**文章编号:** 1672-8785(2015)04-0038-05

# 采用边缘 Gibbs 现象抑制的红外图像 POCS 重构算法

叶宗民<sup>1</sup> 田振杰<sup>2</sup> 王东阳<sup>1</sup>
(1.91404 部队 93 分队,河北秦皇岛 066001;
2.96531 部队 55 分队,河南焦作 454150)

摘 要: 在研究和分析凸集投影 (Projection Onto Convex Sets, POCS) 法的基础上,提出 了一种改进的图像超分辨率重构算法。该算法充分利用空域确定模型,通过平滑降噪 处理,经运动估计进行配准;突出数字图像细节信息的同时,有针对性地修改点扩散 函数 (Point Spread Function, PSF) 取值,通过有效抑制边缘 Gibbs 现象获得最佳质量的 高分辨率重构图像。对重构后的红外图像质量进行了定量评价。结果表明,图像质量 取得了预期的效果。该技术在红外目标识别与跟踪、红外侦察与反侦察、舰船红外目 标特性研究、高清数字图像处理、旧视频翻录和生物信息提取与识别等方面具有重要 的应用价值。

关键词: 边缘 Gibbs 现象; 凸集投影; 超分辨率; 红外图像

中图分类号: TN219 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.04.008

# POCS Reconfigurable Algorithm for Infrared Image by Inhibiting Marginal Gibbs Phenomenon

YE Zong-min<sup>1</sup>, TIAN Zhen-jie<sup>2</sup>, WANG Dong-yang<sup>1</sup>
(1. The 93 Department of 91404 Unit, Qinhuangdao 066001, China;
2. The 55 department of 96531 unit, Jiaozuo 454150, China )

**Abstract:** A modified reconfigurable super-resolution algorithm for infrared images is put forward on the basis of study and analysis of the Projection Onto Convex Sets (POCS) algorithm. The modified algorithm makes full use of the determination model in the spatial domain and implements registration by smoothing noise reduction processing after motion estimation. Because the Point Spread Function (PSF) is modified while the details of digital images are highlighted, reconfigurable high resolution images with optimal quality are obtained by inhibiting the margin Gibbs phenomenon. The quality of the reconfigured infrared image is evaluated quantitatively. The result shows that the expected result is obtained in image quality. This technology is of important application value to infrared target recognition and tracking, infrared reconnaissance and anti-reconnaissance, study of characteristics of infrared ships, processing of high-definition digital images, ripping of old video and extraction and recognition of biological information.

Key words: marginal Gibbs phenomenon; POCS; super-resolution; infrared image

**收稿日期**: 2015-02-09

作者简介:叶宗民(1982-),男,江苏溧水人,工程师,硕士研究生,主要研究方向为目标特性研究。 E-mail: ye\_luren\_2002@163.com

随着红外成像技术的发展, 红外成像制导 武器的威力越来越大, 当今世界各国都在竞相 发展红外成像制导反舰导弹。目标的红外特性 研究是提高红外成像制导武器性能的一个重要 手段, 舰船红外目标特性测量与应用方面的研 究与应用需求日益凸显。由于受红外焦平面器件 性能及光学系统的影响和受制作工艺及量化效 率等限制,目前高密度小像元尺寸的红外焦平 面器件的制作成本较高,而且存在一定困难。由 于国外对红外成像器件及技术进口到我国一直 进行限制, 红外目标特性测量分析的空间分辨 率核心指标与应用需求的差距较大。基于当前红 外成像测量设备水平的后期数据处理应用需求 明显,本文提出用水面舰船目标的超分辨率红外 图像重构方法,对红外探测设备采集的连续图 像数据进行二次加工处理, 然后通过数字图像 超分辨率重构技术获取更多有用的目标信息, 突出水面目标红外特征的分布细节,从而提高 水面目标实景仿真建模素材的质量。

提高目标红外图像的空间分辨率通常有两种技术方法:第一种是提升探测器的制造工艺,加大硬件投入。这种方法受经费和技术的限制,短期内很难实现。第二种是利用数字信号处理技术从一组混叠、模糊和含噪的低分辨率观测红外图像中重构出高分辨率的红外图像。本文采用第二种方法。对舰船目标的红外图像进行超分辨率重构,可为红外图像分割、识别和跟踪等应用提供数据支持,为舰船目标特性测量与分析、对抗仿真等方面应用提供素材,为目标识别、目标跟踪、红外侦察与反侦察、红外告警和红外干扰等方向的技术研究提供参考。

# 1 传统 POCS 算法

凸集的定义是: 设集合 *C* 中任意两点  $X_1, X_2 \in C,$ 若  $\lambda x_1 + (1 - \lambda) x_2 \in C$  ,其中  $\lambda \in (0,1)$ ,则该集合 *C* 为凸集。POCS 算子的定 义是: 若 *C* 为希尔伯特 (Hilbert) 空间 *H* 中的一 个闭合凸子集, *y* 是 *H* 中任意的一个元素,即  $y \in H$ ,那么必然存在唯一的一个元素  $x_0 \in C$ , 使得  $\inf_{x \in C} ||y - x|| = ||y - x_0|| = ||y - Px||$ , P为 POCS 算子 <sup>[3]</sup>。

对于探测设备获取的低分辨率观测图像, 利用模糊辨识技术识别 PSF 的类型和参数。设 模糊 PSF 为高斯函数,其表达式为<sup>[7]</sup>

$$h(x,y) = Ce^{-(x^2 + y^2)/2\sigma^2}, (x,y) \in S_h$$
(1)

式中,  $\sigma$  为标准差, 反映模糊的程度; h(x,y) 的 支撑域为  $S_h$ ; 归一化常数为 C。

用  $\hat{f}_k(s,t)$  表示当前估计的高分辨率图像的 参考帧,  $g_l(i,j)$  表示当前低分辨率图像的观测 帧。若低分辨率图像观测帧中的某像素  $(i_0, j_0)$  映 射到高分辨率图像参考帧的位置为  $(s_0, t_0)$ ,则 用式 (2) 计算该像素的估计值 <sup>[10]</sup>:

$$\hat{f}(s_0, y_0) = \sum_{s_0 - (w-1)/2}^{s_0 + (w-1)/2} \sum_{t=t_0 - (w-1)/2}^{t_0 + (w-1)/2} \hat{f}_k(s, t) h(s - s_0, t - t_0)$$
(2)

于是,观测帧中实际像素值与像素估计值之间 的残差定义为

$$r_l(i_0, j_0) = g_l(i_0, j_0) - \hat{f}(s_0, t_0)$$
(3)

若残差  $\gamma$  为正且大于阈值  $\sigma_0$ ,表明当前估 计值  $\hat{f}_k(s,t)$  偏小,则增大估计值  $\hat{f}_k(s,t)$ ;反之, 减小估计值  $\hat{f}_k(s,t)$ 。

# 2 边缘 Gibbs 抑制改进算法

凸集投影 POCS 算法充分利用了图像的先 验知识,算法简单,便于实现,但其收敛过程依 赖初值的选择,收敛慢,运算量大,且可能会造 成解不唯一。由于突集投影定义在边缘上,重构 后的图像在深浅两色的分界线附近,造成深色的 像素更深,浅色的像素更浅,这就是边缘 Gibbs 现象<sup>[10]</sup>,它会严重影响重构出的高分辨率图像 的质量。本文根据水面红外图像目标的运动特 征,加入目标跟踪的序列图像配准算法,利用 目标跟踪技术进行粗定位,求得粗变换参数, 然后进一步准确估计参数,对配准算法进行并行 化改造,在解中加入先验约束条件,确保存在一 个解,达到改善重构算法的收敛稳定性和降噪能 力。 针对水面目标红外成像的运动特点,建立 精确的运动估计模型,以判定图像局部空域活 动性,提高观测帧运动估值的准确度,去除未在 参考帧中发生作用的部分像素。在对图像进行 修正前,对当前估计的高分辨率图像的边缘进 行检测。若 PSF 的中心在边缘像素上,利用权 值函数对其相乘,使得各系数沿着边缘垂直的 方向减小,而边缘线方向不发生变化;从而有效 地改善图像深浅两色分界两侧的像素互相之间 的影响,达到抑制边缘 Gibbs 现象的效果。

在重构算法中,利用 Sobel 算子对图像的边缘进行检测,用 G<sub>x</sub> 表示 x 方向偏导,G<sub>y</sub> 表示 y 方向偏导,权值函数可以表示为

$$w(x,y) = e^{-\lambda |G_x x + G_y y| / (|G_x| + |G_y|)} = e^{-\lambda |\nabla f^T p| / ||\nabla f||_l}$$

 $(x,y) \in S_h \tag{4}$ 

式中,用一个常数 \ 来调节权值函数值变化的 速度。 \ 越小,函数值变化越慢。

修改的点扩散函数为

$$h'(x,y) = h(x,y)e^{-\lambda|\nabla f^T p|/||\nabla f||_l}, (x,y) \in S_h \quad (5)$$

通过修改上式,可以有效改善重构过程中 图像深浅区域分界线两侧像素的相互影响,有效 抑制边缘 Gibbs 现象,提高重构后图像的质量。

## 3 算法实现

由于舰船红外序列图像中的目标大多处于 运动状态,并不是所有低分辨率图像观测帧中的 像素都会出现在参考帧中。没有出现在参考帧中 的像素对重构出的图像没有作用,可以式(6)来 判断观测图像中的像素在重构过程中的作用:

 $\mu_{l,k}(i,j) = \frac{1}{q^2} \sum_{s=qi-q+1}^{qi} \sum_{t=qj-q+1}^{qj} |f_l(s,t) - f_k(s+q\nu_i, t+q\nu_j)|$ (6)

式中, q 是一个插值的参数;  $\varepsilon_k(i, j)$  是阈值;  $(\nu_i, \nu_j)^T$  为像素  $g_l(i, j)$  的运动向量;  $f_l(s, t)$  为低 分辨率图像中的插值图像。若局部空域活动性 低的像素的运动估计不准确,重构图像的质量 会下降。这时,阈值  $\varepsilon_k(i,j)$  应取比较小的值,否 则,阈值  $\varepsilon_k(i,j)$  应取比较大的值。图像的空域活 动性可以用式 (7) 衡量:

$$T_{k}(i,j) = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{(\alpha,\beta) \in S_{i,j}} (g_{k}(\alpha,\beta) - \mu_{k}(i,j))^{2}}$$
(7)

式中,  $S_{i,j}$  表示参考帧中的中心在 (i,j) 的一 个矩形区域; K 为区域  $S_{i,j}$  内的像素数;  $\mu_k(i,j)$  为区域  $S_{i,j}$  内的像素平均值。阈值  $\varepsilon_k(i,j)$ 和局部的标准差  $T_k(i,j)$  之间的关系可表示为  $\varepsilon_k(i,j) = cT_k(i,j)$ ,其中, c 为常数,对于运动比 较大的序列图像, c 的取值应当比较小。

基于边缘 Gibbs 现象抑制的红外图像超分 辨重构算法的主要实现思路如图 1 所示。





# 4 仿真结果及评价

重构算法是 POCS 改进算法结合边缘 Gibbs 现象抑制技术的算法,硬件平台采用 DSP+FPGA 架构,通过计算得到的结果如图 2 所示。

(a) n

(c) n+2

(b) n+1

(d) n+3

$$PSNR = 10 \lg \frac{M \times N \times [\max(F) - \min(F)]}{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} [R(i, j) - F(i, j)]^2}$$
(9)

式 (9) 反映了图像处理前后的质量变化。峰 值信噪比越高, 重构效果和质量就越好。本文在 信噪比、峰值信噪等方面对超分辨率重构出的图 像进行了探索性评价, 保证了重构后的图像的 质量, 算法运行结果如图 3 所示。



#### 图 3 重构图像评价结果

### 5 结论

红外图像超分辨率重构技术的研究对红外 目标特性研究具有重要的应用价值。通过超分 辦率重构技术获取更多有用的目标信息,突出 水面目标红外特征分布细节,提高水面目标实 时仿真建模素材质量,可为红外图像分割、识别 和跟踪等应用提供数据支持。采用图像平滑技 术、POCS 改进算法和边缘 Gibbs 现象抑制技术 对海面复杂背景下的低分辨率红外舰船目标进 行了超分辨率重构,使水面目标红外图像的分 辨率提高了 50%,并对重构后的图像进行了定 量评价。对舰船红外图像中的目标运动进行了 估计并进行了可信度检验、基于 DSP 的亚像素 配准及算法并行化处理,改进了边缘 Gibbs 现象 的抑制技术,从而优化了运动状态下的海面舰 船目标的红外重构图像的质量。仿真计算结果证 明,采用 Gibbs 现象抑制技术的海面舰船红外运 动目标的图像重构算法能满足应用需求,可解决 现有红外成像探测设备分辨率低、红外成像细 节信息不够的问题,具有很好的经济效益。未来 还可以在算法效率上进行提高, 使该重构方法

业内公认的判据或者评判方法,目前还是以主 观视觉观察作为主要判断手段。本文提出了采 用基于信噪比特征 - 包括信噪比和峰值信噪比 -的方法探索研究红外序列图像客观质量评价技 术的途径,并在重构图像质量评价上进行了尝 试。采用信噪比和峰值信噪比两个参数进行定 量分析,通过对重构后的红外图像进行计算,获 得了较好的评价效果。

(e) N

图 2 系统运行结果

对于重构图像质量的评价,至今没有一个

(1) 信噪比

对重构后的红外图像的信噪比采用式 (8) 进行计算。信噪比越大,重构效果越好。

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} F^{2}(i,j)}{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} [R(i,j) - F(i,j)]^{2}}$$
(8)

(2) 峰值信噪比

http://journal.sitp.ac.cn/hw

能实时提高探测器采集的图像的分辨率,使其 能用在更广泛的领域内使用。

#### 参考文献

- [1] 邹文艺. 超分辨率红外图像重建算法的研究. 硕士 论文 [D]. 西安电子科技大学, 2004.
- [2] 孔玲莉,黄华,齐春,等.图像超分辨率研究的最新进展[J].**光学技术**,2004(3):374 377.
- [3] 邹谋炎. 反卷积与信号复原[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001:100-125.
- [4] 安博文,潘胜达.基于 FPGA + DSP 的超分辨率 成像系统设计 [J].**红外技术**,2010,**32**(9):523-526.
- [5] 谢伟,陈皓,秦前清.基于多帧视频序列的盲超分 辨率影像重建[J].数据采集与处理,2011,26(1):1-7.

### (上接第23页)

时对高温物体进行测量,而且也可适用于 锅炉火焰燃烧、火箭发动机、航空发动机和冶金 等工业领域高温及火灾灾情的实时监测。本系统 需进一步研究如何将温度场更精细分区,如何 处理更高采样速率产生的大量数据,以实现高温 物体温度场分布的测量,并提高温度测量精度 和探测灵敏度。

### 参考文献

(上接第37页)

法。该算法改善了图像的分割效果,提高了 分割效率,是一种可行的红外图像分割算法。

### 参考文献

- [1] 雷松泽. 最大熵阈值的红外图像人体目标分割方法 [J].**西安工业大学学报**,2014,**34**(11):882-885.
- [2] 王东阳,时磊,赵军.一种用于红外图像分割的改进型 Otsu 方法 [J].**红外**,2013,**34**(7):31-33.
- [3] 陈洪科,杨晓玲.基于分形理论的改进型二维最大 熵红外图像分割算法 [J].**红外**,2012,**33**(8):27-31.
- [4] 蒋艳君, 谭左军, 余贞贞, 等. 红外图像阈值分割 算法的研究 [J].红外,2008,29(12):33-35.
- [5] 梁建慧,马苗.人工蜂群算法在图像分割中的应用 研究 [J].**计算机工程与应用**,2012,**48**(8):194–197.

- [6] 李展,张庆丰,孟小华,等.多分辨率图像序列的超 分辨率重建 [J].**自动化学报**,2012,**38**(11):1804–1814.
- [7] 邓建青.机载光电成像超分辨率图像重建技术研究[D].长春:中国科学院研究生院,2011.
- [8] 陈铮,沙江,童一峻,等.基于 DSP 阵列的海面 目标红外图像实时仿真系统研究 [J].光学与光电技 术,2012,10(5):54-57.
- [9] 李伟. 基于高速 DSP 器件 TMS320C6711 的超分辨 率图像处理系统 [D]. 西安:西安电子科技大学, 2006.
- [10] 禹晶. 序列图像的 POCS 超分辨率重构方法 [D]. 北京:北京工业大学, 2007.
- 张虎,李世伟,陈应航,等.非接触高温测量技术 发展与现状 [J].**宇航计测技术**,2012(5):68-71.
- [2] 孙晓刚, 李云红. 红外热像仪测温技术发展综述 [J]. 激光与红外, 2008, 32(8): 101-104.
- [3] 曾光宇,张志伟,张存林. 光电检测技术[M].北 京,清华大学出版社, 2005:14-15.
- [4] 卢浩,张卫华.基于 AVR 的非制冷探测器温控系
   统的设计 [J]. 红外,2011,32(2):9-12.
- [5] 崔中华, 熊继军, 沈三民. 基于 LVDS 技术的实时图 像测试装置的设计 [J]. 电子技术应用,2010(4):84-86.
- [6] Karaboga D. An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization[R]. Technical Report-TR06, Erciyes. University, Engineering Faculty, CompputerEngineering Department, 2005.
- [7] Deb K, Thiele L, Laumanns M, et al . Scalable Test Problems for Evolutionary Multi-objective Optimization [J] . Evolutionary Multi-objective Optimization, 2005,105–145P.
- [8] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[C].Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, NJ:IEEECS,1995:1942-1948.
- [9] 毕晓君,王艳娇.加速收敛的人工蜂群算法 [J].系 统工程与电子技术,2011,33(12):2755-2761.