

文章编号: 1672-8785(2012)06-0022-05

用于海气界面观测的红外热像仪非均匀性校正及滤波方法研究

韩兆辉^{1,2} 王岩峰² 张 杰²

(1. 青岛大学物理科学学院, 山东 青岛 266071;

2. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘 要: 利用红外仪器开展海气界面小尺度过程热通量观测工作具有重要的科学意义, 而非致冷焦平面热像仪的成像非均匀性严重影响了人们对海面温度分布的观测。以相同温度下的平静水面作为黑体, 对热像仪进行了非均匀性校正, 去除了条带噪声。通过对用不同滤波方法处理的图像的归一化均方误差 (Normalized Mean Square Error, NMSE)、信噪比和标准差进行比较, 发现高斯滤波的效果较好。

关键词: 海气界面; 红外热像仪; 非均匀性校正

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.06.005

Study of Nonuniformity Correction and Filtering of Infrared Camera for Air-sea Interface Observation

HAN Zhao-hui^{1,2}, WANG Yan-feng², ZHANG Jie²

(1. College of Physics Science, Qingdao University, Qingdao 266071, China;

2. First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract: To measure the air-sea heat process in a small scale by using an infrared camera is of great scientific significance. However, the imaging nonuniformity of the uncooled infrared focal plane array used in the infrared camera has severe influence on the observation of sea surface temperature distribution. By using the calm water surface as a blackbody, the nonuniformity of the infrared camera is corrected and the stripe noise is removed. By comparing the Normalized Mean Square Error (NMSE), signal-to-noise ratio and standard deviation of the images processed via different filtering methods, the Gaussian filtering method is found to be more effective.

Key words: air-sea surface; infrared camera; nonuniformity correction

0 引言

海气界面的热通量变化是影响气候的重要机制。海气界面间潜热和感热通量的输送不仅会对大尺度海气相互作用过程产生重要影响, 而且也是导致气候变化的关键因素。海气界面处的湍流热量交换是用于表征下垫面强迫和其

上大气相互作用的一个重要参数。它通过影响上层海洋及大气边界层结构, 对大气环流和海洋环境产生作用。其中, 海表面状况会强烈影响海气界面的湍流热量交换过程。因此, 对海表面热交换过程进行观测对于海气相互作用研究可起到重要的支撑作用。

目前海气界面热交换观测方法较多, 包括

收稿日期: 2012-04-16

作者简介: 韩兆辉 (1986-), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事海气界面热通量研究。E-mail: hzh_1211@163.com

卫星 / 航空遥感、船舶 / 浮标观测和定点观测等等。这些方法不是空间分辨率低就是时间分辨率低, 特别是它们缺乏小尺度过程连续观测资料, 而这却是海气热交换过程的一项非常重要的内容。由于海面的热交换主要发生在海表面 $10\ \mu\text{m}$ 的热力学边界层内^[1](处于红外成像器件的感知范围), 同时用红外热像仪可以直接观察物体表面温度的空间分布, 因此有越来越多的现场观测采用了红外成像器件。在大多数条件下, 海气界面的热交换相对温和, 温度变化小, 所以用于拍摄的红外成像器件必须具有较高的热灵敏度(一般要求热灵敏度在 $0.1\ ^\circ\text{C}$ 以内)。

非致冷焦平面热像仪具有成本低、寿命长、结构简单和使用方便等优点, 已经被广泛应用于包括海洋观测在内的各个领域。但是由于焦平面的内部结构不均匀以及在后续的信号变换和处理过程中各路信号所得到的增益不一致等原因, 不同探测光敏元在相同红外辐射照度条件下所产生的输出信号不完全相同, 于是便会导致非致冷焦平面热像仪成像的非均匀性。

本文介绍一种适用于海气界面小尺度过程观测的红外热像仪非均匀性校正处理算法(包括条带噪声的去除和后续滤波算法的比较研究), 以获取更真实的海气界面温度空间分布。

1 海气界面的红外观测

红外热像仪是观测海气界面热通量时最常用的一种手段。为了准确地获得海面辐射数据, 需要根据海面辐射特性和热噪声特性, 尽量去除周围环境和热噪声对观测数据的影响。

1.1 海面辐射特性

用热像仪观测到的海面辐射由海面的热辐射、海面反射的天空(含太阳和云层)辐射和海面到探测器之间的大气辐射等三部分组成, 其表达式^[2]为

$$L_{\lambda} = \tau_{\lambda} \varepsilon_{\lambda} L_{\lambda bT(sea)} + \tau_{\lambda} \rho_{\lambda} L_{\lambda(sky)} + \tau_{\lambda} \rho_{\lambda} L_{\lambda(sun)} + L_{\lambda(air)} \quad (1)$$

式中, τ_{λ} 为大气光谱透过率; ρ_{λ} 为海面光谱反射率; ε_{λ} 为海面光谱发射率; $L_{\lambda bT(sea)}$ 为海面温度的黑体光谱辐射亮度; $L_{\lambda(sky)}$ 为天空光谱辐射亮度; $L_{\lambda(sun)}$ 为太阳光谱辐射亮度; $L_{\lambda(air)}$ 为探测器与海面之间大气路径的光谱辐射亮度。

1.2 热噪声的基本特性

红外成像除了会受环境辐射的干扰之外, 热像仪本身的热噪声也是另一个主要的干扰因素。非致冷焦平面热像仪的热噪声可以分为瞬态噪声和空间噪声两种。其中, 瞬态噪声包括暗电流噪声和散粒噪声等, 而空间噪声是由焦平面阵列的非均匀性造成的。瞬态噪声可以用适当的滤波器加以消除, 而固有空间噪声只能通过对焦平面阵列进行校正来消除。下面所处理的图片均是由 ICI7320 型红外热像仪在国家海洋局第一海洋研究所的小型风浪试验水槽中拍摄得到的。表 1 列出了红外热像仪的主要性能指标。

表 1 ICI7320 型红外热像仪的主要性能指标

ICI 7320	
探测器类型	氧化钒非致冷焦平面
响应波段	$8 \sim 14\ \mu\text{m}$
测量精度	$\pm 1\ ^\circ\text{C}$ 或 $\pm 1\%$
热灵敏度	$0.038\ ^\circ\text{C}$ ($25\ ^\circ\text{C}$)
像素	$320\ (\text{H}) \times 240\ (\text{V})$
视场角	22°

2 非均匀性校正方法研究

2.1 条带噪声的去除

非致冷红外焦平面热像仪拍摄的图像中的最主要的噪声是条带噪声, 因此针对红外图像的去噪工作也要从去除条带噪声开始。由于条带噪声是由探测器之间的响应频率不一致造成的, 因此必须对这些探测器进行非均匀性校正, 使它们的响应频率达到一致。非均匀性校正方法有定标校正和自适应校正两大类。其中, 定标校正法包括一点校正法、两点校正法和多点校正法^[3-6]; 自适应校正法主要有高通滤波器、神经网络算法以及基于场景的校正法^[7-9]等。

考虑到海面观测的实际条件(海水温度的瞬时变化不大),本文采用一点校正法。这样从理论上来说就是让红外相机拍摄一个温度分布均匀的黑体,选取任意列探测器的值作为基准值,并对其他探测器进行标定,使每行探测器的响应频率保持一致;然后选取任意行探测器的值作为基准值,并对其他传感器进行标定,使每列探测器的响应频率保持一致。考虑到探测器的非线性响应特性,要尽量选择与待测目标温度相近的黑体进行校正。在室温下,水表面薄层的辐射率为 0.98,可以被近似看作黑体;对于静止水体,水表面的温度可以被看作是均匀分布的,因此可以把平静的水面看作温度分布均匀的黑体。图 1 为水槽中静止水面的红外图像(室温为 22.1℃,空气湿度为 61%)。

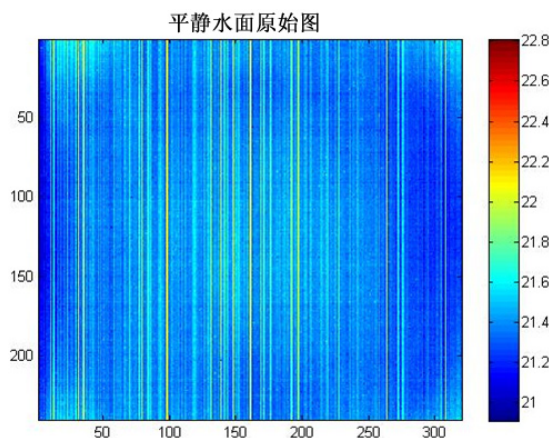


图 1 ICI7230 型红外热像仪拍摄的原始平静水面影像

由于红外光学系统的影响导致图 1 中四个角发亮,数据偏差较大,因此应该选择中间的探测器作为基准探测器,以避免受边缘光学效应的干扰,减小校正误差。本文选取图 1 中的第 160 条列温度 Y_{160} 和第 120 条行温度 X_{120} 作为基准值来对图 1 中的其他温度值进行校正。

先求出列校正矩阵 V :

$$[V_1 V_2 \cdots V_{320}] = [Y_1 Y_2 \cdots Y_{320}] - Y_{160} \quad (2)$$

则

$$T' = T - V \quad (3)$$

式中, T 为图 1 的温度矩阵, T' 为去除列非均匀性的温度矩阵。然后求出行校正矩阵 H :

$$[H_1 H_2 \cdots H_{240}]^{-1} = [X'_1 X'_2 \cdots X'_{120}]^{-1} - X'_{120} \quad (4)$$

式中, X' 为 T' 中的行。那么,校正矩阵 M 为

$$M = V + H \quad (5)$$

对于与图 1 拍摄环境相同的风波图像,我们可以通过校正矩阵 M 进行校正。图 2 为在同一温度、湿度条件下,风速在 2.5 m/s 时拍摄的水面图像。通过将图 2 的温度矩阵减去校正矩阵 M ,可以得到校正后的温度矩阵(见图 3)。

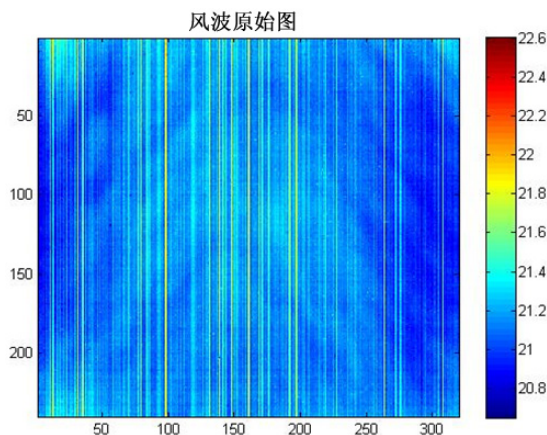


图 2 风速为 2.5 m/s 时的红外图像

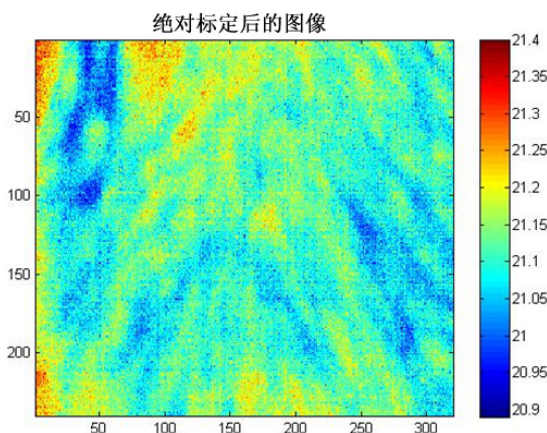


图 3 去除条带噪声后的红外图像

2.2 滤波方法比较

校正后的红外图像比原始图像细腻得多,我们可以很清楚地看出波浪的温度分布。虽然

通过校正可以去除空间固有噪声,但是对于瞬态噪声仍需用其他滤波方法加以去除。

本文选取均值滤波、中值滤波、高斯滤波和小波分析等四种滤波方法,并采用 3×3 滤波窗口进行分析。其中,均值滤波是典型的线性滤波方法;中值滤波是最常用的非线性平滑手段;高斯滤波是根据高斯函数的形状来选择权值的线性平滑滤波器,它对于去除服从正态分布的噪声是很有效的。对于图像来说,通常用二维零均值离散高斯函数作为平滑滤波器,其函数表达式为

$$g[i, j] = e^{-\frac{(i^2 + j^2)}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

小波分析是一种多尺度信号分析方法,它克服了短时傅里叶变换固定分辨率的问题。该方法既可分析信号的概貌,又可分析信号的细节。本文选用的是 db2 小波。二维离散小波变换是将一个二维信号(图像)CA 逐层分解为近视分

量 cA_j 和细节信号 cD_j^h 、 cD_j^v 、 cD_j^d (分别为水平方向、垂直方向和对角方向)。

滤波方法的优劣可以通过滤波后图像质量的高低来判断。图像质量的测度有主观描述和客观描述两种类别。本文将分别从这两个方面对四种滤波方法进行分析。

(1) 客观评价

本文采用归一化均方误差 (Normalized Mean Square Error, NMSE)、信噪比和标准正态分布中的标准差 σ 三种指标(见表 2)对滤波图像进行评价。在表 2 中可以看出,对于 NMSE 和信噪比指标,高斯滤波明显优于其他几种滤波方法,说明高斯滤波的保真性比较好;db2 小波第三层分解近似分量的信噪比为负值,表明其失真信号强度大于原信号强度。四种滤波方法的 σ 值相差不大,但都比原图的 σ 值小,说明滤波使图像变得更加平滑了,图像解析度下降了。

表 2 滤波图像评价表

评价指标	被评价图像						
	原图	均值滤波	中值滤波	高斯滤波	db2 小波滤波 第一层近似分量	db2 小波滤波 第二层近似分量	db2 小波滤波 第三层近似分量
NMSE		0.1594	0.1701	0.0307	0.1352	0.1717	1.9064
信噪比 (db)		7.9752	7.6931	15.1293	8.6912	7.6515	-2.8021
σ	0.055	0.046	0.047	0.049	0.048	0.045	0.044

(2) 主观评价

图 4(a)、图 4(b)、图 4(c) 和图 4(d) 分别为待处理的原始图像、中值滤波后的图像、均值滤波后的图像和高斯滤波后的图像。通过与校正图像进行对比可以发现,图 4(b) 和图 4(c) 的平滑度与对比度较好,但是清晰度下降较大;图 4(d) 的平滑性和对比度比原图有所提升,同时清晰度没有明显的下降。图 5 所示为 db2 波的三层分解近似分量。从图 5 中可以看出,随着分解层数的增加,图像越来越平滑,同时清晰度越来越低。

3 结论

本文结合水面温差小的特点采用一点校正法。与两点及多点校正法相比,这样不仅可以减

少计算量,而且还可以实现在每次做观测试验前进行实时校正,以去除由于环境因素和传感器漂移产生的误差,从而提高校正精度。通过对四种滤波方法进行分析,我们发现高斯滤波是一种相对较好的滤波手段。由于本文是在实验室水槽中开展的,对于更为复杂的现场观测还有待于进一步研究。

4 致谢

本文的实验过程得到了国家海洋局第一海洋研究所官晟老师的悉心指导,在此表示衷心的感谢;同时还要感谢中央级科学事业单位修缮购置项目“海气界面微尺度过程光学探测试验系统”对本论文的资助。

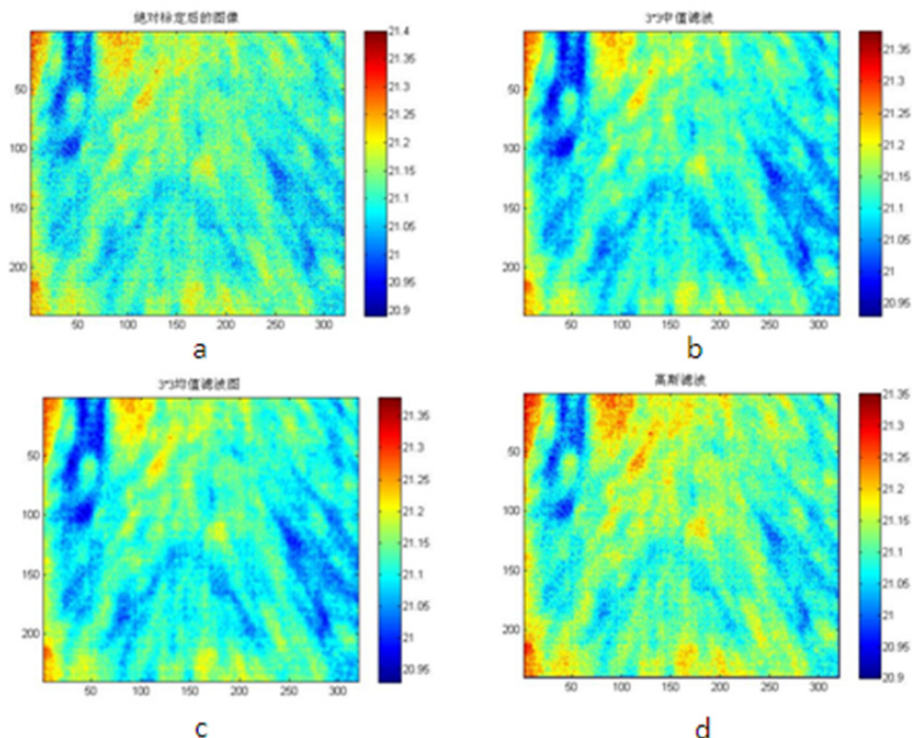


图 4 (a) 待处理的原始图像, (b) 中值滤波后的影像, (c) 均值滤波后的影像, (d) 高斯滤波后的影像

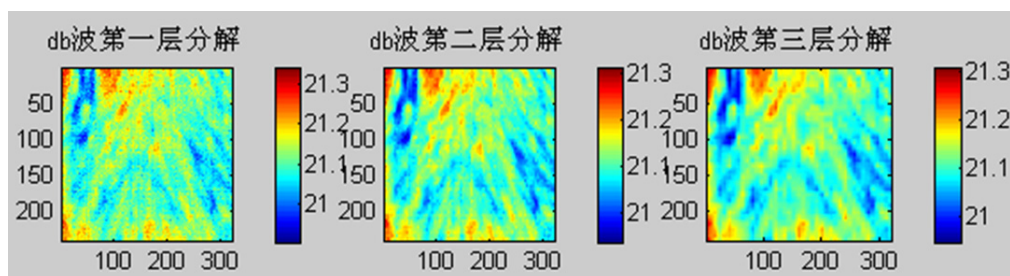


图 5 db2 小波的三层分解红外影像

参考文献

- [1] Christoph S G, Hagen S, Bernd J. Estimation of Surface Flow and Net Heat Flux from Infrared Image Sequences [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2003, **19**(2): 159–174.
- [2] Jin Y Q. Multiple Scattering from a Randomly Rough Surface [J]. *Journal of Applied Physics*, 1988, **63**(5): 1286–1292.
- [3] Schulz M, Caldwell L. Nonuniformity Correction and Correctability of Infrared Plane Arrays [C]. *SPIE*, 1995, **2407**: 200–209.
- [4] 李言旭, 刘银年. 红外探测系统的非均匀性校正算法研究 [J]. *红外*, 2004, **25**(11): 21–27.
- [5] 何小娟. 红外焦平面探测器的非均匀性校正与算法实现 [J]. *红外*, 2001, **22**(6): 1–7.
- [6] 殷世民, 刘上乾. 基于低次插值的红外焦平面器件非均匀性多点校正算法 [J]. *光子学报*, 2002, **31**(6): 715–718.
- [7] Scribner D A, Sarkay K A, Caulfield J T, et al. Nonuniformity Correction for Staring Focal Plane Arrays Using Scene-base Techniques [C]. *SPIE*, 1990, **1308**: 224–233.
- [8] Scribner D A, Sarkady K A, Kruer M R, et al. Adaptive Nonuniformity Correction for IR Focal Plane Arrays Using Neural Networks [C]. *SPIE*, 1991, **1541**: 100–109.
- [9] 国亚双, 王英瑞. 一种新的基于场景的红外图像非均匀性校正算法 [J]. *红外*, 2006, **27**(3): 13–16.