

海面红外图像的动态范围压缩及细节增强

王园园^{1,2,3,4}, 赵耀宏^{1,3,4}, 罗海波^{1,3,4}, 李方舟^{1,2,3,4}

- (1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
4. 辽宁省图像理解与视觉计算重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 动态范围压缩和细节增强是红外图像处理两个重要课题。为了将高动态海面背景红外图像清晰显示, 提出一种高动态范围压缩及细节增强算法。首先, 通过基于梯度边缘信息的多方向拉普拉斯增强方法, 将梯度图像平滑处理, 并与多方向拉普拉斯滤波相乘, 实现高动态范围图像的细节增强; 然后统计增强后图像的动态广义直方图信息; 最后采用灰度级分组的方法构造映射函数, 将高动态范围压缩到 8 bits, 输出可清晰显示的红外图像。对大量海面背景红外图像进行实验分析, 结果表明, 该算法提高了图像的对比度, 有效增强了舰船目标细节, 同时抑制了海面背景噪声的放大和光晕现象的产生, 最终获得较好的输出图像。

关键词: 动态范围压缩; 灰度级分组; 细节增强; 拉普拉斯增强; 海面红外图像

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0126003

Dynamic range compression and detail enhancement of sea-surface infrared image

Wang Yuanyuan^{1,2,3,4}, Zhao Yaohong^{1,3,4}, Luo Haibo^{1,3,4}, Li Fangzhou^{1,2,3,4}

- (1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Opto-Electronic Information Processing, CAS, Shenyang 110016, China;
4. The Key Lab of Image Understanding and Computer Vision, Liaoning Province, Shenyang 110016, China)

Abstract: Dynamic range compression and detail enhancement are two important issues for effectively displaying high dynamic range infrared (IR) images on standard dynamic range monitors. Sophisticated techniques are required in order to improve the visibility of the details without introducing distortions. To clearly show the highly dynamic infrared image of sea background, a high dynamic range compression and detail enhancement algorithm was presented which was made of three main steps. First, highly dynamic infrared image was enhanced by a multi-directional Laplacian enhancement method based on gradient edge information, and the first order gradient image smoothed was combined with multi-directional Laplacian filtering to enhance images. Second, the dynamic generalized histogram information of the enhanced image was obtained. Finally, the gray level grouping method was used to construct the

收稿日期: 2018-08-05; 修订日期: 2018-09-03

基金项目: 中国科学院国防创新基金(CXJJ-15-S109)

作者简介: 王园园(1992-), 女, 硕士生, 主要从事红外图像处理方面的研究。Email:wangyuanyuan@sia.cn

导师简介: 赵耀宏(1979-), 男, 研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事图像处理等方面的研究。Email:zhaoyaohong@sia.cn

mapping function, which maps 14 bits intensity in the input image to 8 bits intensity in the output image. As a result, infrared image with low dynamic range was obtained clearly. Experiments on a large number of sea-surface infrared images were conducted. The results verify that the proposed algorithm can improve the contrast of the image, effectively enhance the ship target details, suppress background noise amplification, and avoid the generation of halos. Therefore, the image with high quality was achieved.

Key words: dynamic range compression; gray level grouping; detail enhancement; Laplacian enhancement; sea-surface infrared image

0 引言

为了将高动态范围红外图像的 14 bits 或 16 bits 灰度压缩到可显示的 256 级, 还原真实的场景信息(如目标, 舰船、飞机等), 增强目标边缘, 以便进一步进行目标检测与追踪^[1-2], 采取适当的动态范围压缩和细节增强方法使得图像在显示的同时突出细节显得尤为重要。海面红外图像中舰船目标相对背景较小、鱼鳞光等噪声严重, 这给图像的动态范围压缩及增强带来很大困难。

线性映射(AGC)、直方图均衡化(HE)等动态范围压缩和增强方法, 计算简单但图像改善效果有限。许多新的对比度增强算法都是基于对直方图均衡化的改进^[3-6], 平台直方图均衡化(PE)设置平台值来抑制图像平坦区域的过增强。限制对比度自适应直方图均衡化和细节增强方法(BCCE)^[6]通过增强局部对比度来改善低对比度细节的可视性, 但会产生一定的光晕^[7]现象。分层增强方法^[8-14]中, 基于双边滤波分层和动态范围分区(BF&DRP)^[11]的算法运用双边滤波器较好地实现了动态范围压缩和细节增强, 减少了光晕的产生, 但目标边缘易产生梯度翻转现象。基于聚类的动态范围压缩和对比度调整(CDCA)^[12]算法优化了目标细节的可视化效果, 但由于多次迭

代使得计算复杂度高, 工程实现比较困难。基于局部频域信息的自适应增强方法(AMLFC)^[13]是一种针对海面场景的红外图像增强方法, 该方法有效提高了图像的对比度。参考文献[14]发表了一种高动态红外图像细节增强方法, 利用引导滤波将红外图像分层, 然后分别处理细节层和背景层。参考文献[15]发表了一种新的基于梯度域的高动态红外图像的可视化方法, 有效避免了光晕和梯度反转等现象, 但动态范围压缩效果有限。

现有动态范围压缩及增强方法存在背景噪声明显、目标细节增强效果不理想、光晕现象等问题, 因此, 文中提出一种新的动态范围压缩及增强算法。该算法分为两部分:(1) 将平滑的多方向的梯度边缘与对应方向的拉普拉斯滤波相结合, 得到目标细节突出的增强图像;(2) 基于增强图像的动态广义直方图, 采用灰度级分组的方法构造映射函数, 能够有效保留细节纹理特征不丢失, 实现灰度图像的动态范围压缩。该算法能够有效增强舰船目标细节, 抑制海面背景噪声和光晕现象。

1 文中算法

文中算法先进行细节增强, 再进行动态范围压缩, 整体流程如图 1 所示。

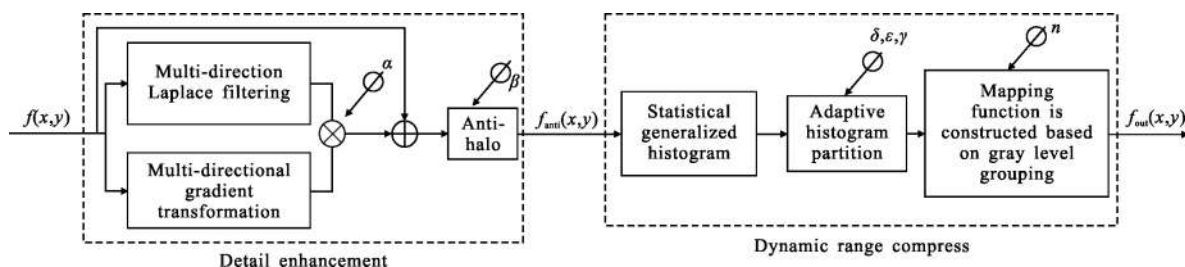


图 1 文中算法流程图

Fig.1 Flow chart of the proposed algorithm

第一步, 基于梯度边缘信息的多方向拉普拉斯增强。将梯度变换形成的掩模与拉普拉斯滤波结合; 再对光晕现象进行抑制处理。

第二步, 对增强图像进行动态范围压缩。先统计增强图像的动态广义直方图; 再采用灰度级分组的方法构造映射函数。

1.1 基于梯度边缘信息的多方向拉普拉斯增强

梯度变换和拉普拉斯滤波是两种常用的图像锐化方法。拉普拉斯滤波在图像细节增强方面效果较好, 但会产生比梯度变换更多的噪声; 梯度变换对噪声和小细节的响应要比拉普拉斯滤波的响应弱, 而且可以通过均值滤波对其进行平滑处理而进一步降低^[6]。因此, 文中增强方法中, 对梯度图像进行平滑处理并用拉普拉斯图像与它相乘。相乘会保留灰度变化强烈区域的细节, 同时降低灰度变化相对平坦区域的噪声。此外, 只考虑水平和垂直两个方向, 不利于倾斜边缘的处理。因此, 文中提出基于梯度边缘信息的多方向拉普拉斯增强方法。

首先, 在原有两个方向的基础上增加考虑两个对角线方向, 多方向的梯度算子 ∇f 为:

$$\nabla f = [g_x \ g_y \ g_\theta \ g_\varphi]^T = \left[\frac{\partial f}{\partial x} \ \frac{\partial f}{\partial y} \ \frac{\partial f}{\partial \theta} \ \frac{\partial f}{\partial \varphi} \right]^T \quad (1)$$

式中: g_x 、 g_y 、 g_θ 和 g_φ 是图像 f 中任一点 (x, y) 分别通过 sobel 梯度算子检测的水平方向、垂直方向和两个对角线方向的边缘信息。多方向的拉普拉斯算子 $\nabla^2 f$ 如公式(2)所示。

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} \quad (2)$$

式中: $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}$ 、 $\frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$ 、 $\frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2}$ 和 $\frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2}$ 是图像 f 中任一点 (x, y) 分别沿水平方向、垂直方向和两个对角线方向上的拉普拉斯滤波结果。各方向示意图如图 2 所

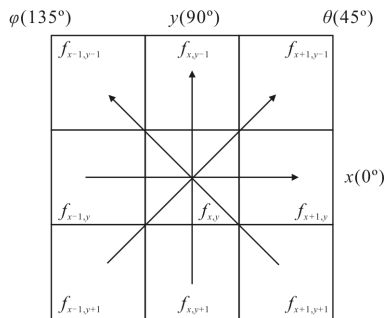


图 2 多方向示意图

Fig.2 Multi-directional schematic

示, $x(0^\circ)$ 表示水平方向、 $x(90^\circ)$ 表示垂直方向、 $\theta(45^\circ)$ 表示 45° 对角线方向、 $\varphi(135^\circ)$ 表示 135° 对角线方向。

然后, 将平滑后的各个方向的梯度边缘与对应方向上拉普拉斯滤波结果相结合。对图像 f 中任一点 (x, y) 处增强后的图像 f_{enh} 定义为:

$$f_{enh}(x, y) = f(x, y) + \alpha(G(g_x) \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + G(g_y) \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + G(g_\theta) \frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2} + G(g_\varphi) \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2}) \quad (3)$$

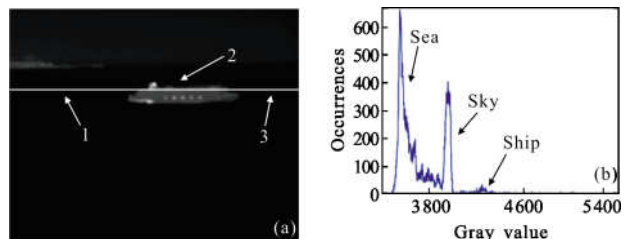
式中: $G(g_x)$ 、 $G(g_y)$ 、 $G(g_\theta)$ 和 $G(g_\varphi)$ 分别表示将梯度图像 g_x 、 g_y 、 g_θ 和 g_φ 通过 5×5 的均值滤波处理; α 是用来调节增强程度的系数。图像中, 平坦的背景区域, 边缘强度小, 能抑制背景噪声的放大; 舰船目标区域, 边缘强度大, 能增强目标的纹理细节。

最后, 针对目标边缘产生的光晕现象, 文中对增强图像 $f_{enh}(x, y)$ 进行抑制光晕处理, 得到反光晕的增强图像 $f_{anti}(x, y)$, 如公式(4)所示。

$$f_{anti}(x, y) = \begin{cases} \beta \cdot \max(R) & f_{enh}(x, y) > \beta \cdot \max(R) \\ \frac{\min(R)}{\beta} & f_{enh}(x, y) < \frac{\min(R)}{\beta} \\ f_{enh}(x, y) & \text{others} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $R = \{f(x+i, y+j) | i, j = -1, 1\}$ 为原图像 f 中点 (x, y) 的八邻域元素; β 是光晕抑制系数。

将文中增强方法与梯度变换和拉普拉斯滤波方法进行实验对比, 如图 3 所示, 图 3(a)、(b) 分别为原红外图像及其直方图, 图 3(c) 是其第 90 行向量信号, 其中 1、3 部分对应海面背景; 2 对应舰船目标部分, 灰度幅值变化较大的地方为舰船边缘。图 3(d)、(e) 和 (f) 分别将原信号与梯度变换、拉普拉斯滤波增强和文中方法进行对比, 图 3(d)(e) 中舰船细节增强的同时产生一定的光晕现象, 放大背景噪声, 拉普拉斯滤波结果中背景噪声尤其明显。图 3(f) 中文中方法增强结果有效保留边缘信息、增强舰船细节, 背景部分有效抑制噪声的放大, 具有很好的抗噪特性。



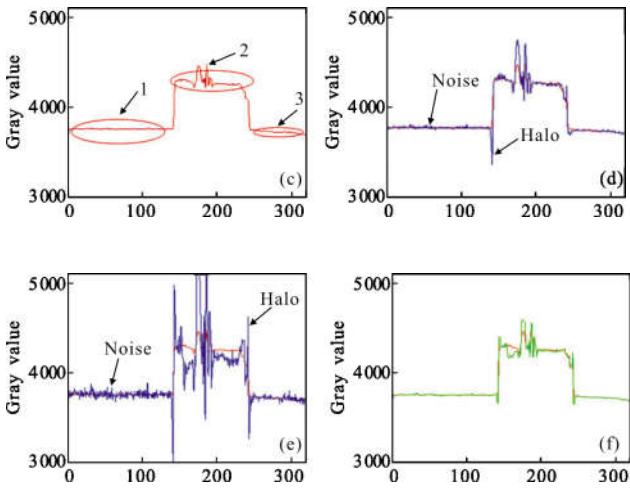


图 3 增强结果。(a) 原图, (b) 直方图, (c) 第 90 行信号
(d) 第 90 行信号(红色)及其梯度变换结果(蓝色),
(e) 第 90 行信号(红色)及其拉普拉斯滤波结果(蓝色),
(f) 第 90 行信号(红色)及其文中方法增强结果(绿色)

Fig.3 Enhancement results. (a) original image, (b) histogram,
(c) 90th line signal, (d) 90th line signal(red) and
enhancement of gradient transformation(blue),
(e) 90th line signal(red) and enhancement of Laplace
filtering(blue), (f) 90th line signal(red) and the result
of proposed method(green)

1.2 基于动态广义直方图的灰度级分组压缩

海面红外图像中舰船目标小、海面天空背景大,海面噪声冗杂,鱼鳞光等干扰明显。其直方图中像素分配较集中,背景部分直方图峰值远大于目标直方图峰值,不利于图像整体对比度的提升。如图 3(a)、(b)为典型的高动态海面红外图像及其直方图,灰度范围为 14 bits,主要集中在 3 400~4 600 之间,具有海面、天空两大高峰直方图,而舰船直方图相对较小。

针对海面背景红外图像的特点,文中提出基于动态广义直方图的灰度级分组压缩方法。

首先,统计海面图像广义直方图^[17],将区域特性考虑在内,使不同区域的同一灰度级具有不同的对比度增益,减小占有较多像素的背景灰度的对比度增益,增加占有较少像素的细节灰度的对比度增益。由于海面背景红外图像中,舰船目标只占据很少的高灰度级像素,海面背景占有大量的低灰度级像素,包括大量的海杂波、鱼鳞光等噪声,使用全局直方图处理方法无法控制目标和背景灰度级的分配。因此,下面将广义直方图自适应分区,以保证和控制图像

背景和目标的灰度级比例。

最后,采用灰度级分组方法^[18]分别构造每个子广义直方图的映射函数,以保证频数分布较小的灰度所对应的细节信息不丢失。

1.2.1 统计广义直方图

广义直方图将整数 1 分解为两个值:分数和余数,通过对每个灰度级累计分数和在所有灰度级均匀分配余数值生成。图像 $I(u, v)$ 的广义直方图 $H(k)$ 表达式如公式(5)所示。

$$H(k) = \sum_{(u,v) \in I} \left(r_{uv} \cdot \delta(x_{uv}, k) + (1-r_{uv}) \cdot \frac{1}{\max - \min} \right) \quad (5)$$

式中: k 为图像最小灰度级 \min 与最大灰度级 \max 之间的灰度级; x_{uv} 是点 (u, v) 的灰度值; $r_{uv} \in [0, 1]$ 表示点 (u, v) 处的分数值,如公式(6)所示。

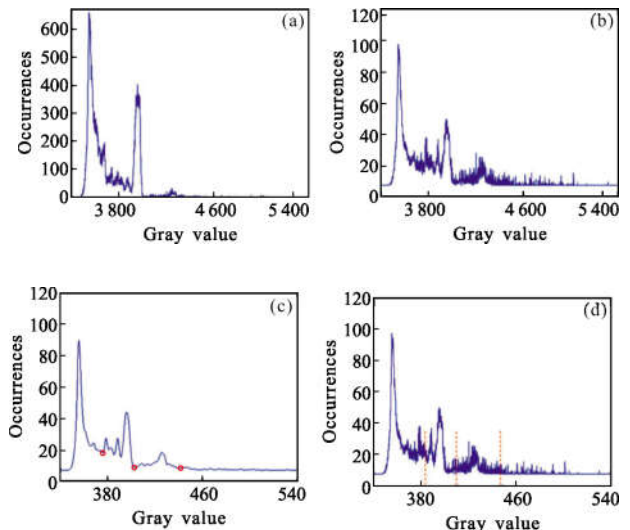
$$r_{uv} = 1 - e^{-\lambda c} \quad (6)$$

$$c = \frac{\sigma_x e_x}{\max(\sigma_x, e_x)} \quad (7)$$

式中: σ_x, e_x 分别为局部 3×3 区域的标准方差和信息熵; 参数 λ 用来控制对比度增益的变化,实验中取 10。 $\delta(x_{uv}, k)$ 为克罗内克函数。

$$\delta(x_{uv}, k) = \begin{cases} 1, & x_{uv} = k \\ 0, & x_{uv} \neq k \end{cases} \quad (8)$$

图 4(a)、(b)分别为图 3(a)海面背景红外图像对应的普通直方图 and 广义直方图,图 4(a)中普通直方图灰度频数分布最大值为 663,最小值为 0;图 4(b)中广义直方图通过增加分数值、增益对比度来增强图像对比度,余数值通过均匀分布来保护图像对比度,得到灰度频数分布最大值为 97,最小值为 7.3。



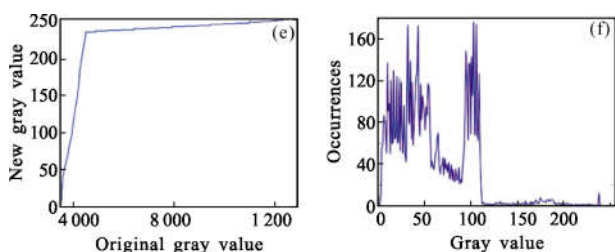


图 4 图 3(a)动态范围压缩过程。(a)普通直方图,(b)广义直方图,(c)直方图平滑曲线,(d)分区结果,(e)映射曲线,(f)输出直方图

Fig.4 Dynamic range compression process of image 3(a).

- (a) Histogram, (b) generalized histogram,
- (c) histogram smooth curve, (d) partition results,
- (e) mapping curve, (f) histogram of output image

1.2.2 动态直方图分区

对广义直方图进行全局处理,不考虑目标和背景灰度级的分配,不能很好地提高图像的对比度。基于子直方图的局部方法能够实现图像灰度级比例可控。广义直方图动态分区步骤如下:首先,平滑广义直方图,如公式(9)所示。

$$H_s(k) = \sum_{i=-2}^{i=2} H(k+i)g(i) \quad (9)$$

式中: $g(i)$ 为窗口大小为 1×5 的高斯滤波函数。

然后,选取平滑后直方图 $H_s(k)$ 的极小值点:

$$\min = \{k | H_s(k) < H_s(k-1), H_s(k) < H_s(k+1)\} \quad (10)$$

再根据灰度范围阈值 δ 和频数分布阈值 ε 判断极小值点,确定分割点 m_j ,如公式(11)所示,其中, $j=1, 2, \dots, p$ 。

$$m_j = \min_i, (\min_i - \min_{i-1}) > \delta, H(\min_i) > \varepsilon \quad (11)$$

最后,计算分割点对应的映射后的新灰度级 M_j ,基于子直方图的灰度范围、累计概率密度和灰度均值的分配方法,如公式(13)所示。

$$X_i = (\log P_i)^\gamma / (S_i \times W_i) \quad (12)$$

$$M_j = \sum_{i=1}^j \frac{X_i}{\sum_{i=1}^{p+1} X_i} \times 255 \quad (13)$$

式中: P_i 、 S_i 分别是第 i 个子直方图的累计概率密度和灰度范围; $W_i = (m_i + m_{i-1})/2$ 是第 i 个子直方图的灰度均值, $i=1, 2, \dots, p+1$,通过调节参数 γ 来控制子直方图灰度级的扩展数量比例 X_i ,再归一化到 255 灰度级。图 4(c)为图 4(b)直方图的平滑曲线,设置参数 $\delta=390$ 、 $\varepsilon=10$ 、 $\gamma=0.1$,得到分割点;对应广义直方图上

的划分结果如图 4(d)所示,划分为四个子直方图。

1.2.3 构造映射曲线

利用子广义直方图信息可有效控制红外图像海面背景和目标的灰度比例,增强输出图像对比度;再利用灰度级分组的方法分别构造映射函数,可避免占较少像素的细节灰度级被映射为同一灰度级,导致纹理特征丢失。灰度级分组过程中依次合并子直方图的非零部分,直至组数为 n ,再构建映射曲线。

首先,将子直方图的非零部分作为初始分组,如公式(14)所示。

$$G(i) = H(k), H(k) \neq 0 \quad (14)$$

式中: $k=m_{j-1}+1, \dots, m_j, i=1, 2, \dots, n_0$ 。接着,依次合并子直方图非零部分 $G(i)$ 中最小的概率密度和它左右邻域内较小的概率密度的两个灰度级,直至灰度级被合并为 n 组,如公式(15)所示。

$$G(i') = \begin{cases} G(i) \\ G(i_a) + \min\{G(i_a-1), G(i_a+1)\} \\ G(i+1) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $G(i_a) = \min_i G(i), i'=1, 2, \dots, n_0-1$ 。将子直方图的输出灰度范围根据组数均匀分布,公式如下:

$$N = (M_j - M_{j-1})/n \quad (16)$$

式中: N 表示子直方图中每组灰度集所占灰度范围。

最后,依据每组灰度分布情况,通过线性变换关系构建映射函数 $T(k)$,将输入灰度图像的高动态范围压缩到可显示的灰度范围。映射函数构建方法如下:

(1) 如果灰度级 k 被分到灰度集 $G(i)$ 并且该灰度集内灰度值不止一个时,变换关系为:

$$T(k) = \left(i - \frac{R(i)-k}{R(i)-L(i)} \right) \times N + M_{j-1} + 1 \quad (17)$$

(2) 如果灰度级 k 被分到灰度集 $G(i)$ 并且该灰度集内灰度值有且只有一个时,或者,灰度级 k 介于灰度集 $G(i)$ 和 $G(i+1)$ 之间,变换关系为:

$$T(k) = i * N + M_{j-1} \quad (18)$$

(3) 如果灰度级 k 小于第一灰度集的最小灰度值,则映射为当前子直方图的最小灰度值:

$$T(k) = M_{j-1} + 1 \quad (19)$$

(4) 如果灰度级 k 大于第 n 灰度集的最大灰度值,则映射为当前子直方图的最大灰度值:

$$T(k) = M_j \quad (20)$$

式中: $G(i)$ 是最终灰度级分组; $L(i)$ 、 $R(i)$ 分别是第 i 组

内最小和最大灰度值, $i=1, 2, \dots, n$ 。灰度级分组压缩结果如图 4(e)所示,为映射曲线,横坐标表示原灰度级,纵坐标表示压缩后灰度级,图 4(f)为输出图像的直方图。

2 实验结果与分析

实验图像通过制冷红外热像仪采集,探测器面阵为 320×256 ,实验图像主要是海面背景红外图像。其中海面背景包括不同尺寸、不同距离、不同方向的舰船目标、岛岸背景、背光山峰场景、太阳亮带场景、鱼鳞光干扰场景等。

2.1 参数选择

文中算法中有 6 个参数,如图 1 所示,分别为:增强程度调节系数 a ,取 0.001;增强边界系数 β ,取 1.02;灰度范围阈值 δ 和频数分布阈值 ε ;扩展灰度级的调节参数 γ ;灰度级分组数 n 。

2.1.1 参数 δ 和参数 ε 的选择

参数 δ 表示灰度范围阈值,参数 ε 表示频数分布阈值。文中主要研究对象是海面背景红外图像,其背景主要由海面和天空两部分组成。故一般情况下,同时调节灰度范围阈值 δ 和灰度频率阈值 ε ,确定分割点,将舰船目标与海面、天空背景分开。在 $\gamma=0.1$, $n=150$ 情况下, $\delta=390$, $\varepsilon=10$ 时,目标与背景之间动态范围比例较好,舰船目标增强较好,图像可视化效果较好,整体对比度较高。

2.1.2 参数 γ 的选择

参数 γ 通过控制灰度级的扩展数量来增强舰船目标, $\delta=390$, $\varepsilon=10$, $n=150$ 情况下, $\gamma=0.1$ 时,目标与背景之间的灰度级比例恰当,动态范围压缩效果较好。

2.1.3 参数 n 的选择

参数 n 表示灰度级分组方法中的分组数,理想情况下,每组灰度频率相等时,图像动态范围压缩效果最佳。当 n 为 100~200 时,图像对比度较高,可视化效果较好, $\delta=390$, $\varepsilon=10$, $\gamma=0.1$ 情况下,该参数具有很好的鲁棒性,对比实验取 $n=150$ 。

2.2 不同算法的对比分析

为了验证文中方法的有效性,文中对不同场景的大量海面背景红外图像用不同的方法(直方图类方法 PE、分层类方法 BF&DRP、针对海面场景的方法 AMLFC、CDCA)处理后作对比分析。其中 BF&DRP 灰度域标准差采用参考文献[11]推荐值,

根据实验效果空间域标准差取 $\sigma_s=10$; AMLFC 采用参考文献[13]推荐的参数。部分海面场景实验结果如图 5~7 所示,为了验证两个温差相差较大背景或

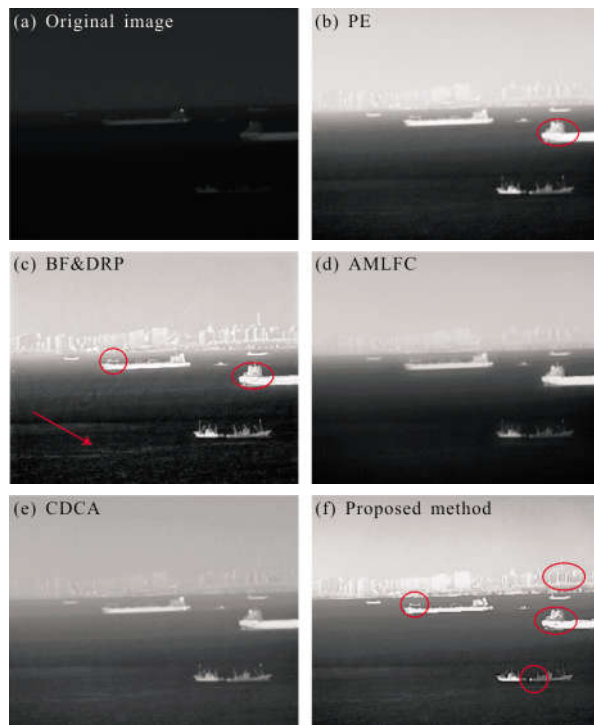


图 5 海面岛岸多舰船目标场景实验结果

Fig.5 Results of sea-island scene with multi-ship

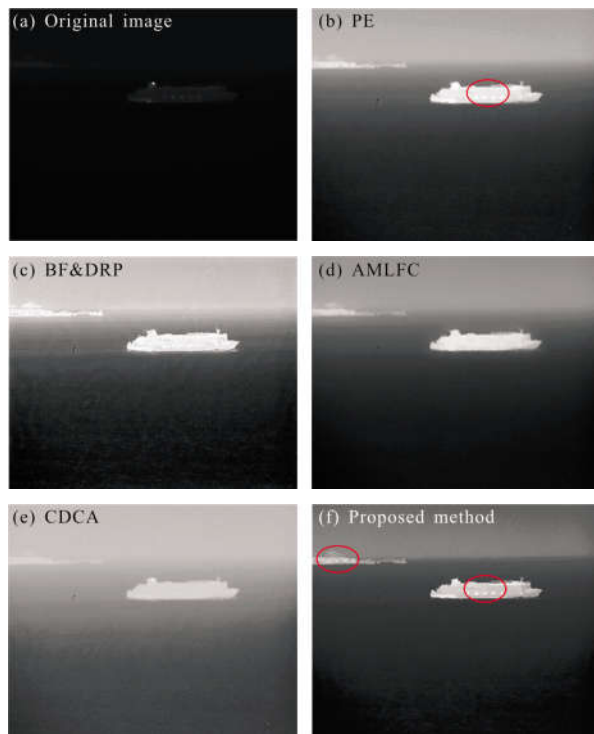


图 6 海面场景实验结果

Fig.6 Results of sea background

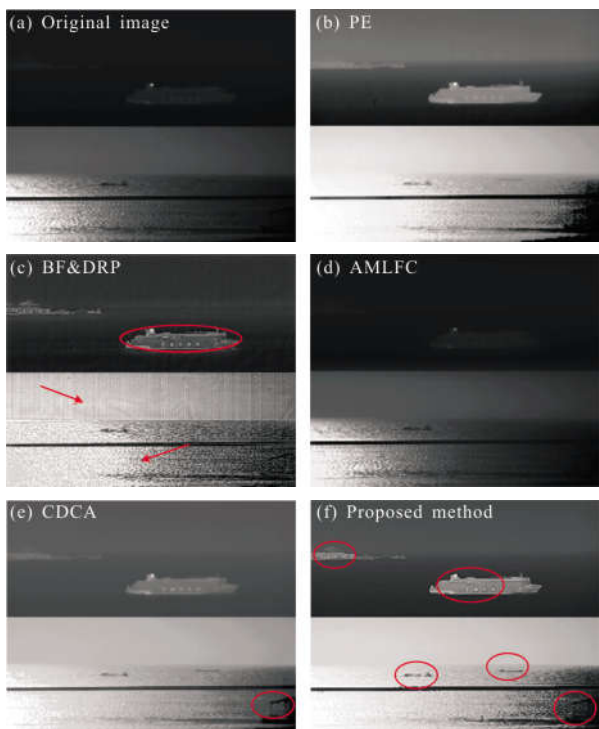


图 7 组合场景实验结果

Fig.7 Results of combination scene

目标的显示效果，且由于实际海面场景较难采集到如此数据，故组合含高温、中温目标的场景(图 6(a))和含低温目标的场景作为宽动态实验图像 7。表 1 为对应图像的动态范围和有效灰度级所占百分比。

表 1 测试图像描述

Tab.1 Description of the test image

Image	Min(DL)	Max(DL)	DL	Percent of DL
Fig.5	3 880	10 169	6 289	38.4%
Fig.6	3 476	12 862	9 386	57.3%
Fig.7	2 851	16 383	13 532	82.6%

虽然目前还没有一个公认的、完备的图像视觉效果的客观评价标准,但对比度增强测量(EME)^[19]可以在一定程度上说明算法的有效性。计算公式如下:

$$EME = \frac{1}{k_1 k_2} \sum_{i=1}^{k_1} \sum_{j=1}^{k_2} 20 \ln \frac{\max(X_{i,j})}{\min(X_{i,j})} \quad (21)$$

公式(21)表示将图像分为 $k_1 k_2$ 个不重叠子块 $X_{i,j}$ 。文中选用 EME 对不同方法进行客观标准分析,EME 越大表明图像信息越丰富,不同图像和不同方法的处理结果如表 2 所示,文中算法输出图像 EME 值均高于其他方法。由于 EME 对噪声非常敏感,如果图

像的平坦区域引入噪声,则尽管输出图像质量一般,但其相应的 EME 值较高。观察实验结果,文中方法实验结果噪声抑制效果较好,背景干净,没有光晕现象;而 BF&DRP 方法输出图像带有一定背景噪声和光晕现象,故 EME 值略高于文中算法结果。

表 2 测试图像 EME 值比较

Tab.2 EME results for the test images

	Original	PE	BF&DRP	AM LFC	CD CA	Proposed
Fig.5	0.095 1	2.694 8	6.726 9	1.821 8	0.941 2	4.094 3
Fig.6	0.068 6	3.172 1	8.150 8	2.349 7	1.031 9	5.810 3
Fig.7	1.339 5	3.711 7	8.075 7	2.659 2	2.248 1	3.705 0

EME 可以帮助衡量图像信息量(可能是噪声),但并不能全面地衡量图像的视觉效果。为了更全面地分析,对大量图像用不同方法处理后进行对比。

HE 等全局方法不能针对边缘、纹理特征进行有效增强,还往往引起较亮区舰船目标等过饱和,边缘模糊;且 HE 抗噪特性较差,容易放大海面背景区域噪声。PE 一定程度上改进 HE 过增强的问题,提高图像对比度,但对海面红外图像的动态范围压缩效果一般,边缘细节增强效果较差,如图 5(b)中只检测到温度较高的大舰船目标,岛岸场景中的楼房细节不清晰,边缘模糊。

BF&DRP 技术通过将细节和背景分层处理能够很好地突出舰船的细节信息,但仍存在一些问题,一方面使输出图像过于锐化;另一方面导致光晕现象的产生。如图 5(c)所示,仅检测到高温目标舰船和低温目标舰船,舰船细节纹理增强较明显,但部分海面鱼鳞光噪声也被增强,同时舰船边缘存在一定的光晕现象,如图 7(c)所示。如图 6(c)所示,图像整体对比度提升明显,但舰船上窗口、岛屿细节不清晰。

针对海面场景红外图像的动态范围压缩及增强方法 AMLFC 和 CDCA 的实验结果,AMLFC 方法细节增强效果较差,较低温度小目标、较高温度舰船中间窗口等细节信息丢失,如图 5(d)、6(d)所示,温差较大背景下,目标丢失,如图 7(d)所示;CDCA 方法动态范围压缩效果有限,图像对比度较低,整体可视化效果差,如图 5(e)~7(e)所示。

文中动态范围压缩及增强方法较好地突出了目

标细节,提高了图像整体对比度,抑制了光晕现象的产生,输出图像可视化效果良好。图 5 岛岸场景红外图像中,文中方法实验结果如图 5(f)所示,检测到低温小舰船、高温大舰船和单一像素大小的目标。岛岸场景中楼房清晰显示,舰船头部细节很好地增强。图 6 海面红外图像中,舰船目标的灰度范围占整幅图像的灰度范围比例较小,文中方法清晰显示其他方法不能发现的舰船窗口等细节,如图 6(f)所示,检测到舰船窗口、岛屿小目标等,输出图像视觉效果较好。图 7 是不同温度背景组合的场景,如图 7(f)所示,文中实验检测到低温背景下的小舰船目标,并有效凸显大舰船目标的窗口细节纹理;同时检测到高温背景下的各个目标,提高图像整体对比度,可视化效果较好。

为验证文中方法的复杂度和计算量,对不同方法进行用时检测,结果如表 3 所示。可以看出,文中方法运行速度要快于针对海面场景红外图像压缩的 CDCA 方法,但耗时要多于传统方法。下一步加速优化算法,并开展在实时图像处理中的应用研究。

表 3 不同方法处理用时比较(单位:s)

Tab.3 Processing time comparison of different methods(Unit:s)

	PE	BF&DRP	AM LFC	CD CA	Proposed method
Fig.5(a)	0.010 7	2.767 2	1.996 1	6.527 0	3.060 2
Fig.6(a)	0.011 3	2.514 2	2.688 3	5.805 6	2.405 8
Fig.7(a)	0.053 9	2.442 7	1.824 9	8.903 5	6.382 9

3 结束语

高动态范围压缩和细节增强是红外图像领域的两个重要研究课题。为了将高动态红外图像清晰显示在 8 bits 常用显示设备上,文中提出了一种高动态范围压缩及细节增强算法。通过平滑后梯度图像与多方向拉普拉斯滤波相结合来增强图像,提高了目标细节纹理的可视性,抑制了海面背景噪声的放大和光晕现象的产生;基于动态广义直方图信息,采用灰度级分组的方法构建映射曲线,实现对对比度增强可控,保证低频细节信息不丢失。通过多种海面场景红外图像及陆地红外图像实验,验证了文中算法能够有效抑制光晕现象,较好地增强舰船目标细节信

息,输出图像对比度较高。同时,实验发现,动态直方图分区调节参数较多,对场景自适应能力较弱,接下来将对其进一步精简优化。

参考文献:

- [1] Wang Hao, Zhang Ye, Shen Honghai, et al. Review of image enhancement algorithms [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 438-448. (in Chinese)
王浩, 张叶, 沈宏海, 等. 图像增强算法综述[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 438-448.
- [2] Zhou Qiang, Zhao Jufeng, Feng Huajun, et al. Infrared image enhancement using polarization imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 39-47. (in Chinese)
周强, 赵巨峰, 冯华君, 等. 基于偏振成像的红外图像增强[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 39-47.
- [3] Lai Y R, Tsai P C, Yao C Y, et al. Improved local histogram equalization with gradient-based weighting process for edge preservation [J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2017, 76(1): 1-29.
- [4] Wang Y, Pan Z. Image contrast enhancement using adjacent-blocks-based modification for local histogram equalization [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 86: 59-65.
- [5] Chen Boyang. Local linear enhancement of luminance histogram of color remote sensing image. [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(2): 502-508. (in Chinese)
陈博洋. 彩色遥感图像的亮度直方图局部线性化增强[J]. 光学精密工程, 2017, 25(2): 502-508.
- [6] Branchitta F, Porta A. Dynamic-range compression and contrast enhancement in infrared imaging systems [C]//SPIE, 2008, 6737(7): 076401.
- [7] Zuo C, Chen Q, Ren J. Display and detail enhancement for high-dynamic-range infrared images [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(12): 895-900.
- [8] Hao Zhicheng, Wu Chuan, Yang Hang, et al. Image detail enhancement method based on multi-scale bilateral texture filter [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(4): 423-431. (in Chinese)
郝志成, 吴川, 杨航, 等. 基于双边纹理滤波的图像细节增强方法[J]. 中国光学, 2016, 9(4): 423-431.
- [9] Xu Honglie, Chen Qian, Gu Guohua, et al. High dynamic range image enhancement technology based on guided image filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3843-3849.
- [10] Jia Hongguang, Wu Zepeng, Zhu Mingchao, et al. Infrared image enhancement based on generalized linear operation and

- bilateral filter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(12): 3272–3282. (in Chinese)
- 贾宏光, 吴泽鹏, 朱明超, 等. 基于广义线性运算和双边滤波的红外图像增强 [J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(12): 3272–3282.
- [11] Branchitta F, Diani M, Romagnoli M. New technique for the visualization of high dynamic range infrared images [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(9): 6401.
- [12] Rossi A, Acito N, Diani M. Dynamic range reduction and contrast adjustment of infrared images in surveillance scenarios[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(10): 102002.
- [13] A Onur Karali, O Erman Okman, Aytai T. Adaptive enhancement of sea-surface targets in infrared images based on local frequency cues [J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2010, 27(3): 509–517.
- [14] Garcia F. Real-time visualization of low contrast targets from high-dynamic range infrared images based on temporal digital detail enhancement filter [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2015, 24(6): 061103.
- [15] Zhang F, Xie W, Ma G, et al. High dynamic range compression and detail enhancement of infrared images in the gradient domain [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 67: 441–454.
- [16] Gonzalez R C, Woods R E. Digital Image Processing [M]. Translated by Ruan Qiuqi, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (in Chinese)
- [17] Yoon B W, Song W J. Image contrast enhancement based on the generalized histogram[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2007, 16(3): 033005.
- [18] Chen Z, Abidi B R, Page D L, et al. Gray-level grouping (GLG): an automatic method for optimized image contrast enhancement—Part I: the basic method [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(8): 2290–2302.
- [19] Celik T, Tjahjadi T. Contextual and Variational Contrast Enhancement[J]. *IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2011, 20(12): 3431.