

低 SNR 海天线提取算法

刘士建^{1,2}, 吴滢跃², 蔡能斌¹

(1. 上海市现场物证重点实验室, 上海 200032; 2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 针对海天线 SNR 低且有一定倾角难于提取的问题, 提出一种新的海天线提取算法。在预处理阶段, 利用 Laplacian 模板对海面的波纹进行增强, 然后使用顺序滤波与数学形态学相结合的方法增加海面波纹的面积与灰度, 预处理后增大了海面与天空的灰度差, 海天线的 SNR 提升 70% 以上; 最后, 设计了一种斜线查找矩阵, 通过对图像行扫描生成该矩阵, 矩阵最大值的横纵坐标即为海天线的位置和角度。实测数据的试验结果验证了该方法的有效性且算法运算简单, 易于工程应用。创新点在于使用模板运算与形态学相结合的方法提高了海天线 SNR 并设计了斜线查找矩阵可以简单地定位海天线的位置和角度, 减少了计算复杂度。

关键词: 低信噪比; 海天线提取; 算法

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3491-05

Novel low-SNR sea-sky-line extraction algorithm

Liu Shijian^{1,2}, Wu Yingyue², Cai Nengbin¹

(1. Shanghai Key Laboratory of Scene Evidence, Shanghai 200083, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: For SNR of sea-sky-line is low and there is a certain inclination so they are difficult to extract, a new extraction algorithm was proposed. Firstly, the image preprocessing was taken by applying Laplacian template filtering to enhance waves on the surface, followed by order-statistics filters and morphologic closing. After the image preprocessing step, the SNR of sea-sky-line was enhanced. Finally, seeking for the inclined sea-sky-line by using a novel matrix, the matrix should be produced by scanning infrared image horizontally, the maximal element of the matrix identified the position and angle of the sea-sky-line. The experimental result shows that the method can locate sea-sky-line efficiently and correctly, requiring a few computation and be used for engineering applications. Innovations are the use of templates and morphological operators to improve SNR of sea-sky-line and find matrix can simply locate the position and angle of sea-sky-line, reducing the computational complexity.

Key words: low-SNR; sea-sky-line extraction; algorithm

收稿日期: 2013-04-10; 修订日期: 2013-05-03

基金项目: 上海市现场物证重点实验室基金资助项目(2010XCWZK04); 十二五国防预研基金(41101050501)

作者简介: 刘士建(1975-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事光电对抗技术方面的研究。Email: shj_liu@ustc.edu

0 引言

红外图像中舰艇目标的识别是光电对抗领域中重点研究的内容之一。由于舰艇等目标通常出现在海天交界处,也就是目标处于海天天线附近,通过确定红外图像中海天线的位置,对海天天线附近的区域进行重点识别和定位,可以大大减少数据处理中后续的计算量,并可以排除假目标的干扰。所以,海天天线的检测技术^[1-5]在成像型反舰导弹末端制导技术中具有重要的意义。

目前海天天线提取方法主要有以下几类:基于图像分割的方法^[6],首先确定分割阈值然后通过二值化区别天空区域与海面,提取出海天线。该方法的缺点是分割的最佳阈值难以计算并且算法抗噪能力差,影响了海天天线的提取效果。基于小波变换的多尺度分析方法^[3],该类算法首先在大尺度下确定海天天线的大致位置,然后在小尺度下对海天天线精确定位;该类算法的缺点是处理过程复杂且计算量大,不利于工程上的实际应用;使用最多的是基于经典的 Hough 变换寻找直线的方法^[4],利用 Hough 变化在边缘点图像中提取最长的直线段定位海天天线,但是其计算量仍然偏大且也需要对图像进行分割,最佳的分割阈值也难于计算。

在现实应用当中,由于海面气象条件复杂,目标识别系统的工作环境非常恶劣,目标红外辐射在海面大气中的传输衰减严重,导致红外图像的对比度显著下降,海天天线难以辨别,甚至 SNR 小于 1,海天天线难以检测。为此,文中提出一种基于 Laplacian 模板与数学形态学结合的预处理方法增加海面波纹的灰度,增强海天天线的特征与 SNR,为海天天线的提取打下基础。接下来,针对海天天线倾斜的问题,设计了一种斜线查找矩阵,利用该矩阵对图像进行扫描即可定位海天天线的位置和倾斜角度。

1 海天天线 SNR 定义

根据参考文献[6]中海天线 SNR 的定义,可以定量地评价海天天线的能量大小。红外图像定义为 $f(i, j)$,海天天线上面天空区域为 R_{sky} ,下侧的海面区域为 R_{sea} ,则海天天线 SNR 的计算公式为:

$$SNR = \frac{2 \cdot \left| \frac{\text{mean} \{f(i, j)\}_{(i, j) \in R_{sea}} - \text{mean} \{f(i, j)\}_{(i, j) \in R_{sky}}}{\text{std} \{f(i, j)\}_{(i, j) \in R_{sea}} + \text{std} \{f(i, j)\}_{(i, j) \in R_{sky}}} \right|}{1} \quad (1)$$

式中:mean 和 std 分别代表区域内像元灰度的均值和标准差。

2 图像预处理

利用图像中海面海浪有波纹起伏、天空区域灰度均匀的特点,首先使用 Laplacian 模板进行边缘增强,然后使用顺序滤波消除噪点,保留海面波纹;最后使用形态学滤波闭运算填充海面区域,达到增强海天天线 SNR 的目的。

2.1 Laplacian 模板

虽然海面与天空区域的灰度值差别很小,但是由于天空背景均匀,海面有波浪的起伏,利用这一特点,使用边缘检测算子对图像进行模板运算,增强海面的波浪纹理。

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

使用 3×3 的 Laplacian 算子对图像进行模板运算,如公式(2)。

2.2 顺序滤波

顺序滤波是一种非线性的信号处理方法^[7], $m \times n$ 邻域内 d 阶顺序滤波就是取图像中某一点的 $m \times n$ 邻域内的点,把它们按从大到小顺序排序,选取灰度顺序为 d 的点的灰度作为该点的灰度。 $m \times n$ 邻域内 d 阶顺序滤波如下所示:

$$f(i, j) = \text{ord}_d \left\{ \begin{array}{l} f(i \pm k, j \pm h) \\ f(i \pm (k-1), j \pm (h-1)), \dots, f(i, j) \end{array} \right\} \quad (3)$$

$$m = 2k + 1, n = 2h + 1$$

由于海面波纹的形状近似水平的长方形,文中选用的 $k=1, h=4$ 的 3 阶顺序滤波,达到消除天空背景中的噪声点并扩充海面波纹面积的目的。

2.3 形态学闭运算

经过前两步预处理后,海面的特征已经比较明显,使用数学形态学闭运算填充海面波浪缝隙中暗的区域,提升海面平均灰度,进一步增强海天天线 SNR,便于算法提取海天天线。

数学形态学是图像处理中常用的运算。设 $f(x, y)$ 是输入图像; $b(i, j)$ 是结构元素,可以定义灰度图像形态学处理的两个基本运算。

灰度膨胀定义为:

$$(f \oplus b)(x, y) = \max \left\{ f(x-i, y-j) + b(i, j) \mid \begin{matrix} (x-i, y-j) \in D_f \\ (i, j) \in D_b \end{matrix} \right\} \quad (4)$$

式中: D_f 和 D_b 分别为 f 和 b 的定义域。膨胀的计算是在由结构元素确定的领域中选取 $f+b$ 的最大值。

灰度腐蚀定义为:

$$(f \ominus b)(x, y) = \min \left\{ f(x-i, y-j) - b(i, j) \mid \begin{matrix} (x-i, y-j) \in D_f \\ (i, j) \in D_b \end{matrix} \right\} \quad (5)$$

腐蚀的计算是在由结构元素确定的领域中选取 $f-b$ 的最小值。

形态学闭运算的定义是:对图像先膨胀后腐蚀。从腐蚀和膨胀的特点可以看出,闭运算可以去除比结构元素更小的暗色细节,并填充比结构元素小的洞。

3 海天线检测

经过图像预处理后,图像中海面区域的灰度值明显增强,海天线已经清晰可辨,海天线的 SNR 得到提升,接下来可以提取海天线了。

文中借鉴参考文献[8]的方法提取海天线,该方法的优点是计算速度快,对噪声和复杂背景有抑制能力;但该方法只适用于提取水平的海天线,不适用于提取有一定倾角的海天线。

设计了一种斜线查找矩阵,矩阵的行代表海天线的位置,矩阵的列代表海天线的角度,通过对图像行扫描即可生成该矩阵的值并定位的海天线位置和倾斜角度。为了保持算法的完整性,首先简要阐述参考文献[8]提取海天线的方法,然后详细介绍如何生成海天线查找矩阵并定位海天线。

3.1 水平梯度检测

从大尺度上来分析,天空区域的灰度比海面背景的灰度要低,所以对图像使用如下模板进行处理,生成水平梯度图像。

$$\begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.2 非线性分割

为了增强算法的抗噪声能力和准确性,降低水面波纹和图像噪声的影响,使用如下分割公式对水平梯度图像进行分割后再寻找海天线。

$$f(x) = \begin{cases} x & x < 20 \\ 20 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

3.3 海天线提取

斜线查找矩阵定义为:

$$S = \begin{bmatrix} s_{1,1} & \cdots & s_{1,15} \\ \cdots & s_{i,m} & \cdots \\ s_{M,1} & \cdots & s_{M,15} \end{bmatrix} \quad s_{i,m} = \sum_{j=1}^N f(i+j \times g(m), j) \quad (8)$$

式中: $i=1, \dots, M; j=1, \dots, N; m=1, \dots, 15; M$ 为图像的行数; N 为图像的列数。 $f(i, j)$ 为经过公式(6)、(7)处理后的图像; $g(m)$ 为预定义好的一维数组,数组长度为 15。

$$g(m) = \begin{bmatrix} 1/10, 1/13, 1/16, 1/20, 1/26, 1/40, \\ 1/80, 0, -1/80, -1/40, -1/26, -1/20, \\ -1/16, -1/13, -1/10 \end{bmatrix} \quad (9)$$

元素 $s_{i,m}$ 的行等于海天线的位置 P_{sea} (行号),列代表海天线的角度 A_{sea} :

$$A_{sea} = \text{atan}(g(m)) \quad (10)$$

斜线查找矩阵 S 中每一个元素 $s_{i,m}$ 都代表某一条斜线上的像素灰度值之和,经过水平梯度运算与非线性分割后,在海天线附近的像素具有最大的梯度,所以海天线附近的像素梯度值累加之后,就对应矩阵中最大的元素,最大元素的横、纵坐标得到海天线的位置和角度。

根据 $g(m)$ 的定义可知,可检测的海天线角度范围 $[-5.7^\circ, 5.7^\circ]$,如图 1 所示,适用于非剧烈的舰船摇晃,如果红外探测系统安装在稳台上,则海天线的倾角一定不会超过 5° 。如果需要检测大倾角的海天线,则需要重新设计算法中的斜线查找矩阵。

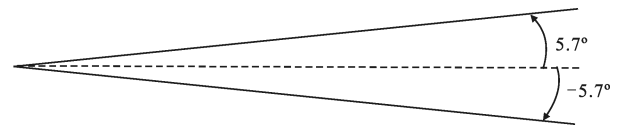


图 1 可检测海天线角度范围示意图

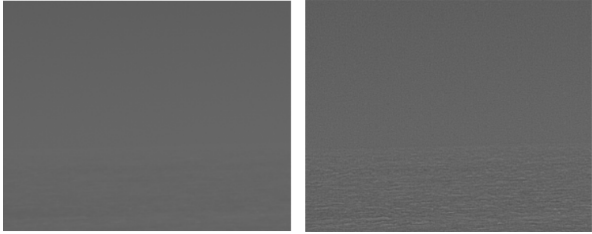
Fig.1 Angle of sea-sky-line can be detected

Hough 变换也可以查找斜线,但是其涉及浮点运算计算量偏大且图像需要二值分割,阈值难以选取。此斜线查找矩阵不需要分割图像,对每个像素需要遍历 15 次,计算量较少。

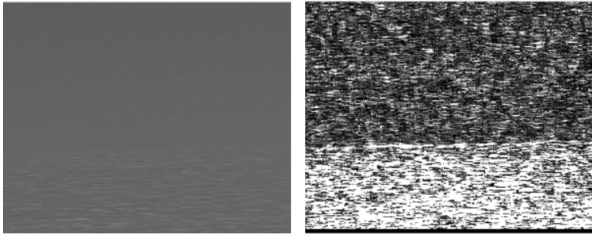
4 实验结果与分析

对文中所提的算法使用 Matlab 软件编程进行分析。选取实拍的红外中波海天图像进行算法仿真验证,

图像大小为 256×320 像素，图像的灰度级为16bit。由于视频拍摄时间在夜晚且有薄雾，图像中海天区域对比度很低，海天线难于分别。在视频中截取了两帧图像，图 2 和图 3 均为图像预处理结果，图 3 中有两艘船只，一艘位于海天交界处，另一艘位于近海面处。



(a) 低 SNR 海天红外图像 (b) Laplacian 模板运算结果
(a) Low SNR infrared image (b) Laplacian template operation results



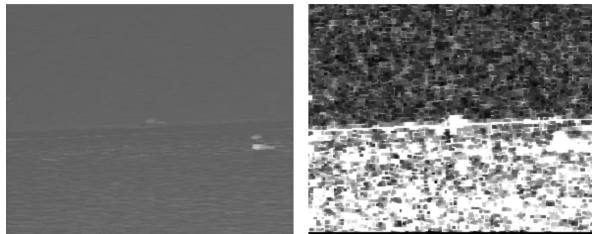
(c) 顺序滤波结果 (d) 形态学闭运算结果
(c) Order filtering results (d) Morphological closing operation results

图 2 图像预处理结果

Fig.2 Result of image preprocessing



(a) 低 SNR 海天红外图像 (b) Laplacian 模板运算结果
(a) Low SNR infrared image (b) Laplacian template operation results



(c) 顺序滤波结果 (d) 形态学闭运算结果
(c) Order filtering results (d) Morphological closing operation results

图 3 图像预处理结果

Fig.3 Result of image preprocessing

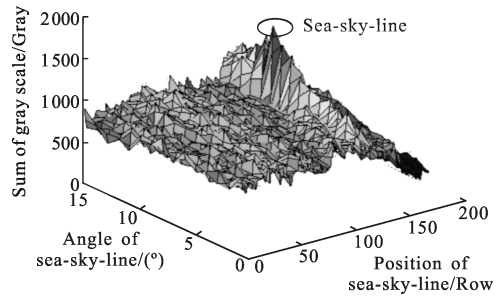
从图 2 和图 3 中可以看出，经过预处理后，海面区域的灰度值得到提升，海天线已经清晰可辨。表 1 给出了海天线 SNR 定量的评价结果，预处理后海天线的 SNR 得到大幅提升，有利于海天线的检测。

表 1 预处理前后海天线 SNR 对比

Tab.1 Comparison of SNR of sea-sky-line

| | Preprocessing | Processed | Increased SNR |
|-------|---------------|-----------|---------------|
| Fig.2 | 1.71 | 2.96 | 73.1% |
| Fig.3 | 1.65 | 3.07 | 86.1% |

经过预处理后的图像，使用文中提出的改进海天线提取算法检测海天线，生成斜线查找矩阵，图4(a)与图 5(a)画出了该矩阵的三维空间图像，通过确定最大值可以得到海天线的位置与角度。



(a) 图 2 海天线查找矩阵三维空间图

(a) Three-dimensional diagram for sea-sky-line extraction matrix for Fig.2



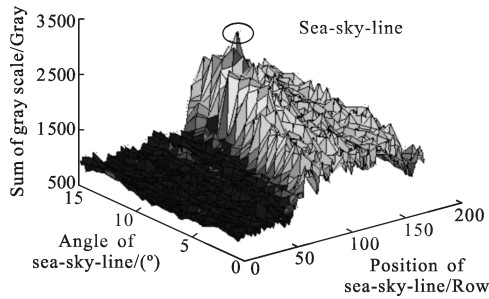
(b) 图 2 检测结果

(b) Sea-sky-line extraction result for Fig.2

图 4 文中算法对海天线检测的结果

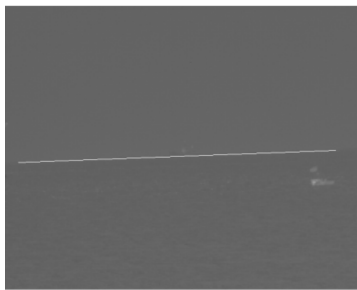
Fig.4 Sea-sky-line extraction result using proposed algorithm

海天线的检测结果如图 4(b)与图 5(b)所示，可以看出海天线的检测结果准确。



(a) 图 3 海天线查找矩阵三维

(a) Three-dimensional diagram for sea-sky-line extraction matrix for Fig.3



(b) 图 3 检测结果

(b) Sea-sky-line extraction result for Fig.3

图 5 文中算法对海天线检测的结果

Fig.5 Sea-sky-line extraction result using proposed algorithm

5 结论

针对低 SNR 海天线提取,提出了一种基于 Laplacian 模板运算、顺序滤波与数学形态学相结合的图像预处理方法,该方法可以增加海面波纹的面积与灰度值,预处理后的海天线 SNR 可以提升 70% 以上;在海天线提取阶段,设计了一种斜线查找矩阵,可以通过对图像行扫描生成该矩阵的值,然后查找该矩阵的最大值即可定位海天线的位置和角度。

实验表明文中方法提取低 SNR 海天线准确。目前该方法已经成功应用于海面舰船红外自动识别系统。此外,作为一种直线提取技术,该方法还可以扩展应用于机场、道路的提取与识别等场合。

参考文献:

- [1] Faraklioti M, Petrou M. Multiresolution versus single resolution horizon picking in 2D seismic images[C]//SPIE, 2004, 5238: 50-61.
- [2] Zhang Jinsuo, Song Liquan, Jin Minhui, et al. Research on infrared small target detection technique based on bandpass filtering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(4): 294-297. (in Chinese)
- [3] Zhang Bing, Zhao Ningxia, Liu Weiting, et al. Research on water-sky-line detection technique Bbased on wavelet transform [J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(4): 297-299. (in Chinese)
- [4] Liu Songtao, Zhou Xiaodan, Wang Chenggang. Robust sea-sky-line detection algorithm under complicated sea-sky background [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(8): 5-10. (in Chinese)
- [5] 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. (in Chinese)
- [6] Niu Zhaodong, Zeng Rongsheng, Chen Zengping. Low-SNR sea-sky-line extraction using fuzzy voting by local line segment [J]. *Signal Processing*, 2010, 26(3): 405-412. (in Chinese)
- [7] Gonzalez Rafael C, Woods Richard E. Digital Image Processing [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [8] Liu Shijian, Jiang Min, Zhuang Liang. A fast and effective algorithm for sea-sky-line extraction in infrared image [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(4): 230-233. (in Chinese)