

文章编号 1004-924X(2016)06-1490-11

基于不同积分时间帧累加的红外图像超帧方法

洪闻青*, 姚立斌, 姬荣斌, 刘传明

(昆明物理研究所, 昆明 650223)

摘要:针对大多数常规红外成像系统单帧成帧时间内探测器组件响应动态范围有限,以及超帧算法需要借助其他复杂装置或专用电路的不足,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,采用电子学处理方法对整个超帧处理过程进行了研究。分析了限制红外探测器响应动态范围的原因,简单介绍了帧积分方法的原理和利弊。然后对不同积分时间下获得的图像进行了非均匀性校正、帧信息融合和新帧映射。实验结果表明:本文方法提高了系统的噪声等效温差(NETD),捕获了更多的场景原始图像信息,丰富了图像的灰度层次,增加了图像的信息熵。该方法能够等效拓展探测器的响应动态范围,增加场景原始信息的捕获,提高成像系统的输出信号信噪比以及探测灵敏度。

关键词:红外图像;超帧处理方法;积分时间;动态范围;信噪比

中图分类号: TN215; TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162406.1490

A super-frame processing method for infrared image based on accumulation of different integration time frame

HONG Wen-qing*, YAO Li-bin, JI Rong-bin, LIU Chuan-ming

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223)

* Corresponding author, E-mail: hongwenqing@aliyun.com

Abstract: Since the dynamic response range of the detector component within the period of single framing for most regular infrared imaging system is limited, and the super-frame calculation can not be conducted without the help of other complicated devices or dedicated circuits, a method based on accumulation of different integration time frame for infrared image super-framing was put forward. In this method, a research was conducted on the whole super-framing process by means of electronic method, the reason for limited dynamic response range of the infrared detector was analyzed, and the principle, advantages and disadvantages of the frame integration method was introduced. Then non-uniform correction, frame information integration and new frame mapping were conducted on images obtained under different integration time. It is showed in the test that the method helps to improve the NETD of the system, capture more original image information, enrich the gray level of the image, and increase the image information entropy. By using this method, the dynamic response range of the detector can be expanded, more original scene information can be captured, and the detection sensitivity and signal to noise ratio of the image output signal can be improved.

收稿日期:2016-01-11;修订日期:2016-03-04.

基金项目:云南省科技厅应用基础研究计划重大项目(No. 2013FC009)。

Key words: infrared image; super-frame processing method; integration time; dynamic range; signal to noise ratio

1 引言

在现实情况中,景物温差极易出现较大差异,目前搭载的最为先进的成像系统是由输出精度为14 bit 及以上的数字红外探测器构成的,其能够有效探测并显示于一帧图像中的景物信息的最小温差仅为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大温差也不过几十度,那么对于一帧图像中同时存在较低与较高温度场景的情况,势必会出现高温场景饱和或者捕捉不到低温场景有效信息的情况,另外,通常还存在图像灰度信息远未能占满整个图像灰度空间绝大多数灰度级的情况^[1-3]。目前的红外成像系统难以将真实场景的大动态范围信息在一帧图像内通过丰富的图像灰度层次表现出来。究其原因,由于目前焦平面探测器组件中读出单元电路积分电容的电荷存储容量有限,造成积分电容的积分时间受限,特别是长波器件的积分时间最多只有1 ms左右,难以在获取一帧场景时,既保证高温场景不饱和,又确保低温场景的有效信息不被噪声淹没。此外,通常红外成像系统帧频要小于50 Hz,除去图像处理时间,其仍远大于探测器积分时间,造成在单帧成帧时间内的很长一段时间探测器没有得到有效利用,造成了器件性能的浪费^[4]。因此,对于高性能的红外成像系统,在用其观察大温差场景时,除希望红外成像系统探测器在单帧成帧时间内有大的动态范围响应输出之外,还希望系统能够捕获尽可能多的原始图像信息,且具有高信噪比、高探测灵敏度等特征^[5-6]。

为此,Austin 等学者最早提出了红外图像超帧处理技术的概念^[7]。红外图像超帧技术就是指在红外成像系统规定的单帧图像成帧时间内(即一个超帧周期内)获得多幅图像(这些图像被称为子帧),然后对长积分子帧逐帧逐像元查找饱和像元并用短积分子帧相应像元替换,以获得新的单帧图像,并在系统约定的单帧成帧时间内输出,进而达到在红外成像系统单帧成帧时间内等效拓展探测器响应动态范围、获取更多的原始场景图像信息的目的。但是该方法对于提高成像系统的输

出信号信噪比以及探测灵敏度没有意义。在此基础上,国内外学者进行了相关研究,取得了一些成果,譬如基于光机装置的超帧原理样机^[8]、基于高速数字传输电路的红外图像超帧处理方法,但 these 方法或多或少需要借助复杂的光机装置、专用集成电路才能实现超帧处理的功能,存在推广应用的困难。

本文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,通过电子学处理方法完成整个超帧处理过程。该方法集成了传统红外图像超帧处理方法的优点,能够在红外成像系统单帧成帧时间内等效拓展探测器响应动态范围、获取更多的原始场景信息,同时还能够提高成像系统的输出信号信噪比以及探测灵敏度,并且不需要复杂的光机装置、逐帧逐像元判断替换的高级图像处理算法以及专用电路等辅助手段便可以实现红外图像超帧处理。此外,本文方法还具有原理简单、处理实时性好等特点,能够方便地集成于大多数红外成像系统之中。

2 基于不同积分时间帧累加的红外图像超帧处理方法

基于相同积分时间的红外图像帧累加处理方法(即图像的帧积分),是在成像系统单帧成帧时间内直接将具有相同积分时间的图像先进行对应像元灰度值累加再平均的方法,以达到改善图像信噪比的效果。其原理在于,对于相同场景,获得的每一帧图像信号电压幅值相等,而噪声的产生过程又是一个平稳的随机过程,噪声之间不具有相关性。通过帧积分(相当于时域滤波),可以改善图像的信噪比,而与表征探测灵敏度的关键指标噪声等效温差(NETD)与信噪比成反比,故 NETD 也得到改善^[9-10]。对 k 帧相同积分时间的红外图像进行帧积分,其功率信噪比提高为原来的 k 倍,其电压信噪比将是处理前的 \sqrt{k} 倍^[11]。但由于累加的各图像帧对应像元所捕获的辐射能量

信息相同,因而通过图像帧积分并不能在成像单帧成帧时间内拓展探测器响应动态范围、获取更多原始场景信息。

本文提出的基于不同积分时间帧累加的红外图像超帧处理方法,立足于普通红外成像系统架构,采用电子学处理方法,从原始红外辐射信号的探测、传输到后期数据处理的整个处理链路着手,实现红外图像的超帧处理。在成像系统单帧成帧时间内,在设置的多个探测器不同积分时间下,通过读出电路对焦平面信号进行读取,获取相同场景不同辐射信息图像帧。将这些不同信息量的子帧进行数据融合,以达到成像系统单帧成帧时间内等效拓展探测器响应动态范围、获取更多原始场景信息的效果,同时滤除部分噪声,提升成像系统的输出信号信噪比及探测灵敏度。

本文方法依次包括获得红外图像子帧、对子帧进行非均匀性校正、子帧融合产生新图像帧、新图像帧灰度映射、进行其余图像处理输出单帧红外图像等 5 部分,本文方法的工作原理如图 1 所示,下面对本文方法工作过程进行详细介绍。

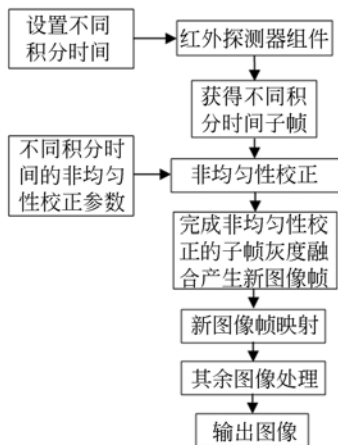


图 1 基于固定且不同积分时间的红外图像超帧处理方法工作原理框图

Fig. 1 Working principle diagram of infrared image superframing technique based on fixed and different integration time

1) 获得红外图像子帧

在常规红外系统单帧成帧时间内,设置不同积分时间,并获得对应的红外图像,作为进行超帧处理的子帧。在设置积分时间时,需将 k 个设定值尽可能地覆盖探测器像元的响应曲线。将第 m

个超帧周期内的 k 个积分时间从长到短依次记为 $t_{m1}, t_{m2}, \dots, t_{mk}$, 且有 $t_{m1} > t_{m2} > \dots > t_{mk}$, 将第 m 个超帧周期内第 i 个子帧中位置为 (x, y) 处的像元随温度 T 变化的响应电压输出幅值记为 $V_{mi}(T) \in [0, V_{\max 0}]$ 。

2) 对子帧进行非均匀性校正

根据红外探测器像元响应呈“S”曲线的特点,将不同积分时间下探测器任一像元响应电压 $V_{mi}(T)$ 随温度 T 的变化情况用图 2 表示^[12]。对同一场景目标,探测器任一像元在不同积分时间下的响应曲线会有所不同,积分时间较大时,像元的响应电压会较大,反之亦然,如在温度为 T_a 处, $t_{m1} > t_{m2} > t_{mk}$, $V_{m1}(T_a) > V_{m2}(T_a) > V_{mk}(T_a)$ 。类似地,在温度区间 $[T_a, T_b]$ 内,探测器各像元均存在这一情况。因此,需要在 $[T_a, T_b]$ 温度范围内根据不同的积分时间对探测器各像元进行非均匀性校正,获得不同积分时间对应子帧的非均匀性校正参数,并完成各子帧的校正。

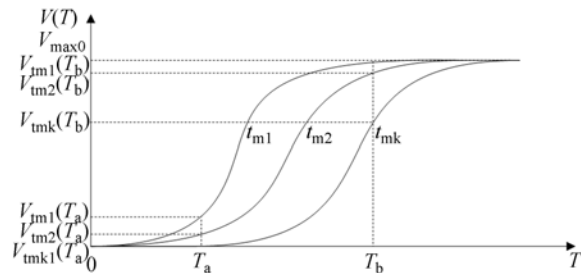


图 2 不同积分时间下的任一像元响应电压随温度变化示意图

Fig. 2 Sketch map of response voltage of any pixel varies with temperature under different integration times

3) 子帧融合产生新图像帧

采用灰度直接累加法将完成非均匀性校正的各子帧进行灰度融合。若将校正后各子帧图像的灰度空间记作 G_0 , 共 C_0 个灰度级, 那么将 k 帧子帧各对应位置像元灰度值直接累加后, 可得到新图像帧灰度空间, 记作 G_n , 则灰度级为

$$C_n = kC_0. \quad (1)$$

那么新图像帧任一像元灰度对应的等效原始响应电压 V_{sm} 则为

$$V_{sm} = \sum_{i=1}^k V_{mi}. \quad (2)$$

新图像帧任一像元灰度对应的等效原始响应电压 $V_{sm}(T)$ 随温度 T 的变化情况如图 3 所示。

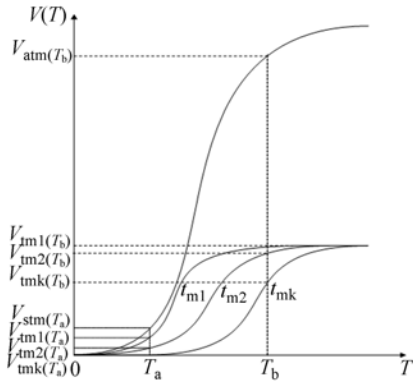


图 3 新图像帧任一像元灰度对应的等效原始响应电压 $V_{sm}(T)$ 随温度 T 的变化情况示意图

Fig. 3 Sketch map of equivalent original response voltage $V_{sm}(T)$ corresponding to any pixel in new frame with temperature T under different integration times

对子帧进行灰度融合,除了直接累加外,还可采用灰度加权累加法^[13]。具体为 k 帧子帧各对应像元灰度值分别与加权系数相乘后再进行灰度累加,得到新图像帧灰度空间记作 G_n ,对应于 k 个子帧的加权系数分别为 $W_1、W_2 \cdots W_k$,新图像帧的灰度级为

$$C_n = (W_1 + W_2 + \cdots + W_k) C_0, \quad (3)$$

那么新图像帧任一像元灰度对应的等效原始响应电压 V_{sm} 为

$$V_{sm} = W_1 V_1 + W_2 V_2 + \cdots + W_k V_k. \quad (4)$$

新图像帧任一像元灰度对应的等效原始响应电压 $V_{sm}(T)$ 随温度 T 的变化情况将有类似图 3 的效果。

此外,还可借助其他算法完成子帧的灰度融合^[14-15]。通过各种累加方式得到的新单帧图像,包含了探测器最长积分时间下的最大响应及最短积分时间下的最小响应,等效拓展了探测器在成像系统单帧成帧时间内的响应动态范围。同时,还增加了系统单帧成帧时间内捕获的原始场景图像信息。

4) 新图像帧灰度映射

为了获得新图像帧中不同场景物体的多层次感显示效果,需对新图像帧进行灰度拉伸后再映射。为了让图像的有效灰度信息充满整个灰度空间,需对新灰度空间中的最小、最大有效灰度级

$C_n(\min)、C_n(\max)$ 进行检测,则整个新图像帧任一像元灰度对应的等效原始响应电压 V_{sm} 可表示为

$$V_{sm} = \begin{cases} 0 & \text{当 } C_i < C_n(\min) \text{ 或 } C_i > C_n(\max) \text{ 时} \\ V_{sm}(C_i) & \text{当 } C_n(\min) \leq C_i \leq C_n(\max) \text{ 时} \end{cases}, \quad (5)$$

其中 C_i 表示新图像帧中任一灰度级, $V_{sm}(C_i)$ 表示 C_i 对应的等效响应电压。此时,再分别将 $C_n(\min)、C_n(\max)$ 线性映射到 G_y 的最小、最大灰度级,那么此时新图像帧灰度空间 G_n 的有效图像信息则全部映射到了约定的最终输出指定灰度空间 G_y 。

5) 进行其余图像处理并输出单帧红外图像

在完成新图像帧映射后,进行其他后期处理,并按约定的单帧成帧时间输出处理完的单帧图像。

本文方法还将对红外图像信噪比产生影响。根据图像随机噪声与信号的相关性将引入的图像噪声分为加性和乘性噪声,将第 i 帧图像 (x, y) 位置像元对应的电压信号 V_{fi} 表示为

$$V_{fi} = V_{si} + V_{mi} + V_{mni}, \quad (6)$$

其中 V_{si}, V_{mi} 和 V_{mni} 分别表示图像原始信号、加性噪声和乘性噪声分别对应的电压幅值。

假设对 k 帧图像进行累加,相应像元对应的电压幅值按其功率关系相加后的表达式为

$$P = \left(\sum_{i=1}^k V_i \right)^2 = \sum_{i=1}^k V_i^2 + 2 \sum_{i=1}^k C_{ij} V_i V_j, \quad (7)$$

其中 $0 < i < j < k, V_i, V_j$ 是图像帧间对应像元信号电压幅值, C_{ij} 是图像信号间的相关系数,有 $0 \leq C_{ij} \leq 1$ ^[16]。

在图像信号中,尽管被探测的场景是静止的,或者在 k 帧图像累加的过程中场景的移动距离较小,但由于在一个超帧周期内各子帧的积分时间不同,因此其响应也不相同,那么各子帧间对应像元原始图像信号之间的相关系数为 $0 < C_{ij} < 1$,经过 k 帧连续子帧图像的直接累加,图像信号功率 S 为:

$$S = \left(\sum_{i=1}^k V_{si} \right)^2 = \sum_{i=1}^k V_{si}^2 + 2 \sum_{i=1}^k C_{ij} V_{si} V_{sj}, \quad (8)$$

经过 k 帧累加后,对应像元的加性噪声累加电压幅值 $\sum_{i=1}^k V_{mi}$ 趋近于零^[17]。由于图像中的乘

性噪声与原始图像信号相关,因此乘性噪声之间的相关系数为 $0 < C_{ij} < 1$ 。此时,经过 k 帧不同积分下的子帧累加之后,新图像帧对应像元的噪声功率 N 的表达式为

$$N = \left[\sum_{i=1}^k (V_{ni} + V_{mi}) \right]^2 = \left(\sum_{i=1}^k V_{ni} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^k V_{mi} \right)^2, \quad (9)$$

对于不同量级的 V_{ni} 和 V_{mi} ,新图像帧对应像元的噪声功率 N 将有不同表达式。

a) 当 $V_{ni} \gg V_{mi}$ 时

由于 V_{mi} 在噪声中占比极小,对图像产生的影响也微乎其微,因此 $\sum_{i=1}^k V_{mi}$ 将趋近于零,并且由前可知各子帧对应像元加性噪声累加电压幅值 $\sum_{i=1}^k V_{ni}$ 也趋近于零,则新图像帧对应像元噪声功率为:

$$N = \left[\sum_{i=1}^k (V_{ni} + V_{mi}) \right]^2 \rightarrow 0. \quad (10)$$

从式(8)可看出,新图像帧的原始图像信号大于任何一个子帧的原始图像信号,而式(10)又说明了新图像帧的图像噪声小于任何一个子帧的图像噪声,因此新图像帧的信噪比为^[18]:

$$\text{SNR} = \frac{S}{N} = \frac{\left(\sum_{i=1}^k V_{si} \right)^2}{\left[\sum_{i=1}^k (V_{ni} + V_{mi}) \right]^2} > \text{SNR}_i, \quad (11)$$

其中 SNR_i 表示任一子帧的信噪比。上式说明通过本文方法处理产生的新图像帧的信噪比与未使用本文方法获得的任一单帧红外图像信噪比相比,得到了提高。

b) 当 $V_{ni} \ll V_{mi}$ 时或 V_{ni} 与 V_{mi} 数值相近时

由于各子帧对应像元的加性噪声累加电压幅值 $\sum_{i=1}^k V_{mi}$ 趋近于零,那么此时新图像帧对应像元的噪声功率 N 为:

$$N = \left[\sum_{i=1}^k (V_{ni} + V_{mi}) \right]^2 = \left(\sum_{i=1}^k V_{mi} \right)^2, \quad (12)$$

分别将 k 帧 V_{si} 和 V_{mi} 的均值记为 \bar{V}_s 和 \bar{V}_{mi} ,那么从数值上 S 和 N 的表达式可表述为

$$S = \left(\sum_{i=1}^k V_{si} \right)^2 = \sum_{i=1}^k V_{si}^2 + 2 \sum_{i=1}^k C_{ij} V_{si} V_{sj} = k^2 \bar{V}_s^2, \quad (13)$$

$$N = \left[\sum_{i=1}^k (V_{ni} + V_{mi}) \right]^2 = \left(\sum_{i=1}^k V_{mi} \right)^2 = k^2 \bar{V}_{mi}^2. \quad (14)$$

那么新图像帧的信噪比则为:

$$\text{SNR} = \frac{S}{N} = \frac{k^2 \bar{V}_s^2}{k^2 \bar{V}_{mi}^2} = \frac{\bar{V}_s^2}{\bar{V}_{mi}^2} = \overline{\text{SNR}}, \quad (15)$$

其中 $\overline{\text{SNR}}$ 表示该超帧周期内各子帧去除加性噪声的等效平均信噪比。此时,对于未使用本文方法获得的任一单帧红外图像信噪比小于 $\overline{\text{SNR}}$ 的图像,本文方法处理产生的新图像帧信噪比都将优于它。

通过上述理论分析可知,本文方法通过在红外系统单帧成帧时间内,对红外探测器进行不同积分时间下的多次读出,经子帧数据融合后,产生新的单帧图像,等效地扩大了探测器积分电容的电荷存储容量,等效地增加了积分时间,同时等效地拓展了探测器响应动态范围,获得了更多的原始场景图像信息,并且较为充分地发挥了具有较高帧频输出能力探测器的性能。此外,还可以改善红外成像系统输出信号的信噪比及表征探测灵敏度的关键指标 NETD。本文方法适用于所有观察静止场景以及固定成像系统;对于慢速运动场景以及慢速运动成像系统,考虑到成像子帧帧频很高,相邻子帧中的场景几乎没有位移,本文方法同样能够发挥良好的处理效果;对于快速运动场景以及快速运动成像系统,需要考虑每一个超帧周期内相邻子帧存在相对位移的影响,才能较好地发挥本文方法的效果。

3 试验结果与分析

采用制冷型长波 640×512 红外焦平面探测器构建的成像系统 16 bit 真实图像序列进行仿真试验。该型探测器最高输出帧频在 200 Hz 以上。分别采用成像系统观察均匀黑体及实物场景的红外图像进行仿真试验,并约定最终输出图像仍为 16 bit。在进行每一类红外图像的采集时,除了每帧图像的积分时间设置不同,其余试验条件均相同。

3.1 均匀黑体情况下本文方法试验结果与分析

在积分时间依次设定为 16、112、240、368、496、624 和 720 μs 的情况下,采用红外系统分别观察 20、35 $^{\circ}\text{C}$ 均匀黑体,并在 7 个不同积分时间采集 7 帧原始图像,再采用该积分对应的事先标定好的非均匀性校正参数对原始红外图像进行实时校正,校正后的 7 个子帧图像作为一个超帧周期内的 7 个子帧,按照相同权重将这 7 个子帧进行直接像元灰度累加,创建新图像帧,并将新图像帧线性映射到 16 bit 灰度空间,得到超帧处理后

的图像,完成一个超帧处理过程。对进行超帧处理前后的子帧以及新图像单帧进行比较可知,除了新图像单帧在亮度上有少许变化外,较难看出处理后的效果。为了客观定量地评价均匀图像超帧处理的效果,根据国标中红外成像系统 NETD 的计算方法对 7 个积分时间下的 20 $^{\circ}\text{C}$ 和 35 $^{\circ}\text{C}$ 均匀黑体的多组图像进行计算,同时对 7 个子帧按照相同权重超帧处理后的单帧图像进行计算,得到完成超帧处理后等效系统的 NETD 和各单帧等效系统的 NETD,如表 1 所示^[19]。

表 1 超帧处理前后等效系统的 NETD 对比

Tab.1 NETD comparison of equivalent system before and after superframing processing

图像类型	积分时间/ μs						
	16	112	240	368	496	624	720
NETD/mK							
单帧图像	135.6	29.0	17.8	13.9	11.9	10.5	9.8
不同积分时间 7 帧子帧超帧后产生新单帧图像				5.6			

由表可见,本文方法产生的新单帧图像等效对应的红外系统的 NETD 好于任何一个子帧图像等效对应的红外系统的 NETD,这说明,本文算法在一定程度上能够等效提升红外成像系统的探测灵敏度。此外,考虑到 NETD 与 SNR 的关系可知,本文方法能够有效改善成像系统的输出信号信噪比。

3.2 实物场景下本文处理方法的试验结果与分析

同样采用上述 7 个积分时间(Integration Time,INT)进行试验,采集 7 帧原始图像,并采用相应积分时间下的非均匀性校正参数对原始图像进行实时校正,将完成校正的 7 帧子帧作为一个超帧周期内的 7 个子帧,然后将 7 个子帧对应像元灰度依次进行累加,再去除无效灰度级的灰度拉伸及映射,最终得到处理后的新单帧图像。限于文章篇幅,选取 720、368 和 16 μs 图像序列,如图 4(a)、(d)、(g)所示,图 4(b)、(e)、(h)分别为这 3 个不同积分时间子帧图像去除无效灰度级的灰度拉伸及映射结果,图 4(c)、(f)、(i)为图 4(b)、(e)、(h)的局部感兴趣区域的放大图像。图 4(j)为 7 个子帧按照相同权重直接累加超帧后的结

果,图 4(k)为图 4(j)去除无效灰度级的灰度拉伸及映射的结果,图 4(l)为图 4(k)的局部感兴趣区域的放大图像。图 4(m)为积分时间由长到短的 7 个子帧按照 7:1:1:1:3:1:1 的权重直接累加超帧后的结果,图 4(n)为图 4(m)去除无效灰度级的灰度拉伸及映射结果,图 4(o)为图 4(n)的局部感兴趣区域放大图像。

此外,试验还选取了目前红外成像系统图像处理常用的直方图均衡、帧积分以及先对图像进行帧积分再进行直方图均衡等算法进行对比实验。限于篇幅,本文仅给出积分时间为 720 μs 和 16 μs 的图像,帧积分累积帧数为 7 帧,其中图 5(a)、(d)为直方图均衡算法处理效果,图 5(b)、(e)为帧积分处理效果,图 5(c)、(f)为先帧积分再进行直方图均衡处理的效果。

从图 4 中不难看出,对于未进行灰度拉伸的图像,由于其亮度差异较小不便于人眼观察,如图 4(a)、(d)、(g)、(j)和(m)所示,灰度拉升后,能够较好地将图像包含的不同灰度层次信息清晰显现。图 4 中积分时间长的子帧(b),能够捕获窗外温度较低物体辐射的红外信息,使得窗外房屋以及屋内的桌椅等温度相对较低的景物的灰度层次

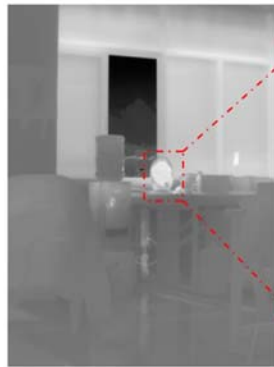
信息得以体现,但窗前热风机正面区域温度过高,图像饱和,这部分图像的有效细节缺失;对于积分时间较短的图 4(h),情况正好相反。从图中能看到窗前热风机内的发热片数量及形状,但对于温度较低的场景则未能捕获到有效信息。由图 4(k)可知,本文方法可同时保留场景中的高温景物信息以及低温景物信息,既探测到了窗外以及屋内低温场景的信息,同时也避免了窗前热风机正面高温区域饱和的情况,图像层次更加丰富,图像细节比任何一个子帧都要多,实现了大温差场景下的大动态范围探测及显示。同时,通过权值的设置,还能改善效果,譬如加权处理的图 4(n)整体观感上优于图 4(k),图像层次更为丰富,细节也较为清晰。通过对比图 5 中几种对比算法的处理结果可知,通过直方图均衡处理,图像的灰度

层次从观感上得到了丰富,但是图像场景信息并没有增加,而且由于算法自身的原因,还损失了一些细节信息;帧积分处理后的图像从观感上几乎没有变化;从图像上看,先帧积分再直方图均衡方法的效果与直接进行直方图均衡处理的结果相当。上述试验结果说明,本文方法能够在红外成像系统单帧成帧时间内等效拓展探测器响应动态范围,获取更多的原始场景图像信息,这一结果是直方图均衡、帧积分及其组合方法等常规算法所不具备的。

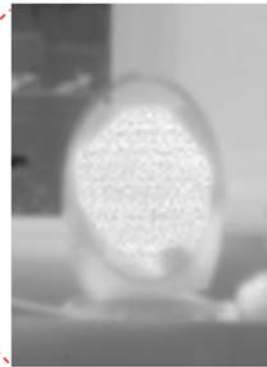
除了主观评价,本文还引入信息熵(Information Entropy, IE)对 7 个不同积分时间下的子帧、超帧后图像以及引入对比试验图像进行评价。信息熵越大表明图像信息越丰富,具体比较情况如表 2 所示^[20-21]。



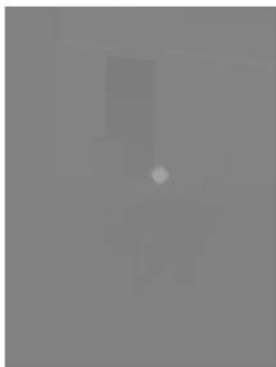
(a) 720 μs 原始图像
(a) 720 μs original image



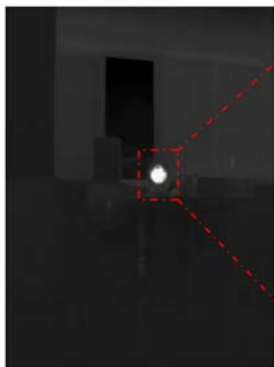
(b) 720 μs 灰度拉伸图像
(b) 720 μs gray stretch image



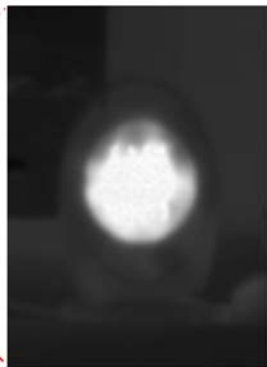
(c) 720 μs 灰度拉伸局部放大图像
(c) 720 μs gray stretch local enlarged image



(d) 368 μs 原始图像
(d) 368 μs original image



(e) 368 μs 灰度拉伸图像
(e) 368 μs gray stretch image



(f) 368 μs 灰度拉伸局部放大图像
(f) 368 μs gray stretch local enlarged image

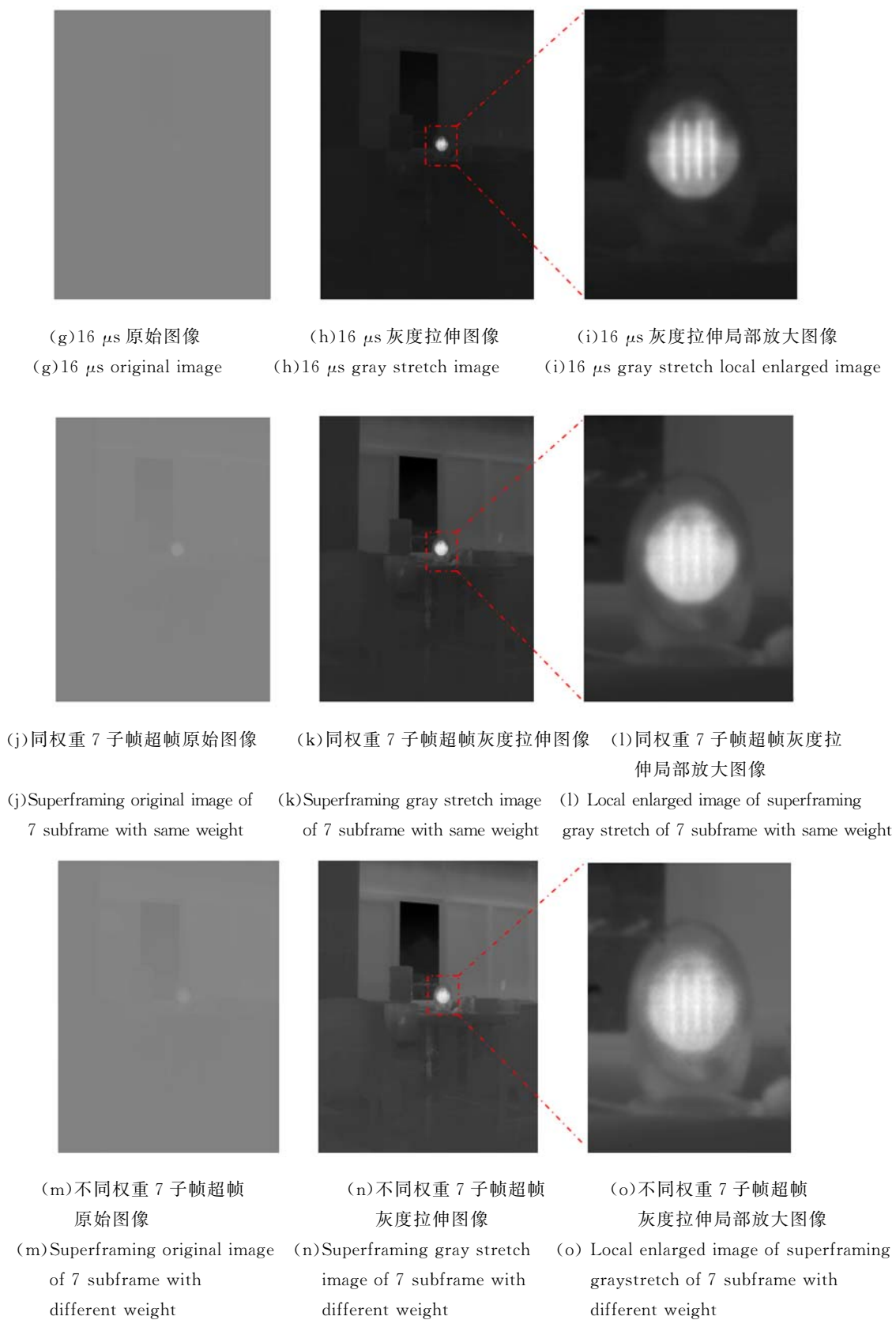


图 4 基于不同积分时间的红外图像超帧处理前后效果对比

Fig. 4 Comparison of effects before and after superframing processing of infrared image based on different integration times

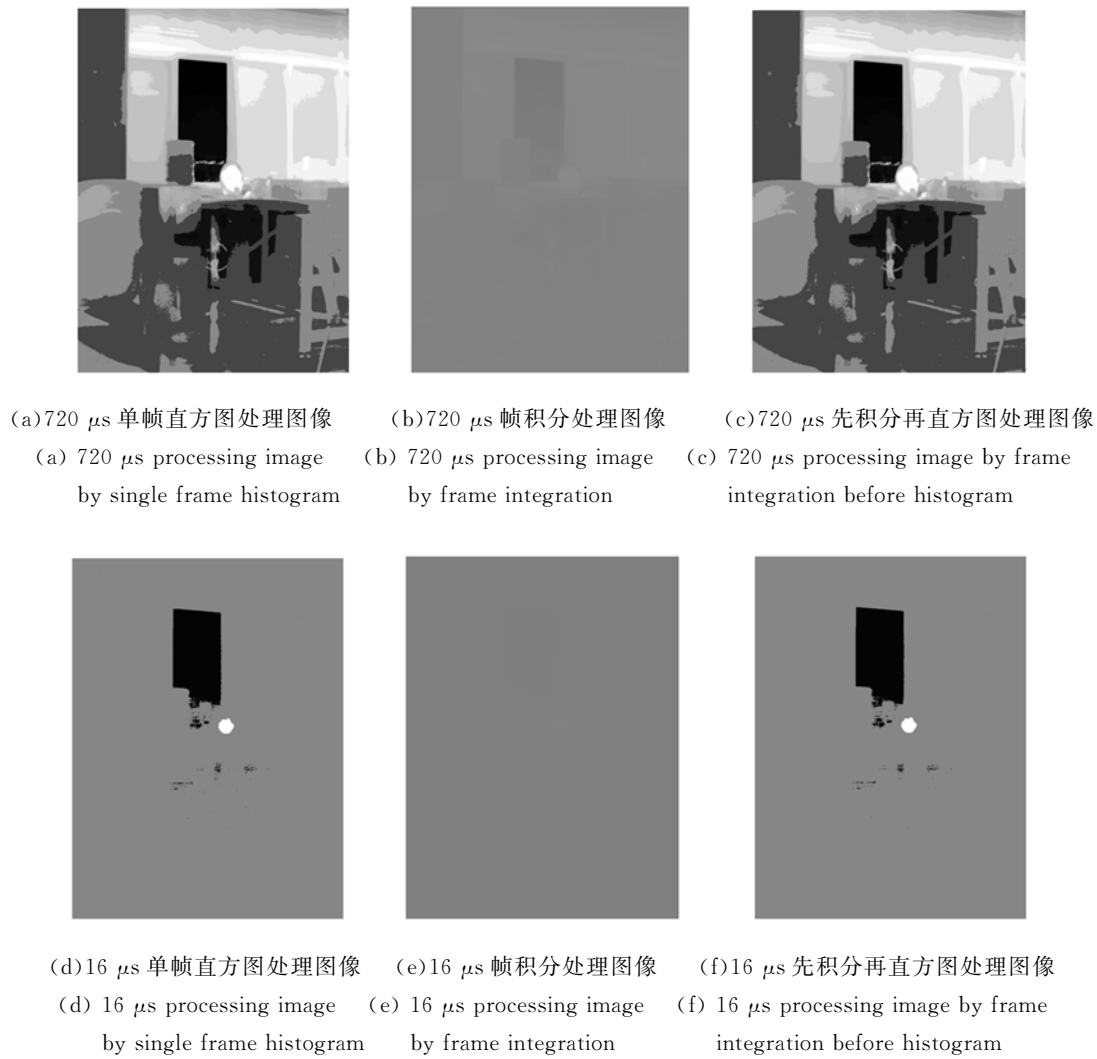


图 5 基于不同积分时间的红外图像其他处理算法效果对比

Fig. 5 Effects comparison of other processing methods of infrared image based on different integration times

表 2 本试验中各整幅图像的信息熵结果对比

Tab. 2 Comparison of information entropy results in this experiment

帧对应积分时间(μs)	图像状态				
	单帧	单帧拉伸映射	单帧直方图均衡	同积分 7 帧图像帧积分	先帧积分再直方图均衡
720	2.929 4	6.513 8	2.873 2	2.929 7	2.873 5
624	2.843 7	5.929 3	2.777 9	2.844 7	2.778 8
496	2.580 0	5.221 7	2.535 4	2.579 4	2.534 9
368	2.095 4	4.502 1	2.069 5	2.095 6	2.069 6
240	1.905 5	3.878 4	1.890 4	1.904 9	1.889 8
112	1.140 0	3.894 7	1.128 8	1.140 3	1.129 0
16	0.284 5	3.958 4	0.283 2	0.283 8	0.282 5
7 个子帧权重为 1:1:1:1:1:1:1	2.096 7	5.156 4	--	--	--
7 个子帧权重为 7:1:1:1:3:1:1	2.413 2	5.678 7	--	--	--

由表2可知,本文方法处理的新单帧图像的信息熵大于绝大多数单帧子帧的信息熵,同时优于直方图均衡、帧积分以及先对图像进行帧积分再进行直方图均衡处理等算法的大部分结果,说明图像的信息量得到了增加。对于少数积分时间较长单帧子帧信息熵大于本文方法处理结果,其原因在于积分时间较长图像的部分高温区域已经饱和,该区域图像出现了类似椒盐颗粒的现象,加之图像存在较超帧后单帧图像更大的噪声,会对信息熵的计算造成一定的影响。更重要的是,这些图像的高温场景区域已经饱和,丢失了图像的有效信息。类似地,尽管对于部分其他算法处理结果略大于本文处理方法,但这些图像并没能够有效改善原图像的显示效果,有的甚至还丢失了原始信息。

4 结 论

为了验证本文方法对于探测器响应动态范

围、成像系统输出图像信号信噪比和探测灵敏度的影响,本文针对均匀场景和实物场景两类真实红外图像序列分别进行实验,对均匀图像通过主观图像观察和图像 NETD 客观指标进行评价,对实物图像采用主观图像观察和图像信息熵客观指标进行评价,并且引入了直方图均衡、帧积分以及其组合算法的处理效果对比。实验结果表明:本文方法的使用提高了系统的 NETD,捕获了更多的场景原始图像信息,并且丰富了图像的灰度层次,而且没有导致图像的失真,同时增加了图像的信息熵,因此,通过本文方法的使用,能够等效拓展探测器响应动态范围,增加场景原始信息的捕获,提高成像系统输出信号信噪比以及探测灵敏度。

参考文献:

- [1] ZHANG F, XIE W F, MA G R, *et al.*. High dynamic range compression and detail enhancement of infrared images in the gradient domain[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 67:441-454.
- [2] LIU N, ZHU C G. Novel image detail enhancement technology for high dynamic range infrared detector [C]. *Proc. of SPIE*, 2014, 9301(9301J):1-2.
- [3] ZHANG J F, ZHANG ZH J, BO L. A novel spatial domain details enhancement and compression algorithm for high dynamic range infrared image [C]. *Proc. of SPIE*, 2013, 8878(8878B):1-2.
- [4] HONG W Q, YAO L B, JI R B, *et al.*. Infrared image superframing technique based on high-speed digital transmission circuit [C]. *Proc. of SPIE*, 2013, 8907(8907D):1-2.
- [5] 王刚, 陈永光, 杨锁昌, 等. 采用图像块对比特性的红外弱小目标检测[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5):1424-1433.
WANG G, CHEN Y G, YANG S CH, *et al.*. Detection of infrared dim small target based on image patch contrast[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5):1424-1433. (in Chinese)
- [6] 余毅, 常松涛, 王旻, 等. 宽动态范围红外测量系统
的快速非均匀性校正[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7):1932-1938.
YU Y, CHANG S T, WANG M, *et al.*. Fast non-uniformity correction for high dynamic infrared radiometric system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7):1932-1938. (in Chinese)
- [7] AUSTIN A, RICHARDS B K. Superframing scene dynamic range extension of infrared cameras [C]. *Proc. of SPIE*, 2004, 5612:199-200, 202-205.
- [8] RICHARDS A A, SOUZA S D. A novel NIR camera with extended dynamic range [C]. *Proc. of SPIE*, 2006, 6205(6205G):5-10.
- [9] YAO L B. Super-framing technique based on digital readout for infrared thermal image systems [C]. *Proc. of SPIE*, 2014, 9300(930003):3, 5-6.
- [10] 孙英恺. 基于 EMCCD 的光子计数成像方法及实验研究[D]. 南京:南京理工大学, 2013, 28-29.
SUN Y K. *The research of imaging method and experiment based on EMCCD photo counting* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and technology, 2013, 28-29. (in Chinese)
- [11] 李怀琼, 陈钱, 隋修宝, 等. 多帧累加平均技术在红外实时图像处理中的应用[J]. *激光与红外*, 2005, 35(12):978-979, 982.
LI H Q, CHEN Q, SUI X B, *et al.*. The tech-

- nique of the multi-frame image accumulation and equilibration with infrared thermal imaging system [J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(12):978-979, 982.
- [12] YANG H M, HUANG ZH H, CAI H Y, *et al.*. Novel real-time nonuniformity correction solution for infrared focal plane arrays based on S-curve model[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(7): 0770011-0770012.
- [13] YANG G CH, LI M L, RAO Y B, *et al.*. Detail-enhanced and brightness-adjusted exposure image fusion[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2015, 24(3):0330173-0330174.
- [14] 张仲瑜, 焦淑红. 多特征融合的红外舰船目标检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(S):29-33.
ZHANG ZH Y, JIAO SH H. Infrared ship target detection method based on multiple feature fusion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S):29-33. (in Chinese)
- [15] 周渝人, 耿爱辉, 张强, 等. 基于压缩感知的红外与可见光图像融合[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3):855-863.
ZHOU Y R, GENG A H, ZHANG Q, *et al.*. Fusion of infrared and visible images based on compression sensing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3):855-863. (in Chinese)
- [16] 肖来元, 陆书. 基于小波变换的视频帧积分算法研究[J]. *计算机工程与科学*, 2006, 28(3):47-48,52.
XIAO L Y, LU SH. Video frame integral algorithms for discrete wavelet transform[J]. *Computer Engineering & Science*, 2006, 28(3):47-48, 52. (in Chinese)
- [17] 王琳, 向健勇, 刘安. 红外图像增强在 CPLD 中的实时实现技术[J]. *红外技术*, 2006, 28(1):39-42.
WANG L, XIANG J Y, LIU A. Real-time infrared image enhancement technique in high density CPLD[J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(1): 39-42. (in Chinese)
- [18] 孙成明, 袁艳, 赵飞. 空间目标天基成像探测信噪比分析[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(5):1654-1659.
SUN CH M, YUAN Y, ZHAO F. Analysis of SNR for space-based imaging detection of space object [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1654-1659. (in Chinese)
- [19] GB/T 17444-2013, 红外焦平面阵列参数测试方法[S].
GB/T 17444-2013, Infrared focal plane array parameter test method[S]. (in Chinese)
- [20] HE W J, FENG W Y, PENG Y Y, *et al.*. Multi-level image fusion and enhancement for target detection[J]. *Optik*, 2015, 126(2015):1206.
- [21] 刘秀, 刘斌, 金伟其, 等. 一种红外图像细节增强和动态范围压缩处理算法[J]. *光学学报*, 2011, 31(s):s1005045.
LIU X, LIU B, JIN W Q, *et al.*. A new infrared image detail enhancement and dynamic range compression algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(s):s1005045;5-6.

作者简介:



洪闻青(1986—),男,安徽巢县人,博士研究生,工程师,2008年于北京航空航天大学获得学士学位、2011年于中国兵器科学研究院获得硕士学位,现为兵器科学研究院博士研究生,主要从事红外成像系统开发及图像处理的研究工作。E-mail: hongwenqing@aliyun.com

导师简介:



姚立斌(1968—),男,云南石屏人,博士,研究员,博士生导师,2006年于比利时鲁汶大学获得博士学位,主要从事红外电路与系统的研究工作。E-mail: libin.yao@ieee.org

导师简介:



姬荣斌(1967—),男,云南大理人,博士,研究员,博士生导师,1995年于厦门大学获得博士学位,主要从事红外器件与材料的研究工作。E-mail: 454091787@qq.com



刘传明(1977—),男,四川自贡人,硕士,研究员,2006年于北京理工大学获得硕士学位,主要从事红外成像系统的研发工作。E-mail: chrliu@gmail.com