文章编号：1672-8785(2018)05-0001-07

多电容非制冷红外探测器动态范围调整技术

魏新宇[1,2,3]　赵航斌[1,2,3]　张　宁[1,2,3]　孙德新[1,2,3,4*]

（1. 中国科学院上海技术物理研究所，上海　200083；
2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室，上海　200083；
3. 中国科学院大学，北京　100049；
4. 中国科学院上海技术物理研究所启东光电遥感中心，江苏 启东　226200）

摘　要：针对非制冷红外焦平面阵列(Uncooled Infrared Focal Plane Array，UIRFPA)对多目标成像时动态范围有限的问题，基于探测器特性提出了一种根据目标调整动态范围的方法。积分前，根据所选目标初始成像的灰度分布实时调整电容；同时逐点配置像元偏压，以适应动态范围并完成非均匀性校正(Non-Uniformity Correction，NUC)；依次实现局部目标的最佳成像效果。最后搭建了一种用于验证此方法可行性的红外成像系统。结果表明，本文方法实现了动态范围的实时调整，并获得了清晰的局部关键目标图像。由于解决了动态范围与目标不匹配的问题，该方法对非制冷红外成像系统在多目标场景下的拓展应用具有一定意义。

关键词：非制冷红外探测器；多目标；动态范围

中图分类号：TP732.2　**文献标志码：**A　**DOI：**10.3969/j.issn.1672-8785.2018.05.001

Dynamic Range Adjustment Technique of Multi-capacitor Uncooled Infrared Detector

WEI Xin-yu[1,2,3]，ZHAO Hang-bin[1,2,3]，ZHANG Ning[1,2,3]，SUN De-xin[1,2,3,4*]

(*1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;*
2. CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technologies, Shanghai 200083, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. Qidong Optoelectronic Remote Sensing Center, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Qidong 226200, China)

Abstract: To solve the dynamic range limitation of an Uncooled Infrared Focal Plane Array (UIRFPA) for imaging multiple targets, a method which can adjust dynamic range according to the target is proposed on the

收稿日期：2018-03-26

基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFC0803000)

作者简介：魏新宇(1992-)，男，山西太原人，硕士研究生，主要从事非制冷长波红外探测器驱动及信息获取与处理技术方面的研究。

*通讯作者：E-mail：sundexin@mail.sitp.ac.cn

basis of the characteristics of the detector. Before integration, the capacitance is adjusted in real time according to the grayscale distribution of the selected target in an initial image. At the same time, the pixel bias is configured point by point to adapt the dynamic range and Non-Uniformity Correction (NUC) is conducted. Then, the best imaging effect of the locality of the target is achieved successively. Finally, an infrared imaging system for verifying the feasibility of the method is built. The results show that the proposed method can realize the real-time adjustment of dynamic range and obtain clear local key target images. Because the problem of mismatch between dynamic range and target is solved, it is of great significance to the application of uncooled infrared imaging system in multi-target scenario.

Key words: uncooled infrared detector; multi-objective scenario; dynamic range

0 引言

微测辐射热计通常是指以热敏电阻作为探测器阵列敏感元来探测红外辐射的器件。它根据红外辐射的热效应引起敏感元电导率随温度变化的特性，以电信号的方式对红外辐射进行表征，因此属于非制冷型红外探测器。由于具有功耗小、成本低、体积小、使用便携等优点，微测辐射热计已经广泛应用于安防、夜视和搜救等领域。而在较为复杂的环境下，尤其是当场景中存在多种辐射强度目标时，目标与探测器动态范围的不匹配会大大影响成像质量，限制探测器的应用水平。

成像系统的动态范围反映了可探测目标能量强弱的范围[1]。若动态范围过大，则可探测到更多辐射强度的目标，但此时常常需要牺牲目标细节；若动态范围过小，部分目标则可能会超出动态范围而无法被探测到。在成像系统中，影响动态范围的因素主要包括积分电容大小和噪声水平等[2]。根据目标辐射强度选用合适的积分电容，同步微调动态范围，实时调整探测器的工作状态，使其保持较低的噪声水平，有助于获得更好的成像效果。

在通常情况下，非制冷红外系统工作时都稳定在单电容状态。由于动态范围在成像前就已确定，难以根据成像目标对其进行实时调整；或者调整后，系统状态会发生变化，噪声增大，非均匀性恶化，从而严重影响成像质量。

本文基于探测器的自身特点，在成像时根据局部目标灰度分布实时切换电容，调整动态范围；同时利用像元上集成的数模转换器(Digital-to-Analog Converter，DAC)对不同电容下的系统进行微调，扩展动态范围；并通过PID温度控制确保系统噪声始终维持在较低水平。

1 局部动态范围调整方法

1.1 微测辐射热计结构及探测器像元响应模型

微测辐射热计的读出电路输出采用非制冷红外探测器中广泛使用的电容跨阻放大器(Capacitive Transimpedance Amplifier，CTIA)结构[3]，如图1所示。

在偏压作用下，积分电流的表达式为[4]

$$I_{int}(t)=I_b-I_p(t)=\frac{V_{SK}-(V_{EB}-V_{EB_TH})}{R_b}-\frac{(V_{FID}-V_{FID_TH})}{R_{TH}(t)} \quad (1)$$

采样电压为

$$V_{out}(t)=V_{cons}-C_{int}^{-1}*\int_0^{T_{int}}\left[\frac{V_{SK}-(V_{EB}-V_{EB_TH})}{R_b}-\frac{(V_{FID}-V_{FID_TH})}{R_{TH}(t)}\right]dt \quad (2)$$

式中，$R_{TH}(t)$为热敏电阻，用于对目标红外辐射作出响应；R_b为偏置电阻；V_{SK}为固定偏置电压；$V_{DET}=0$；V_{FID}和V_{EB}为可调偏压。

若在积分时间T_{int}内，$R_{TH}(t)$不变，则可将式(2)进一步简化为

$$V_{out}(t)=\frac{(V_{FID}-V_{FID_TH})}{R_{TH}(t)}\times\left(\frac{T_{int}}{C_{int}}\right)+V_{cons}(1)-\frac{T_{int}}{C_{int}}\times\frac{V_{SK}-(V_{EB}-V_{EB_TH})}{R_b} \quad (3)$$

式中，影响V_{out}的自变量是，$R_{TH}(t)$与像元所接收的红外辐射能量x相关，而修改V_{FID}、T_{int}、

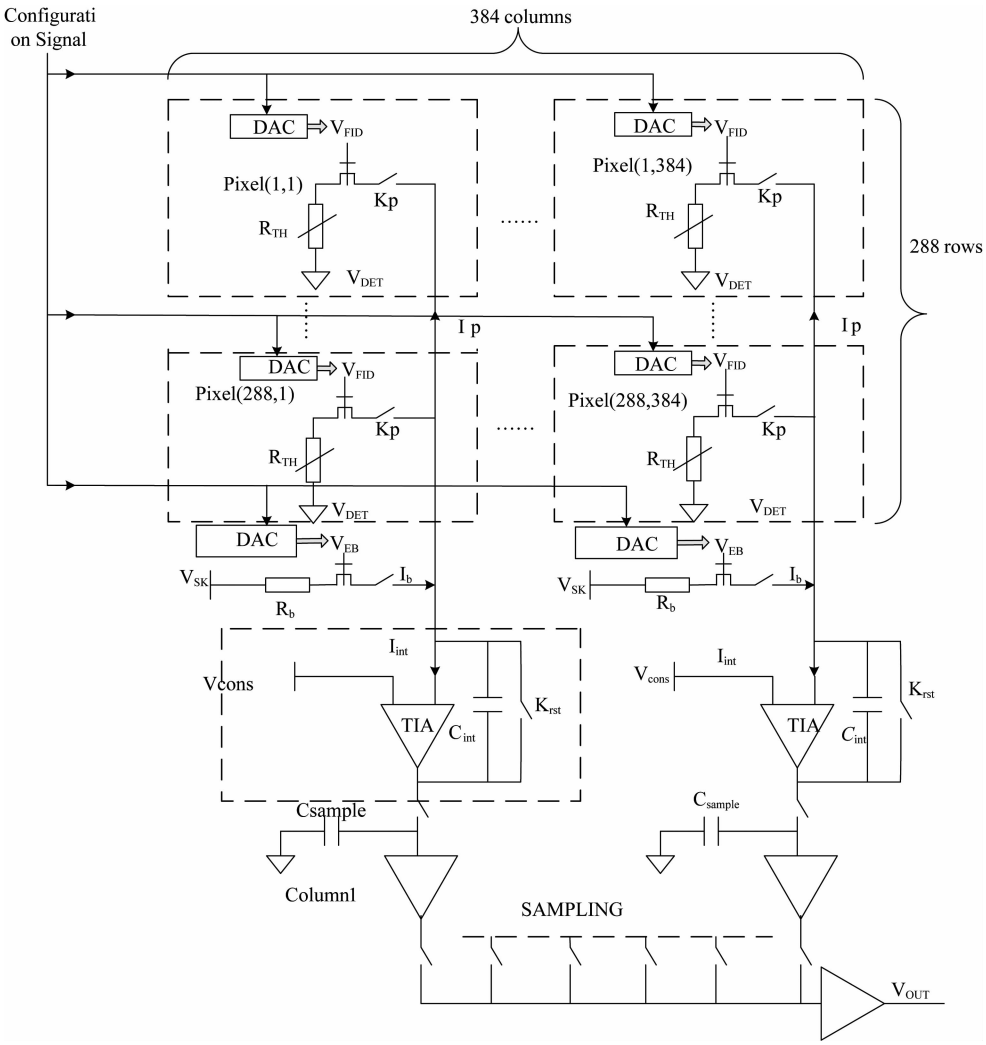


图 1　微测辐射热计的读出电路结构

C_{int}、V_{EB}等参数也会影响 V_{out}。因此可用以下线性模型来简化式(3)[5-6]：

$$f(x)=A_{ij}x+B_{ij}+n \tag{4}$$

式中，$f(x)$为像元输出电压；x 为像元输入辐射量；n 为噪声；A_{ij} 和 B_{ij} 分别为相应位置像元的放大系数和偏移量。其中 A_{ij} 正比于 T_{int} 和 C_{int}^{-1}，与 V_{FID} 正相关。

$$\frac{\partial B_{ij}}{\partial V_{EB}}=\frac{T_{int}}{C_{int}}\frac{1}{R_b} \tag{5}$$

因此在成像时，可通过配置积分电容 C_{int} 来选择合适的增益和调整动态范围。同时在电容确定后，配置偏压 V_{EB}，使像元输出呈线性增减，以确保目标响应落在当前系统的动态范围之内。

1.2　噪声模型分析

系统噪声的大小直接决定了动态范围的下限。因此，通过抑制噪声可以有效提高动态范围。微测辐射热计的噪声可分为空间噪声和时间噪声两种。其中，空间噪声主要是指成像阵列的非均匀性，其来源包括材料和制作工艺等方面[7]。同时，衬底温度不均匀也会进一步恶化其非均匀性。时间噪声的主要来源包括约翰逊噪声、$1/f$ 噪声和温度噪声[8]。系统总噪声为

$$\overline{V}_{total}^2=\overline{V}_j^2+\overline{V}_{1/f}^2+\overline{V}_t^2$$
$$=4kTR_{TH}(t)\Delta f+V_{FID}^2\times\frac{n}{\Delta f}+4\eta kT^2G\Delta f \tag{6}$$

式中，k 为玻尔兹曼常数；T 为探测器焦平面的温度；$R_{TH}(t)$为热敏电阻的阻值；Δf 为带

宽；n 为半导体材料的噪声常数；V_{FID} 为探测器像元上的偏压；η 与偏压 V_{FID} 正相关[8]；G 为像元与环境的热导。

由式(6)可知，Δf 对噪声具有双向贡献，难以定量分析，因此应依据实际的噪声表现和电路需求加以调整；V_{FID} 与 $1/f$ 噪声及温度噪声正相关，所以将偏压 V_{FID} 稳定保持在较低水平，有利于抑制噪声。由于约翰逊噪声和温度噪声都与 T 正相关，通过保持探测器焦平面低温稳定可以有效抑制时间噪声和扩展动态范围。

2 工程实现

2.1 系统设计

图 2 所示为红外系统的逻辑框架。基于探测器电容及偏压实时可调的特性，通过 FPGA 实现逻辑控制。探测器共有两路输出，其中温度信号经过调理电路后，与由 DAC 转换的温度设定信号一同被输入 ADN8834 温控模块。通过外置模拟 PID 网络控制 TEC 两端电流以完成对探测器电压的精准校正。信号电压经过调理电路并由 AD9240 量化为 14 bit 数字信号，然后通过千兆网接口被输出到上位机；同时，控制信号也由网口传输至 FPGA。FPGA 外挂的两片 NVSRAM 分别用于预存不同电容的原始非均匀性校正数据和预存数据失效时的临时校正数据。

系统上电时，FPGA 按默认配置设定最大电容成像，调用预存 NUC 数据进行校正，并设定原始的温控数值(283 K)。图像经网口进入上位机后，上位机通过对灰度图像进行边缘检测，将所选的目标区域作为后续调整动态范围的判断依据。当目标灰度分布过于集中时，降低电容，提高增益；通过缩小动态范围来扩展目标灰度和提高成像细节。若超过一定比例的目标灰度分布在动态范围上下限的附近，则配置电容和像元偏压，从而扩大探测器的动态范围。

2.2 逻辑实现

图 3 所示为探测器的驱动时序。每帧成像前，FPGA 通过 I/O 接口对探测器信号 SDA0 完成一次状态配置，包括电容、帧频、积分时间的设置。在每行积分前，FPGA 根据 NUC 数据以及上位机所提供的偏移量，通过 SDA0、SDA1、SDA2 串行接口对两个可调偏压进行设置。接着在 2Tline 时间后输出该行图像信息。

3 实验测试与分析

为了验证本文方法的可行性，我们对一种

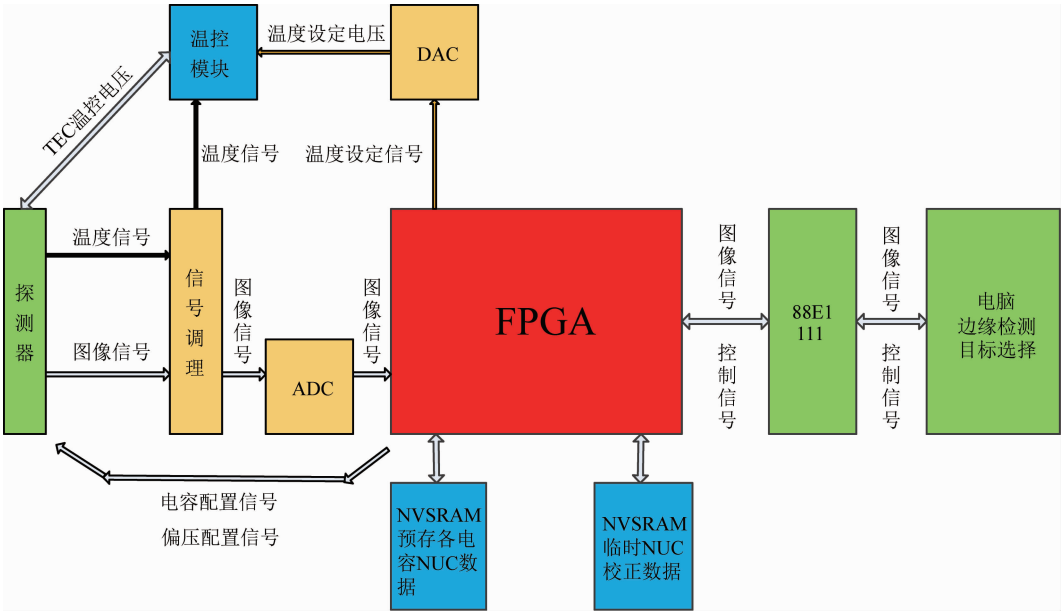


图 2 红外系统的逻辑框架

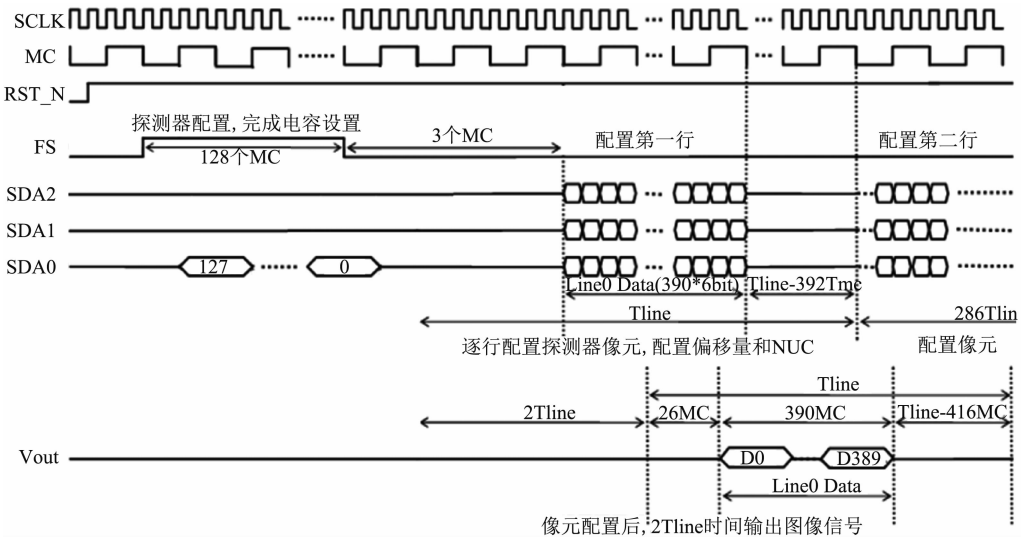


图 3 探测器的逻辑时序

非制冷长波红外成像系统进行测试。

3.1 电容切换及偏压调整对动态范围扩展的影响

首先验证调整电容以及通过 DAC 修改像元偏压对输出电压 V_{out} 的影响(结果见图 4)。

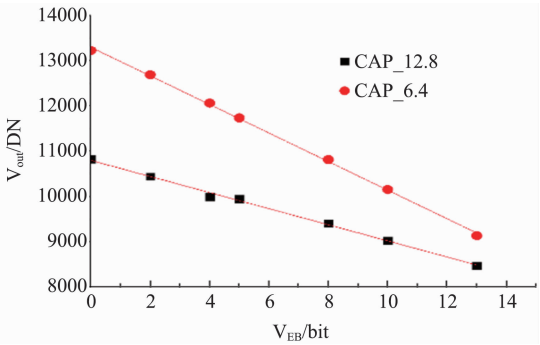


图 4 不同电容及偏压下的像元输出响应

测试条件如下：黑体的定标温度为 308 K，定标精度为 0.1 K；积分电容为 12.8 pf/6.4 pf；积分时间为 16 μs；TEC 的制冷温度为 270 K；V_{EB} 对应的电流为 112.5 μA。由式(4)可得：

$$\frac{\partial B_{ij}}{\partial V_{EB}}=\frac{T_{int}}{C_{int}}\frac{1}{R_b} \tag{7}$$

本文对测量数据进行了线性拟合。两种电容条件下用于表征拟合度的 Adj. R-Square 参数都高达 99.8%以上(见图 5 和图 6)。同时可以看出，不同电容所对应的增益系数之间具有明显差异。在 12.8 pf 电容条件下，DAC 输入每提高 1 bit，V_{out} 下降 177.54 LSB。在 6.4 pf 电容条件下，DAC 输入每提高 1 bit，V_{out} 下降 315.32 LSB。DAC 的单向可调步长为 4 bit。即理论上可通过配置 DAC 使系统额外获得 12.8 pf电容下 2752 LSB (6.4 pf 电容下 5045 LSB)所对应的动态范围。

Equation	y = a + b*x		
Weight	No Weighting		
Residual Sum of Squares	12372.15873		
Pearson's r	-0.99951		
Adj. R-Square	0.99882		
		Value	Standard Error
CAP6.4	Intercept	13297.04762	32.56487
	Slope	-315.31746	4.43152

图 5 6.4 pf 电容条件下的线性拟合数据

Equation	y = a + b*x		
Weight	No Weighting		
Residual Sum of Squares	11559.92857		
Pearson's r	-0.99855		
Adj. R-Square	0.99652		
		Value	Standard Error
CAP12.8	Intercept	10800.71429	31.47779
	Slope	-177.54762	4.28358

图 6 12.8 pf 电容条件下的线性拟合数据

3.2 焦平面温度和稳定性对噪声和非均匀性的抑制

系统噪声决定了成像分辨能力，是影响动态范围的重要因素之一。而焦平面的非均匀性需要通过 DAC 调整 V_{EB} 来加以校正，即占用 DAC 用于拓展动态范围的部分步长。因此，噪

声和非均匀性越小，可拓展的动态范围就越大。

本文在制冷和非制冷条件下对系统噪声和非均匀性进行了对比测试。测试条件如下：黑体的定标温度为 308 K，定标精度为 0.1 K；积分电容为 6.4 pf；积分时间为 16 μs；TEC 的制冷温度为 283 K；环境温度为 295 K。

在非制冷条件下，焦平面的温度处于不稳定状态，均方根噪声高达 8.32 LSB。除去坏点条件后，焦平面在非均匀性校正前后的非均匀性分别为 9.24%和 3.27%。而在 283 K 制冷条件下，焦平面的温度电压稳定在设点电压±0.01 V（见图 7），均方根噪声仅为 1.92 LSB，校正前后的非均匀性分别为 4.46%和 0.92%。保证稳定的焦平面温度可以有效减小噪声和非均匀性，为动态范围的扩展提供更大的裕量。

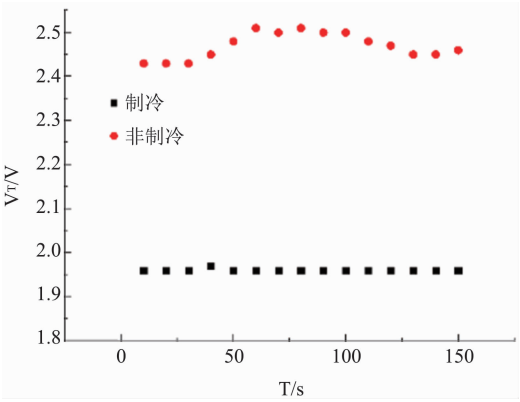


图 7 制冷和非制冷条件下的温度电压

图 8 所示为控温条件下的焦平面噪声和非均匀性结果。测试数据验证了之前对噪声模型的分析，即通过使用 TEC 制冷可以极大地降低噪声和非均匀性。同时，在 TEC 制冷能力的范围内，焦平面的温度越低，对噪声和非均匀性的抑制效果越好。

3.3 成像效果

测试条件如下：积分电容为 12.8 pf/6.4 pf、积分时间为 16 μs、TEC 的制冷温度为 283 K、外部环境温度为 295 K。我们在此条件下检验逐目标动态范围适应的成像效果。目标分别为人手（约 310 K）和电烙铁（约 670 K）。系统先通过最大电容对目标进行了成像，然后

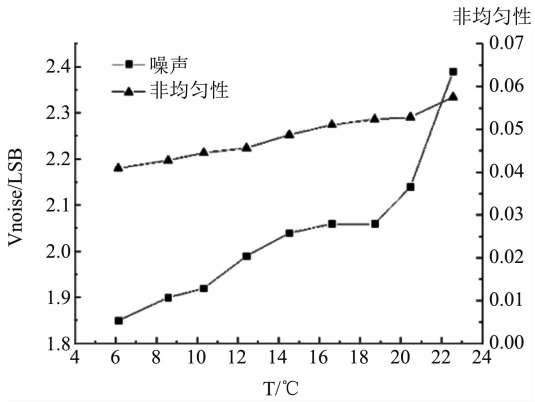
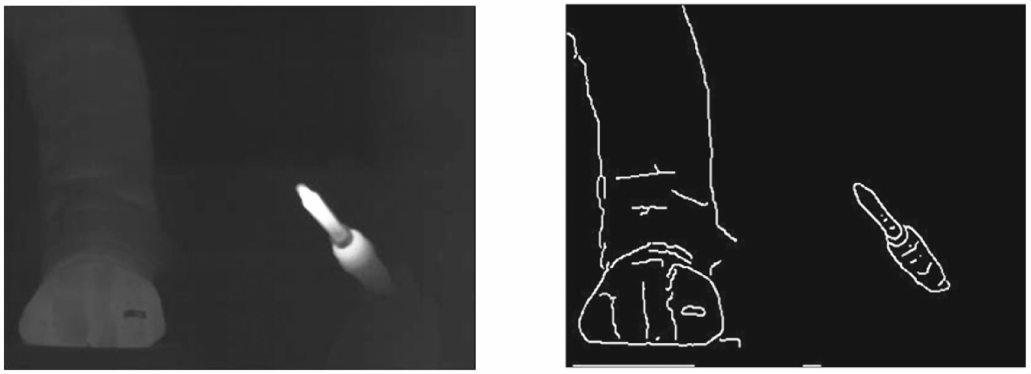


图 8 不同温度制冷下的噪声和非均匀性（6.4 pf）

由 canny 算子边缘检测得到了图 9 所示的区域。图 10(b)所示为左侧目标的灰度分布。可以看出，在当前电容下，目标在 20～40 灰度阶附近高度集中，仅占整个动态范围的 8%左右，导致目标细节较少。根据此目标占系统动态范围的比例，系统将成像电容切换为最小的 6.4 pf，得到了图 10(c)和图 10 (d)所示的成像结果及灰度分布。目标所对应的灰度层次明显增加，系统当前的动态范围对左侧目标的成像效果最佳，左侧目标的动态范围适应过程结束。图 11(b)所示为右侧目标的原始灰度分布。当积分电容最大时，仍有 121 个像素分布在灰度阈值上限，即有部分区域过曝。为获得过曝区域的信息，配置偏压，降低整个焦平面输出，使系统的动态范围向更高方向移动（结果见图 11(c)和图 11 (d)）。DAC 降低 5 个步长的相应偏压后，分布在灰度阈值上限的像素降至 1 个。此时，右侧目标过曝区域获得了较好的成像效果，右侧目标的动态范围适应过程结束。结果表明，与原始图像相比，两个目标都获得了更多的信息。

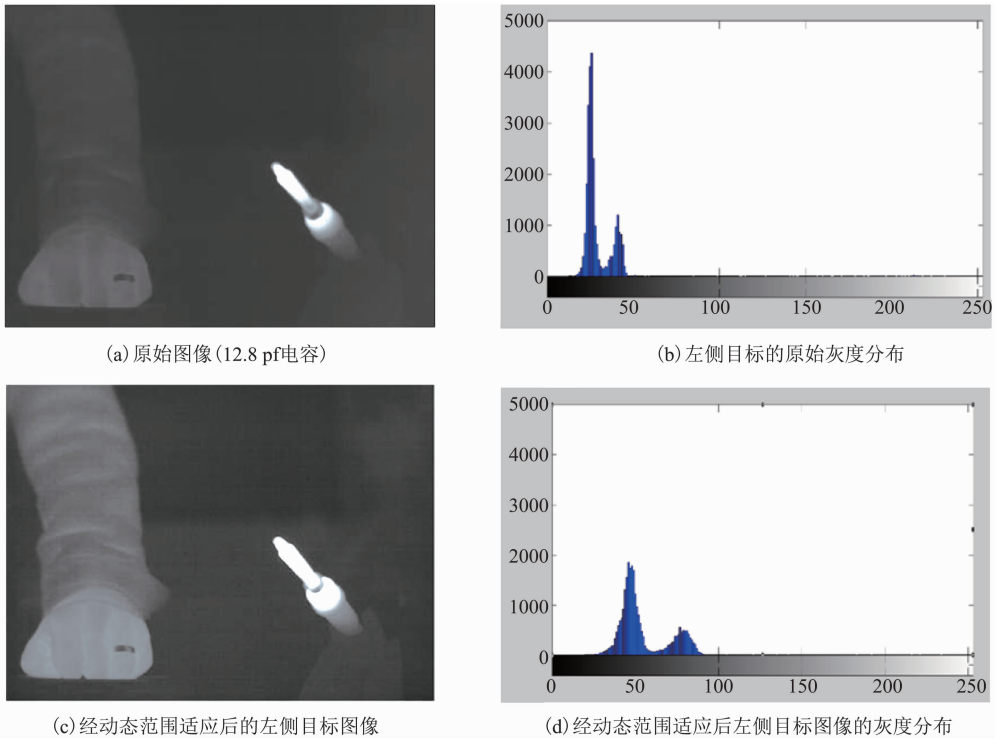
4 结束语

本文基于非制冷红外探测器自身电容及偏压实时可调的特点，针对场景中存在多个目标的情况，提出了一种以目标的灰度分布作为调整依据逐目标适应动态范围的方法，并设计了一种用于验证其可行性的红外成像系统。结果表明，该方法对于提高局部成像细节具有一定



(a) 原始图像(12.8 pf电容)　　(b) 经canny算子处理后的图像

图 9 获得目标边界



(a) 原始图像(12.8 pf电容)　　(b) 左侧目标的原始灰度分布

(c) 经动态范围适应后的左侧目标图像　　(d) 经动态范围适应后左侧目标图像的灰度分布

图 10 左侧目标的动态范围适应过程

作用。传统的红外系统具有单电容成像、动态范围受限等特点，而本文方法则可针对不同目标切换积分电容，逐点调整像元偏压以适应动态范围；同时依靠 PID 完成温度控制，从而有效减小噪声及非均匀性。因此，与一般成像方式相比，本文方法可获得相关目标更多的细节信息。该方法对非制冷红外成像系统在多目标场景下的拓展应用具有一定意义。

参考文献

[1] 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.

[2] 马娜. 动态范围自适应红外焦平面读出电路的设计 [D]. 成都：电子科技大学，2011.

[3] 隋修宝. 非制冷凝视热像仪成像理论以及关键技术研究 [D]. 南京：南京理工大学，2009.

[4] 张宁，柴孟阳，赵航斌，等. 非制冷红外探测器片上偏压逐点非均匀性校正方法 [J]. **红外技术**，2017，**39**(8)：682-687.

[5] Seribner D A，Sakady K A. Nonuniformity Correction for Stating IR Focal Plane Arrays Using

(下转第 30 页)