

HDR 热成像系统动态范围特性测试评价方法

王铭赫, 李 硕, 金伟其*, 米凤文

(北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为了适应具有太阳、干扰弹、火光等强辐射背景下的高性能热成像应用,可适应温差达 1 000~5 000 °C 以上强辐射干扰场景的 HDR 热成像成为国内外发展的重要方向。虽然 HDR 热成像系统动态范围测试系统组成与传统测试系统没有明显的差异,但目前尚没有适宜的测试方法和仪器,其核心在于缺乏大动态范围动态红外辐射源靶标。研究了一种 HDR 热成像系统动态范围特性测试评价方法,设计了一种新型的 HDR 动态红外辐射源阵列靶标,可获得温差不低于 1 000 °C 的 HDR 动态红外辐射,实现 HDR 热成像系统动态范围特性的客观测试。实验结果表明:HDR 动态红外辐射源阵列靶标在温度范围、稳定性、精度、调制频率等方面满足测试评价的要求,可实现快速、可靠的 HDR 热成像系统动态范围特性测试,对于推进 HDR 热成像技术研究和系统测试评价具有指导意义。

关键词: HDR; 热成像系统; HDR 红外辐射源; 测试评价技术

中图分类号: TN215; TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210526

Testing and evaluation method for HDR thermal imaging system dynamic range performance

Wang Minghe, Li Shuo, Jin Weiqi*, Mi Fengwen

(MoE Key Lab of Photoelectronic Imaging Technology and System, School of Optics and Photonics,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To adapt to high performance thermal imaging application in the background with strong radiation such as sun, interference bomb and fire, high dynamic range (HDR) thermal imaging with adaptability for strong radiation interference scenes of temperature difference beyond the range of 1 000-5 000 °C, had become a significant direction of development at home and abroad. Although there was no obvious difference between the dynamic range testing system of HDR thermal imaging system and traditional thermal imaging system, there was no suitable testing method and instrument now, and its core lay in the lack of large dynamic range dynamic infrared radiation source target. This article researched a dynamic range performance testing and evaluation method of HDR thermal imaging system, and designed a novelty HDR dynamic infrared radiation sources array target with temperature difference beyond 1 000 °C to realize the objective testing of HDR thermal imaging system dynamic range performance. The experimental results show that HDR dynamic infrared radiation sources array target meets the testing and evaluation requirement of temperature range, stability, accuracy, modulation frequency, etc. and can realize fast and reliable the dynamic range performance testing of HDR thermal imaging system. This technology is of guiding significance to the development of HDR thermal imaging technology research and system testing and evaluation.

收稿日期:2021-03-10; 修订日期:2021-04-20

基金项目:十三五陆装重点预研项目(301020400104)

作者简介:王铭赫,男,硕士生,主要从事热成像系统测试评价技术方面的研究。

通讯作者:金伟其,男,教授,博士生导师,主要从事夜视与红外技术、光电图像处理、光电检测与仪器方面的研究。

Key words: HDR; thermal imaging system; HDR infrared radiation source; testing and evaluation technology

0 引言

基于红外焦平面阵列探测器 (Infrared Focal Plane Array, IRFPA) 的热成像技术在军事和民用领域已广泛应用,但常规热成像系统在观测包含太阳、干扰弹、火焰等强辐射源的目标场景时,由于场景辐射范围超过系统实际动态范围(约 50~60 dB),造成图像无法完整还原在高温或者低温区域的辐射差异,往往会造成观测目标丢失问题。为此,高动态范围 (High Dynamic Range, HDR) 热成像技术^[1]成为重要的发展方向,目前主要有基于片上像素 A/D 变换技术^[2]和超帧成像技术^[3]两类方案。前者采用全数字的像素 A/D 变换技术(通常为 16~18 bit 的 A/D 变换),不仅能够获得 90~100 dB 以上的动态范围,而且具有更高的探测性能,NETD 达到小于 10 mK 的水平。后者采用基于常规的 IRFPA 的超帧成像方式,通过设置循环的多帧变积分时间控制,采集不同积分时间图像通过适宜的图像融合方法,得到 HDR 场景的热图像。

动态范围特性是 HDR 成像系统的重要特性,目前可见光成像领域已有较为成熟的动态范围测试评价方法(如基于 HDR 灰度测试卡等),相应的可见光光源和靶标都易于获取,但是这些技术难以直接应用到 HDR 热成像领域。从原理上讲,HDR 热成像系统动态性能测试与传统热成像系统在系统组成框架上没有明显差异,只是测试靶标需要产生 1 000 °C 以上的 HDR 动态辐射。然而目前常用的标准辐射源如黑体靶标、电阻阵列靶标和激光靶标^[4]等,或受温度变化范围限制,或温度可控性较差,温控周期较长,均难以达到 HDR 动态红外辐射靶标的要求,即可有效控温、快速响应的高动态范围动态红外辐射靶标成为 HDR 热成像系统动态性能测试评价的关键。

文中针对 HDR 热成像系统动态范围特性测试评价问题,研究一种具备宽温度范围的动态可控红外辐射靶标及其对应的热成像系统动态性能评价方法,以实现 HDR 热成像系统高动态范围性能的测试评价。

1 HDR 热成像系统及其动态范围定义

目前关于 HDR 热成像系统公开研究较少,对于 HDR 热成像系统的动态范围没有明确的定义,为此

需明确 HDR 热成像系统动态范围的定义,以指导测试评价方法及 HDR 动态红外辐射源靶标阵列设计。

1.1 基于超帧的 HDR 热成像模式

超帧 HDR 成像技术主要可分为(辐)亮度融合和灰度融合两类方法。前者预先标定预设积分时间下成像系统响应函数^[5](如图 1 所示),进而通过采集相应积分时间的多曝光图像,经过辐亮度映射生成可视化辐亮度图像(近似线性)。后者直接将多帧灰度图像对应像素进行加权平均^[6]或采取其他融合方法,无需估计系统响应函数,融合方式更为简便,但难以保证图像的线性关系。

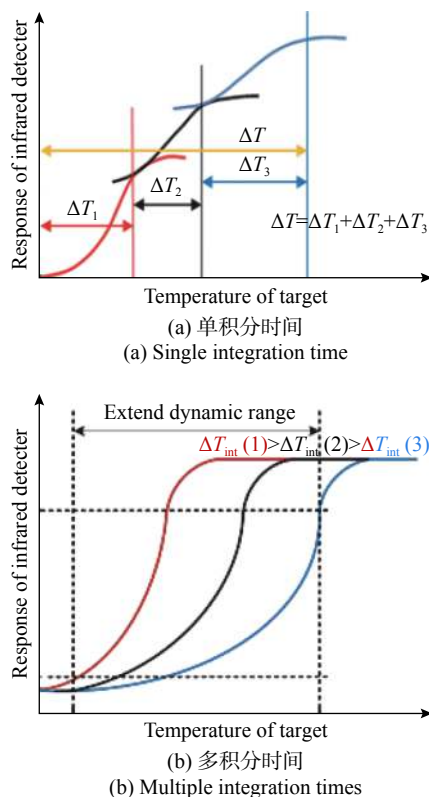


图 1 HDR 热成像温度响应曲线

Fig.1 Temperature response curve of HDR thermal imaging

2018 年,刘明聪^[7]等在传统红外探测器响应模型基础上,推导出变积分时间下热成像系统非均匀校正系数变化模型,并实现了基于响应函数的多积分时间图像融合,如图 2 所示(基于 FLIR 公司制冷型长波红外热像仪 x6570sc,探测器阵列 640×512,响应波段 7.7~9.3 μm,NETD<25 mK)。

根据强辐射目标或干扰辐射与常规场景的辐射

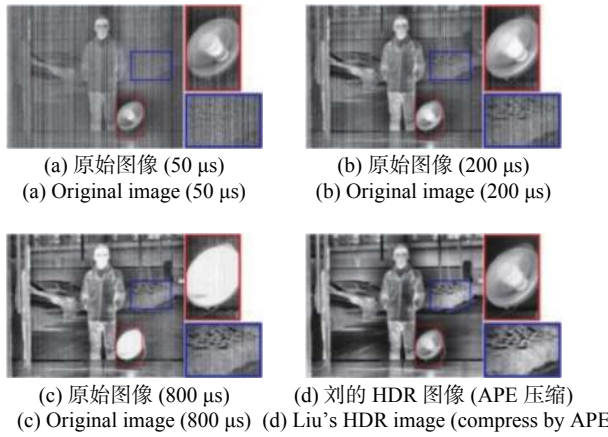


图 2 基于各像元响应函数的红外多曝光图像 HDR 融合 (长波)

Fig.2 HDR fusion result based on the response function of each pixel (LWIR)

差异较大的特点 (如图 3 所示)。2019 年,李硕^[8]等提出了一种基于灰度-梯度估计的多积分时间红外图像融合算法,通过采集较大的跨温度区域多积分时间图像,采用非线性灰度融合方法实现了 HDR 热成像 (如图 4 所示),通过积分时间的优化,可实现不低于 100 dB

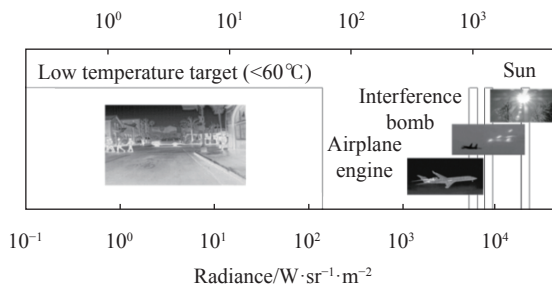


图 3 高动态范围目标场景景物温度分布

Fig.3 Target temperature distribution of HDR target scene

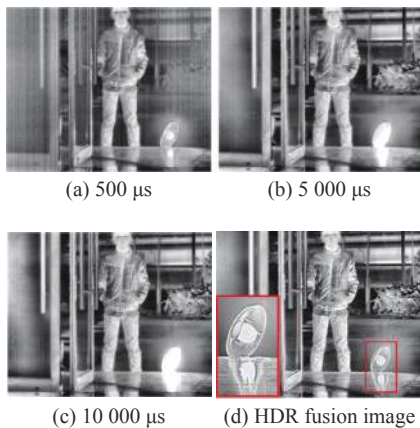


图 4 基于灰度-梯度估计的多积分时间红外图像融合效果

Fig.4 Multi-integration times infrared images fusion result based on grayscale-gradient estimation

的 HDR 热成像。

1.2 场景 HDR 热成像的定义及动态范围

鉴于 HDR 热成像技术的日趋成熟,其动态范围性能的评价成为迫切需要解决的问题。目前对热成像系统动态范围有不同的认识,其定义直接影响 HDR 靶标温度范围的设计。以热成像系统的噪声等效温差 NETD 作为标尺,对目标场景的温差进行衡量是一种较为合理的方法,即场景 HDR 评价方法。假设目标场景最大可探测温度范围为 ΔT_{Range} , 则以 NETD 衡量的动态范围为:

$$DR = 20\lg(\Delta T_{Range}/NETD) \quad (1)$$

这种方法实际上与数字图像 A/D 位数的评价方法是一致的,但根据实际探测器的工作状况,对于线性探测器响应和“S”形探测器响应,存在两种不同的平均方法。

假设探测器为线性响应,即探测器 A/D 具有 $D(\text{bit})$ 的动态范围,在特定积分时间 τ 下,IRFPA 探测器可探测的最低温度为 T_{\min} , 最高温度为 $T_{\max}=T_{\min}+(2^D-1)NETD$, 目标场景的最低温度为 $T_{h\min}$, 则对应常规热成像系统的动态范围可表示为:

$$DR' = 20\lg\left(\frac{T_{\max}-T_{h\min}}{NETD}\right) = 20\lg\left[\frac{(2^D-1)NETD+T_{\min}-T_{h\min}}{NETD}\right] \quad (2)$$

例如,假设 $T_{\min}=0\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{h\min}=15\text{ }^\circ\text{C}$, 系统 $NETD=30\text{ mK}$, $D=14\text{ bit}$, 则 $T_{\max}=491.49\text{ }^\circ\text{C}$, 成像动态范围 $DR=84.0\text{ dB}$ 。

由于实际红外探测器的响应曲线通常为 S 形,探测器 A/D 难以保证 14 bit 均能有效区分,对于上面示例情况,假设实际有效 A/D 位数 $D=12\text{ bit}$, 则有 $T_{\max}=122.85\text{ }^\circ\text{C}$, 成像动态范围 $DR'\approx 71.8\text{ dB}$; 有效 A/D 位数 $D=13\text{ bit}$, 则有 $T_{\max}=245.73\text{ }^\circ\text{C}$, 成像动态范围 $DR'\approx 77.7\text{ dB}$ 。

2 HDR 动态红外辐射源阵列靶标设计

虽然基于片上像素 A/D 变换技术和超帧成像技术的 HDR 热成像系统均能达到 90~100 dB 的高动态范围,但是两者的 NETD 数值相差较大,使得系统实际响应的最大场景温差也存在差异。例如,前者在 90~100 dB 动态范围下有效响应的最大温差在 1000 $^\circ\text{C}$ 左右,后者在 4 帧叠加融合状态的 90~100 dB 动态范

围下,有效响应的最大温差可达 1 000~3 000 ℃。鉴于常规黑体辐射源无法满足大温差范围和动态调制能力的需求,设计采用一种 HDR 动态红外辐射源阵列靶标。该辐射源阵列靶标由动态红外辐射源阵列、靶标板、模拟驱动电路板、数字信号处理板等部分组成。

2.1 阵列靶标温度范围设计

当 HDR 热成像系统的 NETD=(20~30) mK 时,若测试场景动态范围超过 100 dB,则要求测试靶标的温度范围达 3 000 ℃,超过 90 dB 则需要的温度范围达 1 000 ℃。综合考虑到当前辐射源器件性能和实验室测试方式,选取 1 000 ℃ 作为靶标的温度范围,可测试 HDR 热成像系统动态范围约为 (93.98~90.46) dB。为了测试 HDR 热成像系统在中间温度区域的响应特性,在 1 000 ℃ 温度区间内需设置若干动态调制辐射源,实现全温度范围辐射源分布。

为此,给出了 HDR 动态辐射源阵列靶标的设计

方案为:在低温温度区间(-50 ℃ 至室温)设置 2 个具备温差的低温辐射源;在高温 900 ℃ 以上设置 2 个具备温差的高温辐射源;在中间温度区域(室温至 900 ℃),设置 6 个相位存在确定差异的动态调制辐射源。使得 HDR 动态红外辐射源阵列靶标同时具备超过 1 000 ℃ 的温度范围、高中低温度区间、稳定控温能力及温度动态变化能力,实现了实验室环境模拟外界温度场景的能力。

2.2 辐射源选取及设计

考虑到系统功耗及辐射源器件可提供的温度范围,采用微型辐射源构建辐射源阵列。

(1) 辐射源选取

选择的 Helioworks 公司微型红外辐射源具有温度范围广、功耗低、寿命长、响应速度适中、驱动简单等优势,表 1 给出了所采用的四种辐射源器件的主要参数。

表 1 四种红外辐射源器件参数

Tab.1 Parameters of four infrared radiation sources

Model	EK-8270	EK-8620	EF-8533	Low temperature source
Firm	Helioworks	Helioworks	Helioworks	Self-made
Surface				
Radiation materials	Kanthal filament	Kanthal filament	NiCr filaments	TEC
Emissivity	0.7	0.7	0.88	-
Temperature range	Up to 1050 ℃ Steady state	Up to 950 ℃ Steady state	25 -700 ℃ Modulation mode	-20 -25 ℃ Steady state
Package	TO-8	TO-8	TO-8	TO-3
Peak power/W	8.4	1.5	4	2.5
Window	No window	No window	ZnSe window	ZnSe window
Wavelength range	All	All	0.6-20 μm	0.6-20 μm

其中,电可调制脉冲红外辐射源 EF-8533 是一种峰值温度达 700 ℃ 的中温可调制动态红外辐射源,可运行于调制或稳态模式,其运行时电压与电流关系如图 5(a) 所示;运行于脉冲模式时该辐射源调制频率范围为 0~2 Hz,且调制度曲线如图 5(b) 所示。经过测试,在 25~700 ℃ 的温度范围内,随着输入电压的提

升,辐射源温度变化与输入电压呈良好的线性关系,符合控温稳定性要求。

另外,选取低温辐射源需要考虑到辐射源体积及控温可靠性的影响。设计了一款最低温度达-20 ℃,TO-3 封装的微型低温辐射源:采用半导体制冷片作为低温红外辐射源,通过调整输入功率调节制冷片的

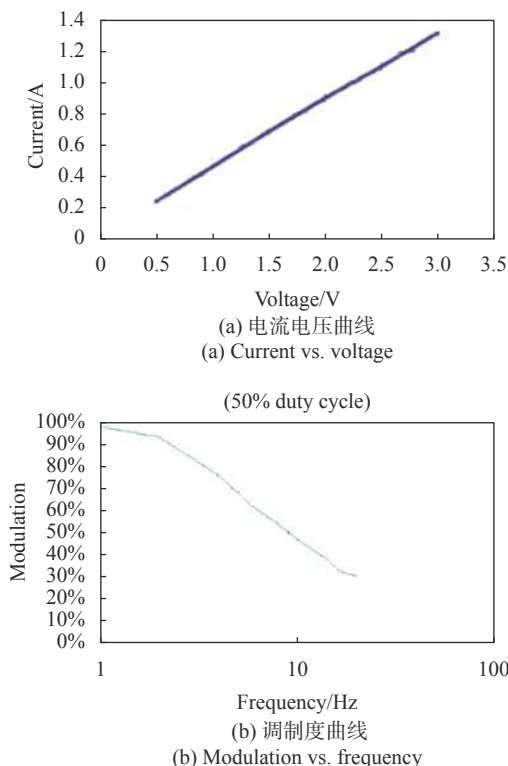


图 5 EF-8533 参数曲线

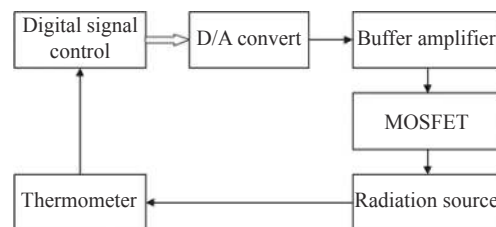
Fig.5 Curves of EF-8533's parameters

冷端温度;在冷端辐射面上放置微型热敏电阻,结合控温电路及算法,实现制冷片冷端温度控制;考虑到低温辐射面结霜,影响低温辐射源发射的问题,将半导体制冷片封装于填充氮气的 TO-3 金属外壳内,采用硒化锌薄片作为红外透射窗口,透过波段 0.6~20 μm。

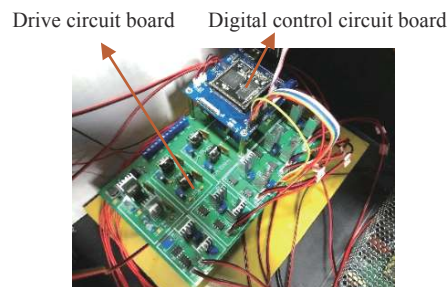
(2) 辐射源的驱动与控制

对 10 只辐射源均采用直流驱动、温度反馈补偿的方式进行控温,且对每只辐射源分配独立的控制驱动电路,单路辐射源控制驱动电路结构如图 6(a)所示。实际制作的控制电路板将 10 路控制驱动电路分布于两片 PCB 版上(如图 6(b)所示),其中上层 PCB 板为数字信号处理板,以 FPGA 芯片为主控,完成数

字控温算法及辐射源动态调制功能,下层 PCB 板为模拟驱动电路板,按照辐射源功率要求可调节驱动功率。



(a) 单个辐射源驱动电路
(a) Drive circuit of single infrared source



(b) 主控电路板
(b) Central control circuit board

图 6 辐射源驱动控制电路

Fig.6 Drive and control circuit of infrared source

(3) 辐射源标定

辐射源实际温度表现与材料表面发射率有关,尤其低温辐射源采用的 TEC 表面发射率未知。因此对各个辐射源的实际辐射温度按照发射率为 1.0 进行重新标定,标定方法及辐射源控温稳定性测试结果如表 2 所示。

(4) 辐射源前面板设计

将辐射源按照低温区、中高温区、高温区进行划分,HDR 靶标前面板排布方案及外观如图 7 所示。各个红外辐射源位于靶标板后方,通过靶标板上直径 10 mm 的圆孔透过辐射。靶标板为铝材质,外表面喷涂黑体漆。

表 2 红外辐射源器件温度稳定性测试

Tab.2 Temperature control stability of infrared radiation sources

Type	Low temp. source	Medium temp. source	High temp.source
Temp. range/°C	-20-25	25-700	25-1 050
Stability/°C	0.2	0.3	3.0
Repetiveness/°C	—	0.1	1.0
Caliation method	MWIR thermal imaging system	MWIR thermal imaging system	Fluke MI3 thermometer

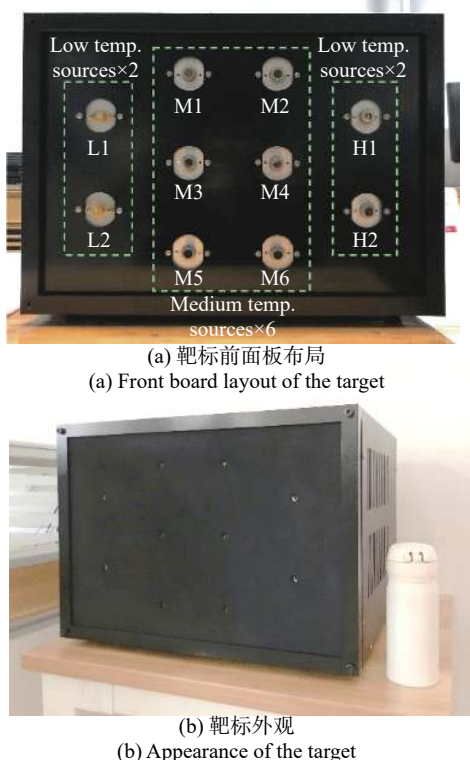


图 7 HDR 红外辐射源阵列靶标外观

Fig.7 Appearance of HDR infrared radiation sources array target

2.3 中温辐射源调制曲线

如图 8 所示, 令六只辐射源均按照锯齿波形调制, 且调制波形保持 $\pi/6$ 相位差。在任一时刻 (如 t_0), 六只辐射源始终具有相同温差, 且令辐射源处于线性升温状态便于观察灰度变化规律。通过观察热成像系统观测靶标记录的图像序列可测试六个中温辐射源的辐射差异。

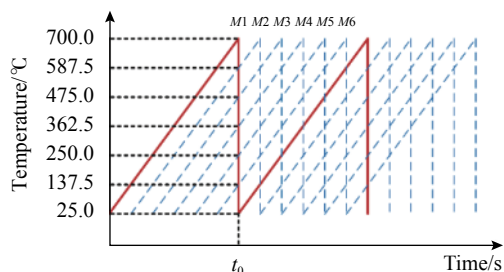


图 8 中温红外辐射源调制曲线

Fig.8 Modulation curves of medium-temperature infrared radiation source

2.4 辐射源控温稳定性需求分析

按照 $NETD=(20\sim30)$ mK 计算, 在动态范围在超过 80 dB 之后, 由高温、低温辐射源的温度不确定度 4.2 °C 造成的动态范围不确定度在 0.18~0.12 dB 以

内, 满足动态范围测试要求。动态中温辐射源控温稳定性要求源于调制波形要求, 实测时按照 HDR 热像仪帧频不高于 50 fps 计算, 设定中温辐射源调制频率 0.1 Hz 下, 每周期 10 s 时间内, 热像仪采集 500 个调制曲线上的坐标断点, 相邻坐标断点温差约为 1.35 °C, 实测中温辐射源控温稳定性 0.3 °C, 不会引起曲线上上升趋势的模型变化。即辐射源温度稳定性及重复性满足动态范围测试要求。

3 HDR 热成像系统测试

基于 HDR 动态红外辐射源阵列靶标及 HDR 热成像系统的 NETD, 结合场景动态范围计算方法, 可进行常规热成像系统和 HDR 热成像系统的动态范围特性测试评价。

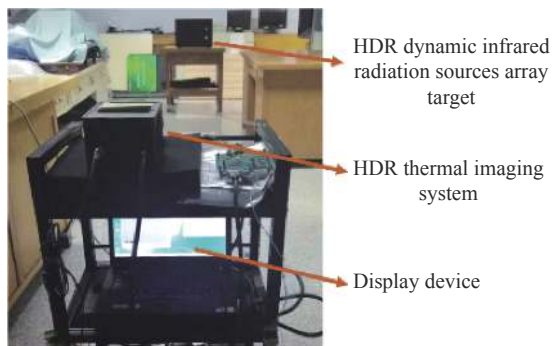
3.1 HDR 热成像系统测试及评价流程

(1) HDR 动态红外辐射源阵列靶标开机并选择测试模式, 分别设定稳态低温辐射源为 -20 °C、-10 °C, 稳态高温辐射源为 950 °C、1 050 °C, 6 只中温辐射源的调制波形为频率 0.1 Hz 相位相差 $\pi/6$ 的锯齿波;

(2) 将待测试 HDR 热成像系统调焦成像在 HDR 动态红外辐射源阵列靶标上 (如图 9 所示), 调节阵列



(a) HDR 热成像系统
(a) HDR thermal imaging system



(b) 测试系统
(b) Testing system

图 9 HDR 热成像测试系统

Fig.9 Testing system of HDR thermal imaging

靶标的高温 and 低温辐射源, 确定能区分的高低温度之差即为基于响应函数的 HDR 热成像系统的动态范围, 并根据系统 *NETD* 值确定实际可探测等级或动态范围 dB 值;

(3) 观测并记录阵列靶标调制曲线 3 个周期时间 (即 30 s) 以上, 读取 HDR 热成像系统观测的数字图像序列, 手动选取待处理辐射源区域的灰度并计算灰度均值, 得到测试曲线;

(4) 对 HDR 热成像系统的动态范围评价包括基于响应函数的 HDR 动态特性评价和基于多积分时间+非线性自适应动态范围压缩的 HDR 动态特性评价。前者要求按照测试流程得到基于响应函数的 HDR 热成像系统的场景温度动态范围 dB 值, 且观测中温辐射源灰度变化与动态红外辐射源阵列靶标设置一致时确认该值有效; 后者要求观察及采集中温辐射源灰度变化均清晰可辨, 确定出的高低温差之差即为非线性 HDR 热成像系统场景温度动态范围, 由此计算动态范围 dB 值。

3.2 测试结果

3.2.1 热成像系统观测靶标的测试图像

采用基于超帧的 HDR 长波红外热成像系统 (探测器规模 256×256) 的 4 帧融合为 1 帧的 HDR 成像模

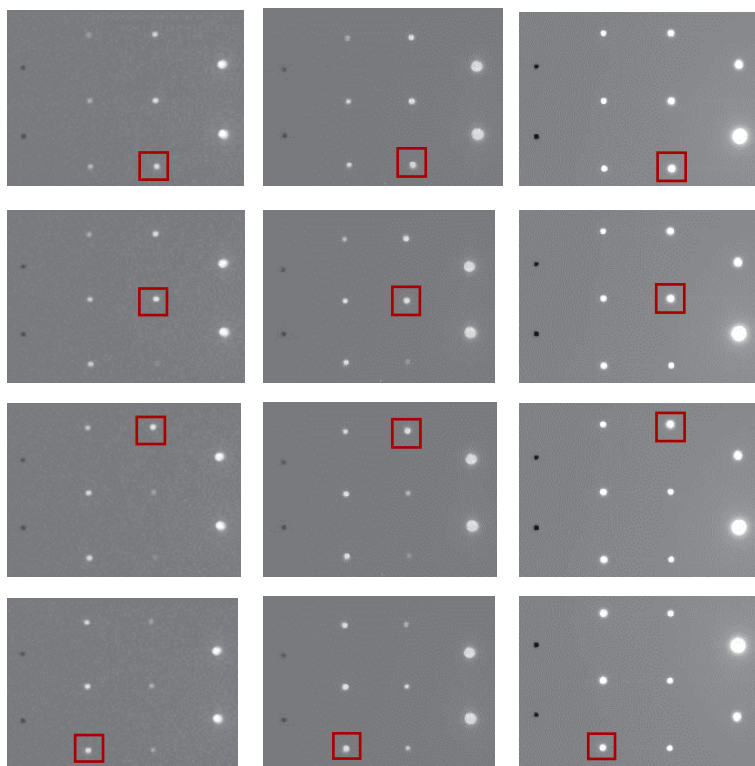
式 (原始数据位宽 14 bit, *NETD*=30 mK, 理论动态范围约 96.33 dB, 实测系统动态范围不低于 91.05 dB)、单积分时间模式 (原始数据位宽 14 bit, 典型 *NETD*=30 mK, 理论上具备 90 dB 的动态范围)、Iraytek 公司非制冷长波热像仪 LA6110 (原始数据位宽 14 bit, *NETD*=40 mK, 数字动态范围极限约 84 dB) 进行了观测对比实验。实际观测时, 3 款热成像系统可视 8 bit 图像均由原始 14 bit 或 16 bit 图像经 AGC 压缩算法获得。

实际观测 6 个中温辐射源变化规律如图 10 所示。

(1) 在 HDR 热成像系统的 HDR 成像模式下, 图像高温辐射源灰度差异可分辨, 低温辐射源灰度差异可分辨, 对 6 个中温辐射源的灰度响应按照辐射调制规律变化, 且辐射源之间的灰度差异始终清晰可辨, 表明 HDR 热成像具备有效的场景温度动态范围;

(2) 在 HDR 热成像系统的单积分时间模式下, 对低温辐射源响应灰度相近时, 且无法分辨两只高温辐射源的温度差异, 表明在单积分时间下图像高温区域响应已饱和;

(3) 在 LA6110 观测下, 该系统理论动态范围不足以观测 HDR 动态靶标 1 070 °C 的温度范围, 无法分辨两个高温辐射源的辐射差异, 且 6 个中温辐射源的



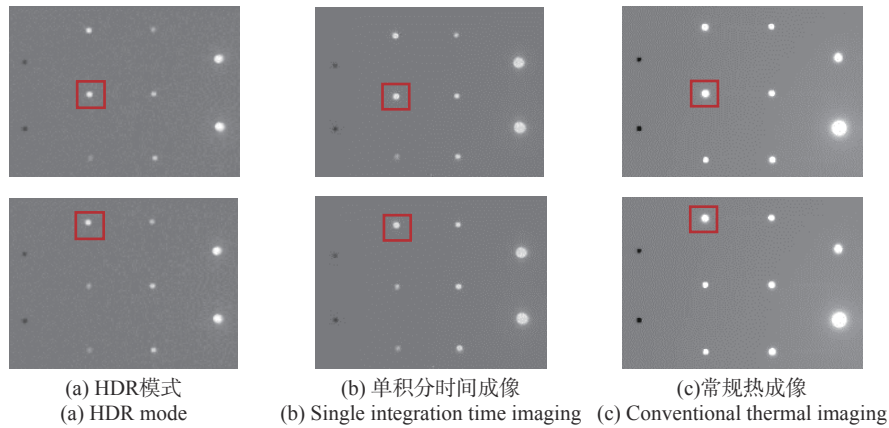


图 10 不同成像模式的靶标观测效果

Fig.10 Target observation effects of several imaging mode

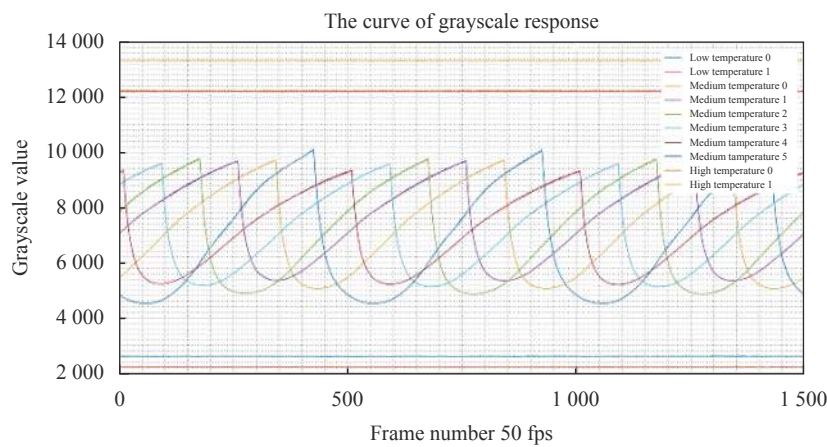
灰度变化不明显, 辐射差异无法被清晰观测。

压缩的 HDR 动态范围特性评价方法, 分析 HDR 热成像系统 HDR 模式对各个辐射源的灰度响应曲线, 如

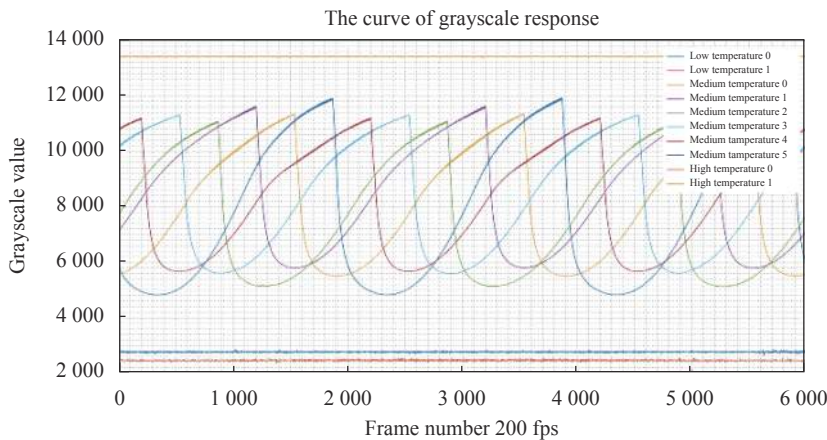
3.2.2 HDR 热成像系统测试曲线

按照基于多积分时间+非线性自适应动态范围

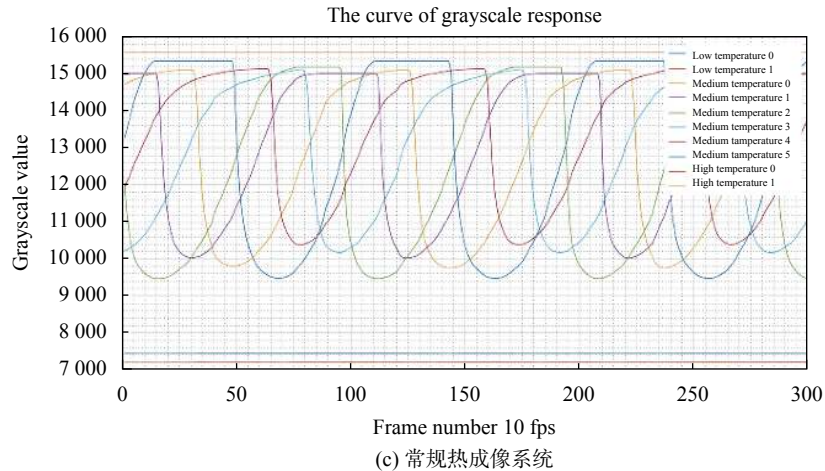
图 11 所示。6 个中温辐射源灰度变化规律与辐射源



(a) HDR 热成像系统-HDR-模式
(a) HDR thermal imaging system-HDR mode



(b) HDR 热成像系统-单积分时间模式
(b) HDR thermal imaging system-single integration time



(c) Conventional thermal imaging system

图 11 HDR 热成像系统 HDR 模式灰度响应曲线

Fig.11 Grayscale response curves of HDR thermal imaging system in HDR mode

温度调制规律一致,且 6 条响应曲线没有重合,表明不同中温辐射源在任一时刻下,呈现出的辐射差异均能被有效捕获并展现,这与实际观测结果相符,此时测得的场景动态范围实际数值有效。此外做出 HDR 热成像系统单积分时间模式、常规热成像系统 LA6110 图像对应的图像灰度响应曲线,用作对 8 bit 图像观测效果的补充,如图 11(b)、(c) 所示。图 11(b) 中,由于高温区域饱和造成的两条高温响应曲线重合,对应实际观测效果的高温区域灰度差异无法分辨,图 11(c) 中,高温区域饱和造成高温区域响应曲线重合,且中温区域灰度变化范围小,曲线重合度高,与实际观测图像中的中温区域灰度差异难以分辨、中温区域灰度变化不明显的现象相符合。

3.2.3 热成像系统动态范围测试结果

在对 HDR 热成像系统测试及对比的基础上,按照测试流程分别对 HDR 热成像系统 HDR 模式 (14 bit)、HDR 热成像系统单积分时间模式 (228.6 μ s, 14 bit) 及常规长波非制冷热成像系统 Iraytek LA6110 (14 bit) 进行的动态范围测试结果如表 3 所示。其中 HDR 热成像系统 HDR 模式下饱和灰度值为 14 400 (受辐射源温差限制,尚未饱和),单积分时间模式下饱和灰度值为 12 000 (受辐射源温差限制,尚未饱和),常规长波非制冷热成像系统 IraytekLA6110 饱和灰度值为 16 383 (接近饱和),所得动态范围测试结果在各系统灰度响应未饱和截止情况下获得。

表 3 热成像系统动态范围标定结果

Tab.3 Calibration result of thermal imaging system dynamic range

Thermal imaging system	HDR thermal imaging system (HDR mode)		HDR thermal imaging system (Single integration time)		Conventional thermal imaging system (Iraytek LA6110)	
	Temperature/ $^{\circ}$ C	Grayscale	Temperature/ $^{\circ}$ C	Grayscale	Temperature/ $^{\circ}$ C	Grayscale
Response of high temp. sources	1 050	13 310	750	11 690	280	16 110
	950	12 215	730	11 100	260	15 900
Response of low temp. sources	-20	2 216	-20	95	-20	6 865
	-10	2 621	-10	123	-10	6 692
NETD/mK	30		30		40	
Dynamic range/dB	91.05		88.19		77.50	

4 结 论

HDR 热成像技术具有广泛的应用前景,其系统应用离不开动态范围性能的评价。针对现有的 HDR 热成像系统测试方法并未得到广泛认可的问题,文中研究了 HDR 热成像系统动态范围特性的测试评价技术,设计研制的 HDR 动态红外辐射源阵列靶标具备宽温度范围、多温度区域、结合恒定温度与温度变换的特性,可以测试 HDR 热成像系统的实际动态范围以及评价其高动态范围下的性能表现,为 HDR 热成像系统动态范围性能的测试提供了行之有效的办法,对 HDR 热成像技术的性能评价和生产过程的质量控制等均具有重要意义。

目前,受器件性能的限制,HDR 动态红外辐射源阵列靶标的温差范围还不足覆盖描述实际典型目标场景的温度范围。此外,结合中温动态红外辐射源的调制变化规律设计,更有效地描述 HDR 热成像系统的动态范围等均是后续需进一步研究的问题。

参考文献:

- [1] Sun Jing, Xu Yan, Duan Ivyin, et al. A survey on high dynamic range display technology [J]. *Information Technology*, 2016(5): 41-45. (in Chinese)
- [2] Yao Libin, Chen Nan, Zhang Jiqing, et al. Digital IRFPA technology [J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(5): 357-366. (in Chinese)
- [3] Richards A A, Cromwell B K. Extending IR camera scene radiance dynamic range with cyclic integration times[C]// Proc of SPIE, 2005, 5782: 93-99.
- [4] Malyutenko V K, Bogatyrenko V V, Malyutenko O Y. Bulk silicon as photonic dynamic infrared scene projector [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(13): 473-486.
- [5] Debevec P E, Malik E J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs[C]//24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1997: 369-378.
- [6] Vavilin A, Deb K, Jo K H. Fast HDR image generation technique based on exposure blending[C]//Trends in Applied Intelligent Systems, 2010: 379-388.
- [7] Liu Mingcong, Li Shuo, Li Li, et al. Infrared HDR image fusion based on response model of cooled IRFPA under variable integration time [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 94: 191-199.
- [8] Li Shuo, Jin Weiqi, Li Li, et al. Fusion Igorithm based on grayscale-gradient estimation for infrared images with multiple integration times [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 105: 103179.