

信息熵-低通滤波联合掩模云层干扰去除方法

李静 李颖

Cloud interference removal using information entropy-low-pass-filtering combined mask

LI Jing, LI Ying

引用本文:

李静, 李颖. 信息熵-低通滤波联合掩模云层干扰去除方法[J]. *中国光学*, 2024, 17(5): 1199-1208. doi: 10.37188/CO.2024-0067

LI Jing, LI Ying. Cloud interference removal using information entropy-low-pass-filtering combined mask[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(5): 1199-1208. doi: 10.37188/CO.2024-0067

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0067>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

融合视觉显著性和局部熵的红外弱小目标检测

Infrared dim small target detection based on visual saliency and local entropy

中国光学 (中英文). 2022, 15(2): 267 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0170>

结合光学掩模调制的鼠眼像差精确测量

Accurate measurement of mouse eye aberration combined with optical mask modulation

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1100 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0051>

面结构光在机检测的叶片反光抑制技术

Blade reflection suppression technology based on surface structured light on-machine detection

中国光学 (中英文). 2022, 15(3): 464 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0194>

基于偏振差分图像的海天线检测方法

Sea-sky-line detection method based on polarization difference images

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 596 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0181>

基于法向量和面状指数特征的文物点云棱界配准方法

Aligning method for point cloud prism boundaries of cultural relics based on normal vector and faceted index features

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 654 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0156>

基于改进引导滤波器的多光谱去马赛克方法

Multispectral demosaicing method based on an improved guided filter

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1056 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0231>

文章编号 2097-1842(2024)05-1199-10

信息熵-低通滤波联合掩模云层干扰去除方法

李静*, 李颖

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 为了降低海洋光学遥感图像中云区对海面表面纹理分析的影响, 本文开展了信息熵-低通滤波融合掩模的云层干扰去除研究。首先, 分析了现有遥感图像去云算法的基本原理及其局限性。在此基础上, 提出一种基于信息熵-低通滤波联合掩模的云层干扰去除方法。其中包括对遥感图像的改进矩匹配的去条带预处理、局部信息熵滤波, 以及联合低频滤波作为遥感图像中各像元的校正参数。该算法具有复杂度低、处理速度快的特点。实验结果表明: 与现有算法相比, 本文提出的算法可在低计算复杂度的前提下, 大幅增强各区域的纹理细节信息, 其平均信息熵可达到 7.8 以上, 对比度可达到 60 以上, 平均梯度可达到 200 以上; 图像细节方面, 本文算法能够在不引入伪边缘、非均匀性的前提下, 充分展现受云区影响的海表纹理细节, 进一步满足高保真度的遥感应用需求。

关键词: 云层检测; 干扰去除; 信息熵滤波; 低通滤波

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2024-0067

Cloud interference removal using information entropy-low-pass-filtering combined mask

LI Jing*, LI Ying

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: zuobin97117@163.com

Abstract: To mitigate the impact of clouds on sea surface texture analysis in marine remote sensing images, this paper studies the removal of cloud interference using an information entropy-low-pass-filter combined mask. Initially, we analyze the fundamental principles and limitations of the existing remote sensing image declouding algorithms, highlighting their unsuitability for applications requiring high fidelity. Subsequently, we propose a cloud interference removal technology based on information entropy-low-pass filtering combined mask. This technology encompasses destriping procedures with improved moment matching for remote sensing images, local information entropy filtering, and joint low-frequency filtering as correction parameters for each pixel in the images. The algorithm is characterized by low complexity and high time efficiency. Experimental results demonstrate that, compared to existing algorithms, the proposed method significantly enhances texture detail information in thin cloud areas and cloud edges while maintaining low computational complexity. It achieves an image information entropy over 7.8, a contrast ratio exceeding 60, and a mean gradient above 200. In comparisons of image details, the proposed algorithm enhances texture details without introducing artifacts or non-uniformities, thereby meeting the high-fidelity requirements for remote

sensing applications.

Key words: cloud detection; interference removal; information-entropy filter; jointed mask

1 引言

舰船、潜艇等是海洋遥感的一类重要探测目标,但在遥感图像中目标本身仅占据极少量的像素,甚至隐匿在水下,难以直接观察。然而其运动所产生的尾迹却可扩散至几十公里^[1],而且蕴含着目标朝向、速度、几何特征等丰富的信息,其可在海表存续数十分钟之久^[2-3],因此获取并检测尾迹在海表所呈现的纹理特征来间接探测海上目标正成为一项研究热点。然而尾迹在海表所呈现的纹理细节在尺度上较微观、在强度上较微弱。针对这一问题,许多学者提出利用时间延迟积分 CCD 探测器的信号转移特性,在推扫过程中实现对暗弱目标多次短时曝光^[4-6],叠加得到高信噪比、高分辨率、高动态范围的海洋光学遥感图像^[7]。尽管如此,仍有诸多导致图像质量下降的因素,使得该技术的应用与发展受限。例如:推扫成像的固有缺陷导致的条带噪声^[8]在尺度上与海表纹理特征接近,在后续纹理分析时容易造成误判;海洋大气环境较陆地上更为复杂多变,云层干扰更为常见,厚云层会完全遮挡其覆盖区域,导致目标探测与识别、特征提取等工作无法正确进行^[9];薄云层虽具有一定的透明度,但仍会降低其覆盖区域的对比度。在海洋光学遥感图像处理中,云区的处理效果直接影响后续处理分析的可靠性^[10]。为了提高海洋光学遥感图像的利用价值,亟需研究一种能够降低云层对海表纹理特征干扰的算法。

近年来,国内外学者根据云区的不同性质提出了不同类型的云区处理算法。它们大致可分为以下两类:基于阈值和基于分类的算法。基于阈值的算法通过确定云区的光谱亮度特性合理设置阈值。例如先进中高分辨率光谱辐射成像仪 (MODIS),该仪器配备了热红外和水蒸气吸收光谱,利用云区的光谱特性来协助辨云^[11-12]。对于诸如 Landsat 这类卫星所获取的分辨率较高、光谱较少的遥感图像,国内外学者基于单幅遥感图像提出一些自动化云量估计算法^[13]。文献 [14] 提出了自动云层及其阴影掩模算法,用以确定在云

层光谱-温度空间的边界,并根据太阳高角和云层高度对其阴影位置进行预测。文献 [15] 提出了 Fmask 算法,该算法能够通过基于场景的阈值-概率掩模,并根据目标匹配计算云层阴影。在 Fmask 算法中,基于单个 Landsat 影像的大量绝对晴空像素的阈值不是恒定的,其受光谱域限制,这也导致 Fmask 算法无法适用于复杂表面,例如城市、雪地和山脉。文献 [16] 将雾霾优化变换 (HOT) 响应水平作为云光学深度的替代测量,并通过给定云块中 HOT 响应的空间分布来估计相应阴影斑块中入射可见辐射的减少程度。虽然该方法实现了云影对象之间的自动空间匹配,但手动选择 HOT 阈值会直接影响检测效果。基于分类的方法则常常利用模式识别、机器学习和计算机视觉的方法^[17]。文献 [18] 将一些有效的指标与无监督分类方法相结合,实现了 RGB VHR 图像中的云及其阴影的检测和去除。该方法可用于土地的利用分析。文献 [19] 提出的概率神经网络分类器利用时间上下文信息跟踪图像序列中的云随时间的变化情况,并在训练和更新方案中均采用最大似然准则。近年来,利用标记图像的几何、纹理或颜色信息,基于分类的云检测方法不断改进训练过程,以实现更准确的云检测^[20]。

目前云区处理方法大多集中在云区识别与分类及掩模去除^[21-24],少有文献讨论云区对其覆盖地物特征的影响。对于受影响地物特征的增强或复原,也仅局限于复原较显著的地物特征^[25]。对于海洋光学遥感图像,海表纹理特征较微弱,容易被诸多干扰因素所淹没,因此,对云区处理后,往往会导致其覆盖或附近的残余海表纹理细节失真,甚至丢失,并额外引入伪边界,难以满足高保真度要求的遥感应应用^[26]。通过观察大量海洋光学推扫遥感图像中的云层,根据云层对所覆盖地物的影响,将云区分为薄云区、厚云区、云边界区 3 类。其中:薄云区对其覆盖地物的影响主要是降低对比度,其地物细节仍得以一定程度的保留;厚云区则完全遮盖其覆盖地物的细节特征,但边缘区域可能较薄,在处理时,为了充分展现细节信息,边缘区域可当做薄云区处理;若云区含有絮状

云, 呈棉花散落样分布时, 除掩盖地物信息外, 还增加了大量边缘区, 严重破坏云区-非云区边界地物的连续性, 给目标识别等后续处理带来巨大的挑战。

无论云区对地物造成怎样的干扰, 在对于保真要求较高的应用中, 均需重点研究以下两个内容: (1) 云区覆盖或附近地物残留细节的增强; (2) 减少处理造成的不良影响(引入伪边界、非均匀性等)。因此, 需要在使计算复杂度尽可能低的前提下, 同时实现以上两点, 为高保真要求的海洋遥感图像应用提供可靠的预处理手段。

本文以最大程度保留海表纹理特征为出发点, 提出一种信息熵-低通滤波联合掩模云层干扰去除方法。具体行文安排如下: 第2节阐述现有方法的局限性, 第3节介绍信息熵-低通滤波联合掩模云层干扰去除方法的原理与实现方法; 第4节开展实验比较, 说明本文提出的方法可行性和适用性; 最后在第5节中总结全文。

2 研究方法

在原始的含云海洋推扫遥感图像, 除了有云区干扰外, 还混杂着条带噪声等干扰, 因此, 首先要进行条带预处理, 然后再进行信息熵滤波、低通滤波, 并根据滤波结果, 联合设定各像元校正参数。最后, 对遥感图像进行校正, 以降低云区干扰程度, 从而使其覆盖的或附近的海表纹理细节特征得以增强。

2.1 图像预处理

本文以如图1所示的两幅海洋遥感推扫图像作为示例。可以看到图像受到多重不利因素干扰, 包括大气层、云层(其中左图存在厚云区)、以及条带噪声等, 难以直接观察到海洋表面纹理信息。

由于标定系数未知, 故采取矩匹配算法去除条带噪声。首先, 计算出大小为 $M \times N$ 的全局图像 $f(m, n)$ 的均值 $\text{mean}(f)$ 和标准差 $\text{std}(f)$:

$$\text{mean}(f) = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) \quad (1)$$

$$\text{std}(f) = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [f(m, n) - \text{mean}(f)]^2} \quad (2)$$

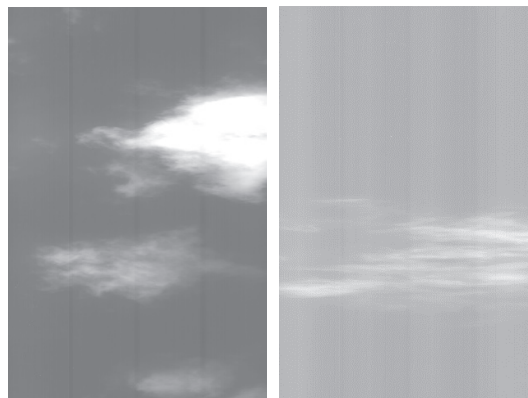


图1 两幅原始推扫海洋遥感图像

Fig. 1 Original push-broom maritime remote sensing images

随后计算沿推扫方向各列的均值 $\text{mean}[f(:, n)]$ 和标准差 $\text{std}[f(:, n)]$:

$$\text{mean}[f(:, n)] = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} f(m, n) \quad (3)$$

$$\text{std}[f(:, n)] = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} [f(m, n) - \text{mean}[f(:, n)]]^2} \quad (4)$$

最后, 按下式实现矩匹配:

$$\hat{f}(m, n) = \frac{f(m, n) - \text{mean}[f(:, n)]}{\text{std}[f(:, n)]} \times \text{std}(f) + \text{mean}(f) \quad (5)$$

然而, 对于存在云区等易发生过曝的图像而言, 过亮的区域通常作为异常数据, 这就容易给式(1)~式(4)带来计算误差, 具体结果如图2所示。

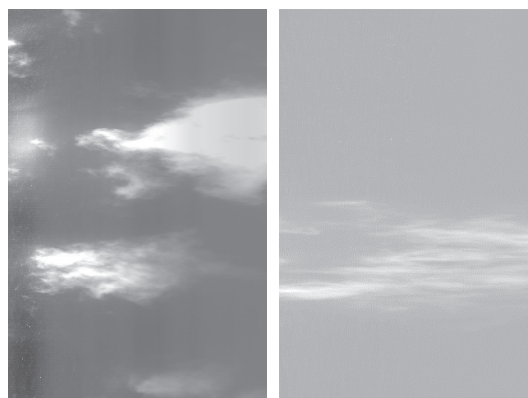


图2 经矩匹配去条带噪声后的图像

Fig. 2 Images after stripe noise removal by moment matching

由图2可以看到, 条带噪声得到一定程度的抑制, 然而左图仍残留可见的非均匀性, 此即为过

亮区域导致的计算误差的表现,需要排除该云区数据。计算各列像元的 10 分位和 90 分位灰度值 $DN_{p=10\%}^{f(:,n)}$ 和 $DN_{p=90\%}^{f(:,n)}$, 并将计算式 (1)~式 (4) 时得到的式 (6) 值为 0 的像元排除在外:

$$I[f(m,n)] = \begin{cases} 1, & DN_{p=10\%}^{f(:,n)} < f(m,n) < DN_{p=90\%}^{f(:,n)} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (6)$$

因此将式 (1)~式 (4) 分别改进为:

$$\text{mean}(f) = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m,n) I[f(m,n)], \quad (7)$$

$$\text{std}(f) = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [f(m,n) - \text{mean}(f)]^2 I[f(m,n)]}, \quad (8)$$

$$\text{mean}[f(:,n)] = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} f(m,n) I[f(m,n)], \quad (9)$$

$$\text{std}[f(:,n)] = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} [f(m,n) - \text{mean}[f(:,n)]]^2 I[f(m,n)]}. \quad (10)$$

原始图像经式 (7)~式 (10) 处理后,再经式 (5) 运算,可得到处理后的图像,如图 3 所示。

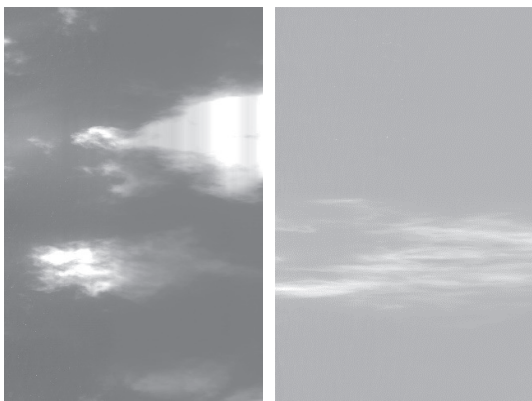


图 3 经改进的矩匹配去条带噪声后的图像

Fig. 3 Images after stripe noise removal by improved moment matching

与图 2 相比,左图的海洋区域非均匀性几乎完全消除,而厚云区所体现的非均匀性则是由于过曝导致云区灰度值反向补偿的结果,对海洋纹理信息无影响,故可在后续的处理中舍弃。

2.2 信息熵滤波器

为了确定云区对地物细节特征的影响程度,本文引入了信息熵这一量度,即

$$H(\Omega) = - \sum_{i=0}^{2^b-1} p(i) \log_2 p(i), \quad (11)$$

式中, $p(i)$ 表示图像区域 Ω 中出现灰度值为 i 的概率, b 表示该图像的位深。动态范围越窄,上式的值越低。云层的存在将导致其覆盖地物的动态范围被压缩,因此信息熵可作为动态范围受影响程度的指标,间接显示云层厚度。对于推扫图像中的饱和区域,经去条带处理后,各列饱和灰度值有差异。针对上述问题,考虑将局部区域窗口限制在某一列的数个像元内,即设置 Ω 为 $2k \times 1$ 大小的窗口 (k 为奇数)。按照这一理论,本文将信息熵滤波器的操作表示为:

$$\text{Ent}_f(m,n) = - \sum_{i=0}^{2^b-1} p_{\Omega}^{f(m,n)}(i) \log_2 p_{\Omega}^{f(m,n)}(i), \quad (12)$$

式中, $p_{\Omega}^{f(m,n)}(i)$ 表示以图像 f 中的像元点 (m,n) 为中心确定的局部区域 $\Omega = \{(i,j) | m - k/2 < i < m + k/2\}$ 中出现灰度值为 i 的概率, $\text{Ent}_f(m,n)$ 即为信息熵滤波图。当 $k = 5$ 时,将图 1 按照式 (12) 处理得到如图 4 所示结果。

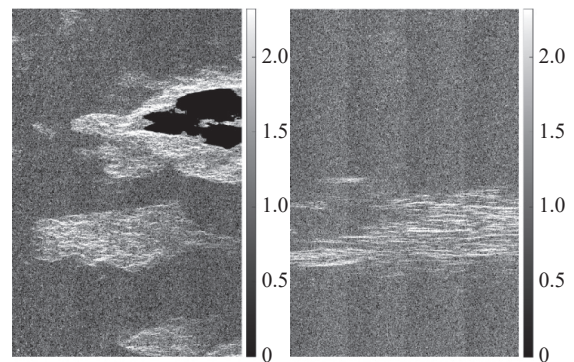


图 4 信息熵滤波图

Fig. 4 Informational entropy filtering image

可以看到,当局部区域为厚云区时,由于灰度值均为最大值,即动态范围仅为单一码值,故信息熵为零。当局部区域为薄云区时,灰度变化较为丰富,仍具一定大小的动态范围。总体上,信息熵滤波图清晰地展示了非云区、薄云区和厚云区。设置与图像大小相当的全一模板,将局部信息熵值为零的区域置零,可得到如图 5 所示结果。可见,在厚云区外,存在局部信息熵为零的像元,呈

椒盐噪声样分布, 通过闭运算即可在保持厚云区不变的前提下进行去除。

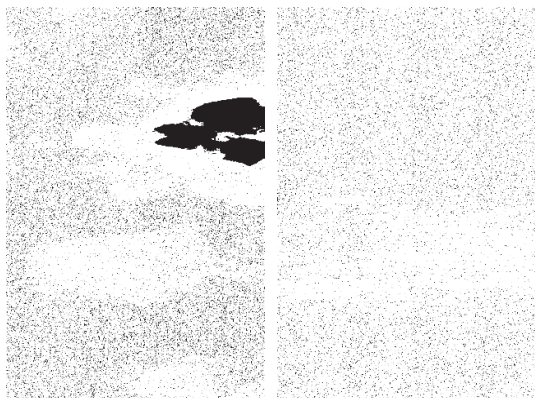


图5 信息熵值为零的指示图

Fig. 5 Indicator map for zero local entropy

2.3 低通滤波器

为提取云区弥散边缘所呈现的低频特征, 考虑采用高斯低通滤波器, 其频域滤波函数为:

$$\text{gauss}(u, v) = \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{\sigma^2}\right), \quad (13)$$

式中 (u, v) 表示频域坐标, σ 表示高斯低通滤波函数的标准差(即为半截止频率, 经纵向实验对比, 取值为6)。将去条带后的图像进行傅立叶变换后再与频域滤波函数进行元素乘, 最后经逆变换得到低通滤波图像。该操作可表示为:

$$f_{\text{GLPF}}(m, n) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{\hat{f}(m, n)\} \otimes \text{gauss}(u, v)\}, \quad (14)$$

式中 $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$ 表示对 $f(m, n)$ 傅立叶变换, \otimes 表示元素乘, $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$ 表示傅立叶逆变换。在得到低通滤波图后, 其可作为基准校正权重图。

2.4 信息熵滤波与低通滤波联合校正

为了使图像中的每一像元均得到合理校正, 下面将结合信息熵滤波和低通滤波结果确定每一像元在两方面的校正系数。其中, 将低通滤波图作为偏置系数, 将信息熵滤波图作为增益系数, 即:

$$f_{\text{P}}(m, n) = \frac{\hat{f}(m, n) - f_{\text{GLPF}}(m, n)}{\text{Ent}_f(m, n) + 1 - \alpha(m, n)}, \quad (15)$$

式中 $1 - \alpha(m, n)$ 为缓和项, 是对信息熵滤波图的闭运算, 避免被零除。应注意的是按照上式计算出的结果超出 $[0, 1]$ 的浮点型范围, 因此还需进行归一化处理。最后得到如图6所示的结果。

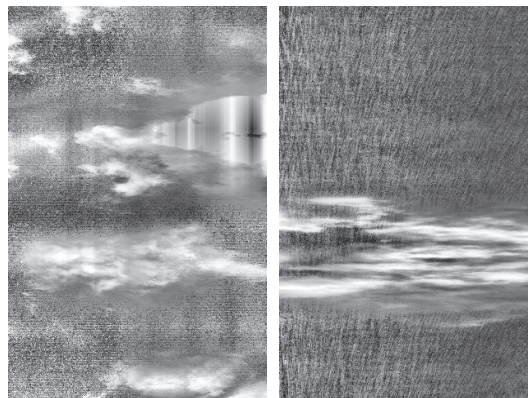


图6 本文算法处理效果

Fig. 6 Processed by the proposed algorithms

3 实验结果比较

为了评价本文所提算法的性能, 选择3种常用、成熟且时效性高的算法, 与本文算法开展比较实验。下面将简要介绍这些算法以及其主要参数的含义和设置。

(1)基于暗通道先验的去雾算法^[27]。其利用云、雾、大气对光散射的共性, 将云区覆盖地物复原视作去雾操作。该算法的主要参数为大气光强 AtmLight , 该参数在0~1内可调, 其值越高, 去云雾效果越显著, 此时云层将可见光大量或完全散射, 呈现白色, 大气光最强。故将 AtmLight 设置为1。

(2)局部直方图均衡算法^[28-29]。其通过限定图像局部区域来限定待均衡化的灰度动态范围, 降低灰度值过高区域所引入的干扰。主要参数为局部区域切片数量 NumTile 。该参数越大, 图像内局部区域越小, 区域内动态范围越窄, 增强效果越明显, 但应保持局部区域尺度远大于感兴趣目标(本文中的海表纹理特征)的尺度, 否则会导致失真。经过纵向比较与权衡, NumTiles 设置为 $[32, 32]$ 。

(3)低频信息消减算法。将大气和云区的特征视作低频信息组成部分, 在频域上抑制其干扰, 以凸显海浪纹理等高频特征。参数包括截止频率 σ , 其应与云区的低频特征的频率范围相当。经过纵向实验比较, $\sigma=10$ 。

(4)本文算法的参数包括表示信息熵滤波窗口大小的参数 k 和低通滤波的截止频率 σ 。其中为了避免海表纹理特征失真, k 不宜过小; 考虑到

薄云区覆盖地物细节恢复, σ 应适当减小。经过纵向实验比较, 确定 $k=5$, $\sigma=6$ 。

在实验样本数据选择中, 筛选了 635 张尺寸为 5000×1536 的海洋遥感图像, 其中云区覆盖率在 10%~60% 之间。同时从中以 200×200 大小尺

寸框取 3 类子区域: 薄云区、近云区和非云区。数量各控制在 300 左右, 用于评价各算法对海表纹理细节的影响。图 7 (彩图见期刊电子版) 展示了部分样本数据、各算法的处理效果以及框取区域示例。

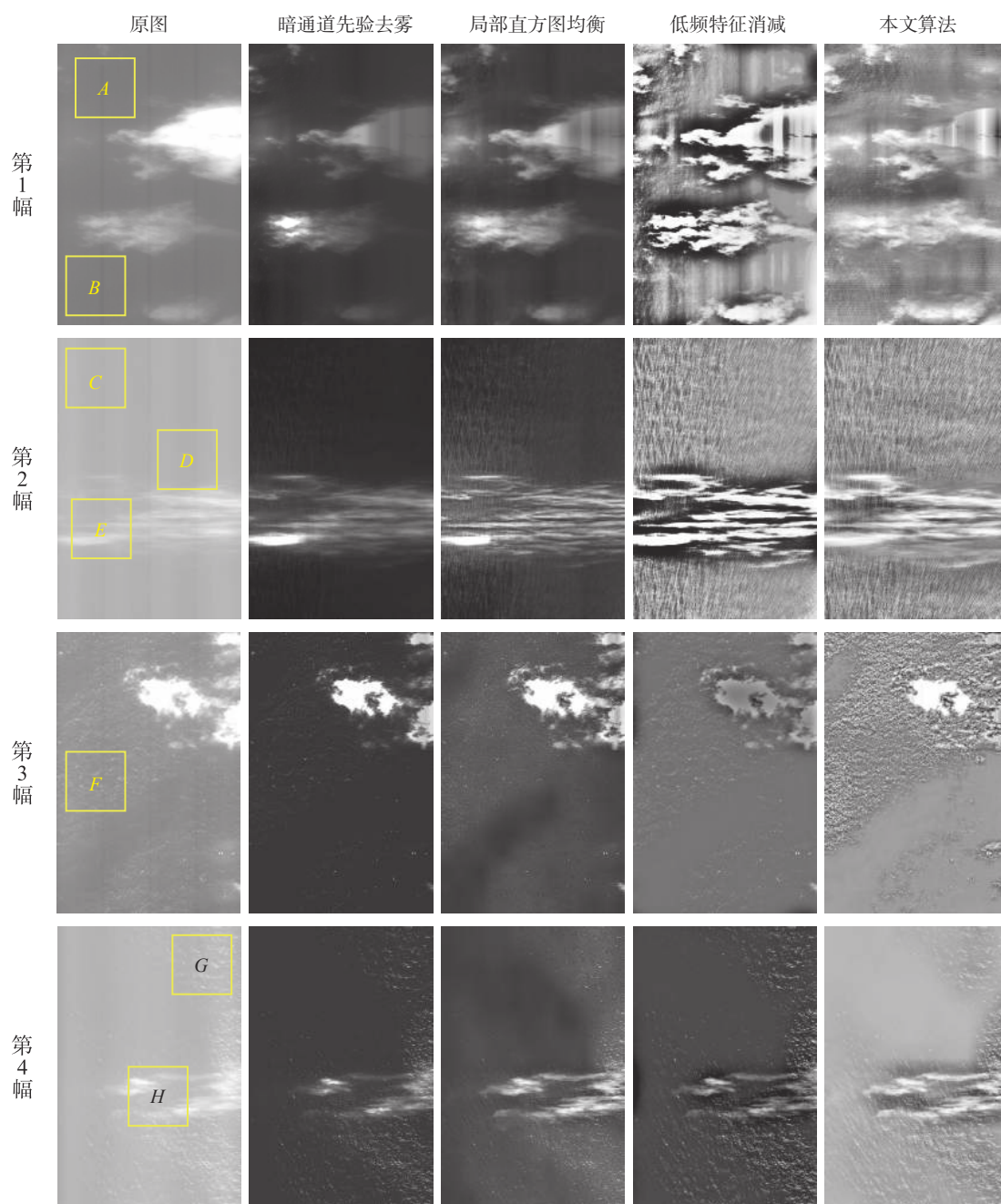


图 7 原始图像(部分)及各算法处理后图像。从上到下分别是 4 幅不同图像; 从左到右分别是原图、基于暗通道先验去雾、局部直方图均衡、低频特征消减、本文算法结果。黄框表示框取示例, 其中 A, B, D 为近云区; C, F, G 为非云区; E, H 为薄云区

Fig. 7 Comparison between original images (Part) and corresponding images processed results obtained by four algorithms. From top to bottom are 4 different images, from left to right: original images, and processed by dark channel prior, local histogram equalization, low-frequency diminishing and proposed algorithm. Yellow Squares are examples of selected areas for evaluations. A, B, D are near cloud areas; C, F, G are non-cloud areas, E, H are thin-cloud areas.

3.1 量化评价比较

为了客观评价各算法性能, 选择如下 3 种量化指标来评价细节提升效果。

(1) 图像信息熵, 根据式 (11) 计算这些区域的图像信息熵, 此时 Ω 即为选框内区域。从该式可以看出, 选框内部的直方图分布越均匀, 所展现的信息越丰富, 信息熵值就越高。

(2) 对比度, 可按下式计算:

$$\text{std}(\Omega) = \sqrt{\frac{1}{p \times q} \sum_{i=0}^{p-1} \sum_{j=0}^{q-1} [\Omega(i, j) - \text{mean}(\Omega)]^2}, \quad (16)$$

式中, p 和 q 分别为选框区 Ω 的宽和高。 $\text{mean}(\Omega)$ 表示选框区 Ω 的平均灰度值。选框区 Ω 的内部动态范围越大, 对比度越高。

(3) 平均梯度, 可按下式计算

$$MG = \frac{1}{p \times q} \sum_{i=0}^{p-1} \sum_{j=0}^{q-1} \sqrt{H_{\text{Grad}}(i, j)^2 + V_{\text{Grad}}(i, j)^2}, \quad (17)$$

其中 $H_{\text{Grad}}(i, j)$ 和 $V_{\text{Grad}}(i, j)$ 分别代表选框内的水平和垂直方向的梯度:

$$H_{\text{Grad}}(i, j) = \Omega(i, j + 1) - \Omega(i, j), \quad (18)$$

$$V_{\text{Grad}}(i, j) = \Omega(i + 1, j) - \Omega(i, j). \quad (19)$$

选框区 Ω 内相邻像元的灰度差异越大, 由式 (17) 计算得到的平均梯度值就越高。

用上述 3 种评价指标测试原图及 4 种算法处理后图像中各选框区域, 将结果进行统计整理, 如表 1~表 3 所示。其中加粗数字表示当前类型区域的最优算法结果。

表 1 各类算法在局部区域中的信息熵比较

Tab. 1 Comparison of image entropies in local area of images processed by different algorithms

	薄云区	近云区	非云区	平均值
原图	5.202	3.191	3.391	3.928
基于暗通道先验算法	6.282	2.835	4.296	4.471
局部直方图均衡算法	7.350	2.967	5.016	5.111
低频特征消减算法	4.175	2.976	2.936	3.363
本文算法	7.847	7.976	7.826	7.883

结合图 7 及表 1~表 3 可以看到: 基于低频特征消减算法加重了云区边界特征(即引入伪边

缘), 导致该算法在薄云区的对比度和平均梯度这两个指标上达到最大, 然而在近云区和非云区中, 本文算法的各指标均超过其他算法。从平均值来看, 本文算法在对比度上与基于低频特征消减的算法相当(均达到 60 以上), 信息熵和平均梯度分别达到 7.8 和 200 以上, 综合指标显著高于其他算法。

表 2 各类算法在局部区域中的对比度比较

Tab. 2 Comparison of image contrasts in local area of images processed by different algorithms

	薄云区	近云区	非云区	平均值
原图	12.088	2.226	2.582	5.632
基于暗通道先验算法	55.377	8.322	5.479	23.059
局部直方图均衡算法	55.402	19.079	9.107	27.863
低频特征消减算法	104.881	66.954	54.744	75.526
本文算法	60.306	72.438	58.656	63.800

表 3 各类算法在局部区域中的平均梯度比较

Tab. 3 Comparison of image mean gradients in local area of images processed by different algorithms

	薄云区	近云区	非云区	平均值
原图	6.678	5.970	4.612	5.753
基于暗通道先验算法	24.486	31.244	10.053	21.928
局部直方图均衡算法	72.733	76.943	21.358	57.011
低频特征消减算法	94.857	269.980	189.559	184.799
本文算法	74.298	315.702	259.858	216.619

3.2 图像细节比较

观察图 7 可以看出, 基于大气光先验的去雾算法和局部直方图均衡算法均忽略了非云区的局部细微的灰度变化, 导致非云区的灰度范围进一步压缩、纹理丢失。而低频信息消减算法的处理效果虽然充分显示了图像局部的灰度变化信息, 增强了海表纹理结构, 然而在云区边缘上, 由于灰度差异较大, 边缘特征得到大幅增强, 形成伪边缘, 导致靠近边缘区域的纹理丢失。而本文算法则可以在不加重云区边缘的前提下, 充分展示海洋纹理信息。为了比较各类算法处理后的图像细节, 以图 7 中黄框所示的 8 处不同区域为例, 将这些区域的细节进行放大展示, 如图 8 所示。

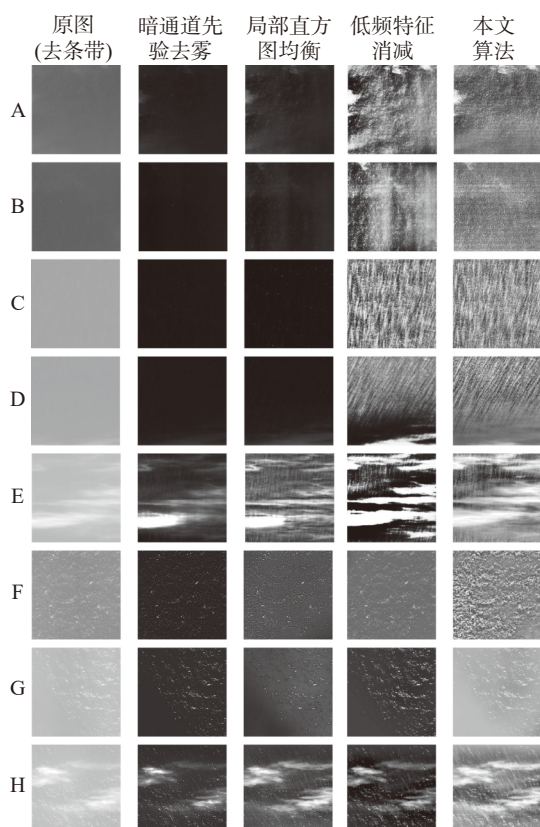


图 8 局部区域的细节比较

Fig. 8 Local area details comparison

可以看到:原图难以观察到海表纹理细节(第一列);在云层的高反射率干扰下,基于暗通道先验去雾的算法将薄云本身视作了待增强区域,因而仅能提升薄云本身的对比度,未能提升海面纹理细节(第二列);基于局部直方图均衡算法处理后,纹理细节显示仅有略微提升,仍难以满足纹理特征检测需求(第三列);基于低频信息消减的算法则可有效提升海表纹理细节质量(第四列),但在云边缘区域出现了伪边缘(*D*、*E*区),所覆盖的海表纹理特征较暗,难以观察其纹理细节,且有非均匀性残留(特别是*B*区)。本文的算法能够在不

引入伪边缘和非均匀性的前提下显示更多细节信息,最大限度地保留其纹理特征的真实性和完整性(第五列)。

4 结 论

本文首先简述了基于海洋遥感的目标尾迹检测,以及其在海表所浮现的纹理特征在尺度和强度上的特点。随后介绍了云层对海洋光学遥感图像的干扰特点以及现有的云区检测和去除手段,并分析了这些算法所存在的局限性。在此基础上,本文提出了一种信息熵-低通滤波联合掩模云层干扰去除方法,通过采用基于改进矩匹配的条带噪声去除、局部信息熵滤波,以及联合低通滤波结果作为遥感图像中各像元的校正参数,有效降低了云层对海表纹理细节的干扰。为了评价本文算法性能,选取 635 张含云海洋光学遥感图像数据作为实验对象,应用 4 种算法(基于暗通道先验的去雾算法、局部直方图均衡算法、低频特征消减算法和本文算法)进行处理。对各算法处理结果,分别等量框取 3 类不同区域(非云区、近云区、薄云区),用 3 种不同的量化指标(信息熵、对比度、平均梯度)分别进行评价。量化评价结果表明,本文提出的算法对于含云遥感图像中的各类区域均可有效校正,各类区域的处理效果总体上优于其他 3 类算法,其中在对比度指标上,本文算法与基于低频特征消减的算法相近(均达到 60 以上),信息熵和平均梯度分别达到 7.8 和 200 以上,均显著高于其他算法。在图像细节方面,本文算法处理后,图像各区域的细节纹理特征(特别是云边缘区域)均得到有效增强,且未引入额外的伪边缘和非均匀性,满足高保真度要求的遥感应用需求。

参考文献:

- [1] LIU Y F, DENG R R. Ship wakes in optical images[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2018, 35(8): 1633-1648.
- [2] XUE F D, JIN W Q, QIU S, *et al.*. Rethinking automatic ship wake detection: state-of-the-art CNN-based wake detection via optical images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5613622.
- [3] DING K Y, YANG J F, LIN H, *et al.*. Towards real-time detection of ships and wakes with lightweight deep learning model in gaofen-3 SAR images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 284: 113345.
- [4] WANG D J, LI W M, YAO Y, *et al.*. A fine image motion compensation method for the panoramic TDI CCD camera in remote sensing applications[J]. *Optics Communications*, 2013, 298-299: 79-82.
- [5] 张元贞, 孙晓兵, 骆冬根. 应用于海洋观测的 TDI-CCD 驱动电路的设计[J]. *大气与环境光学学报*, 2019, 14(5):

- 385-392.
- ZHANG Y ZH, SUN X B, LUO D G. Design of driving circuit of TDI-CCD for ocean observation[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2019, 14(5): 385-392. (in Chinese).
- [6] 陶淑苹, 张续严, 冯钦评, 等. 针对广域像移变化的数字时间延迟积分方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0911001.
- TAO SH P, ZHANG X Y, FENG Q P, *et al.*. Digital time delay and integration method for wide-range image motion variation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0911001. (in Chinese).
- [7] 宋明珠. 海洋弱小动态目标光学探测技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.
- SONG M Z. *Research on optical detection techniques for ocean weak moving targets*[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2020. (in Chinese).
- [8] LIU N, LI W, TAO R, *et al.*. Wavelet-domain low-rank/group-sparse destriping for hyperspectral imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(12): 10310-10321.
- [9] TAO L T, YUAN L, SUN J. SkyFinder: attribute-based sky image search[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2009, 28(3): 68.
- [10] KANG X D, HUANG Y F, LI SH T, *et al.*. Extended random walker for shadow detection in very high resolution remote sensing images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(2): 867-876.
- [11] FREY R A, ACKERMAN S A, LIU Y H, *et al.*. Cloud detection with MODIS. part I: improvements in the MODIS cloud mask for collection 5[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25(7): 1057-1072.
- [12] ACKERMAN S A, HOLZ R E, FREY R, *et al.*. Cloud detection with MODIS. part II: validation[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25(7): 1073-1086.
- [13] IRISH R R, BARKER J L, GOWARD S N, *et al.*. Characterization of the landsat-7 ETM+ automated cloud-cover assessment (ACCA) algorithm[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2006, 72(10): 1179-1188.
- [14] HUANG CH Q, THOMAS N, GOWARD S N, *et al.*. Automated masking of cloud and cloud shadow for forest change analysis using Landsat images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(20): 5449-5464.
- [15] 张舒宁, 张浩, 张兵, 等. 一种适合高光谱卫星云识别的 Fmask 改进算法[J]. *光学学报*, 2023, 43(24): 2428009.
- ZHANG SH N, ZHANG H, ZHANG B, *et al.*. An improved Fmask algorithm for cloud detection applied to hyperspectral satellite[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(24): 2428009. (in Chinese).
- [16] 姜琪, 代晶晶, 田淑芳. WorldView-3 单景影像去云处理对比研究[J]. *测绘科学*, 2021, 46(8): 141-147.
- JIANG Q, DAI J J, TIAN SH F. Comparative study on cloud removal of WorldView-3 single scene images[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(8): 141-147. (in Chinese).
- [17] BAI T, LI D R, SUN K M, *et al.*. Cloud detection for high-resolution satellite imagery using machine learning and multi-feature fusion[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(9): 715.
- [18] MOVIA A, BEINAT A, CROSILLA F. Shadow detection and removal in RGB VHR images for land use unsupervised classification[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 119: 485-495.
- [19] TIAN B, AZIMI-SADJADI M R, VONDER HAAR T H, *et al.*. Temporal updating scheme for probabilistic neural network with application to satellite cloud classification[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2000, 11(4): 903-920.
- [20] TAN K, ZHANG Y J, TONG X. Cloud extraction from Chinese high resolution satellite imagery by probabilistic latent semantic analysis and object-based machine learning[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(11): 963.
- [21] 逢淑林, 孙林, 杜永明, 等. 全谱段光谱成像仪遥感影像云检测算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(22): 2228003.
- PANG SH L, SUN L, DU Y M, *et al.*. Cloud-detection algorithm for images obtained using the visual and infrared multispectral imager[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(22): 2228003. (in Chinese).
- [22] 葛曙乐, 董胜越, 孙根云, 等. 一种适用于高分五号全谱段光谱成像仪影像的云检测算法[J]. *上海航天*, 2019, 36(S2): 204-209.
- GE SH L, DONG SH Y, SUN G Y, *et al.*. Cloud detection algorithm for images of visual and infrared multispectral imager[J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, 36(S2): 204-209. (in Chinese).
- [23] 吴代强, 何涛. 基于 Landsat8 样本数据库的高分五号影像云识别[C]. 第七届高分辨率对地观测学术年会论文集.

- 高分辨率对地观测学术联盟, 2020: 11.
- WU D Q, HE T. GaoFen-5 image cloud detection based on landsat8 sample database[C]. *The 7th China High Resolution Earth Observation Conference*. Academic Alliance for High Resolution Earth Observation, 2020: 11. (in Chinese).
- [24] 陶淑苹, 金光, 张贵祥, 等. 实现遥感相机自主辨云的小波 SCM 算法[J]. *测绘学报*, 2011, 40(5): 598-603.
- TAO SH P, JIN G, ZHANG G X, *et al.*. A wavelet SCM algorithm used to detect cloud in remote sensing cameras[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(5): 598-603. (in Chinese).
- [25] 王诗尧. 单幅遥感图像去薄云算法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- WANG SH Y. *Research on thin cloud removal for single aerial images*[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese).
- [26] 刘子力, 杨家俊, 王文静, 等. 遥感图像云检测方法综述[J]. *中国空间科学技术*, 2023, 43(1): 1-17.
- LIU Z L, YANG J J, WANG W J, *et al.*. Cloud detection methods for remote sensing images: a survey[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2023, 43(1): 1-17. (in Chinese).
- [27] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [28] ZHU H, CHAN F H Y, LAM F K. Image contrast enhancement by constrained local histogram equalization[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1999, 73(2): 281-290.
- [29] CHENG H D, SHI X J. A simple and effective histogram equalization approach to image enhancement[J]. *Digital Signal Processing*, 2004, 14(2): 158-170.

作者简介:



李 静(1977—), 女, 山东荣成人, 博士, 助理研究员, 2008 年于海军航空工程大学获得博士学位, 现为北京跟踪与通信技术研究所助理研究员, 主要从事航天工程总体研究。E-mail: zuobin97117@163.com



李 颖(1977—), 女, 河北唐山人, 博士, 副研究员, 主要从事通信与信息系
统、电磁兼容、光学系统等方面的研究。E-mail: sunshinegirlly@163.com