

doi:10.3788/gzxb20184711.1101001

# 南海北部区域海洋水体皮温-体温模型研究

张建<sup>1,2</sup>, 郝三峰<sup>2,3</sup>, 宋庆君<sup>4</sup>, 赵佺骁<sup>2,3</sup>, 安飞<sup>2</sup>

(1 西安电子科技大学 机电工程学院, 西安 710071)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

(4 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

**摘 要:**针对我国海洋遥感定标检验技术, 提出海洋水体皮温-体温模型, 将海洋皮温测量精度提高至 0.3℃. 模型皮温数据来源于自主研发架设在南海北部 PY-301 石油平台上的无人值守自动多波段红外辐射系统, 通过标准黑体标定、光阑校正、天空光校正, 使海水皮温测量精度优于±0.5℃. 基于模型分析了风速对海洋皮温和体温差值的影响, 并用所提模型与 Donlon 模型对海洋皮温测量值进行风速修正, 修正后两者偏差分别为 $-0.0076 \pm 0.2971^\circ\text{C}$ 和 $0.0446 \pm 0.3248^\circ\text{C}$ . 结果证明该模型有效且能够提高海洋皮温的测量精度.

**关键词:**海洋表面温度; 海洋特征检测; 红外辐射; 光学检测; 数学模型

中图分类号: P714+.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)11-1101001-8

## Study on Model of the Sea Surface Skin Temperature and Bulk Sea Surface Temperature in Northern Region of South China Sea

ZHANG Jian<sup>1,2</sup>, HAO San-feng<sup>2,3</sup>, SONG Qing-jun<sup>4</sup>, ZHAO Liang-xiao<sup>2,3</sup>, AN Fei<sup>2</sup>

(1 School of Mechano-electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an Shanxi 710119, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(4 National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081)

**Abstract:** For the research of marine remote sensing calibration of China, a mathematical model of bulk-skin sea surface temperature is proposed to improve the measurement precision of skin sea surface temperature to 0.3℃. Skin sea surface temperature is measured by the self-designed automatic multi-spectral infrared radiometer system installed on the PY-301 oil platform in the northern part of the South China Sea, the measurement accuracy of the radiometer is better than  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  through standard blackbody calibration, pupil correction and skylight correction. The effect of wind speed on the bulk-skin sea surface temperature is analyzed based on the model, the skin sea surface temperature is corrected by the proposed model and Donlon model, the biases of corrected results are  $-0.0076 \pm 0.2971^\circ\text{C}$  and  $0.0446 \pm 0.3248^\circ\text{C}$ , respectively. Results prove that the proposed model is effective and can improve the measurement accuracy of skin sea surface temperature.

**Key words:** Sea surface temperature; Oceanic feature detection; Infrared radiation; Optical detection; Mathematical model

**OCIS Codes:** 010.4450; 120.6780; 000.3870; 300.6340

## 0 引言

海表温度 (Sea Surface Temperature, SST) 作为气象学与海洋学研究的重要物理量, 直接关系到渔业资

基金项目: 中科院西部之光人才项目 (No. XAB2016A10), 陕西省重点研发计划项目 (No. 2018ZDXM-GY-105) 和国家高技术研究发展计划 (No. 2008AA09A403) 资助

第一作者: 张建 (1978-), 男, 副研究员, 博士研究生, 主要研究方向为先进光电仪器设计, 红外辐射测量技术. Email: zj@opt.ac.cn

收稿日期: 2018-08-30; 录用日期: 2018-11-08

<http://www.photon.ac.cn>

源、洋流以及气候变化等问题.从过去的传统船舶、浮标探测,到近 30 年来不断增加的热红外和微波辐射探测, SST 的测量和研究工作不断进步.国内外对基于红外辐射技术测量海洋皮温的方法已做了很多相关的研究,其中国际上比较有代表性的有海洋大气辐射干涉仪 (Marine-Atmospheric Emitted Radiance Interferometer, M-AERI)<sup>[1]</sup>、定标的红外现场测量系统 (Calibrated Infrared In situ Measurement System, CIRIMS)<sup>[2]</sup> 和红外海表温度自动辐射计 (Infrared SST Autonomous Radiometer, ISAR)<sup>[3]</sup> 等.国内中科院西安光机所研制的自动多波段红外海洋表面温度辐射系统,其系统分辨率优于  $0.1^{\circ}\text{C}$ ,精度优于  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ <sup>[4]</sup>.基于红外辐射技术 SST 测量的一个重要应用是海洋遥感卫星定标,日本 Himawari-8 卫星 SST 测量精度相对于 MTSAT-2 卫星有了较大的提升,但仍然与地面 SST 测量值有差别,分析表明此差值与风速以及昼夜温差有关<sup>[5]</sup>.风速会影响海洋表面的辐射系数,进而影响 SST 测量<sup>[6-8]</sup>,因此海洋皮温测量中考虑风速的影响非常有必要.

由于海表层小于 10 m 的混合层温度剖面变化复杂,另外各测量点也有所不同,造成观测的温度分为皮温和体温.利用热红外或者微波辐射测量的温度只能局限在气-水界面  $10\ \mu\text{m}$  左右,因此测量的是海表面表皮温度 (Sea-Surface Skin Temperature, SSST),而浮标和船舶观测的温度测量点通常在气-水界面下  $0.5\sim 1\ \text{m}$  内,这时测量的温度是海表面体温 (Bulk Sea Surface Temperature, BSST).SSST 和 BSST 的关系受海面粗糙度的影响<sup>[9-12]</sup>.DONLON C J 等总结出在风速超过  $6\ \text{m/s}$  的白天和夜间,由于受表面搅动的影响,皮层温度和表层下一定深度的温度之间存在一定的关系;在低风速下,白天上层海水有明显的层化现象,皮温与体温之间的关系变得复杂,在夜间,通常能观测到皮温小于体温的现象<sup>[13]</sup>.DONLON C J 等利用 6 个航次不同海区和不同季节的数据,总结出晚上皮温和体温的差异与风速大小是一种近指数关系<sup>[10]</sup>.

由于海洋表面温度测量易受太阳辐射、表面搅拌效应、表皮增发效应等影响,如何提高测量精度是亟待解决的问题,目前国外最高测量精度为  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ <sup>[1-3]</sup>,我国在海洋表面温度测量上还有进一步提升的空间.本文利用南海北部海区 PY-301 平台上集成的自动多波段红外辐射系统和温盐深仪 (Conductivity Temperature Depth, CTD) 测量系统以及相关的气象观测数据,通过统计分析方法得出南海北部海区的水体皮温-体温模型,基于该模型对原始数据进行风速修正,减小了反演误差,使得海表温度测量精度从  $0.5^{\circ}\text{C}$  提高至  $0.3^{\circ}\text{C}$ .同时将该模型与 Donlon 模型进行分析对比,以验证该模型的有效性.

## 1 海表温度测量系统校正

自动多波段红外辐射系统架装在南海北部的 PY-301 石油平台上,针对测量中存在的红外系统透射率变化、环境温度变化和探测器响应系数等变化的影响,分别对该系统仪器进行了现场标定、光阑校正和天空光校正,确保海洋表皮温度的测量精度.

### 1.1 仪器现场标定

红外辐射系统在外场实时工作时,容易受探测器响应系数变化、红外光学系统膜层老化、辐射计内部壳体温度变化等因素的影响,严重影响仪器的精度.针对该问题,系统采用双黑体标准辐射源实时校正的方法.现场利用一个常温黑体 (高温) 和一个环境温度黑体对仪器进行现场标定,仪器通过反射镜收集两个黑体以及海面和天空的辐射信号并分别进行响应,在短时间内 (如一个测量循环),仪器的壳体、周边环境温度以及影响仪器测量的其它干扰可视为稳定的,因此可通过一个测量循环分别利用高低温两个黑体进行现场标定,如图 1.

通常情况下,在一定范围内,探测器接收到的某一波段的辐射亮度与其电压读数近似满足线性关系 (图 1 中真实曲线),即

$$L = A \cdot D_c + B \quad (1)$$

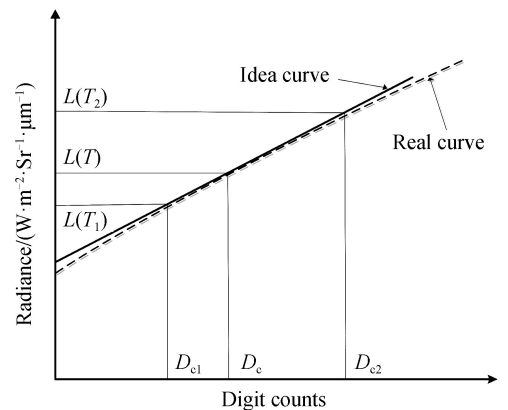


图 1 现场两点定标示意图

Fig.1 Schematic diagram of calibration by using two standard points

式中,  $L$  为辐亮度,  $D_c$  为经过仪器自适应放大后的数码值,  $A$  和  $B$  分别为系数和截距. 通过温度分别为  $T_1$  和  $T_2$  的环境温度黑体和常温黑体, 利用普朗克公式可计算出黑体的红外发射辐亮度  $L(T_1)$  和  $L(T_2)$ , 利用仪器响应数码值  $D_{c1}$  和  $D_{c2}$  得到式(1)中的系数  $A$  和截距  $B$  (图 1 中的理想曲线), 仪器改变测量目标后(天空或者海面)所获取的数码值  $D_c$  便可转换为目标辐亮度值.

## 1.2 光阑校正

仪器的光阑校正主要基于两方面的原因: 一是仪器在搬运安装过程中造成的准直性偏差, 在实际使用中发现了狭缝遮挡视窗的情况; 二是仪器壳体温度对红外辐射亮温与通过 CTD 海表温度计算的辐射计亮温的差值的影响. 图 2 为红外辐射计反演误差随环境温度的变化, 由图可知, 测量结果的偏差和环境温度有较好的线性关系, 当仪器外壳温度为  $30^\circ\text{C}$  时, 测量结果偏大约  $1\text{ K}$ , 在夏季南海中低纬度海区, 仪器外壳温度最高可超过  $40^\circ\text{C}$ , 对测量结果的影响更大, 因此迫切需要对结果进行校正.

针对某波长  $\lambda$ , 在无遮挡情况下, 仪器测量的辐射亮度  $L_m$  等于亮温为  $T$  的测量场景辐射亮度  $L_t$ , 由于存在遮挡, 实际场景的辐射亮度只有部分能量投射到仪器探测器, 而遮挡视场温度为  $T_{\text{box}}$  的壳体也会贡献相应的辐射亮度信号  $L_{\text{box}}$ . 在遮挡时仪器探测的信号构成为

$$L_m(\lambda) = \tau L_t(\lambda, T) + \epsilon_{\text{box}} L_{\text{box}}(\lambda, T_{\text{box}}) \quad (2)$$

式中,  $\tau$  为狭缝的透过率,  $\epsilon_{\text{box}}$  为考虑了壳体对仪器内部温度反射后等效发射率. 假设壳体温度与周围环境温度相等, 则借助黑体进行多次测量即可求解出  $\tau$  和  $\epsilon_{\text{box}}$ . 由于  $\tau$  和  $\epsilon_{\text{box}}$  是仪器的固有属性, 在一定波长范围内对各波段的影响一致, 因此, 选择  $9 \sim 12\ \mu\text{m}$  的三个热红外波段进行分析, 各波段发射率的差异约为  $0.5\%$ , 对回归精度几乎无影响. 以三个波段的数据为输入对象, 利用最小二乘法得  $\tau = 0.2843 \pm 0.0012$ ,  $\epsilon_{\text{box}} = 0.715 \pm 0.0031$ .

实际测量中,  $L_m$  通过定标文件得出, 壳体温度贡献辐射亮度  $L_{\text{box}}$  通过环境温度、黑体温度利用普朗克公式计算得到.

## 1.3 天空光校正

通常海面皮层温度  $T_{\text{skin}}$  是红外辐射计通过测量海面辐射亮度  $L(T)$  计算得来的, 但辐射计测量的海表辐射还包括了小部分天空光, 影响了最终的测量精度, 如图 3. 假设辐射计到海面的距离足以忽略大气影响, 则一定波长范围内 ( $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$ ) 以观测角  $\theta$  测量的辐射亮度表示为

$$L(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_{\text{sea}}(\lambda, \theta) R(\lambda) L(\lambda, T_{\text{skin}}) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda, \theta) L(\lambda, T_{\text{sky}}) d\lambda \quad (3)$$

式中,  $L(\lambda, T)$  是通过普朗克公式计算的辐射亮度,  $R(\lambda)$  是仪器响应函数,  $\epsilon_{\text{sea}}(\lambda, \theta)$  是海水发射率,  $\rho = 1 - \epsilon_{\text{sea}}(\lambda, \theta)$  为海面反射率. 实际应用中, 由于仪器工作波段相对固定, 式(3)可近似等效为

$$L(T) = \epsilon_{\text{sea}} L(T_{\text{skin}}) + (1 - \epsilon_{\text{sea}}) L(T_{\text{sky}}) \quad (4)$$

$\epsilon_{\text{sea}}(\lambda, \theta)$  随海面粗糙度和入射角变化<sup>[14-19]</sup>, 一旦  $\epsilon_{\text{sea}}(\lambda, \theta)$  确定, 则海洋皮温的辐射亮度为

$$L(T_{\text{skin}}) = \frac{1}{\epsilon_{\text{sea}}(\lambda, \theta)} \{L(T) - [1 - \epsilon_{\text{sea}}(\lambda, \theta)] L(T_{\text{sky}})\} \quad (5)$$

基于以往的测试与研究<sup>[14-19]</sup>, 本次红外辐射计观测角在  $\theta < 40^\circ$  的范围, 此时发射率  $\epsilon$  有最大值, 即  $\epsilon > 0.98$ . 对于完全晴朗的天空, 天空的辐亮度远小于海水, 因此这部分的校正尤为关键, 最大校正量可达  $0.5^\circ\text{C}$ . 在天空分布有云时, 移动的云对不同时刻测量的海水皮温产生影响, 在云完全覆盖时, 校正量比较小, 通常小于  $0.1^\circ\text{C}$ , 如图 4.

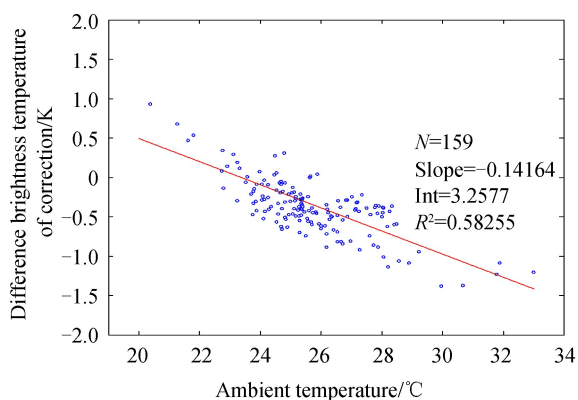


图 2 红外辐射计反演误差随环境温度的变化  
Fig.2 Inversion error of infrared radiometer varies with ambient temperature

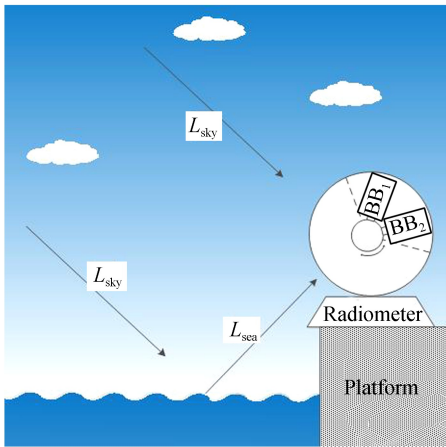


图3 现场红外辐射计测量原理

Fig.3 Schematic diagram of infrared radiometer measurement

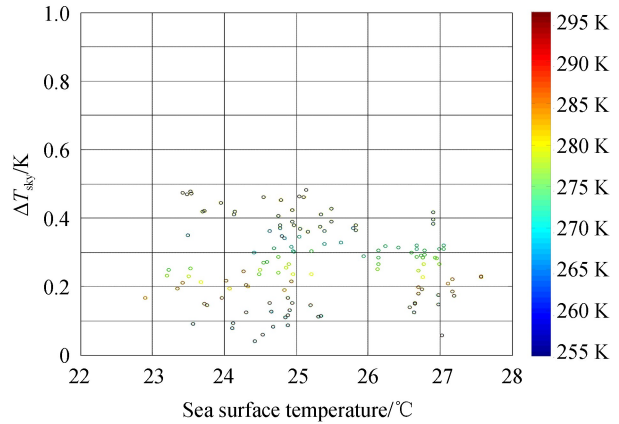


图4 天空光对海温反演的影响

Fig.4 Influence of sky light on SST inversion

图4给出了南海海区3~4月的天空光对红外皮温反演的影响,横轴是CTD测量的海表面温度,纵轴是皮温反演时的天空光校正量,可以看出,天空光的亮温大约在250 K时,校正量最大,最大可达0.5℃,而在阴天以及有云覆盖的情况下,天空光的校正量要小很多,可能会小于0.1℃.虽然阴天以及有云覆盖的条件下,天空光影响较小,但还是建议在晴空天气时测量,因为云覆盖情况下将产生数据观测海面与天空的同步效应,严重影响测量结果的稳定.另外,图中还可以看出,无论海水的温度高低,天空光的影响都存在,因此,天空光校正对红外测量海水皮温非常重要.

## 2 构建皮温-体温模型

模型构建过程如图5所示,分别测量海洋水体皮温、体温和现场风速数据,经数据匹配之后构建皮温-体温随风速变化的模型,最后对模型的有效性和精度进行评估.

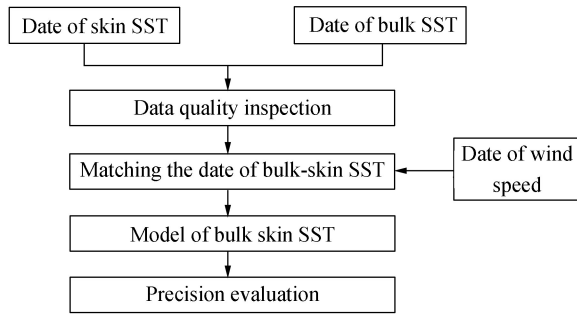


图5 水体皮温-体温模型建立流程

Fig.5 Flow of establishment of the bulk-skin sea surface temperature model

### 2.1 模型数据来源

水体皮温数据由自行研制的红外辐射计获取,仪器安装在PY30-1平台救生艇甲板层,据水面高度约40 m,观测角40°,同时测量天空光入射辐射亮度和两个定标黑体,测量精度标称优于0.5℃.水体体温由CTD测量,测量系统安装在水下约1.21 m处,从2012年3月到11月的统计分析,最深时在水下2.05 m,最浅时在水下0.38 m,总体保证了系统在测量时未露出水面.仪器为美国Teledyne RSI公司的Citadel CTD-NH型CTD.风矢量数据来源于自动气象站,其固定在石油平台钻井导管架顶部,距海面高度约101 m.

### 2.2 构建数据集

图6给出了2012年红外辐射计和CTD的观测数据分布情况,白色点代表CTD观测数据,彩色点代表红外辐射计观测数据,色标代表月份,图的横轴表示2012年中的天数,纵轴代表海表面温度.从数据同步情

况看,CTD 和红外辐射计具有很好的温度趋势一致性,建模或者验证数据选择要求尽量覆盖整个观测数据范围,并且尽量分布于观测的温度范围内.基于以上原则选取 3 月至 5 月的一半数据用于建模,另外一半数据用于检验.

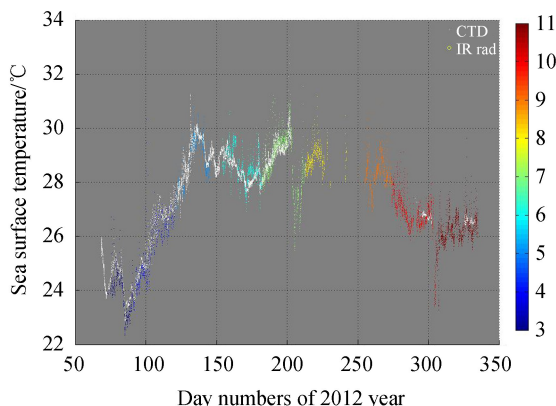


图 6 红外辐射计和 CTD 的观测数据分布情况  
Fig.6 The observed data distribution of infrared radiometer and CTD

红外测量的海表温度经过匹配 CTD 数据和自动气象站数据,共得到 599 组数据,考虑到低风速下风速和风向会有测量误差,取风速大于 1 m/s 的数据,有 330 组.借鉴国外相关模型的研究工作,只保留晚上的数据,此时数据剩下 192 组,再将这 192 组分两部分,一半数据用于建立模型,另外一半数据用于检验模型,用于建模和检验的数据各 96 组,温度覆盖 23~30°C.图 7 中虚线表示理想条件下的皮温与体温关系,两者相等,实线表示由实际数据拟合得到的皮温、体温关系.由图可知,两者数据比较一致,总体偏差都在 0.268~0.277°C 之间,标准偏差也维持在大约 0.3°C,数据质量良好.

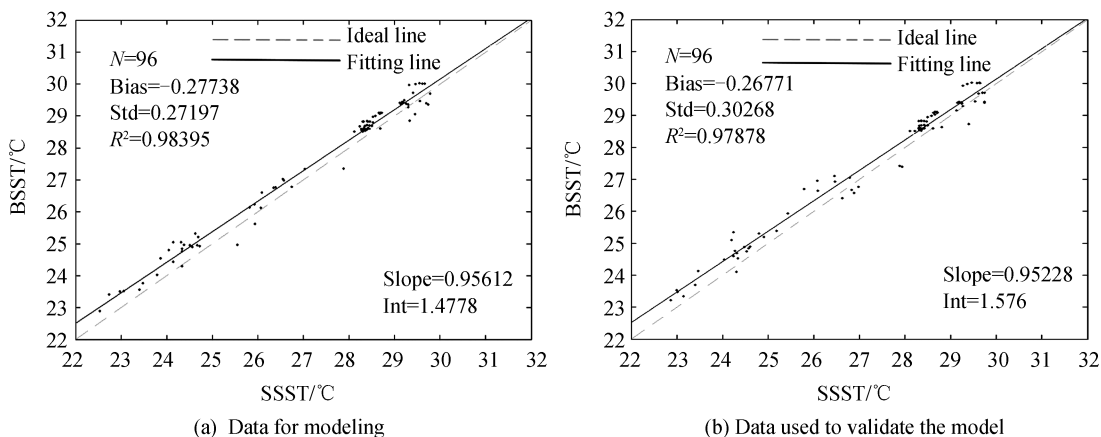


图 7 红外辐射计和 CTD 的数据散点图  
Fig.7 Scatter plot of infrared radiometer and CTD data

### 2.3 风速对皮温-体温差的影响

将建模数据(即图 7(a)的数据集)中水体皮温和体温的差值( $T_{SSST} - T_{BSST}$ )记作  $dT_{depth}$ ,与风速的分布关系绘制成散点图,见图 8,可以看出,在风速大的情况下整体数据收敛,在风速小时数据开始分散.将数据按 1 m/s 为间隔分组进行平均,平均后的数据可以评估数据的整体行为.由此可知,在风速小于 5 m/s 时,随风速增加, $dT_{depth}$  呈下降趋势,其量值维持在 0.2~0.3°C 之间,大于 5 m/s 后, $dT_{depth}$  变化趋于平缓,量值维持在 0.3~0.4°C 之间.

将  $dT_{depth}$  平均值进行 3 次多项式回归,可得

$$dT_{depth} = 0.0003 u^3 - 0.0061 u^2 + 0.0150 u - 0.2002 \quad (6)$$

式中, $u$  为风速,相关指数  $R^2$  为 0.945 9,误差平方和(Sum of Squared Error, SSE)为 0.002 586,均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为 0.016 08.该模式记作 NSOAS 模式.

图 8 中也给出了 Donlon 的模型<sup>[6]</sup>, 与 NSOAS 模型有一定的差异, 绝对量值差别约为  $0.2^{\circ}\text{C}$ , 两者在  $4.2\text{ m/s}$  时交叉, 这是由于气温和海表温度的差异所致, 在南海区域 (4~7 月份), 夜晚的气温通常会比海表温度高, 热辐射通量是从气温向海温传递, 即大气始终在给海面加温, 因此, 在低风速时,  $dT_{\text{depth}}$  随风速降低而减小 (更趋向于 0)。

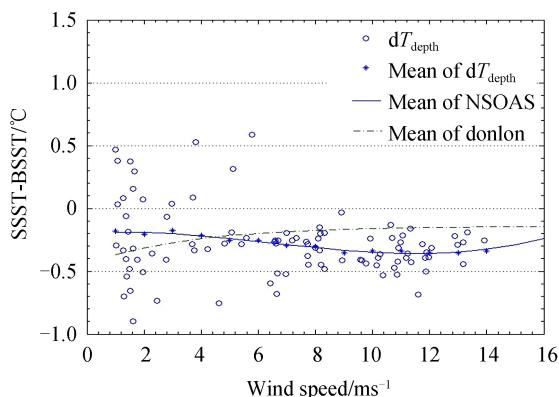


图 8 皮温体温差异与风速的关系

Fig.8 Relationship between difference of SSST and BSST and wind speed

### 3 模型验证与对比

#### 3.1 模型验证与对比

利用式 (6) 的结果, 将验证数据集 (图 7(b)) 的皮温数据进行修正, 修正后结果如图 9, 图中实线表示数据修正后的回归分析模型。对比图 7(b) 可见, 在修正之前, 红外辐射计反演的海表温度与体温关系模型的拟合误差为  $0.2677 \pm 0.3027^{\circ}\text{C}$ , 修正后反演的误差约为  $-0.0076 \pm 0.2971^{\circ}\text{C}$ , 反演的平均相对误差明显减小, 经过修正后红外反演的海表温度的误差不会超过  $0.3^{\circ}\text{C}$ , 即红外反演精度可达到  $0.3^{\circ}\text{C}$ 。

图 10 为验证数据集利用 Donlon 模型风速修正后的结果, 可看出反演误差为  $0.0446 \pm 0.3248^{\circ}\text{C}$ 。比较 NSOAS 模式可知, 除平均相对误差增加外, 标准偏差也有增加, 总体来说, 利用 Donlon 模型修正后的红外反演海表温度精度可维持在  $0.37\text{ K}$ 。

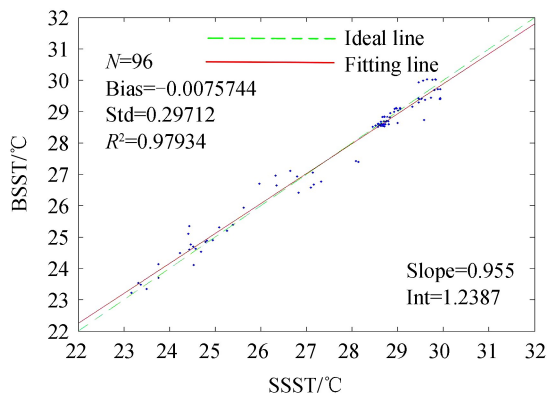


图 9 修正后的验证数据偏差

Fig.9 Deviation of corrected validation data

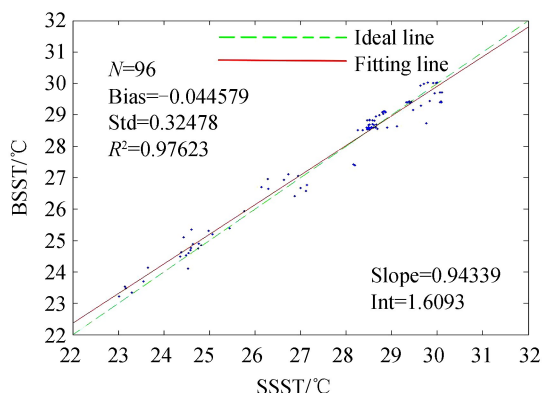


图 10 Donlon 模型修正后的反演误差

Fig.10 Inversion error with Donlon's model corrected

#### 3.2 误差分析

PY-301 平台上的海水体温传感器放置在水下约  $1.2\text{ m}$  处, 最浅时可达  $0.38\text{ m}$ , 皮温和体温的差异会进一步缩小, 并且趋于不明显, 给皮温-体温模型带来误差; 自动气象站安装在水面之上  $101\text{ m}$  处, 此处与海面  $10\text{ m}$  处的风速存在差异, 并且这一差异有不确定因素, 因此  $dT_{\text{depth}}$  随风速的分布会有一些差别, 这也给皮温-体温模型的构建带来新的误差。

在 PY-301 平台上的红外辐射计的接收视场受仪器狭缝的影响, 虽然这一影响已通过光阑校正, 但其校

正量受壳体与环境温度黑体温度差异的影响较大,尤其是在仪器受到外来温度影响时,因此最终的反演结果也会残留校正误差,这也是红外辐射计测量数据标准偏差始终很难小于 $0.3^{\circ}\text{C}$ 的主要原因.而本文数据中,气温通常大于体温,这也给校正带来很大困难,残余校正量通常会使得反演温度偏高.

## 4 结论

对红外辐射计校正后,将红外辐射计测量海洋水体皮温数据与CTD测量海洋水体体温数据进行比较,对差异结果进行了风速分布特征研究.结果表明,在南海区域风速小于 $5\text{ m/s}$ 时,皮温和体温的差异随风速减小而变小,在风速大于 $5\text{ m/s}$ 时,皮温和体温的差异几乎不变,但总体维持在小于 $0.5^{\circ}\text{C}$ .建立了海洋水体皮温-体温的模型,并修正了红外辐射计皮温测量数据,最终使红外辐射计测量海洋水体皮温偏差为 $-0.0076\pm 0.2971^{\circ}\text{C}$ ,这一结果使红外辐射计反演海表温度的精度从 $0.5^{\circ}\text{C}$ 提高到 $0.3^{\circ}\text{C}$ .水体皮温-体温模型的建立,对提高区域的红外反演海温算法有一定的借鉴作用.另外,模型的提出需要现场仪器的配合,因此对自动多波段红外辐射系统设计和研制有参考价值.

## 参考文献

- [1] MINNETT P J, KNUTESON R O, BEST F A, *et al.* The marine-atmospheric emitted radiance interferometer: a high-accuracy, seagoing infrared spectroradiometer[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, **18**(6): 994-1013.
- [2] JESSUP A T, BRANCH R. Integrated ocean skin and bulk temperature measurements using the calibrated infrared in situ measurement system (CIRIMS) and through-hull ports[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, **25**(4): 579-597.
- [3] DONLON C, ROBINSON I S, WIMMER W, *et al.* An infrared sea surface temperature autonomous radiometer (ISAR) for deployment aboard volunteer observing ships (VOS)[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, **25**(1): 93-113.
- [4] ZHANG Jian, QU En-shi, CAO Jian-zhong, *et al.* Study on a multi-spectral band infrared sea surface temperature radiometer system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0401003.  
张建,屈恩世,曹剑中,等.自动多波段红外海洋表面温度辐射系统研究[J].*光学学报*, 2012, **32**(4): 0401003.
- [5] DITRI A L, MINNETT P J, LIU Yang, *et al.* The accuracies of Himawari-8 and MTSAT-2 sea-surface temperatures in the tropical western pacific ocean[J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(2): 1-20.
- [6] ALAPPATTU D P, WANG Qing, YAMAGUCHI R, *et al.* A study on bulk and skin temperature difference using observations from Atlantic and Pacific Coastal regions of United States[C]. SPIE Defense+Security, 2017: 101860M.
- [7] HAO Yan-ling, CUI Ting-wei, SINGH V P, *et al.* Validation of MODIS sea surface temperature product in the coastal waters of the Yellow sea[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2017, **10**(5): 1667-1680.
- [8] YANG Ming-lun, GUAN Lei, ZHANG Kai-lin, *et al.* Effect of emissivity on shipboard sea surface skin temperature measurements[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2016: 4653-4656.
- [9] ZÜLICHE C, HAGEN E. Impact of the skin effect on the near-surface temperature profile[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998, **23**(5-6): 531.
- [10] DONLON C J, MINNETT P J, GENTEMANN C, *et al.* Toward improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research[J]. *Journal of Climate*, 2002, **15**(4): 353-369.
- [11] CHECHIN D, REPINA I, STEPANENKO V. Numerical modeling of the influence of cool skin on the heat balance and thermal regime of a water body[J]. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, 2010, **46**(4): 499-510.
- [12] MINNETT P J, SMITH M, WARD B. Measurements of the oceanic thermal skin effect[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2011, **58**(6): 861-868.
- [13] DONLON C J, NIGHTINGALE T J, SHEASBY T, *et al.* Implications of the oceanic thermal skin temperature deviation at high wind speed[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, **26**(16): 2505-2508.
- [14] HANAFIN J A, MINNETT P J. Measurements of the infrared emissivity of a wind-roughened sea surface[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(3): 398-411.
- [15] MASUDA K, TAKASHIMA T, TAKAYAMA Y. Emissivity of pure and sea waters for the model sea surface in the infrared window regions[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, **24**(2): 313-329.
- [16] SHI Jia-bao, WU Zhen-sen, CAO Yun-hua, *et al.* Study on reflection of sea surface in mid-IR[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **38**(9): 2372-2375.  
施加宝,吴振森,曹运华,等.海面中波红外反射率特性研究[J].*光子学报*, 2009, **38**(9): 2372-2375.
- [17] SHAW J, MARSTON C. Polarized infrared emissivity for a rough water surface[J]. *Optics Express*, 2000, **7**(11): 375-380.

- [18] WATTS P D, ALLEN M R, NIGHTINGALE T J. Wind speed effects on sea surface emission and reflection for the along track scanning radiometer [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1996, **13**(1): 126-141.
- [19] NICLÒS R, CASELLES V, VALOR E, *et al.* A simple equation for determining sea surface emissivity in the 3~15  $\mu\text{m}$  region[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, **30**(6): 1603-1619.

---

**Foundation item:** CAS "Light of West China" Program(No. XAB2016A10), Key Program of Research and Development of Shanxi Province of China(No. 2018ZDXM-GY-105), the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2008AA09A403)  
引用格式: ZHANG Jian, HAO San-feng, SONG Qing-jun, *et al.* Study on Model of the Sea Surface Skin Temperature and Bulk Sea Surface Temperature in Northern Region of South China Sea[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11): 1101001  
张建,郝三峰,宋庆君,等.南海北部区域海洋水体皮温-体温模型研究[J].光子学报,2018,**47**(11):1101001