

# 基于边缘相位编码的复杂背景下海天线检测

孙熊伟<sup>1,2</sup>, 徐青山<sup>1</sup>, 蔡熠<sup>1,2</sup>, 石敏<sup>3</sup>, 李松<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230031;

<sup>3</sup>海军装备研究院, 北京 100073

**摘要** 复杂的海空背景环境中云层、波浪反射、复杂气象条件等会给海天线检测带来困难。针对复杂背景下海天线检测的环境适应性问题,提出了一种基于图像边缘相位编码的海天线检测方法。该算法通过双边滤波原理对图像进行保边滤波处理,以高斯拉普拉斯算子增强边缘响应,配合设计的高斯核方向滤波器完成边缘相位编码的抑制和增强,然后以相位组内扫描线的累积响应强度和海天区域内像素强度分布模式差值辨识出最优海天线的位置。实验结果表明,该算法能够有效地检测出不同复杂背景条件下的海天线,具有计算量小和环境适应性强的特点。

**关键词** 图像处理; 海天线检测; 相位滤波器; 竞争编码; 双边滤波

中图分类号 TP391 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.1110002

## Sea Sky Line Detection Based on Edge Phase Encoding in Complicated Background

Sun Xiongwei<sup>1,2</sup>, Xu Qingshan<sup>1</sup>, Cai Yi<sup>1,2</sup>, Shi Min<sup>3</sup>, Li Song<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>3</sup>Naval Academy of Armament, Beijing 100073, China

**Abstract** The complex sea sky background such as clouds, wave reflection, complex weather, will bring difficulties to the sea sky line detection. To solve this problem of environmental adaptability of sea sky line detection in complex background, a sea sky line detection method is proposed based on the image edge phase encoding. The principle of bilateral filter is used to preserve the image edges and filter out the high frequency noise, and the edge response is enhanced by the Laplace of Gaussian. The edge phase encoding is enhanced and the noise of the system is restrained combined with the Gaussian-Kernel directional filter. Then, the optimized sea sky line is detected by the analysis of cumulative response intensity of scan line in phase component and the difference of pixel intensity distribution mode in sea sky region. The experimental results show that the proposed method can effectively detect the sea sky line in different complex backgrounds, and has low computation complexity and strong environmental adaptability.

**Key words** image processing; sea sky line detection; phase filter; competitive code; bilateral filter

**OCIS codes** 100.2980; 100.3008; 100.2960

## 1 引言

海天线的检测是海空背景图像处理的一个重要问题。海面远距离平视状态下,被观测海面目标总是会

收稿日期: 2017-03-28; 收到修改稿日期: 2017-06-21

基金项目: 气象专项课题(GYHY201106002-03)

作者简介: 孙熊伟(1987—),男,博士研究生,主要从事地表热红外辐射背景场建模及图像处理方面的研究。

E-mail: xiongweisun@163.com

导师简介: 徐青山(1965—),男,博士,研究员,主要从事大气探测、辐射传输、卫星遥感与图像大气校正等方面的研究。

E-mail: qshxu@aiofm.ac.cn

出现在海天天线附近区域。因此,利用海天天线的位置可以有效地缩小目标搜索范围,从而减小目标检测的计算量,提高算法抵抗背景噪声干扰的能力。在实际采集的光学图像中,复杂的海空环境会给海天天线的检测带来直接影响,例如云层、海浪反射、海面多变的气象条件等,从而无法从采集到的光学图片中提取到明显的海天边界,给海天天线的检测带来困难。

针对海天天线的检测问题,近年来学者做了大量积极的研究工作,根据算法思路大致可以分为三类。第一类是利用图像分割算法分割海天区域<sup>[1]</sup>,然后将海天区域的分割线设定为海天天线。然而在复杂的海天气象环境中,这类算法从宏观策略上难以自适应地得到准确的目标分割阈值,从局部策略上分析,同样会面对大量不规则的云、波浪等复杂背景噪声的干扰,导致局部模式难以有效描述。这些干扰因素严重地影响了算法的实际处理速度和处理效果。第二类是基于大海和天空区域在频域上的不同表征特点,利用多尺度小波变换进行频域上的分离分析<sup>[2]</sup>,这类算法需要在多个尺度上分析图像,其计算复杂性限制了工程实用性。第三类算法是基于先验规律,在排除海面曲率和光学畸变的情况下,将海天天线视为一条直线,基于此思想,将海天天线检测问题转化为直线的提取问题。这类算法由于定位速度较快、环境自适应性较好,目前已经成为海天天线提取的主流方法。从宏观角度出发,大量的研究工作者在大尺度下采用 Hough 变换进行直线检测以确定直线方程<sup>[3-7]</sup>,或采用 Radon 变换将梯度图像以线积分的形式投影到直线的参数空间,通过搜索局部峰值点检测直线特征并确定其参数<sup>[8]</sup>。不过,直接利用边缘或者梯度信息进行统计分析会在检测结果中引入大量的虚假直线特征,给目标的辨识带来困难。基于此,部分研究人员尝试从局部角度出发,利用简单灵活的区域和轮廓信息的边缘跟踪策略<sup>[9]</sup>,避免空间上不相邻的背景目标干扰,但是此类方法容易受到图像中大量不稳定边缘带来的分支判定问题的干扰,降低了算法实际的环境自适应能力。

本文提出了一种新的海天天线检测方法,该方法利用双边滤波原理实现海天图像的保边去噪,配合所设计的图像边缘方向信息进行相位编码增强和抑噪,然后通过相位组分内扫描线的响应强度累积值和海天区域内像素强度分布模式的差异值辨识出最优海天天线的位置。该算法能够有效地克服复杂背景下的噪声干扰,同时降低计算复杂度,具有很好的工程实用性。

## 2 图像抑噪和边缘增强处理

### 2.1 基于双边滤波的保边去噪

在实际采集的海天图像中,复杂的海天环境容易带来高频噪声干扰,形成不稳定的错误边缘。Tomasi 等<sup>[10]</sup>设计了由空间几何距离和局部像素差值共同决定滤波系数的双边滤波算法,利用双边滤波算法的保边滤波特性,构建了双边滤波器,在滤除环境噪声的同时保持了海天天线区域的边缘信息稳定。

该算法首先利用空间距离计算高斯分布权重系数,高频噪声的平滑系数为

$$d(i, j, k, l) = \exp\left[-\frac{(i-k)^2 + (j-l)^2}{2\sigma_d^2}\right]。 \quad (1)$$

同时,利用空间域的差值显著性对平滑系数结果进行加权组合,形成局部保边因子:

$$r(i, j, k, l) = \exp\left(-\frac{\|f(i, j) - f(k, l)\|^2}{2\sigma_r^2}\right)。 \quad (2)$$

通过组合像素的邻域空间信息和局部差值信息,输出滤波计算公式:

$$w(i, j, k, l) = \exp\left[-\frac{(i-k)^2 + (j-l)^2}{2\sigma_d^2} - \frac{\|f(i, j) - f(k, l)\|^2}{2\sigma_r^2}\right], \quad (3)$$

式中  $i, j$  为待处理的像素坐标,  $k, l$  为距中心像素的横向和纵向像素距离,  $\sigma_d$  和  $\sigma_r$  为用于空间平滑和差值显著性增强的高斯标准差。图 1 所示为典型海天背景下的 3 个典型案例的滤波结果。其中,经验参数设置为:原始图片尺寸为 640 pixel×480 pixel,滤波窗口为 5×5,  $\sigma_r=3.0$ ,  $\sigma_d=0.1$ 。

图 1 给出了经典的边缘检测算子的边缘提取结果,通过对比可以发现,经过双边滤波处理之后,大量的高频噪声边缘信息被滤除,保证了海天天线的边缘稳定。

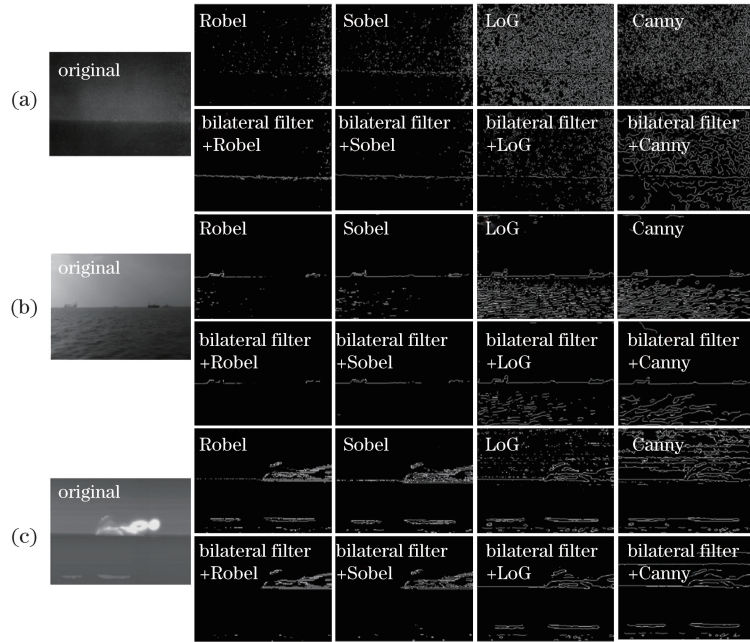


图 1 海天图像抑噪和边缘增强处理

Fig. 1 Denoising and edge enhancement of sea sky image

## 2.2 基于高斯拉普拉斯算子的边缘增强处理

在进行边缘检测操作时,图像对高频噪声比较敏感,本文选择高斯拉普拉斯(LoG)边缘增强算子<sup>[11]</sup>对二维图像信号进行边缘显著性增强。该算法首先对图像进行高斯平滑,然后对高斯核函数进行偏导,再次进行卷积求解。LoG卷积核函数定位为

$$\Delta G_{\sigma}(x, y) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} G_{\sigma}(x, y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} G_{\sigma}(x, y) = \frac{x^2 + y^2 - 2\sigma^2}{\sigma^4} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

式中  $G_{\sigma}(x, y)$  为标准高斯核函数,公式为

$$G_{\sigma}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right). \quad (5)$$

原始图片尺寸为 640 pixel×480 pixel,LoG 滤波窗口为 11×11,高斯核标准差  $\sigma=0.3$ 。如图 1 中边缘提取对比结果所示,LoG 算法在抑制无效边和增强目标边强度方面有更好的效果。相比于经典 Robel、Sobel、Canny 算子的边缘滤波增强算法,LoG 滤波算子在抑制高频边缘信息的同时保持了海天线的完整性,且在稳定性上有着更多的优势。

## 3 基于相位分组的竞争编码

### 3.1 方向滤波器

Kong 等<sup>[12]</sup>最早在掌纹识别的研究工作中提出了对纹理特征进行方向编码的思路,将纹理图像中的每个像素的局部区域方向信息提取出来,把图像从灰度空间映射到方向特征空间,利用组合的纹理方向信息抵抗光照等环境变化带来的干扰。基于方向编码对光照等环境变异的不敏感性和稳定性,构建了可以用于有效探测图像中海天线边缘方向及响应强度的方向滤波器。为了配合高斯滤波算子中带有部分模糊效果的前处理,构建了圆形邻域模板下的方向滤波器。首先以高斯分布预设各个方向的滤波权重[图 2(a)],然后以方向角  $\theta$ ,在圆内切矩形中以线宽度  $l$  提取各个方向上像素尺寸相同的线性方向滤波器,如图 2(b)~(g)所示。

设  $w$  为滤波器半边长尺寸, $x$  为图像中心坐标, $\xi$  为滤波范围内距离图像中心滤波位置的向量坐标,滤波函数定义如下:

$$h(x, \theta) = \frac{\int_{-w}^w F(\xi, x, l, \theta) G(\xi, x) I(\xi, x) d\xi}{k_d(x)}, \quad (6)$$

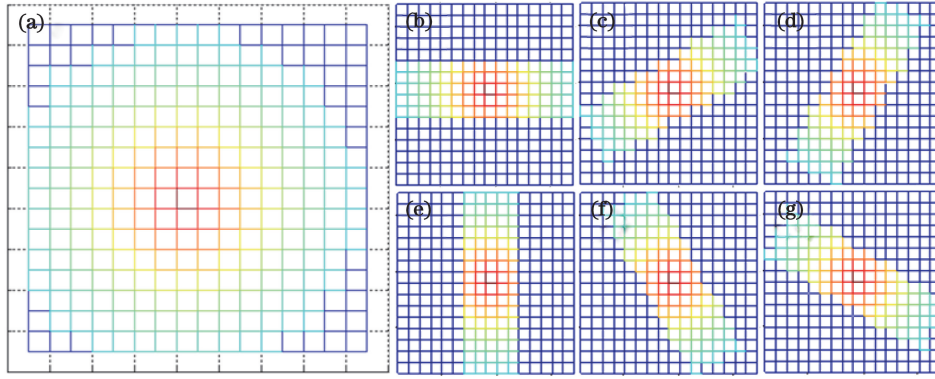


图 2 6 等分方向滤波器设计。(a)滤波器距离权重;(b)~(g)6 个方向的滤波器

Fig. 2 Design of six equal directional filters. (a) Distance weights of filters; (b)-(g) filters in six direction

式中  $I(\xi, x)$  为到中心位置的距离为  $x$  向量为  $\xi$  的像素值,  $F(\xi, x, l, \theta)$  为方向为  $\theta$  宽度为  $l$  的滤波器设定区域,  $G(\xi, x)$  为高斯函数:

$$G(\xi, x) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{d(\xi, x)}{\sigma}\right]^2\right\}, \quad (7)$$

其中

$$d(\xi, x) = d(\xi - x) = \|\xi - x\|. \quad (8)$$

$k_d(x)$  为一个累积常量, 用来归一化滤波器参数, 定义如下:

$$k_d(x, \theta) = \int_{-w}^w F(\xi, x, l, \theta) G(\xi, x) d\xi. \quad (9)$$

利用设计的方向滤波器, 对边缘增强后的图像进行方向滤波增强, 得到 6 个方向的编码结果, 如图 3 所示。

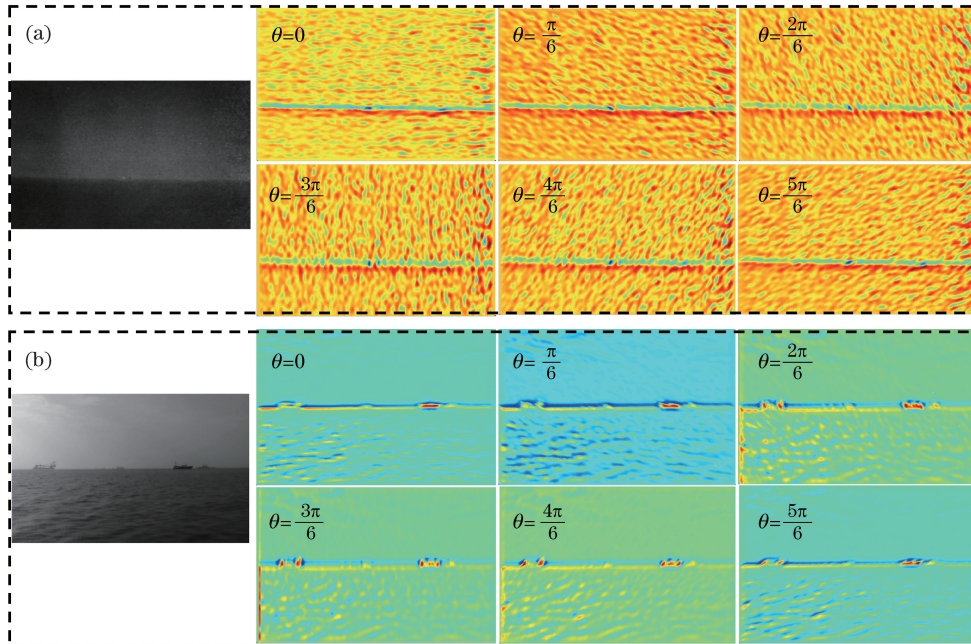


图 3 6 个方向的滤波处理结果。(a)原图;(b)不同方向的滤波结果

Fig. 3 Processing results of six directional filters. (a) Original images;

(b) processing results of each directional filter

通过方向滤波增强, 进一步增强了海天区域边缘特性, 因此海浪、云等自然背景的强干扰边缘的方向不规则性也表现出来, 这为后续有效剔除复杂背景引入的不规则边缘噪声提供了很好的判定基础。

### 3.2 相位竞争编码

利用设计的 6 方向线性滤波器分别对纹理图像进行滤波处理,得到 6 个单方向上的方向滤波响应结果,然后利用 Winner-Take-All<sup>[13]</sup>规则将同一个位置的最强响应方向作为最终的编码方向,以此得到融合之后的统一的稳定性更高的相位响应强度图:

$$I_u(x) = \max[h(x, \theta_j)I(x)], \quad (10)$$

式中  $x$  为每一个像素点的坐标位置,  $h(x, \theta)$  为方向滤波函数,  $\theta_j = j\pi/6$  且  $j = \{0, 1, \dots, 5\}$ 。在此基础上,对融合之后的图像  $I_u(x)$  进行能量强度统计,利用统计的边缘能量强度进一步筛除能量较弱、稳定性较差的像素值,以减少大量不稳定边缘区域的计算。令  $I_b(x)$  为完成筛选过后的相位编码图,最终有效相位编码区域的提取公式为

$$I_b(x) = \begin{cases} 0, & I_u(x) \leq t \\ j, & I_u(x) > t \ \&\& \ I_u(x) = h(x, \theta_j)I(x) \end{cases}, \quad (11)$$

式中分割阈值  $t = \min[fu(x)] + \eta \max[fu(x)] - \min[fu(x)]$ , 根据实验经验设定提取阈值  $\eta = 0.25$  即能保证有效抑制边缘噪声,同时可以很好地保留海天线目标的边缘信息,如图 4 所示,其中背景为蓝色,其他颜色表示不同的相位分组。

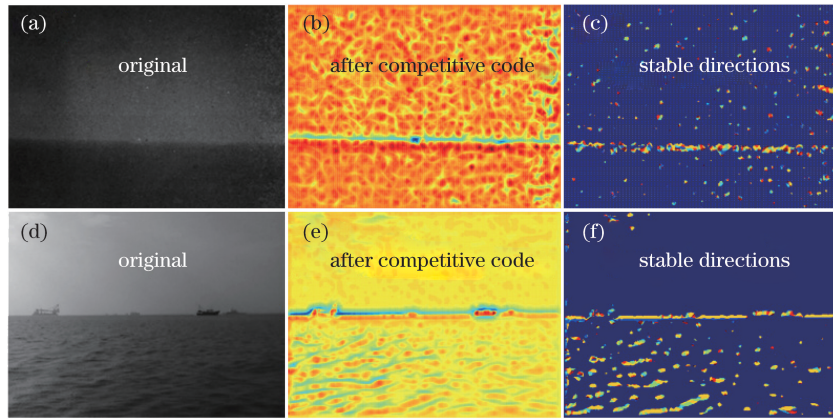


图 4 方向竞争编码处理过程。(a)(d)原图;(b)(e)竞争编码后方向响应图;(c)(f)完成筛选的相位编码图

Fig. 4 Processing results of directional competitive code. (a)(d) Original images;

(b)(e) directional response images after competitive code; (c)(f) phase coding images after screening

通过竞争编码和经验阈值完成有效相位编码区域筛选后,可以明显地观察到,海天线区域的方向特征表现稳定且同相位的编码标记在海天线区域中的分布相对集中,呈现明显的条带特征,与之相对的背景噪声产生的边缘最强响应相位编码则分布不连续且相对散乱。

## 4 基于相位组分分析的海天线提取

### 4.1 提取候选海天线

以相位编码图  $I_b(x)$  为基础,分别提取相位相同且空间相邻的像素组成相位连通体。在部分强背景噪声的海天背景图片中,受到复杂自然背景环境的影响,所提取出的小尺寸相位连通体个数会比较多,通过图像的腐蚀膨胀操作,可以有效地剔除绝大多数小尺寸的背景噪声连通体。

如图 5(a)所示,以相位编码图  $I_b(x)$  上相位连通体质心为固定点,以连通体长轴同水平轴坐标夹角  $\alpha$  为扫描方向,利用数值微分分析器<sup>[13]</sup>(DDA)扫描线方法累积计算相位连通体中对应扫描线位置在  $I_u$  上的边缘响应强度值,得到每个连通体对应的扫描线强度响应为

$$L_{\text{blb}}(x, \alpha) = \sum_{i=1}^N I_u[\text{DDA}(x, \alpha)], \quad (12)$$

其中  $\text{DDA}(x, \alpha)$  表示图像上经过  $I_b(x)$  上连通体质心  $x$  且方向角为  $\alpha$  的 DDA 扫描线段,扫描线段长度为  $N, i = \{1, 2, \dots, N\}$ 。

最后,将多条在角度上相似且距离相近(近似平行,角度差小于 $5^\circ$ )的扫描线方案合并。如图5(b)所示,海天线附近的同相位编码边缘响应更强且更稳定,其扫描线方向上的累积响应强度占比远高于波浪和烟云等背景噪声形成的累积响应[图5(c)]。

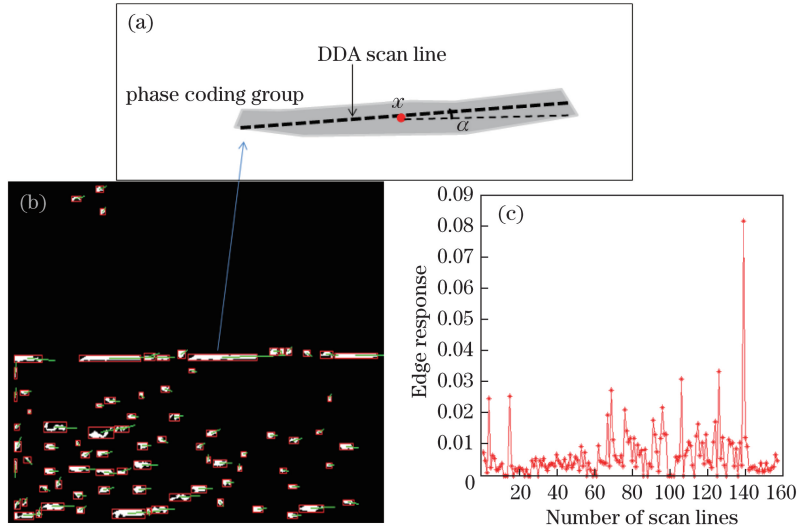


图5 相位编码连通体提取扫描线。(a)海天线扫描累积边缘响应;(b)标注扫描线方向的相位编码连通体;(c)扫描线方向上边缘响应强度分布

Fig. 5 Scan lines extracted from phase coding groups. (a) Cumulative edges response for sea-sky line scanning; (b) phase coding groups marked by scan lines direction; (c) distribution of edges response intensity in the direction of scan line

#### 4.2 海天线判定

为了得到更准确且适应性更好的海天线提取方案,提出了一套简单快速的候选海天线判定规则,判定过程简单。具体步骤如下。

1) 利用比值法,设定经验比值阈值 $h=0.8$ ,当最大响应 $L_{\text{bib}}^{\text{max}}$ 和第二大响应 $L_{\text{bib}}^{\text{sec}}$ 满足判定式时,则直接判定取得最大值的候选方案为海天线,判定结束。判定条件表达式为

$$L_{\text{bib}}^{\text{max}} \times h > L_{\text{bib}}^{\text{sec}} \quad (13)$$

2) 根据经验规则:光学图像中海洋或者天空区域的像素强度在区域内部小距离范围内总是比较相似,而海洋与天空的像素强度分布模式则差异相对较大。因此,海天线上下两侧平行线对应的像素值分别代表了天空和海洋的强度分布模式,其差值应较其他单一区域更加明显。本文构建与海天线平行且距离为 $\|d\|$ 个像素单位的上端和下端扫描线,以上下扫描线中对应位置的像素差值的平均值为条件,筛选最优海天线方案。如图6所示,设有距离待验证海天线为 $\|d\|$ 个像素距离的两侧平行线 $L_U$ 和 $L_D$ ,求取两侧平行线对应像素平均差值 $D(x, \alpha)$ ,其中待验证海天线上 $N$ 个像素点位置为 $X=(x_1, x_2, \dots, x_N)$ ,则

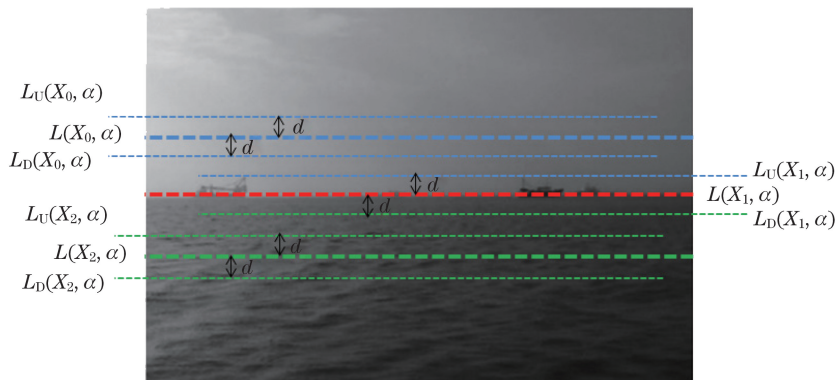


图6 扫描平行线差值

Fig. 6 Difference of scan parallel lines

$$D(X, \alpha) = \frac{\sum_{i=1}^N |I[L_U(x_i + d, \alpha)] - I[L_D(x_i - d, \alpha)]|}{N}. \quad (14)$$

3) 若在海天线判定过程 1) 中比值法判定失败, 则平均距离值  $D(X, \alpha)$  更大的判定为最优海天线。

## 5 实验验证与结果分析

为了验证基于相位编码的海天线检测算法的有效性, 在三亚某海域实际拍摄三类典型场景下的视频案例, 分别为多海浪、天空多云和多礁石。实验随机抽取定量视频帧, 将本文方法与现有实际广泛使用的基于 Hough 变换和 Radon 变换的方法进行性能对比分析。算法的运行环境为 Intel Core2.5 GHz CPU, 4G 内存, 实现工具为 Matlab 2010b。

Hough 变换的思想是将检测到的梯度边缘映射到直线参数空间中, 通过搜索局部峰值确定直线特征的参数。但是 Hough 变换遇到的难点在于整个图像的变换过程会将其中的波浪、背景光、山峦、云层等干扰边缘累加到变换空间, 从而形成峰值点。随机的峰值点将导致大量的原本互不相关的边缘被错误地连接起来, 形成虚假直线, 而从大量的虚假直线中辨识出真正的海天线是非常困难的。Radon 变换是将梯度图像以线积分的形式投影到直线参数空间, 通过搜索局部峰值点检测直线特征并确定其参数, 因此面临着与 Hough 变换同样的问题。不过, Radon 变换的线积分可以反映梯度变化的具体量, 从图 7 可以看出, 相对于 Hough 变换, 其辨识边缘的能力更胜一筹。

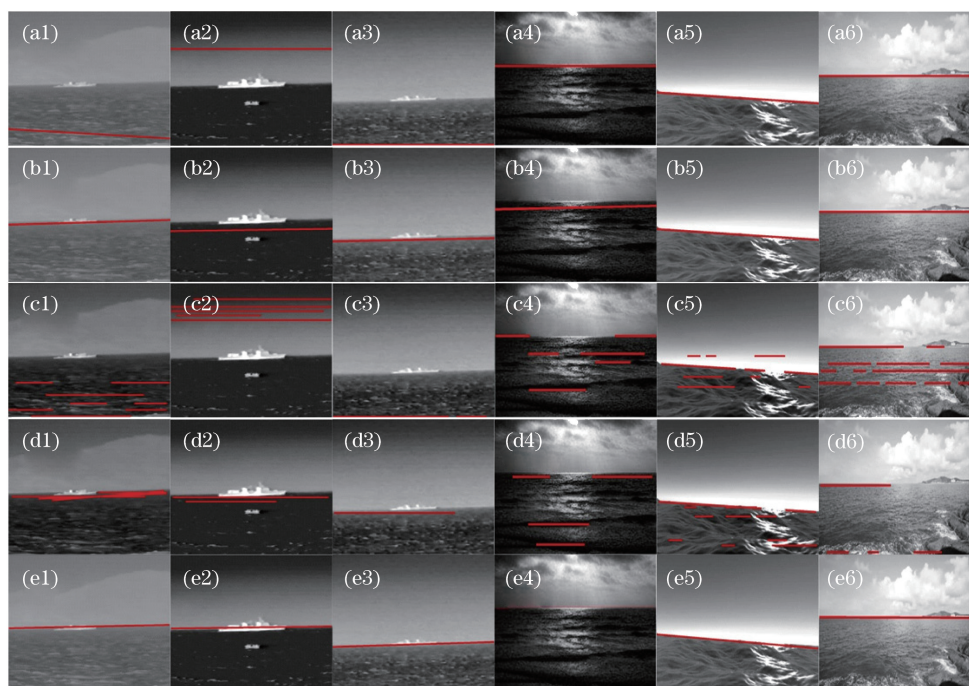


图 7 典型样本图像的海天线检测结果对比。(a1)~(a6)基于 Radon 变换的提取结果;  
(b1)~(b6)基于相位编码前处理和 Radon 变换方法的提取结果;(c1)~(c6)基于 Hough 变换的提取结果;  
(d1)~(d6)基于方向编码前处理和 Hough 变换方法的提取结果;(e1)~(e6)本文方法的提取结果

Fig. 7 Comparison of sea sky line detection results of typical sample image. (a1)-(a6) Extraction results of Radon transform; (b1)-(b6) extraction results of phase encoding preprocess with Radon transform; (c1)-(c6) extraction results of Hough transform; (d1)-(d6) extraction results of direction encoding preprocess with Hough transform; (e1)-(e6) extraction results of proposed method

由图 7 可知, 本文提出的抑噪前处理策略可以有效地剔除大量高频背景边缘噪声, 同时由于自然背景边缘的形态学方向具有不一致性, 因此在进行基于相位的竞争编码分组后, 不相关的边缘信息将具有不同且不连续的相位编码, 因此无法相互连接形成错误的连接线, 从而有效抑制了虚假海天线的形成。因此本文方法更容易克服复杂背景干扰, 能够更准确地辨识出海天线, 其稳健性和准确性明显优于前述两类方法。

为进一步验证本文方法的可靠性,从3类视频中共抽取1000帧分辨率为640 pixel $\times$ 480 pixel的彩色光学图像样本,然后分3次每次随机抽取300帧光学图像作为样本进行测试,对检测结果取平均值。将本文方法同经典的基于Radon变换和Hough变换的方法进行对比。同时,为体现相位竞争编码策略的优越性,将前处理操作同经典的基于Radon和Hough变换的方法进行组合,并将处理结果同人工标注的标准海天线进行比对。分别给出各方法处理结果的准确率(海天线算法检测结果同人工标注结果两者角度差异小于 $\pm 3^\circ$ ,检测距离差异小于 $\pm 4$  pixel)和平均处理时间,如表1所示。

表1 不同方法海天线检测的结果对比

Table 1 Comparison of sea sky line detection results of different methods

| Item                        | Radon transformation | Proposed preprocess+Radon | Hough transformation | Proposed preprocess+Hough | Proposed method |
|-----------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|-----------------|
| Detection rate / %          | 68.3                 | 94.7                      | 54.0                 | 92.3                      | 96.7            |
| Time Consumed per frame / s | 1.3602               | 1.9386                    | 0.7836               | 1.3643                    | 1.1216          |

本文方法在边缘相位信息被分组强化的基础上,利用同相位编码组成的连通体质心和长轴方向构建扫描线,累积扫描线上同相位组分的边缘响应强度。与Radon变换方法相比,该方法对灰度图像边缘累计强度的辨识能力更强,同时根据筛选出的连通体长轴方向进行投影计算的计算量比Radon变换方法的空间变换计算量更小,整体抗噪能力更强。从表1结果可以看出,本文方法的检测准确率更高,且平均处理时间较短,可以有效满足实际处理的时间要求。

## 6 结 论

在复杂海天背景下采集的光学图像容易受到各种强干扰因素的影响,难以保证快速海天线检测的准确性。针对这一问题,利用双边滤波原理对图像进行保边滤波去噪,利用LoG滤波算子增强边缘响应,通过构建方向滤波器、使用方向竞争编码对边缘进行相位分组,使用相位组分连通体提取扫描线,对相邻扫描线进行融合,利用扫描线上同相位组分的边缘响应强度完成海天线的检测。最后,利用实际采集的不同天气情况下的海面光学图像对本文方法进行验证和分析,结果表明,该方法在克服复杂背景噪声干扰方面明显优于现有的基于直接边缘分析的Hough变换和Radon变换方法。本文方法在下一步工作中将考虑如何利用硬件实现空域卷积计算,以进一步加快计算速度。

## 参 考 文 献

- [1] Wen Peizhi, Shi Zelin, Yu Haibin. Automatic detection method of IR small target in complex sea background[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(6): 590-593, 604.  
温佩芝, 史泽林, 于海斌. 复杂海面背景红外小目标自动检测方法[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(6): 590-593, 604.
- [2] Zhang Bing, Zhao Ningxia, Liu Weiting, *et al.* Research on water-sky-line detection technique based on wavelet transform[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(4): 297-299.  
张冰, 赵凝霞, 刘维亭, 等. 基于小波变换的水天线提取算法研究[J]. 激光与红外, 2005, 35(4): 297-299.
- [3] Liu Songtao, Zhou Xiaodong, Wang Chenggang. Robust sea-sky-line detection algorithm under complicated sea-sky background[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(8): 5-10.  
刘松涛, 周晓东, 王成刚. 复杂海空背景下鲁棒的海天线检测算法研究[J]. 光电工程, 2006, 33(8): 5-10.
- [4] Dong Y F, Zhang Y F, Zhu C, *et al.* Extracting sea-sky-line based on improved local complexity[C]. International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, 2010, 6: 82-85.
- [5] Zeng Wenjing, Wan Lei, Zhang Tiedong, *et al.* Fast detection of sea line based on the visible characteristics of marine images[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0111001.  
曾文静, 万磊, 张铁栋, 等. 基于海面可见光图像的海界线快速检测[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0111001.
- [6] Wang Bo, Su Yumin, Wan Lei, *et al.* Sea sky line detection method of unmanned surface vehicle based on gradient saliency[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0511002.  
王博, 苏玉民, 万磊, 等. 基于梯度显著性的水面无人艇的海天线检测方法[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0511002.



- 
- [7] Yang Linna, An Wei, Lin Zaiping, *et al.*. Small target detection based on visual saliency improved by spatial distance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0715004.  
杨林娜, 安玮, 林再平, 等. 基于空间距离改进的视觉显著性弱小目标检测[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0715004.
- [8] Tang D, Sun G, Wang D H, *et al.*. Research on infrared ship detection method in sea-sky background[C]. *SPIE*, 2013, 8907: 89072H.
- [9] Randrianarisoa V, Yang X J, Sheng Y L, *et al.*. Robust automatic ground image feature extraction for multisensor image registration[C]. *SPIE*, 2001, 4385: 129-139.
- [10] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images[C]. *IEEE International Conference on Computer Vision*, 1998: 839-846.
- [11] Sotak G E, Boyer K L. The Laplacian-of-Gaussian kernel: a formal analysis and design procedure for fast, accurate convolution and full-frame output[J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1989, 48(2): 147-189.
- [12] Kong A W K, Zhang D. Competitive coding scheme for palmprint verification[C]. *International Conference on Pattern Recognition*, 2004, 1: 520-523.
- [13] Barrett D P. *Digital differential analysers*[M]. New York: Pergamon Press, 1964.