示),在电子超帧技术的基础上,提出了一种优化增强型高动态范围成像算法^[2]。FrédéricMarcotte等人通过实验研究证实了使用多帧图像平均技术可以显著降低NETD,并基于此项结论提出了两种高动态范围成像思路。第一种思路是采用不同积分时间多次曝光同一场景,其中用较短积分时间多次曝光场景获得多幅图像,对短曝光时间图像进行平均,然后将平均后的结果与长曝光时间图像结合,获得高动态范围图像;第二种思路是采用不同积分时间多次曝光同一场景,且用每个积分时间多次曝光场景获得多幅图像,对同一积分时间的多幅曝光图像求平均,最后用各积分时间下的平均图像耦合出高动态范围图像。

针对第二种思路,FrédéricMarcotte等人展示了在特定的NETD指标要求(NETD < 35 mK)下,积分

时间选取和同一积分时间曝光次数设置的最佳组合方案。对于温度为 $161\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的目标, 设置积分时间为 $5.1\text{ }\mu\text{s}$, 曝光次数为 4 次; 对于温度为 $85\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 161\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的目标, 设置积分时间为 $19.6\text{ }\mu\text{s}$, 曝光次数为 3 次; 对于温度为 $38\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的目标, 设置积分时间为 $89.1\text{ }\mu\text{s}$, 曝光次数为 2 次; 对于温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的目标, 设置积分时间为 $263.3\text{ }\mu\text{s}$, 曝光次数为 5 次。基于上述积分时间和曝光次数组合的高动态范围成像技术用于温度范围为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的场景高质量成像, 可依据场景各点温度逐像素校准积分时间, 确保该温度范围内所有场景目标均能在 NETD 小于 35 mK 的性能状态下成像。



图 2 Telops FAST-IR 1500 中波热像仪^[2]

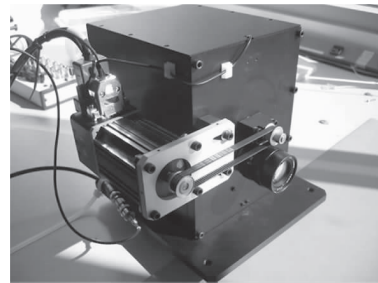
Fig. 2 Telops FAST-IR 1500 MWIR camera^[2]

电子超帧技术作为实现高动态范围红外成像的基本手段之一, 一经提出, 就受到了广泛关注。国内许多研究人员基于超帧技术开展了进一步的研究: 2016 年, 昆明物理研究所的洪闻青等人提出了一种基于不同积分时间帧累加的红外图像超帧处理方法^[3]; 2018 年, 南京理工大学的刘博文等人基于法国 SOFRADIR 公司的 MARS-LW-RM3 制冷长波红外探测器, 进一步开展了超帧频图像算法和变积分时间成像算法的研究^[4]; 2019 年, 天津津航技术物理研究所的 Li Wenjia 等人提出了一种基于相机特征函数的自动积分时间设置模型^[5]; 2021 年, 南京理工大学 Gao Hang 等人提出了一种改进型多曝光融合算法获取高动态范围红外图像^[6]; 2022 年, 北京理工大学的 Tao Xingyu 等人开展了基于灰度信息的超帧高动态范围红外成像多积分时间自适应算法研究^[7]; 2024 年, 散射辐射全国重点实验室的 Sun Xianzhong 等人提出了一种基于多重积分时间的红外成像系统大动态范围算法^[8]。

2.1.2 机械超帧技术

美国 FLIR 系统公司的 Austin A. Richards 等人

对电子超帧技术的研究过程中, 遇到了两个主要的限制因素: 一个是探测器焦平面阵列的偏置需要根据积分时间进行优化; 二是超帧热像仪输出图像的帧率受限于曝光循环周期内的最大积分时间。因此, Austin A. Richards 等人于 2006 年提出了机械超帧技术^[9], 即通过在光路中插入带有不同中性密度滤光片的高速滤光轮, 控制热像仪对场景信号的通光量, 由此生成不同曝光量的子帧图像, 最后合成超帧图像, 提升成像动态范围。该原理样机及其滤光轮如图 3 所示。



(a) 滤光轮相机



(b) 滤光轮

图 3 滤光轮短波相机及其滤光轮^[9]

Fig. 3 Fig. 3 Filter wheel camera and NIR filter wheel^[9]

相比于电子超帧技术, 机械超帧技术实现高动态范围成像具有以下优点: 第一是中性密度滤光片可以产生非常大的曝光量变化; 第二是可以采用单一积分时间和非均匀性校正参数设置; 第三是当有运动目标时, 可选择用短积分时间, 以提高帧率。该机械超帧相机子帧图像及超帧成像效果分别如图 4 和图 5 所示。



图 4 六种滤光片控制曝光量对应的成像子帧^[9]

Fig. 4 Six subframe images through different filters^[9]

该机械超帧技术仅适合于近红外相机,对于3 ~ 5 μm 波段的 InSb 或者 MCT 热像仪来说,由于室温下的 ND 或 BP 滤光片自身会发出跟场景一样多或者比场景更多的辐射,从而导致场景信号被淹没,影响探测效果;如果将高速转动的滤光轮冷却到低温,不仅费用昂贵且需要复杂的技术^[9]。

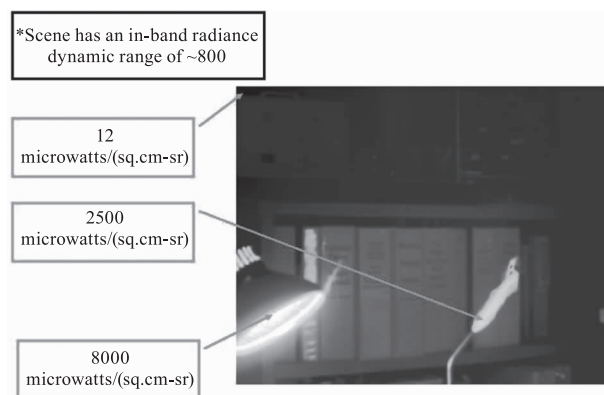


图5 超帧伪彩色成像效果^[9]

Fig. 5 Superframe image with false color^[9]

2.2 基于先进的读出电路技术实现高动态范围成像

由于需要多次曝光同一场景,基于超帧技术的高动态范围成像适用于静止或者缓慢变化的场景,如果在循环曝光周期内目标发生快速移动,则需要对各子帧图像进行配准,算法将会变得更加复杂。因此,一些研究人员通过对红外探测器读出电路作出相应的设计改进,使得探测器在单次曝光时间内,分别输出长、短积分时间探测信号用以合成高动态范围图像,从而减少场景曝光次数,提升场景适应能力。

2.2.1 基于单次曝光同一像元多次非破坏读出技术的高动态范围成像

2017 年,法国研究人员 David Darson 等人采用一款特殊的 InGaAs 短波红外焦平面探测器开发了高动态范围红外成像相机^[10],如图 6 所示。该探测器使用了 New Imaging Technologies 公司发明的 MAGIC CMOS 读出集成电路技术,可产生超过 120 dB 的瞬时工作动态范围^[11-13]。该探测器像元简化架构示意图如图 7 所示,每个像元的感应电荷可存储在两个存储元件中,当使用全局快门模式时,该架构可以使电荷首先在其自身结电容中积累,同时在另一个结电容中执行读出。基于此特性,David Darson 等人在同一个曝光周期内、不同时刻多次读出各像元的感应信号,最后将多幅地动态范围图像合成单幅高动态范围图像,成像效果如图 8 (从左至右曝光时间分别为

0.0001 s、0.12 s、0.24 s、0.36 s、0.96 s)和图 9((a)图通过曝光时间分别为 0.0001 s、0.24 s 和 0.96 s 的三幅低动态范围图像合成,(b)图通过曝光时间分别为 0.0001 s、0.12 s、0.24 s、0.36 s、0.96 s 的五幅低动态范围图像合成)所示。

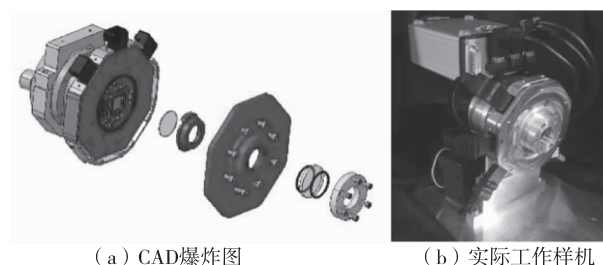


图6 短波红外相机^[10]

Fig. 6 SWIR camera^[10]

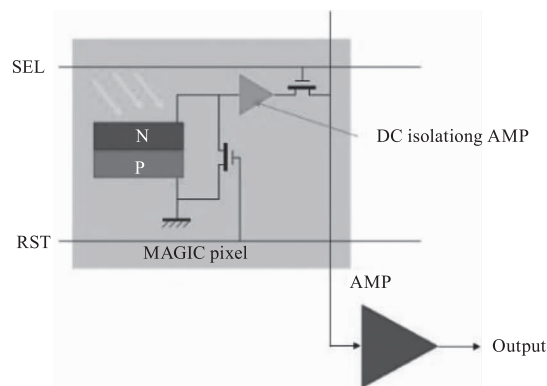


图7 在太阳能电池模式下使用光电二极管的对数像素设计^[11]

Fig. 7 Logarithmic pixel design by using a photodiode in solar cell mode^[11]



图8 基于非破坏读出原理获得的低动态范围图像^[10]

Fig. 8 LDR stack obtained using NDRO principle for 5 exposure time^[10]

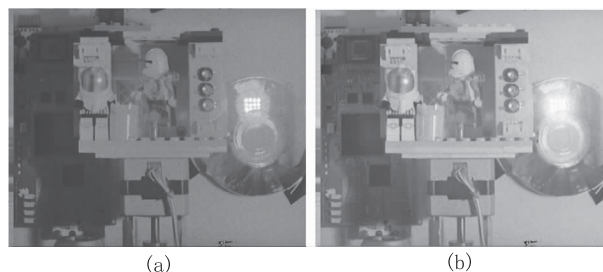
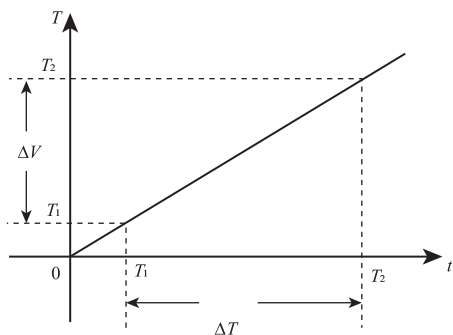
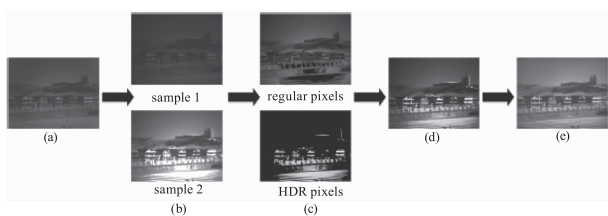


图9 高动态范围图像^[10]

Fig. 9 Tone mapped HDR images generated respectively using 3 and 5 LDR images^[10]

近年来,国内一些学者也基于单曝光周期多次采样原理进行了相关高动态范围红外成像技术研究。2021 年,山东大学 Cheng Fei 等人针对 InGaAs 短波红外热像仪设计了一种基于相关双采样的高动态范围

成像方法^[14]。该探测器采用相关双采样电路进行信号采样,采样原理如图 10 所示,即在一个积分周期 ΔT 时间内,探测器会对每个像元信号采样两次,以获得各像元响应电压信号 ΔV 。其对采样的时机进行了改进,第一次采样的时机 T_1 应确保除盲元外的所有像元响应均不饱和,而第二次采样的时机 T_2 则应使某些像元响应饱和,且 T_1 和 T_2 满足 $T_1 < T_2 < 5T_1$ 。对于在采样周期内没有饱和的像元,其响应电压为 $\Delta V = V_2 - V_1$;对于在采样周期内饱和的像元,其响应电压修正为 $\Delta V = \frac{T_2 - T_1}{T_1} V_1$,此法既可以兼顾低亮度目标的响应,同时又可以将高亮目标的响应值进行修正,从而实现高动态范围成像,成像效果如图 11 所示。

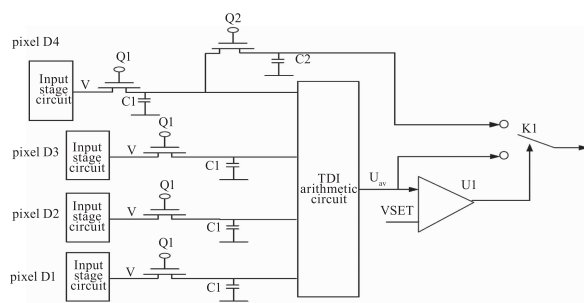
图 10 相关双采样^[14]Fig. 10 Diagram of correlated double sampling^[14]

(a)原始图像;(b)基于相关双采样的高动态范围成像两次采样图;
(c)未饱和和饱和的像元分布图;(d) 16 bit高动态范围图像;
(e)动态范围压缩后的 8 bit图像

图 11 基于相关双采样的高动态范围成像处理过程^[14]Fig. 11 The process of correlated double sampling in HDR imaging^[14]

2022 年,北京空间机电研究所 Yang Xiaole^[15]、Wang Hua^[16]等人基于 TDI(time delay integration)红外探测器工作原理,对读出电路作了相应改进,提升探测器的动态响应范围,避免响应饱和,如图 12 所示。相比于常规的 TDI 红外探测器读出电路,其对像元 D4 的读出电路作了设计改动,增加了开关电子管 Q2 和积分电容 C2。当积分开始时,开关电子管 Q1 和 Q2 同时关闭,电容 C1 和 C2 同时采样;当短积分时间结束后,开关电子管 Q2 断开,电容 C2 停止

采样,此时电容 C1 继续采样;当长积分时间结束后,开关电子管 Q1 断开,电容 C1 停止采样。此时 C1 中存储了 TDI 探测器长积分时间内的采样信号,而 C2 中存储了探测器短积分时间内的采样信号。然后像元 D1 ~ D4 对应电容 C1 的长积分时间采样信号被输入 TDI 运算电路以得到平均电压 U_{av} , U_{av} 连接到比较器 U1 和外部电压 VSET 进行比较,其中 VSET 为探测器饱和输出电压阈值。当 U_{av} 大于饱和电压阈值时,说明此时长积分时间输出地采样信号是饱和的,比较器 U1 控制开关 K1 选择 C2 的采样信号作为响应结果;反之,当 U_{av} 小于饱和电压阈值时,比较器 U1 控制开关 K1 选择 U_{av} 作为响应结果。

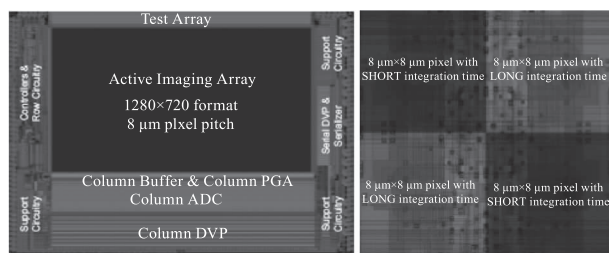
图 12 基于长、短双积分的 TDI 红外探测器读出电路示意图^[15]Fig. 12 New infrared detector readout circuit schematic^[15]

2.2.2 基于单次曝光不同像元两档积分时间的高动态范围成像

2021 年以来,美国 Senseseeker Engineering 公司的 Thomas Poonnen 等人基于数字读出电路设计,开展了一系列高动态范围成像技术研究^[17-19]。他们设计了一款 1280×720 阵列 $8 \mu\text{m}$ 像元数字读出电路,如图 13 所示。该读出电路可设置两档独立的积分时间,各档积分时间对应的像元成棋盘格形式交错排列。该读出电路可选择两种成像模式,一种是高动态范围成像模式,另一种是标准成像模式。当采用高动态范围成像模式时,如图 2(b)所示,左上角像元和右下角像元用同一较短积分时间控制;而右上角像元和左下角像元用同一较长积分时间控制;当采用标准成像模式时,所有像元积分时间保持一致,与常规探测器无异。

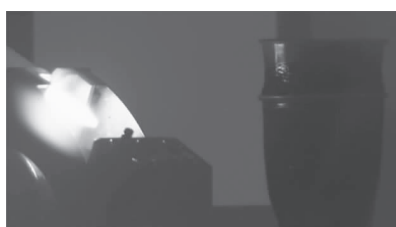
Thomas Poonnen 等人通过一台使用该读出电路的中波红外热像仪进行了成像效果对比试验,成像场景为人工设置的室内高动态范围场景,该场景包含一个通电工作的热烙铁和一个装满液氮的冷纸杯。在标准成像模式下,先后设置积分时间为 15 ms 和 0.1 ms,成像效果依次如图 14(a)和图 14(b)所示。

在高动态范围成像模式下,较长积分时间设置为 15 ms,较短积分时间设置为 0.1 ms,通过插值计算(通过上下左右四邻域像元的响应均值与当前像元响应值再做平均,作为当前像元高动态范围响应值,如式(1)所示),获得高动态范围图像,如图 14(c)所示。



(a)读出电路布局图

(b)棋盘图案插图

图 13 读出电路和像元布局图^[17]Fig. 13 DROIC and pexels layout^[17]

(a)标准成像模式积分时间为15 ms时成像效果



(b)标准成像模式积分时间为0.1 ms时成像效果



(c)高动态成像模式长积分时间为15ms、短积分时间为0.1 ms时成像效果

图 14 标准成像模式和高动态成像模式成像效果^[17]Fig. 14 Normal mode and intra-frame HDR mode^[17]

$$H(i,j) = \frac{P(i,j) + \left(\frac{P(i-1,j) + P(i+1,j) + P(i,j-1) + P(i,j+1)}{4} \right)}{2} \quad (1)$$

2.3 其它提升红外系统成像动态范围技术

2007年至2008年,哈尔滨工业大学的李福巍、陶坤宇等人通过统计成像场景响应灰度值,并与定标获得的最优灰度值进行比较,以增大或减小积分时间,获得了更佳的动态范围^[20-21]。2009年,西安

电子科技大学的王锐等人对此方法进行了改进,提出了一种定标积分时间法提升红外系统成像动态范围^[22]。该方法基本原理为:先对红外系统在各红外辐射量下的积分时间进行定标,并存储为一个查找表;使用过程中,通过固定积分采集第一帧图像,通过统计第一帧图像信息并在查找表中选择合适的积分时间作为第二帧图像的积分时间,从而快速自适应选择最佳积分时间,提升红外成像系统动态范围。

2014年,信息工程大学贺明等人基于非制冷红外焦平面探测器的工作模型^[23](如式(2)所示),提出了一种基于场景预测实时调整偏置电压 $V_{EBASAGE}$ 的扩展红外系统成像动态范围的方法^[24]。通过工作模型可知, $V_{TH_EBASAGE}$ 影响像元响应曲线的斜率, V_{TH_FID} 影响响应曲线的偏置,当 $V_{TH_EBASAGE}$ 固定时,通过实时调整 V_{TH_FID} 的值,可使当前场景处于最佳的成像动态范围内。

$$V_{smp} = V_{cons} - \left(\frac{1}{C_{int}} \right) \int_0^{t_{int}} \left[\frac{(V_{EBASAGE} - V_{TH_EBASAGE})}{R_b} t_{int} + \frac{(V_{FID} - V_{TH_FID})}{R(T)} \right] dt \quad (2)$$

式中, V_{smp} 为采样电容电压; V_{CONS} 为反向放大器正端输入电压; C_{int} 为积分电容; t_{int} 为积分时间; $V_{TH_EBASAGE}$ 和 V_{TH_FID} 为场效应管阈值电压; R_b 为偏置电阻; $R(T)$ 为像元电阻; V_{FID} 和 $V_{EBASAGE}$ 为模拟输出信号的增益和偏置。

2022年,西安电子科技大学罗昭等人研究通过提升红外探测器饱和电荷容量和降低电路噪声的方式提升红外成像动态范围^[25]。

3 未来发展趋势

现有的高动态范围红外成像技术仍然还存在一些不足,导致其使用条件受限。以超帧技术为例,其通过多次曝光、信息融合技术实现了同时并存高温、低温目标场景的探测能力,大大提升了红外系统的成像动态范围。但该技术实质是通过牺牲红外成像系统的时间分辨能力,换取了高动态范围成像能力。然而,随着高性能、高帧频红外探测器技术的发展,特别是长波红外探测器具有积分时间短的使用特点,超帧技术在今后一段较长时间内,将仍然是红外成像系统实现高动态范围成像的主要手段之一,适合于静态或者变化较为缓慢的探测场景。

基于先进的红外探测器读出电路技术,实现红外系统高动态范围成像能力,将是今后一个热门的发展方向。例如文章中介绍的单次曝光同一像元多

次非破坏读出电路技术,可有效减少超帧技术的曝光次数,缩短曝光时间,提升红外系统的时间分辨能力。文章中介绍的单次曝光不同像元两档积分时间技术,实质是通过牺牲红外系统的空间分辨能力,提升了系统的高动态范围成像能力。棋盘格式的像元交错布局和双读出电路技术,不仅实现了红外系统对同一场景的“共焦平面、同步曝光”双积分信号探测能力,也显著提升了红外系统的成像动态范围。

随着像素级数字化、智能化读出电路技术的发展^[26-36],未来有望能够实现像素级积分时间独立可控技术,届时对于红外焦平面探测器而言,每个像元的积分时间可根据场景中各部分目标辐射强度大小进行自适应调控,从而实现高动态范围场景信号采样。但是,此种方式下红外焦平面各像元收集的信号并不在统一的积分时间尺度下,直接采用探测器响应的信号进行成像显示,会产生图像信号相对幅值失真的问题。因此,为了让生成的高动态范围图像不失真,需要依据积分时间与响应信号之间存在的对应关系,将探测器输出信号进行校准重构,从而实现这种新型的高动态范围红外成像技术。

4 结 论

本文简要介绍了高动态范围红外成像技术的应用需求背景、研究进展及其未来发展趋势。基于技术原理,将当前国内外的红外系统高动态范围成像技术归为超帧技术、先进读出电路技术和其它技术三大类,并阐述了各类技术实现高动态范围成像的基本原理和方法。总结了主要技术方向的优势和不足,预测了未来高动态范围成像技术的发展趋势。

参考文献:

- [1] Austin A. Richards, Brian K. Cromwell. Extending IR camera scene radiance dynamic range with cyclic integration times[C]//SPIE, 2005, 5782: 93-99.
- [2] Frédéric Marcotte, Vincent Farley, Myron Pauli, et al. High dynamic range imaging using FAST-IR imagery [C]//SPIE, 2014, 9071: 90710E-1-90710E-10.
- [3] Hong Wenqing, Yao Libin, Ji Rongbin, et al. A super-frame processing method for infrared image based on accumulation of different integration time frame[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(6): 1490-1499. (in Chinese)
洪闻青, 姚立斌, 姬荣斌, 等. 基于不同积分时间帧累加的红外图像超帧方法[J]. 光学精密工程, 2016, 24(6): 1490-1499.
- [4] Liu Bowen. Research and implementation of high dynamic infrared thermal imaging algorithm [D]. Nanjing: Nanjing University of science & Technology, 2018. (in Chinese)
刘博文. 高动态红外热成像算法研究与系统实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [5] Wenjia Li, Ke Li, Zhiheng Zhang. High dynamic range in infrared image using Super-framing framework [C]//SPIE, 2019, 11338: 113181Q-1-113181Q-8.
- [6] Hang Gao, Qian Chen, Chengwei Liu, et al. High dynamic range infrared image acquisition based on an improved-multi-exposure fusion algorithm[J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 115(103698): 1-9.
- [7] Xingyu Tao, Weiqi Jin, Jianguo Yang, et al. Multi-integration time adaptive selection method for superframe high-dynamic-range infrared imaging based on grayscale information[J]. Sensors 2022, 22(11): 4258.
- [8] Sun Xianzhong, Wang Jinduo, Liu Jing, et al. Study on high dynamic range algorithm for infrared imaging system based on multiple integration time [C]//SPIE, 2024, 13154: 131540Q-1-131540Q-5.
- [9] A R Austin, D Shariff. A novel NIR camera with extended dynamic range [C]//SPIE, 2006, 6205: 6205G-1-6205G-13.
- [10] David Darson, Julien Dubois, Mustapha Bourdermane, et al. Real-time high dynamic range based on multiple non destructive read out during a single exposure; application to IR imaging [C]//ICDSC'17, 2017.
- [11] Yang Ni, Yi Ming Zhu, Bogdan Arion. A 768 × 576 logarithmic image sensor with photodiode in solar cell mode [C]//International Image Sensor Workshop 2011, 2011.
- [12] Y Ni, B Arion, Y M Zhu, P Potet, et al. Toward a single-chip TECless/NUCless InGaAs SWIR camera with 120 dB intrinsic operation dynamic range [C]//SPIE, 2011, 8012: 80121W-1-80121W-11.
- [13] Y Ni, B Arion, Y M Zhu, et al. Flexible wide dynamic range VGA ROIC for InGaAs SWIR imaging [C]//SPIE, 2012, 8353: 835306-1-835306-7.
- [14] Cheng Fei, Junliang Liu, Yongfu Li, et al. Short-wave infrared real-time high dynamic range imaging and display based on correlated double sampling[J]. Applied Optics, 2021, 60(6): 1774-1779.
- [15] Yang Xiaole, Xing Mailing, Shi Manli. A method for increasing dynamic range of space point target detecting system [C]//Proceedings of the 7th International Symposium of Space Optical Instruments and Applications, 2022.
- [16] Wang Hua, He Qiangmin, Cai Shuai, et al. Design of TDI infrared imaging circuit system with large dynamic range [C]//SPIE, 2023, 12555: 125550H-1-125550H-8.
- [17] Thomas Poonnen, Sean McCotter, Kendall Esparza, et al. Digital readout integrated circuit for high dynamic range infrared imaging [C]//SPIE, 2021, 11740: 1174006-1-1174006-5.

- [18] Thomas Poonnen, William Korth, Curt Peterson, et al. Proximal interpolation, tone mapping and pseudo-coloring for intra-frame high dynamic range infrared imaging [C]//SPIE, 2022, 12107:121071X-1-121071X-7.
- [19] Thomas Poonnen, Nishant Dhawan, William Korth, et al. Digital pixel readout integrated circuit for high dynamic range infrared imaging [C]//SPIE, 2023, 12534:125341k-1-125341k-6.
- [20] Li Fuwei. Research on IRFPA imaging system dynamic range adaptive adjust technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
李福巍. IRFPA 成像系统动态范围自适应调整技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [21] Tao Kunyu, Li Fuwei, Zhou Yanping, et al. IRFPA imaging system dynamic range adaptive adjust technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 265–269. (in Chinese)
陶坤宇, 李福巍, 周彦平, 等. 红外焦平面成像系统动态范围自适应技术研究 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 265–269.
- [22] Wang Rui, Shao Xiaopeng, Xu Jun, et al. Study on improving dynamic range of infrared imaging system based on calibrating integration time [J]. Infrared Technology, 2009, 31(7): 381–385. (in Chinese)
王锐, 邵晓鹏, 徐军, 等. 基于定标积分时间法提高红外成像系统动态范围的研究 [J]. 红外技术, 2009, 31(7): 381–385.
- [23] JTissor J T, Trouilleau C, A Crastes, et al. Uncooled microbolometer detector: recent development at Ulis [C]//Detectors and Associated Signal Processing II, Proc of SPIE, 2005, 5964:59640F-1-59640F-11.
- [24] He Ming, Wang Yadi, Wang Xinsai, et al. Scene-based dynamic range adaptive adjust technology of infrared focal plane array [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(3): 031002-1-031002-5. (in Chinese)
贺明, 王亚弟, 王新赛, 等. 场景自适应的红外焦平面成像动态范围调整技术 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(3): 031002-1-031002-5.
- [25] Luo Zhao. Design and research of readout circuit for high dynamic range infrared detector array [D]. Xi'an: Xidian University, 2022. (in Chinese)
罗昭. 高动态范围红外探测器阵列读出电路设计研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- [26] Li Guodong. Research on key technologies of pixel level digitization for infrared readout integrated circuit [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022. (in Chinese)
李国栋. 红外读出电路像素级数字化关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [27] Yu Yan, Li Jingguo, Liu Zewei. Recent development of IRFPA pixel-level digitization technique [J]. Laser & Infrared, 2018, 48(8): 951–957. (in Chinese)
于艳, 李敬国, 刘泽巍. 红外焦平面像素级数字化技术最新进展 [J]. 激光与红外, 2018, 48(8): 951–957.
- [28] Bai Piji, Yao Libin, Chen Nan, et al. Progress of pixel-ADC level digital long wave cooled infrared focal plane array detector [J]. Infrared Technology, 2018, 40(4): 301–308. (in Chinese)
白丕绩, 姚立斌, 陈楠, 等. 像素级数字长波制冷红外焦平面探测器研究进展 [J]. 红外技术, 2018, 40(4): 301–308.
- [29] Qiu Tianhui. A design of high DR pixel-level digital infrared readout circuit [D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)
裘天慧. 一种高动态范围像素级数字化红外读出电路的设计 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [30] Chen Yixuan, Li Jingguo. A pixel-level digital readout circuit design with high frame rate and large dynamic range [J]. Infrared, 2024, 45(6): 26–34. (in Chinese)
陈奕璇, 李敬国. 一种高帧频大动态范围像素级数字化读出电路设计 [J]. 2024, 45(6): 26–34.
- [31] Yuan Yuan, Yu Yan, Li Jingguo. Application prospects and development status of intelligent infrared focal plane [J]. Laser & Infrared, 2024, 54(1): 3–9. (in Chinese)
袁媛, 于艳, 李敬国. 智能化红外焦平面应用前景与发展现状 [J]. 激光与红外, 2024, 54(1): 3–9.
- [32] Jeongho Lee, Ilku Nam, DooHyung Woo. Current input pixel-level ADC with high SNR and wide dynamic range for a microbolometer [J]. sensors, 2021, 21(7): 2354.
- [33] Y M Jo, D H Woo, S G Kang, et al. Very wide dynamic range ROIC with pixel-level ADC for SWIR FPAs [J]. Ieee Sensors Journal, 2016, 16(19): 7227–7233.
- [34] Zhengnan Fu, Zhanglong Fu, Zhiyong Tan, et al. A pixel-level, high dynamic, low-power, digital-readout-integrated circuit with hybrid analog-to-digital converter for infrared focal-plane arrays [J]. Sensor Signal Processing, 2023, 7(8): 7003604.
- [35] Yan Zeng, Shiheng Yang, Yueduo Liu, et al. A digital readout integrated circuit based on pixel-level ADC incorporating on-chip image algorithm calibration for IRFPA [J]. IEEE SENSORS JOURNAL, 2023, 23(18): 21747–21755.
- [36] Chen Nan, Zhang Jiqing, Mao Wenbiao, et al. High-dynamic-range and high-sensitivity IRFPA digital-pixel ROIC technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(3): 20210821-1-20210821-11. (in Chinese)
陈楠, 张济清, 毛文彪, 等. 大动态范围、高灵敏度红外焦平面数字像元读出电路技术 [J]. 红外与激光工程, 2022, 51(3): 20210821-1-20210821-11.