

场景自适应的红外焦平面成像系统灰度超分辨技术

贺明^{1,2,3}, 王亚弟¹, 王新赛^{2,3}, 路建方^{2,3}, 李志军²

(1. 信息工程大学电子技术学院, 河南 郑州 450052; 2. 防空兵学院, 河南 郑州 450052;
3. 上海蓝剑科技发展有限公司, 上海 201821)

摘要: 针对目前红外焦平面成像系统在观察目标、特别是弱小目标时, 灰度分辨率不足的问题, 提出了一种基于场景特性自适应的成像灰度超分辨技术。详细介绍了通过自适应调节红外焦平面成像系统中信号采样范围来进行成像灰度超分辨的方法, 包括 3 个方面的内容: 从图像中提取场景有效灰度范围, 获取超分辨调整依据; 结合基于 LMS 的自适应滤波算法, 对调节依据进行滤波预测后给出调节值; 利用调节值分解设置超分辨电路参数, 完成针对观察目标的灰度超分辨。最后, 对整体方案进行了实验验证。通过在红外焦平面系统中实验证明了场景自适应的成像灰度超分辨方法的可行性, 并获得了很好的效果, 灰度分辨率有很大提高, 经过红外焦平面成像系统综合测试仪测试比较 MRTD 值可以提高一倍以上。

关键词: 场景自适应; 灰度超分辨; 红外焦平面; 自适应滤波算法

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2138-05

Adaptive scene-based gray super-resolution technology of infrared focal plane imaging system

He Ming^{1,2,3}, Wang Yadi¹, Wang Xinsai^{2,3}, Lu Jianfang^{2,3}, Li Zhijun²

(1. Institute of Electronic Technology, Information Engineering University of the PLA, Zhengzhou 450052, China;
2. Air Defense Forces Academy, Zhengzhou 450052, China;
3. Shanghai Lanjian Science & Technology Development Co., Ltd., Shanghai 201821, China)

Abstract: When the IR imaging system observing the target, especially small target, gray resolution is not enough. In this paper, a gray super-resolution technology based on adaptive scene characteristic was proposed. The description on method of imaging super-resolution was given by adjusting the ranges of imaging signals on infrared focal plane imaging system in details. The three contents were as follows: extracting the gray characteristic of the scene, analyzing gray characteristic of scene to get the adjusting witness for super-resolution adjusting; combined with adaptive filtering algorithm based on LMS to give the adjusting parameters after filtering on adjust witness; completing gray super-resolution by controlling the parameters in super-resolution circuit. At last, the total scheme was validated with experiment. The experiment in infrared focal plane array imaging system has proved the feasibility of this method, and the imaging quality is improved evidently. Gray resolution is improved greatly. The system MRTD can be improved more than one times in the test.

收稿日期: 2013-11-10; 修订日期: 2013-12-20

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题(2011BAD21B03)

作者简介: 贺明(1981-), 男, 博士生, 主要从事红外成像与识别系统方面的研究。Email: ming8797@gmail.com

导师简介: 王亚弟(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事红外成像和人工智能方面的研究。Email: yadiwi@vip.371.net

0 引言

红外热成像设备是一种将红外热辐射转化为视觉图像的设备。它利用场景内物体本身各部分热辐射的差异获取物体图像的细节。由于具有隐蔽性好、抗干扰能力强、可全天候工作等优点,在军事、商业、医疗、航空等领域发挥着越来越大的作用。红外焦平面是红外热像仪的核心部分,在很大程度上决定了红外热像仪的性能。

红外焦平面成像系统的最小可分辨温差(MRTD)是衡量系统性能的一个重要指标。MRTD表征了系统可分辨红外辐射变化的范围。系统的MRTD越小,能探测到的目标信息就越多,对目标的分辨和识别就越有利。特别是对于探测红外温差较小或者目标较小的红外焦平面成像系统,拥有较好的MRTD显得尤为重要。因此,提高红外焦平面成像系统的MRTD性能具有非常重要的意义^[1-3]。

1 技术原理

目前,红外焦平面成像系统得到充分的发展,在军事和民用领域得到广泛的应用,但是对红外焦平面的灰度分辨率自动优化的研究几乎没有,文中根据对红外焦平面成像电路的实践配合算法处理,提出了利用红外焦平面成像电路结合算法分析反馈实现了对场景自适应的红外成像灰度超分辨技术。

该技术以红外焦平面接受到场景辐射量作为依据,根据实时场景辐射量自适应地调节接受焦平面输出的模数转换芯片(ADC)输入量程,实现对系统灰度分辨的自适应调整,从而获得一个针对场景的实时高分辨灰度动态范围。该方法没有增加任何装置,而是利用目前ADC芯片输入量程固定,且对系统分辨率影响较大的特点,通过调节ADC芯片的输入量程来实现最优化的场景温差分辨率。其基本原理如图1所示。

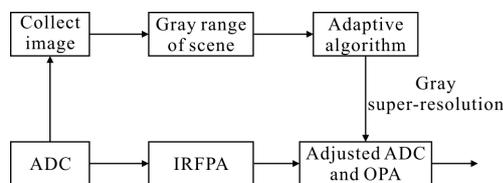


图1 原理框图

Fig.1 Principle of technology

该技术采用根据场景辐射量自适应调节方式,不需要人工设置,有效提高了对场景中目标的温差分辨率,同时降低背景干扰,增加了弱小目标的探测距离。

2 技术实现

该技术主要分为以下四步来实现。

(1) 基于场景直方图统计的超分辨区间的获取

由于系统要不断地调整模数转换器的转换区间和信号放大器的放大倍数,因此反馈的调节量十分关键,该技术主要以获得场景有效辐射量为反馈量,根据观察不同场景辐射量对焦平面输出信号进行选择增益处理。文中采用基于场景直方图统计的方法,获得场景所处的焦平面原始信号的分布区间,然后利用选择场景分布区间进行超分辨处理。

(2) 超分辨灰度区间预测算法

选择最优的场景灰度区间预测算法可以提前知道场景灰度的变化趋势,使需要超分辨的灰度区间更合理,超分辨的效果最佳。提出采用LMS滤波算法^[4],可以有效地预测灰度的变化,减小噪声影响。

(3) 超分辨硬件构架

在得到场景灰度区间以后,计算出场景灰度在焦平面输出信号中的分布,采用高精度的放大电路对焦平面输出信号中的目标分布区间进行截取放大,输出到模数转换器转换成数字信号,从硬件上实现了场景实时灰度超分辨技术。

(4) 超分辨图像的非均匀性校正算法

由于超分辨后焦平面输出图像灰度变化会影响到图像非均匀性变化,传统的两点校正无法满足需求,必须使用场景自适应非均匀性校正算法,算法根据场景变化计算图像非均匀性,实时对超分辨图像进行补偿。

2.1 场景灰度区域的提取

在红外焦平面成像系统实际应用中,主要关心图像中的目标,而根据红外图像的特点,目标灰度区域往往集中在图像直方图中比较狭窄的中间区域内,所以,在进行图像场景灰度区域提取时,文中采用直方图截取的方式,分别在直方图中搜索最大和最小灰度值作为灰度截取位置,最大灰度值和最小灰度值包含的灰度区间就是场景区域的灰度分

布,表达式为:

$$R_{\text{gray}} = \begin{cases} \min_{\text{gray}}, \sum_{i=1}^n h_i < \text{sum} * 3\% \\ \max_{\text{gray}}, \sum_{i=1}^n h_{256-i} < \text{sum} * 3\% \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_{gray} 为场景灰度范围; \max_{gray} 为直方图最大值方向的 3% 像素截取灰度; \min_{gray} 为直方图最小值方向的 3% 像素截取灰度; h_i 为图像直方图。该提取方式可以用于较为复杂的场景。

该方法的优点是针对目标的强度变化选择系统超分辨率灰度区间,分离了图像奇异点的影响,又兼顾了背景中的有效信息。具体实施时,不需要很高的精度,因而可以减少系统的计算量。

2.2 超分辨参数的算法实现

在该技术中,超分辨依据是焦平面探测场景的灰度变化,基本原理是将获得的场景灰度区间换算成焦平面输入电压范围,通过输入有效电压范围调整接受信号端的运放和减直电路,剪掉场景灰度区间最低点的无效电平,然后对剩余部分信号放大到模数转换满幅的范围。其中,结合了 LMS 自适应滤波的方法^[5],一是可以预测场景灰度区间范围,让需要超分辨的场景灰度更加精确,二是可以滤掉一些不必要的干扰,有利于每帧图像超分辨平缓过度,使系统工作更加稳定可靠。

2.3 超分辨的硬件构架

在前面理论研究的基础上,采用了一种双 ADC 模数转换器的硬件架构方式进行实现,其原理见图 2,主要由两个高精度的 ADC、探测器、超分辨率成像处理系统等构成。探测器对目标场景成像后将图像分成两路输入到高速模数转换器件,一路固定动态范围转换到图像处理系统中分析,提取场景灰度范围,求出灰度超分辨参数;另一路利用上一路求取的灰度超分辨参数调节运放系数和模数转

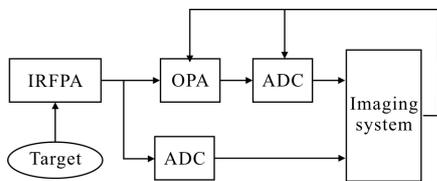


图 2 超分辨技术硬件架构

Fig.2 Super-resolution technology hardware architecture

换的基准,转换完数据后送入后续图像处理系统做进一步校正等处理,这样就完成基于场景分析的灰度超分辨技术。整个超分辨硬件两部分互不影响独立运行,结构简单,可以满足小型化、低功耗设计。

2.4 灰度超分辨后图像的非均匀性校正算法

通常采用线性模型^[6]表示红外焦平面的响应模型,它可以写为:

$$y = A_{ij}x + B_{ij} + v \quad (2)$$

式中: A_{ij} 和 B_{ij} 分别表示坐标 (i,j) 为像元的增益和偏置量; x 为该像元的输入辐射量; y 为像元输出灰度; v 为高斯白噪声。经过文中灰度超分辨后,由于成像灰度始终保持最大化,导致非均匀性中的加性噪声 B_{ij} 不停发生变化,增益 A_{ij} 不变。

因此,针对灰度超分辨对系统非均匀性的影响,提出了结合增益定标校正的校正法,采用一种双边滤波直方图均衡红外焦平面自适应校正算法,突破传统自适应校正算法,引入中值直方图均衡思想,对探测元邻域进行时域直方图中值均衡,从而校正了由于焦平面非均匀性引起邻域像素灰度差异,达到了消除焦平面非均匀性目的。另外为了避免由于图像静止及边缘像素引起的目标边缘退化和伪像,在直方图均衡中加入双边滤波机制,保护了目标细节,抑制了目标边缘的退化和伪像^[7-8]。

$$h(y) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{h_{ij}(y)w_s(i,j)w_r(i,j)}{w_s(i,j)w_r(i,j)} \quad (3)$$

$$w_s(i,j) = e^{-\frac{|i-ki^2+li-l^2|}{2\sigma_s}} \quad (4)$$

$$w_r(i,j) = e^{-\frac{|\lg(i,i)-\lg(k,l)|^2}{2\sigma_r}} \quad (5)$$

式中: $g(i,j)$ 为第 (i,j) 像元的灰度; $g(k,l)$ 为中心点为 (k,l) 像元的灰度; y 为直方图; $h(y)$ 为中值直方图; $h_{ij}(y)$ 为第 (i,j) 个邻域像元直方图; s 为中心点为 (k,l) 的邻域空间; $w_r(i,j)$ 为灰度相似度因子,随着灰度差的增大而减小; $w_s(i,j)$ 为空间邻近度因子,随着与中心点之间欧几里德距离的增加而减小。在图像平缓的区域,邻域内灰度相差不大,双边滤波转化为高斯低通滤波器;在灰度突变的区域,滤波器利用边缘像元附近灰度值相近像元直方图平均替代原值。因此,双边滤波器既平滑了直方图,又保持了图像边缘点的中值直方图。

3 评价和验证

3.1 最小可分辨温差(MRTD)^[9-10]

设测量目标温度高于背景温度时为正温差 ΔT_1 , 目标温度低于背景温度时为负温差 ΔT_2 , 取其绝对值的平均值, 并考虑到准直仪透射比及目标发生器的发射率校正, MRTD 表达式为:

$$\text{MRTD}(f) = (|\Delta T_1| + |\Delta T_2|) \frac{\phi}{2} \quad (6)$$

式中: ϕ 为仪器常数, 与仪器本身的调制传递函数、透射比及目标发生器的发射率有关。

3.2 实验结果与分析

为验证超分辨的性能, 在自主研发的非制冷红外焦平面灰度超分辨成像仪(探测器氧化钒, 镜头孔径 75 mm/f1.0, 焦平面像素数 320×240, 像元尺寸 25 μm , 工作波段 8~14 μm , NETD 为 50 mK 以下, 成像帧频为 50 帧/s)中实验。测试设备: 以色列 opgal 红外成像综合测试仪, 测试靶面尺寸 0.2 周。

通过图 3(图 (a)、(c)为原始图像, (b)、(d)为文中算法校正后的图像)对灰度超分辨后不同场景的

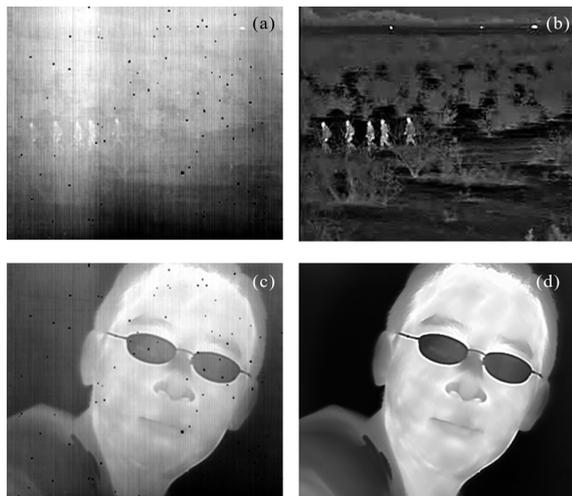


图 3 算法在不同场景下的校正效果

Fig.3 Performance algorithms in different scenes

校正效果分析可以看出, 文中结合双边滤波的中值直方图均衡校正算法对各种场景具有很强的自适应性, 并且收敛速度较快(通常在开机后 100 帧内收敛), 同时一定程度上提高了目标性噪比, 起到增强图像的作用。

图 4 为采用超分辨技术后测试 MRTD 对比, 为

了验证灰度超分辨技术对高温和低温靶面的响应效果, 分别进行两组实验, 并对实验结果进行对比和分析。其中图(a1)、(a2)是正常灰度显示的图像, 图(b1)、(b2)是采用文中灰度超分辨技术的图像, 靶标实际温差 100mK, 对比两组图像可以看出: 无超分辨成像时, 在辐射较弱的情况下, 获得的图像效果较差, 甚至很难分辨, 探测器的灵敏度没有完全发挥, 测得 MRTD 为 200mK。采用灰度超分辨技术成像时, 图像质量有明显的改善, MRTD 测得 100 mK 时靶标仍然清晰可辨, 有继续提升的潜力, 相对于普通成像, MRTD 提升将近一倍以上。同时对比图 4(a1)、(b1)与(a2)、(b2)两组不同温度靶标成像可以看出, 文中提出的灰度超分辨技术成像技术观察不同温度的目标具有很强的自适应性。

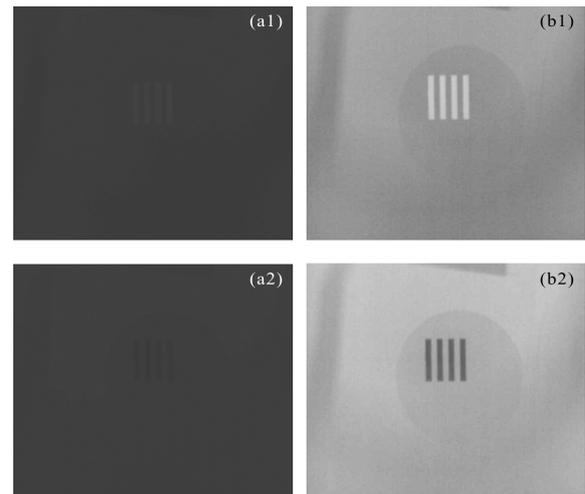


图 4 灰度超分辨前后测试 MRTD 对比

Fig.4 Gray super-resolution MRTD test

4 结论

针对目前红外焦平面成像系统在观察目标、特别是弱小目标时, 灰度分辨率不足的问题, 提出了一种基于目标特性自适应的成像灰度超分辨技术。通过实验分析验证: 文中提出的通过自适应调节系统中红外焦平面成像信号采样范围的工作方式进行灰度超分辨的方法是可行的, 可以较大提高系统对弱目标的灰度分辨, 从而获得更清晰的图像, 经过 MRTD 测试证明该方法实用有效, 对于该技术的工程应用, 算法实现复杂度是一个壁垒, 下一步工作的重点主要集中在优化算法减少实现复杂度。

参考文献:

- [1] Burrough E E, Moe G O, Leshner G W, et al. Automated MRTD using boundary contour system custom feature extractors and fuzzy ARTMAP[C]//SPIE, 1995, 2470: 274.
- [2] Austin A R, Shariff D. A novel NIR camera with extended dynamic range[C]//SPIE, 2006, 6205: 1-13.
- [3] Robert F C, Randa J H. Very wide dynamic range SWIR sensors for very low background applications [C]//SPIE, 1999, 3698: 757-765.
- [4] Zhang Jianli, Feng Rupeng. A daptive control method based on LMS algorithm applied the stabilization loop [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(6): 659-662. (in Chinese)
张建立, 冯如鹏. 基于 LMS 算法的自适应控制在稳定回路中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(6): 659-662.
- [5] Seribner D A, Sakady K A. Nonuniformity correction for stating IR focal plane arrays using scene-based techniques [C]//SPIE, 1990, 1308: 224-233.
- [6] Scribner D A. Adaptive retina-like preprocessing for imaging detector arrays [C]//Int Conf Neural Networks, ICNN, 1993: 1955-1960.
- [7] Harris J G, Chiang Y M. Nonuniformity correction of infrared image sequences using the constant-statistics constraint [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, 8(8): 1148-1151.
- [8] Delon J. Midway image equalization [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2004, 21(2): 119-134.
- [9] Tomasi C. Bilateral filtering for gray and color images [C]// Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision, 1998: 839-846.
- [10] Sun Junyue, Ma Dongmei. Intelligent MRTD testing for thermal imaging system using ANN[C]//SPIE, 2006, 6031: 2-6.