

三波段海面红外热成像测温方法

王平¹, 杨立¹, 寇蔚¹, 金方圆², 杜永成¹

¹海军工程大学动力工程学院, 湖北 武汉 430033;

²水下测控技术重点实验室, 辽宁 大连 116013

摘要 介绍了常规测温方法和三波段海面红外热成像测温方法的原理, 采用这两种方法分别求解海面温度, 对比分析了在不同观测方向和红外热像仪精度下两种方法的精度。结果表明: 三波段海面红外热成像测温方法能消除海面发射率误差对精度的影响。当红外热像仪精度为 ± 0.25 K时, 测得海面温度的偏差基本小于0.5 K, 精度较高。提高红外热像仪精度可有效提高三波段海面红外热成像测温方法的精度。当观测方向天顶角为 $70^\circ \sim 85^\circ$ 时, 常规测温方法测得的海面温度偏差远高于三波段海面红外热成像测温方法, 此时必须采用三波段海面红外热成像测温方法。

关键词 测量; 红外测温; 海面发射率; 红外热像仪; 测温精度

中图分类号 TK311

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.061205

Three-Band Infrared Thermal Imaging Temperature Measurement Method for Sea Surface

Wang Ping¹, Yang Li¹, Kou Wei¹, Jin Fangyuan², Du Yongcheng¹

¹Academy of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China;

²Science and Technology on Underwater Test and Control Laboratory, Dalian, Liaoning 116013, China

Abstract We introduce the principles of conventional temperature measurement method and three-band infrared thermal imaging temperature measurement method for sea surface, then solve sea surface temperature with these two methods, separately, and comparatively analyze the measuring accuracies of the two methods under different observation directions and infrared imager precisions. The results show that three-band infrared thermal imaging temperature measurement method for sea surface can eliminate the influence of the sea surface emissivity error on the temperature measurement accuracy. When the infrared imager precision is within ± 0.25 K, the deviation of sea surface measured temperature is less than 0.5 K, basically, so its accuracy is relatively high. Improving the infrared imager precision can effectively improve the accuracy of three-band infrared thermal imaging temperature measurement method for sea surface. When the zenith angle of observation direction is in the range from 70° to 85° , the deviation of conventional temperature measurement method is much larger than that of three-band infrared thermal imaging temperature measurement method for sea surface, so we must use three-band infrared imaging temperature measurement method for sea surface in this case.

Key words measurement; infrared temperature measurement; sea surface emissivity; infrared thermal imager; temperature measurement accuracy

OCIS codes 120.6780; 110.3080; 010.5620

收稿日期: 2017-12-01; 收到修改稿日期: 2017-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(11504426)、水下测控技术重点实验室延伸性发展基金(YS0C261502)

作者简介: 王平(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事传热传质热流体力学及其应用方面的研究。

E-mail: wangpinghjgcdx@163.com

导师简介: 杨立(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事传热传质热流体力学应用及量测方面的研究。

E-mail: lyang39@hotmail.com

1 引言

红外热像仪测量海面温度具有非接触、实时性高和灵活方便等优点,在海面温度监测、渔业和气象等民用方面具有重要价值。在军事应用方面,由于舰船在海面航行过程中会产生一条明显的热尾流,因此可以利用热尾流的扩散规律以及热尾流与周围海面的温差对舰船海面尾流进行检测与识别。海面红外热成像测温的准确性会受到海面发射率、反射率、大气环境和红外热像仪本身精度等因素的影响,其中海面发射率的影响最大。海面发射率会受到风速、波长、温度和观测方向等因素影响^[1-2]。目前,海面发射率计算模型主要有漫射灰体模型、经验公式模型和粗糙海面模型^[3-5]。减小甚至消除海面发射率误差的影响对提高海面测温精度具有重要意义。

金晟等^[6]仅采用垂直方向或较小观测天顶角方向的海面发射率,这多适用于从空中利用红外热像仪测量海面温度。但舰载红外热像仪更贴近海面,观测方向的天顶角更大,海面发射率误差较大,因而精度不高。邵龙等^[7]建立了基于海空模型的大气对比传递函数,研究了观测距离、海拔高度和路径天顶角等因素对红外热成像系统性能的影响。田棋杰等^[8]提出了一种高温小目标红外辐射特性的测量方法,并通过实验进行了验证。

张波等^[9]建立了双波段下红外热像仪辐射温度和物体实际温度间关系的方程组,同时反演出海面发射率和海面温度,但其将海面近似视为灰体,忽略了海面发射率随波长的变化。杨帧等^[10]介绍了基于双温双波段的红外测温技术的原理,考虑了被测物体发射率随波长的变化,并将温度相近情况下被测物体的发射率视为等同,通过改变被测物体温度,分别使用两种不同工作波段的红外热像仪测定不同温度的物体,通过迭代求解得到被测物体温度。这种方法精度很高,并且无需知道被测物体的表面发射率。但由于需要改变被测物体温度,所以并不适用于海面温度测量。

基于红外遥感卫星的多通道反演算法精度很高,可达0.2 K,但实时性较低,且难以测量局部区域的海面温度^[11-12]。程晓舫等^[13]利用谱色测温原理,引入无量纲波长,建立了具有封闭条件的测温方程,从而解得被测物体温度,并进行了谱色测温实验。多波长高温计采用近红外工作波段,能够测量几千甚至上万开尔文的高温,且精度较高。但与高温目标不同,海面温度低、辐射能量比较弱,受背景

辐射影响较大,并且在近红外工作波段,太阳辐射对海面红外辐射的影响较大,导致研究更复杂,故多波长高温计采用的多光谱辐射测温方法不适用于海面温度测量^[14]。

本文介绍了海面温度的常规测温方法和三波段红外热成像测温方法的原理,给出三波段测温方程中海面温度的求解算法,通过仿真计算对比不同观测方向、不同红外热像仪精度下两种测温方法的精度,分析观测方向和红外热像仪精度等因素对两种测温方法精度的影响,并探讨两种测温方法的适用条件。

2 红外热成像测温原理

红外热成像测温即利用红外热像仪将接收到的红外辐射能量转化为温度信号。在对海面进行红外热成像测温时,测温方程为^[1,15]

$$I(T_r) = \tau_a [\varepsilon(\lambda, \theta_r, \varphi_r) I(T_0) + \rho(\lambda, \theta_r, \varphi_r) I(T_a) + \rho'(\lambda, \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) I(T_u)] + (1 - \tau_a) I(T_L), \quad (1)$$

式中: T_r 、 T_0 、 T_a 分别为海面辐射温度、测得的海面温度和天空背景温度; $I(T_r)$ 为红外热像仪接收到的红外辐射能量; $I(T_0)$ 、 $I(T_a)$ 、 $I(T_u)$ 、 $I(T_L)$ 分别为海面自身辐射能、天空背景辐射能、太阳辐射能和大气路径辐射能; $\varepsilon(\lambda, \theta_r, \varphi_r)$ 、 $\rho(\lambda, \theta_r, \varphi_r)$ 、 $\rho'(\lambda, \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 分别为海面方向光谱发射率、半球-方向光谱反射率和光谱双向反射率, λ 为光波波长; θ_r 为海面反射方向的天顶角; φ_r 为海面反射方向的方位角; θ_i 为海面入射方向的天顶角; φ_i 为海面入射方向的方位角; τ_a 为大气路径透过率。由普朗克辐射定律可知:

$$I(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} d\lambda, \quad (2)$$

式中: 第一辐射常数 $C_1 = 3.7415 \times 10^8 \text{ (W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2})$, 第二辐射常数 $C_2 = 1.43879 \times 10^4 \text{ (}\mu\text{m} \cdot \text{K)}$ 。

积分后可近似满足^[1]

$$I(T) \approx CT^n, \quad (3)$$

式中: C 为辐射常数。在 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段, $n = 9.2554$, 在 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 波段, $n = 3.9889$ 。

海水在红外波段可看作不透明物体,照射到海面的红外辐射能量除一部分被反射外,其余全部被海面吸收^[16],根据 Kirchhoff 定律可得

$$\rho(\lambda, \theta_r, \varphi_r) = 1 - \alpha(\lambda, \theta_r, \varphi_r) = 1 - \varepsilon(\lambda, \theta_r, \varphi_r). \quad (4)$$

当红外热像仪与被测海面距离较近时,可忽略大气路径辐射的影响, $\tau_a = 1$ 。红外热像仪工作波段

主要有 3~5 μm 和 8~13 μm 两种,对两种波段的海面红外辐射进行模拟分析发现,太阳辐射能对 3~5 μm 波段的海面红外辐射影响较大,而对 8~13 μm 波段的红外辐射影响较小,可以忽略不计^[17]。

因此,使用 8~13 μm 波段的红外热像仪进行近距离测温时,测温方程可表示为

$$I(T_r) = \epsilon(\lambda, \theta_r, \varphi_r) I(T_0) + [1 - \epsilon(\lambda, \theta_r, \varphi_r)] I(T_a). \quad (5)$$

3 红外热成像测温方法

3.1 常规测温方法

常规测温方法可通过查表或根据经验公式计算得到海面发射率。经验公式是指通过拟合海面发射率实测数据得到的发射率和观测方向间的经验关联公式,其表达式为^[3]

$$\epsilon = 0.98[1 - (1 - \cos \theta)^5], \quad (6)$$

式中: ϵ 为海面方向发射率; θ 为观测方向的天顶角。

本文采用经验公式计算海面发射率,表 1 和图 1 为不同观测方向天顶角下的海面发射率及变化趋势。

表 1 不同观测方向天顶角下的海面发射率

Table 1 Sea surface emissivity at different zenith angles of observation direction

$\theta /(^{\circ})$	ϵ	$\theta /(^{\circ})$	ϵ
0	0.9800	50	0.9743
10	0.9800	60	0.9494
20	0.9800	70	0.8591
30	0.9800	80	0.6024
40	0.9793	90	0.0000

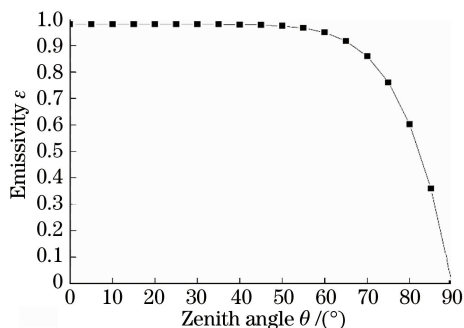


图 1 海面发射率随天顶角的变化趋势

Fig. 1 Sea surface emissivity changing with zenith angle

由表 1 和图 1 可以看出,海面发射率随观测方向天顶角的增大而不断减小。 $\theta = 0^{\circ} \sim 50^{\circ}$,海面发射率基本不变; $\theta = 50^{\circ} \sim 70^{\circ}$,海面发射率明显减小; $\theta > 70^{\circ}$,海面发射率急剧下降。这反映了海面发射率和观测方向间的关系,但忽略了风速、波长和温度等因素的影响。因此,计算所得的海面发射率与实

际发射率存在一定误差。

不同方向观测的海面发射率及误差不同,测温精度也不同^[18]。上海交通大学的邢强等^[16]分别使用经验公式和 Cox-Munk 粗糙海面模型计算了不同观测方向上的海面发射率,并对比分析了不同观测方向上分别采用两种模型算出的海面发射率的误差。结果表明, $\theta = 0^{\circ} \sim 50^{\circ}$,偏差小于 1%; $\theta = 50^{\circ} \sim 70^{\circ}$,误差增大,但仍小于 2%; $\theta > 70^{\circ}$,误差急剧增大,最大可达 20%左右。

使用常规测温方法对海面进行近距离测温,由(3)式、(5)式和(6)式可得海面温度 T_0 :

$$T_0 = \left(\frac{1}{\epsilon} T_r^n - \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} T_a^n \right)^{1/n}. \quad (7)$$

可见,常规测温方法的精度主要受海面发射率误差的影响,天顶角较大时,发射率不准确,导致测温误差较大。

3.2 三波段红外热成像测温方法

在相同观测方向,海面实际发射率随波长变化而变化,且随波长的变化较为复杂,导致发射率很难被准确表达。

连续辐射物体的光谱发射率必然是波长的连续函数,海面方向光谱发射率在波长 λ_0 的邻域波段 $|\lambda - \lambda_0| < \delta$ 内有定义,且在此邻域内有 $N + 1$ 阶导数。可以对海面方向光谱发射率进行泰勒多项式展开,得到海面方向光谱发射率的表达式为^[19]

$$\epsilon(\lambda, \theta_r, \varphi_r) = \epsilon(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r) + \epsilon'(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r)(\lambda - \lambda_0) + \dots + \frac{1}{N!} \epsilon^{(N)}(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r)(\lambda - \lambda_0)^N + o_N(\lambda). \quad (8)$$

式中: $o_N(\lambda)$ 为高阶无穷小量。当 δ 取无穷小量时, $N \geq 2$ 的高阶项及余项可以忽略不计。

在单波段红外热像仪前加设远红外窄带滤光片,获得 $\lambda_0 \sim \lambda_1$ 、 $\lambda_2 \sim \lambda_3$ 、 $\lambda_4 \sim \lambda_5$ 3 种不同的工作波段。在有限窄波段 $\lambda_0 \sim \lambda_5$ 内,海面方向光谱发射率可表示为波长的线性函数。

定义无量纲波长 $\Lambda = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_5 - \lambda_0}$,则(8)式可表示为

$$\epsilon(\lambda, \theta_r, \varphi_r) = a_0(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r) [1 + m(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r) \Lambda], \quad (9)$$

式中: $a_0(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r) = \epsilon(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r)$; $m(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r) = \frac{\epsilon'(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r)(\lambda_5 - \lambda_0)}{\epsilon(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r)}$ 。

在相同观测方向和环境条件下,分别使用 3 种不同工作波段的红外热像仪测量海面温度,由(5)式

可得测温方程组

$$\begin{cases} I_1(T_{r1}) = \epsilon_1 I_1(T_0) + (1 - \epsilon_1) I_1(T_a) \\ I_2(T_{r2}) = \epsilon_2 I_2(T_0) + (1 - \epsilon_2) I_2(T_a), (10) \\ I_3(T_{r3}) = \epsilon_3 I_3(T_0) + (1 - \epsilon_3) I_3(T_a) \end{cases}$$

式中: $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, T_0$ 为未知数, $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 分别为 3 个工作波段下的海面平均发射率, 在有限窄波段内, 可近似用工作波段中心波长的海面方向光谱发射率表示。由(9)式可得

$$\begin{cases} \epsilon_1 = a_0(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r) [1 + m(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r) \Lambda_1^*] \\ \epsilon_2 = a_0(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r) [1 + m(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r) \Lambda_2^*], \\ \epsilon_3 = a_0(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r) [1 + m(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r) \Lambda_3^*] \end{cases} (11)$$

式中: $\Lambda_1^* = \frac{\lambda_1^* - \lambda_0}{\lambda_5 - \lambda_0}$; $\Lambda_2^* = \frac{\lambda_2^* - \lambda_0}{\lambda_5 - \lambda_0}$; $\Lambda_3^* = \frac{\lambda_3^* - \lambda_0}{\lambda_5 - \lambda_0}$, $\lambda_1^*, \lambda_2^*, \lambda_3^*$ 分别为 3 个工作波段的中心波长。

将(11)式代入(10)式, 可得含 $T_0, a_0(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r), m(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r)$ 3 个未知数的方程式, 为

$$\begin{cases} I_1(T_{r1}) - I_1(T_a) = a_0(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r) \times \\ [1 + m(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r) \Lambda_1^*] [I_1(T_0) - I_1(T_a)] \\ I_2(T_{r2}) - I_2(T_a) = a_0(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r) \times \\ [1 + m(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r) \Lambda_2^*] [I_2(T_0) - I_2(T_a)]^\circ \\ I_3(T_{r3}) - I_3(T_a) = a_0(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r) \times \\ [1 + m(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r) \Lambda_3^*] [I_3(T_0) - I_3(T_a)] \end{cases} (12)$$

令 $I_i(T_{ri}) - I_i(T_a) = d_i, I_i(T_0) - I_i(T_a) = b_i$, 消去 $a_0(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r), m(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r)$ 可得

$$\begin{aligned} (\Lambda_3^* - \Lambda_2^*) d_1 d_3 b_2 b_3 + (\Lambda_2^* - \Lambda_1^*) d_3^2 b_1 b_2 + \\ (\Lambda_1^* - \Lambda_3^*) d_2 d_3 b_1 b_3 = 0, \end{aligned} (13)$$

经迭代求解可得海面温度 T_0 。

与双波段红外热成像测温方法不同, 三波段海面红外热成像测温方法考虑了海面发射率随波长的变化情况, 理论模型更加精确。

4 模拟计算及分析

利用计算机模拟海面红外热成像测温即在给定的海面实际温度 T_s 、海面发射率 ϵ 和环境温度 T_a 条件下, 模拟计算红外热像仪接收到的红外辐射能量, 并将其代入相应测温方程(组), 解得海面测量温度 T_0 , 如图 2、图 3 所示。

常规测温方法: 选用 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 波段的红外热像仪。由(7)式可得海面测量温度 T_0 。

三波段红外热成像测温方法: 在单波段红外热像仪前加设远红外窄带滤光片, 获得 3 种不同的工

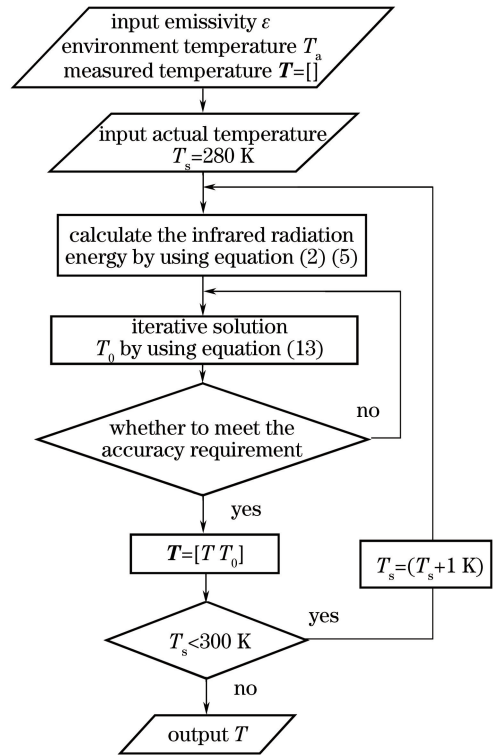


图 2 不同海面实际温度时海面测量温度的算法流程图
Fig. 2 Flow chart of sea surface measurement temperatures at different sea surface actual temperatures

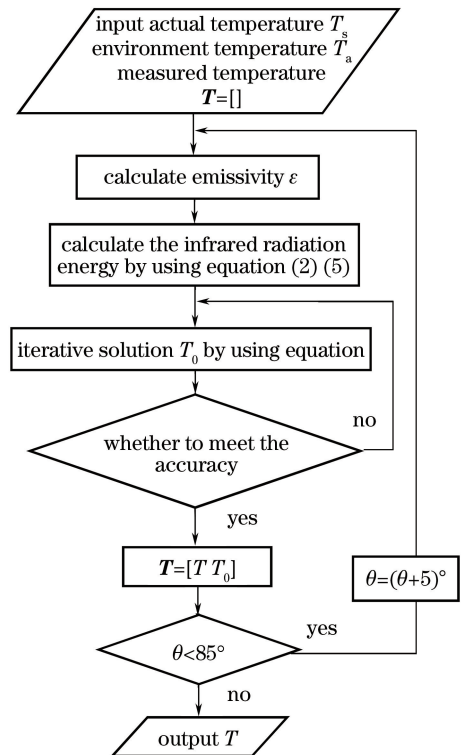


图 3 不同观测方向上海面测量温度的算法流程图
Fig. 3 Flow chart of sea surface measurement temperatures in different observation directions

作波段 $10.38 \sim 10.54 \mu\text{m}$ 、 $10.705 \sim 10.895 \mu\text{m}$ 、 $10.8825 \sim 11.0215 \mu\text{m}$ 。由(13)式迭代求解可得海面测量温度 T_0 。

4.1 不同海面实际温度时的海面测量温度

假设环境温度 $T_a = 305 \text{ K}$ ，海面实际温度 T_s ，考察区间为 $280 \sim 300 \text{ K}$ 。标定红外热像仪，使其精度分别为 $\pm 0.25, \pm 0.5, \pm 1.0 \text{ K}$ 。利用 MATLAB 软件分别对不同观测方向天顶角和不同精度下的红外辐射测温进行仿真计算。

表 2 $\theta = 0^\circ \sim 50^\circ$ 时, 两种方法测得的海面温度

Table 2 Sea surface temperatures measured by the two methods when $\theta = 0^\circ$ to 50°

K

T_s	Conventional method			Three-band method		
	± 0.25	± 0.5	± 1.0	± 0.25	± 0.5	± 1.0
280	280.53	280.78	281.28	280.10	280.19	280.39
282	282.51	282.76	283.26	282.11	282.22	282.44
284	284.49	284.74	285.24	284.13	284.25	284.50
286	286.46	286.71	287.22	286.14	286.29	286.57
288	288.44	288.69	289.20	288.17	288.33	288.66
290	290.42	290.67	291.19	290.19	290.39	290.78
292	292.40	292.65	293.17	292.23	292.46	292.92
294	294.38	294.63	295.15	294.28	294.56	295.12
296	296.35	296.62	297.14	296.34	296.70	297.41
298	298.33	298.60	299.12	298.46	298.92	299.83
300	300.31	300.58	301.11	300.13	300.56	301.28

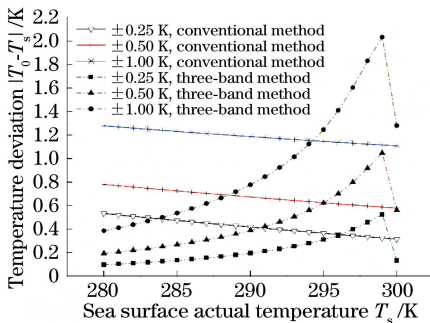


图 4 $\theta = 0^\circ \sim 50^\circ$ 时, 两种方法测得的海面温度偏差随海面实际温度的变化

Fig. 4 Sea surface temperature deviations measured by the two methods with different sea surface actual temperatures when $\theta = 0^\circ$ to 50°

常规测温方法精度主要受海面发射率误差和红外热像仪本身精度的影响。由经验公式计算得到的海面发射率与海面实际发射率存在一定误差, 这种误差随观测方向天顶角 θ 的增大而增大, 并且海面发射率越小, 误差对测得的海面温度偏差影响越大; 三波段红外热成像测温方法在窄波段内线性化处理了海面发射率, 并在迭代求解过程中消去 $a_0(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r)$ 、 $m(\lambda_0, \theta_r, \varphi_r)$, 从而消除了海面发射率误差对精度的影响, 因此其精度主要受红外热像仪本身精

度的影响。
1) 当天顶角 $\theta = 0^\circ \sim 50^\circ$ 时, 海面发射率 ϵ 基本保持在 0.98, 取海面发射率误差为 1%。由表 2 和图 4 可以看出, 当红外热像仪精度分别为 $\pm 0.25, \pm 0.5, \pm 1.0 \text{ K}$ 时, 采用常规测温方法测得的海面温度 T_0 的最小偏差分别为 0.31, 0.58, 1.11 K, 最大偏差分别为 0.53, 0.78, 1.28 K。采用三波段红外热成像测温方法测得的海面温度 T_0 的最小偏差分别为 0.10, 0.19, 0.39 K, 最大偏差分别为 0.52, 1.05, 2.03 K。

度的影响。

在 $0^\circ \sim 50^\circ$ 范围内, 观测方向天顶角较小, 采用经验公式计算得到的海面发射率误差很小, 常规测温方法和三波段红外热成像测温方法的精度主要取决于红外热像仪本身精度, 因此两种方法的精度均较高。当海面实际温度为 $295 \sim 300 \text{ K}$ 时, 采用三波段红外热成像测温方法测得的海面温度偏差较大, 当红外热像仪精度为 $\pm 1.0 \text{ K}$ 时, 最大偏差为 2.03 K。这是由于红外热像仪自身精度问题导致接收到的每个工作波段的红外辐射能量都存在一定误差, 从而形成误差累积, 因此当红外热像仪精度较差时, 测得的海面温度偏差较大, 且随着海面实际温度的增加, 其与背景环境的温差不断减小, 迭代求解也越难停止, 造成测温误差增大, 可通过调整迭代求解停止的条件控制测温误差。

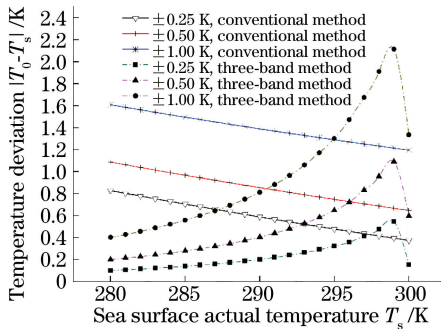
2) 当天顶角 $\theta = 60^\circ$ 时, 海面发射率 $\epsilon = 0.9494$, 取海面发射率误差为 2%。由表 3 和图 5 可以看出, 当红外热像仪精度分别为 $\pm 0.25, \pm 0.5, \pm 1.0 \text{ K}$ 时, 采用常规测温方法测得的海面温度 T_0 的最小偏差分别为 0.38, 0.65, 1.20 K, 最大偏差分别为 0.83, 1.09, 1.61 K。采用三波段红外热成像测温方

法测得的海面温度 T_0 的最小偏差分别为 0.10, 与 $\theta=0^\circ\sim 50^\circ$ 时相比, 由于海面发射率及其误差变 0.20, 0.40 K, 最大偏差分别为 0.55, 1.09, 2.11 K。 化不大, 测得的海面温度偏差基本不变。

表 3 $\theta=60^\circ$ 时, 两种方法测得的海面温度Table 3 Sea surface temperatures measured by the two methods when $\theta=60^\circ$

K

T_s	Conventional method			Three-band method		
	± 0.25	± 0.5	± 1.0	± 0.25	± 0.5	± 1.0
280	280.83	281.09	281.61	280.10	280.20	280.40
282	282.78	283.04	283.56	282.11	282.23	282.46
284	284.73	284.99	285.52	284.13	284.26	284.52
286	286.68	286.94	287.47	286.15	286.30	286.60
288	288.63	288.90	289.43	288.17	288.35	288.69
290	290.59	290.86	291.39	290.20	290.41	290.81
292	292.54	292.81	293.35	292.24	292.48	292.96
294	294.50	294.77	295.31	294.29	294.58	295.17
296	296.46	296.73	297.27	296.36	296.72	297.47
298	298.42	298.69	299.23	298.48	298.96	299.91
300	300.38	300.65	301.20	300.15	300.60	301.33

图 5 $\theta=60^\circ$ 时, 两种方法测得的海面温度偏差随海面实际温度的变化Fig. 5 Sea surface temperature deviations measured by the two methods with different sea surface actual temperatures when $\theta=60^\circ$

3) 当天顶角 $\theta=80^\circ$ 时, 海面发射率 $\epsilon=0.6024$, 取海面发射率误差为 10%。由表 4 和图 6 可以看出, 当红外热像仪精度分别为 ± 0.25 ,

表 4 $\theta=80^\circ$ 时, 两种方法测得的海面温度 T_0 。Table 4 Sea surface temperatures measured by the two methods when $\theta=80^\circ$

K

T_s	Conventional method			Three-band method		
	± 0.25	± 0.5	± 1.0	± 0.25	± 0.5	± 1.0
280	276.63	276.16	275.21	280.14	280.28	280.57
282	278.90	278.43	277.49	282.16	282.32	282.65
284	281.16	280.70	279.77	284.18	284.37	284.74
286	283.42	282.96	282.03	286.21	286.42	286.85
288	285.67	285.21	284.29	288.24	288.49	288.98
290	287.91	287.46	286.54	290.28	290.57	291.15
292	290.15	289.70	288.79	292.34	292.68	293.37
294	292.38	291.93	291.03	294.41	294.82	295.66
296	294.61	294.16	293.26	296.51	297.02	298.03
298	296.83	296.39	295.49	298.56	299.15	300.21
300	299.05	298.60	297.71	300.34	300.92	300.38

$\pm 0.5, \pm 1.0$ K 时, 采用常规测温方法测得的海面温度 T_0 的最小偏差分别为 0.95, 1.40, 2.29 K, 最大偏差分别为 3.37, 3.84, 4.79 K。采用三波段红外热成像测温方法测得的海面温度 T_0 的最小偏差分别为 0.14, 0.28, 0.38 K, 最大偏差分别为 0.56, 1.15, 2.21 K。与前面两种情况相比, 采用三波段红外热成像测温方法测得的海面温度偏差基本不变, 而采用常规测温方法测得的海面温度偏差急剧增大, 三波段红外热成像测温精度明显高于常规测温方法。

当天顶角 $\theta=80^\circ$ 时, 由经验公式计算得到的海面发射率与海面实际发射率的误差很大, 同时受红外热像仪本身精度的影响, 采用常规测温方法测得的海面温度偏差很大。而三波段红外热成像测温方法消除了海面发射率误差对精度的影响, 测得的海面温度偏差基本不变。

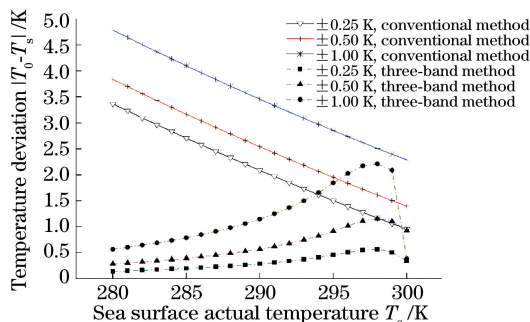


图 6 $\theta=80^\circ$ 时,两种方法测得的海面温度偏差随海面实际温度的变化

Fig. 6 Sea surface temperature deviation measured by the two methods with different sea surface actual temperatures when $\theta=80^\circ$

4.2 不同观测方向上的海面测量温度

假设环境温度 $T_a=305$ K,在海面实际温度 T_s 分别为 290 K 和 295 K,红外热像仪精度分别为 $\pm 0.25, \pm 0.5, \pm 1.0$ K 的情况下,模拟计算常规测

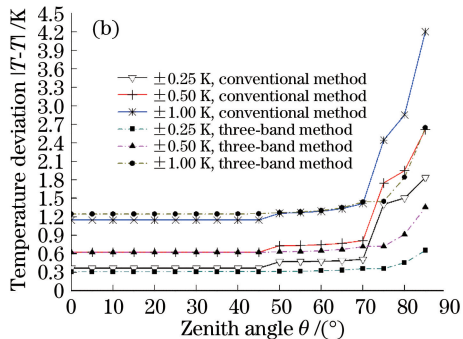
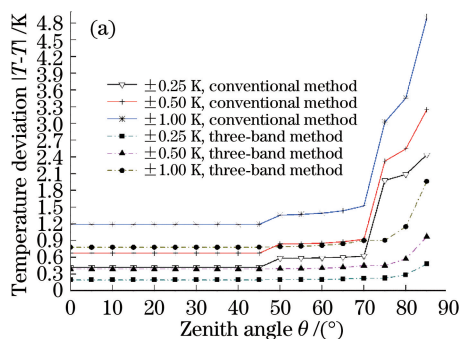


图 7 采用两种方法测得的海面温度偏差随观测方向天顶角的变化。(a) $T_s=290$ K;(b) $T_s=295$ K

Fig. 7 Sea surface temperature deviations measured by the two methods with different zenith angles of observation direction.

(a) $T_s=290$ K; (b) $T_s=295$ K

5 结 论

介绍了常规测温方法和三波段红外热成像测温方法的原理,采用经验公式计算了海面发射率,利用 MATLAB 软件模拟计算了红外热像仪接收到的红外辐射能量并求解出海面测量温度 T_0 ,对比分析了两种测温方法在不同海面实际温度、观测方向和红外热像仪精度下测得的海面温度偏差。

1) 常规测温方法的精度主要受海面发射率误差的影响。当天顶角 $\theta=0^\circ\sim 70^\circ$ 时,采用常规测温方法测得的海面温度偏差变化较小,精度较高;当红外热像仪精度为 ± 0.25 K 时,测得海面温度的偏差基本小于 0.7 K;当天顶角 $\theta=70^\circ\sim 85^\circ$ 时,测得的海面温度偏差急剧增大,最大可达 4.89 K。

2) 三波段红外热成像测温方法能消除海面发

射率误差对精度的影响,其精度主要受红外热像仪精度的影响。当天顶角 $\theta=0^\circ\sim 70^\circ$ 时,测得的海面温度偏差基本不变;当天顶角 $\theta=70^\circ\sim 85^\circ$ 时,测得海面温度偏差的增幅明显小于常规方法,且红外热像仪精度越高,偏差增幅越小,当红外热像仪精度为 ± 0.25 K 时,测得海面温度的偏差基本小于 0.5 K。

3) 当观测方向天顶角 $\theta=0^\circ\sim 70^\circ$ 时,若精度要求不高,可采用较为简便的常规测温方法;当观测方向天顶角 $\theta=70^\circ\sim 85^\circ$ 时,必须采用三波段红外热成像测温方法。

4) 准确标定红外热像仪,提高其精度,可有效提高三波段红外热成像测温方法的精度。

参 考 文 献

[1] Yang L, Yang Z. Principle and technology of infrared

- thermal imaging temperature measurement [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- 杨立, 杨桢. 红外热成像测温原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] Liu Y X, Zhang J, Du Y C. Infrared imaging temperature measurement for a shielded surface by diffuse medium [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 091201.
- 刘永翔, 张健, 杜永成. 弥散介质遮蔽表面的红外成像测温方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(9): 091201.
- [3] Ren H G, Chen H P, Xu G, *et al.* Sea surface emissivity models in infrared image simulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 36-38.
- 任海刚, 陈汉平, 徐杲, 等. 红外仿真中的海面发射率模型[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 36-38.
- [4] Ai M. Infrared imaging simulation and implementation of ocean scene [D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- 艾敏. 海洋场景的红外成像仿真与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [5] Tatarskii V I. Multi-Gaussian representation of the Cox-Munk distribution for slopes of wind-driven waves [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(11): 1697-1705.
- [6] Jin S, Zhang X H, Xia M. Simulation of sea surface temperature field detected by airborne infrared detection system [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, 6(5): 68-71.
- 金晟, 张晓晖, 夏珉. 机载红外热像仪探测海面温度场的仿真计算[J]. *光学与光电技术*, 2008, 6(5): 68-71.
- [7] Shao L, Bai T Z, Zheng H J, *et al.* Imaging analysis of infrared thermal imaging system based on sea-sky model[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 111104.
- 邵龙, 白廷柱, 郑海晶, 等. 基于海空模型的红外热成像系统成像影响分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 111104.
- [8] Tian Q J, Li Z, Chang S T, *et al.* Measurement method of infrared radiometric characteristics for high-temperature small targets [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1012004.
- 田棋杰, 李周, 常松涛, 等. 高温小目标红外辐射特性测量方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1012004.
- [9] Zhang B, Lü S G. Temperature measurement of the thermal infrared imager based on two response working wavebands and its error analysis[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2010, 30(6): 11-15.
- 张波, 吕事桂. 基于双响应波段工作的红外热像仪测温原理与误差分析[J]. *宇航计测技术*, 2010, 30(6): 11-15.
- [10] Yang Z, Yang L, Zhang S C, *et al.* Infrared temperature measurement technology on Lambertian based on the dual temperature and dual-band method [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(11): 2132-2135.
- 杨桢, 杨立, 张士成, 等. 基于双温双波段法的郎伯体红外测温技术[J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(11): 2132-2135.
- [11] Walton C C, Pichel W G, Sapper J F, *et al.* The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with the NOAA polar-orbiting environmental satellites [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1998, 103(C12): 27999-28012.
- [12] Merchant C J, Le B P, Marsouin A, *et al.* Optimal estimation of sea surface temperature from split-window observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(5): 2469-2484.
- [13] Cheng X F, Fu T R, Fan X L. The principle of primary spectrum pyrometry [J]. *SCIENCE IN CHINA Series G-Physics, Mechanics & Astronomy*, 2004, 34(6): 639-647.
- 程晓舫, 符泰然, 范学良. 谱色测温原理[J]. *中国科学 G辑: 物理学 力学 天文学*, 2004, 34(6): 639-647.
- [14] Dai J M. Theory and practice of multi-spectral thermometry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- 戴景民. 多光谱辐射测温理论与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [15] Yang Z. The research on methods and technologies of temperature measurement correction using infrared imager [D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2012.
- 杨桢. 红外热像仪测温修正的方法与技术研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2012.
- [16] Xing Q, Ren H G, Su M. Study on directional emissivity of rough sea surface [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(4): 278-281.
- 邢强, 任海刚, 苏明. 漫射海面的方向发射率研究[J]. *激光与红外*, 2006, 36(4): 278-281.
- [17] Liu Y, Shen G T, Cai J G, *et al.* Improved sea surface radiation models [J]. *Infrared and Laser*

Engineering, 2009, 38(1): 19-22.

刘燕, 沈国土, 蔡继光, 等. 改进的海面辐射模型 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 19-22.

- [18] Hu J H, Ning F, Shen X H, *et al.* Influence of surface emissivity of objects on measuring accuracy of infrared thermal imagers [J]. Chinese Optics, 2010, 3(2): 152-156.

胡剑虹, 宁飞, 沈湘衡, 等. 目标表面发射率对红外热像仪测温精度的影响 [J]. 中国光学, 2010, 3(2):

152-156.

- [19] Fu T R, Cheng X F, Zhong M H, *et al.* Analyses of spectral emissivity in radiation temperature measurement [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(1): 1-5.

符泰然, 程晓舫, 钟茂华, 等. 辐射测温中光谱发射率的表征描述 [J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(1): 1-5.