

自动多波段红外海洋表面温度辐射系统研究

张 建 屈恩世 曹剑中 范哲源 焦国华

(中国科学院西安光学精密机械研究所飞行器光学成像与测量技术研究室, 陕西 西安 710119)

摘要 针对我国海洋遥感定标检验技术的研究,设计了一种能够自动测量海水表面温度的多波段红外辐射系统,其分辨率优于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度优于 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。系统采用了 4 个波段,即 $3.5\sim 4.0\text{ }\mu\text{m}$, $8\sim 13\text{ }\mu\text{m}$, $10.3\sim 11.3\text{ }\mu\text{m}$ 和 $11.5\sim 12.3\text{ }\mu\text{m}$ 。内部光学系统通过两个不同温度的参考黑体进行实时校正,保证光学系统被盐雾沉积后也不影响整个系统的精度。另外,为了防止恶劣天气对系统的影响,还设计了一个由雨量传感器触发的自动保护罩。通过实验室标定和岸边实验对系统精度和稳定性进行了实验验证。

关键词 海洋光学;多波段;红外辐射计;海洋表面温度;光谱辐射

中图分类号 P716⁺.42 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0401003

Study on a Multi-Spectral-Band Infrared Sea Surface Temperature Radiometer System

Zhang Jian Qu Enshi Cao Jianzhong Fan Zheyuan Jiao Guohua

(Flight Vehicle Optical Imaging and Measurement Research Department, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

Abstract A multi-spectral infrared radiometer system is designed that can be used to measure sea surface temperature automatically, whose resolution ratio and accuracy are better than $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively. The system adopts four spectral bands, i. e., $3.5\sim 4.0\text{ }\mu\text{m}$, $8\sim 13\text{ }\mu\text{m}$, $10.3\sim 11.3\text{ }\mu\text{m}$, and $11.5\sim 12.3\text{ }\mu\text{m}$. Its inner optical system carries out real time calibration by two blackbody reference cavities with different temperatures, which promises that the high accuracy of an infrared radiometer is maintained even when optical components are moderately contaminated by salt deposition. Moreover, a protection shutter which could be automatically triggered by a sensitive rain gauge is designed to resist against foul weather. Finally, the accuracy and stability of the system are tested by laboratory calibration and shoreside experiment.

Key words oceanic optics; multi-spectral band; infrared radiometer; sea surface temperature; spectral radiation

OCIS codes 010.4450; 120.4640; 300.6340

1 引 言

海洋表面温度(SST)是海洋-大气系统中一个十分关键的物理量,在海洋学和气象学等许多研究领域中都占有非常重要的地位。国内外对利用红外辐射技术测量海洋表面温度的仪器已有相关研究^[1],具有代表性的有:扫描红外海洋表面温度辐射计(SISTeR),海洋大气发射辐射干涉仪(M-AERI)^[2,3],校准红外原位测量系统(CIRIMS)^[4,5],红外 SST 自主辐射计(ISAR)^[6,7]和高分辨率成像辐射计

(AVHRR)等。这些红外辐射计多数都用于野外测试,一般安装在船舷上,在轮船巡游的过程中,测量周围海域的海水表面温度。其选择的波段通常为长波波段,这是由海水表面辐射特性决定的,在此波段内,海水表面测量通常能以较少的成本获取较高的精度,例如 CIRIMS($9.6\sim 11.5\text{ }\mu\text{m}$),SISTeR($3.7, 10.8, 12.0\text{ }\mu\text{m}$),ISAR($9.6\sim 11.5\text{ }\mu\text{m}$)。然而,单一的波段在卫星定标测量时具有一定的局限性。由于不同红外波段的发射率存在差异,与之相对应的

收稿日期: 2011-06-13; 收到修改稿日期: 2011-09-15

基金项目: 国家 863 计划(2008AA09A403)资助课题。

作者简介: 张 建(1978—),男,硕士,助理研究员,主要从事红外辐射与成像技术方面的研究。E-mail: zj@opt.ac.cn

相同温度下物体的红外辐射出射度也有变化,因此星载的红外光谱辐射计或红外成像辐射计在地球环境资源探测时,根据探测对象的不同,光谱探测范围除了长波红外,有的还包括中波红外。中波红外测量海水目标适用于温度较高的环境,当环境温度下降为较低时,中波红外的辐射量也将下降,将会导致信号过于微弱,无法实现准确测量。而长波红外利于从低温到高温的大范围温度测量。自然界中物体向外界辐射的光谱特性遵循普朗克辐射定律,在每一个波长上其辐射强度都有差异,因而对于不同的波长位置,即使是波段宽度相等,它们的辐射强度也是不一样的。长波细分为3个波段,在不同波段上响应函数不同,比辐射率也不一样。通过系统细分的4个波段,可以得到对应的海水辐亮度,最终可以获得海洋学和气象学研究中所需的温度物理量。

目前,国外包含多个波段的设备还较少,主要有M-AERI(3~18 μm)和AVHRR(3.8 μm , 10.6 μm)等。M-AERI使用双色制冷红外探测器,构成傅里叶变换红外光谱辐射计。AVHRR为成像红外辐射计,需要2个或多个制冷式的红外面阵探测器。而国内基于海洋平台用于测量海洋表面温度的高精度多通道红外辐射仪器尚属空白^[8~11],因此,极有必要研究相关的关键技术以应对当前和未来的应用需求。

自动多波段红外辐射系统是依托南海深水区海洋动力环境立体监测技术开发的一套高精度测量海水红外辐射度的设备。它一方面可以对卫星过境时

测量海水温度的正确性进行现场验证,另一方面通过自动监测海水表面温度,进行海洋科学相关技术的研究。

2 系统工作原理

红外辐射系统设计中采用旋转反射镜分别扫描常温黑体、环温黑体、天空和海水表面。扫描常温黑体和环温黑体可以实时修正红外探测系统的光电响应系数,消除红外光学系统透射率变化、环境温度变化和探测器响应系数变化带来的影响。通过扫描天空和海水表面来修正海空背景辐射对海水辐射测温的影响。通过内部数据处理系统的运算,将测得的红外辐射通量转换为温度值,经过RS485串口传输相关数据到控制终端,达到对海水表面温度进行测量的目的。另外,通过对辐射计内部关键元器件的密封保护和对外部材料进行三防处理,使仪器在海洋环境下能长期可靠工作。

2.1 系统构成

系统主要包括8个部分,即转动扫描组件,红外光学系统,实时校正标准源,红外探测器及预处理组件,信号采集及数据处理运算组件,中央控制器及定时器,上位机控制指令及数据收发组件和自动保护装置。

2.2 工作原理

系统的工作原理图如图1所示,外部场景和实时

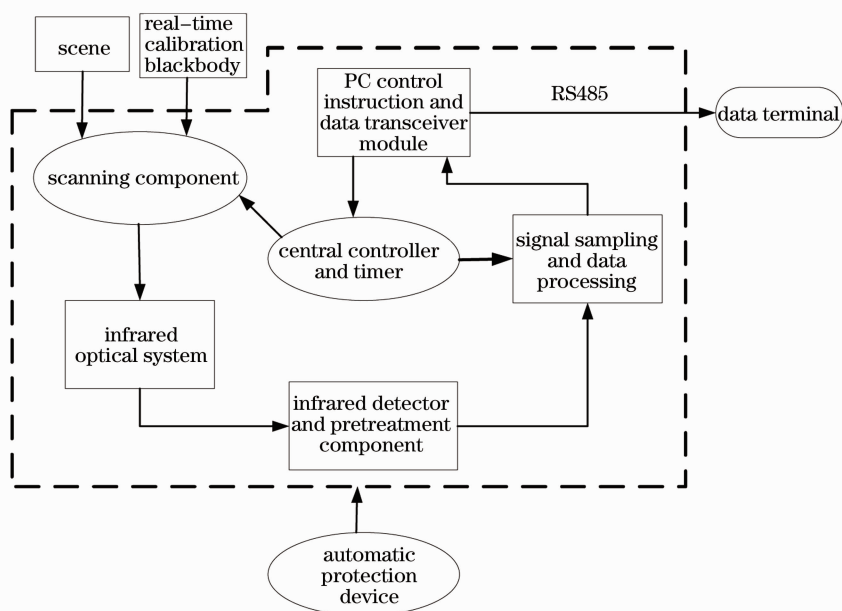


图1 工作原理框图

Fig. 1 Block diagram of working principle

校正标准源通过扫描组件依次进入红外光学系统并将外部的红外辐射聚焦在红外探测器探测面上,红外探测器根据红外辐射通量的大小输出与之相对应的电压或电流值,经前置放大器预处理后,将微小的电压或电流值转换为与红外辐射成正比的电压值,中央控制器及定时器通过时序来控制信号采集及数据处理运算组件,分别采集外部场景和黑体在不同波段的电压值,经模/数(A/D)转换后,量化为响应数据,最后通过运算器运算后,计算出海水表面温度。

3 系统设计及关键技术分析

3.1 场景红外辐射分离和标准辐射源实时校正

场景包含海水和天空,海水为待测的目标,天空作为背景。实时校正黑体源为两个不同温度的黑体,其中一个黑体为环境温度黑体,与环境温度一致,另一个黑体为常温黑体,可进行需要温度的设定。两个黑体均为小型面源黑体,辐射腔具有大于 0.998 的发射率,温度均匀性和温度控制精度均为 0.1 K。系统中采用扫描天空和标准辐射源的方法主要为了实现场景海水红外辐射和天空辐射的分离,通过标准辐射源实时校正辐射响应系数。

3.1.1 场景分离

图 2 说明了红外辐射系统在测量海水红外辐射时天空辐射对其的影响。假设海水表面是完美的辐射体,那么直接测量其光谱辐射,根据普朗克公式就可计算出海水表面的温度。然而,海水的发射率稍小于 1,根据辐射波长和辐射角的稍有不同,则进入系统的红外辐射包含了大气的一小部分辐射。为了能准确测量海水的辐射,必须同时测得下方以海水反射作为背景的大气辐射,确切知道海水表面发射率 ϵ 的数值。根据以往的研究和测试,平静的海水在 $9\sim 12\ \mu\text{m}$,天顶角 $\theta < 40^\circ$ 范围内,发射率 ϵ 具有最大值,即 $\epsilon > 0.98$ 。

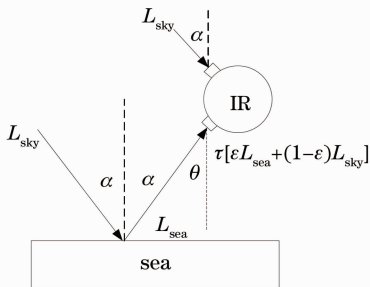


图 2 天空背景对海水辐射测量影响

Fig. 2 Effects of the sky on the measurement of sea radiation

红外辐射系统内置不同波段的滤光片,在测量时选择需要的波段通道,分别测量向上的大气红外辐射,向下的海水红外辐射和海平面反射的大气红外辐射(测量的天顶角 $\theta < 40^\circ$ 且天空背景和海平面反射的天空背景同属一个区域)。

设定向下测量的红外辐射为

$$M_{\text{down}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\lambda} [\epsilon_{\lambda} L_{\text{sea}} + (1 - \epsilon_{\lambda}) L_{\text{sky}}] d\lambda}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad (1)$$

式中 ϵ_{λ} 为海水表面在指定波长的发射率, L_{sea} 为海水表面的同温度黑体的红外辐射出射度, L_{sky} 为天空中大气的红外辐射出射度, τ_{λ} 为光学系统在特定波长的透射率。

$$L_{\text{sea}} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]}. \quad (2)$$

当波段范围较窄时, τ_{λ} 、 ϵ_{λ} 可视为常量,此时

$$M_{\text{down}} = \tau [\epsilon L_{\text{sea}} + (1 - \epsilon) L_{\text{sky}}]. \quad (3)$$

通过黑体标定时,

$$M_{\text{down}} = M_A \tau, \quad (4)$$

M_A 为黑体在温度 T_A 时的红外辐射出射度。向上的红外辐射 M_{up} :

$$M_{\text{up}} = \tau L_{\text{sky}}. \quad (5)$$

通过黑体标定时,

$$M_{\text{up}} = M_B \tau, \quad (6)$$

M_B 为黑体在温度 T_B 时的红外辐射出射度。

根据(3)~(6)式,可解得

$$L_{\text{sea}} = \frac{M_A - (1 - \epsilon) M_B}{\epsilon}. \quad (7)$$

中波红外发射率 ϵ 和长波略有不同。 ϵ_{λ} 可根据以往的研究结果直接给出也可根据现场测量获得,测量方法为设备首次使用时,用水温计直接测量海水表面温度,根据红外辐射计测得的场景综合红外辐射黑体等效温度,天空红外辐射黑体等效温度以及水温计的温度值,根据(2)~(6)式分别计算 L_{sea} 、 M_A 和 M_B ,然后将 L_{sea} 、 M_A 和 M_B 代入(7)式,计算海水红外发射率 ϵ_{λ} 。红外发射率 ϵ_{λ} 经测定或给定后,可根据(7)式解算出海水表面的红外辐射,再由(2)式求解海水表面温度。

3.1.2 实时校正

红外辐射系统在外场工作时,容易受到如下因素影响测量精度。

1) 受环境温度的改变,或探测器芯片、处理电路老化等原因探测器响应系数发生变化;

2) 红外光学系统膜层老化导致光学系统透射率发生变化;

3) 辐射计内部壳体温度发生变化导致探测器接收的光学零件表面剩余反射的背景红外辐射通量发生变化。

以上因素综合在一起可严重影响仪器的精度。

采用双黑体标准辐射源实时校正的方法可消除以上因素的影响,具体原理可用如下数学过程予以说明。在探测器选用上,选取辐射响应线性度较好的区域,探测器的红外辐射和电压或电流响应可由下式表示:

$$D = AL + B, \quad (8)$$

式中 D 为电压或电流响应数值, A 为响应系数, L 为探测器表面收集的红外辐射, B 为常量。

红外辐射 L 包括内部光学元件表面剩余反射的壳体红外辐射 L_s , 目标经光学系统透射的红外辐射 L_o , 在较短时间内, 壳体温度变化较小, 因此, 在每次时间间隔内, 可认为 L_s 为一常量, 则(8)式可描述为

$$D = AL_o + B. \quad (9)$$

扫描镜对准环温黑体和常温黑体时, 根据(9)式得

$$\begin{cases} D_1 = AL_{o1} + B \\ D_2 = AL_{o2} + B \end{cases} \quad (10)$$

L_{o1}, L_{o2} 可根据环温黑体和常温黑体温度结合(2)式算出。 D_1, D_2 是观察不同温度黑体时得到的电压或电流值。

根据(10)式可计算出响应系数 A 和常量 B , 而后可根据未知温度的响应值 D 通过(8)式求出红外辐射 L 的量值。

3.2 扫描组件

扫描组件为一旋转反射镜, 如图 3 所示。反射镜相对于旋转轴 45° 放置, 由步进电机带动绕旋转轴转动, 旋转轴和后方光学系统的光轴重合。反射镜 360° 旋转可分别扫描外部场景和内置的黑体源, 将外部目标的红外辐射依次导入后部的红外光学系统。

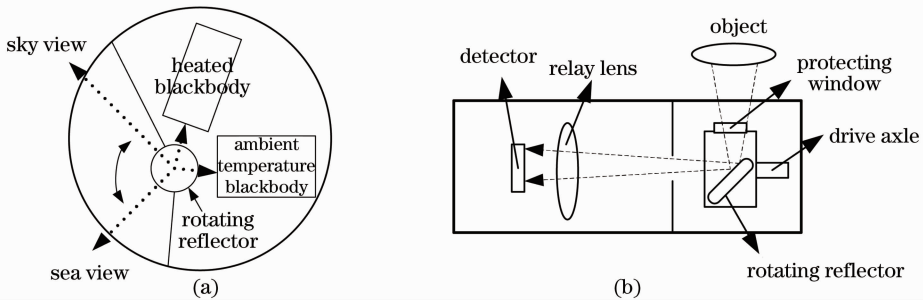


图 3 (a)校正黑体的内部位置和(b)扫描反射镜原理图

Fig. 3 (a) Schematic diagram of location of the calibration blackbody and (b) scanning reflector

3.3 红外光学系统

红外光学系统^[12]的光路如图 4 所示。外部目标的红外辐射经保护窗和扫描镜后投射在中继镜上, 中继镜改变光路, 一方面压缩光路尺寸, 另一方

面使得光线结构适合光束分光以及光束滤光。经分光镜后, 光路分成两部分, 一部分进入中波聚焦耦合透镜, 波段范围为 $3\sim 5 \mu\text{m}$, 另一部分进入长波聚焦耦合透镜。长波滤光片组件由三块带通滤光片组

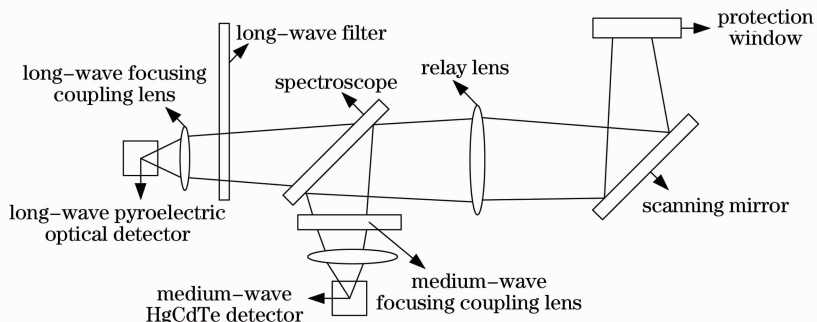


图 4 红外光学系统结构图

Fig. 4 Structure of an infrared optical system

成,波段范围根据要求分别为 $8 \sim 13 \mu\text{m}$, $10.3 \sim 11.3 \mu\text{m}$ 和 $11.5 \sim 12.3 \mu\text{m}$ 。三块滤光镜固定在滤光盘上由步进电机驱动以一定的频率要求旋转。最后,耦合透镜聚焦外部目标的红外辐射到红外探测器上。聚焦透镜设计的耦合参数与探测器应保持一致,这样可以保证最大的光能接收效率。

保护窗表面镀类金刚石高效红外增透膜,扫描镜表面镀银外反射膜并外加介质保护。中继镜后的光学结构进行整体密封,并用固体干燥剂保持内部光学系统和探测器干燥,进而保证光学系统的透射率不出现较大的变化。

3.4 红外探测器及预处理电路

系统中使用两个红外探测器,一种为热释电探测器,工作在长波波段,另一种为中波 HgCdTe 探测器。中波红外测量海水目标适用于温度较高的环境,当环境温度下降为 $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,中波红外的辐射量将下降 4 个数量级,信号过于微弱,无法实现准确测量。

红外辐射探测器信号预处理电路对整个系统起着非常关键的作用。它主要包括电压转换放大电路、滤波电路和放大电路等,电路框图如图 5 所示。红外探测器探测到红外信号经内部自带的前置放大电路,变换为电压信号经过后续的电压跟随电路、低

通滤波电路和比例放大电路将红外微小信号放大到合适电压值,以满足信号动态范围的采集要求。

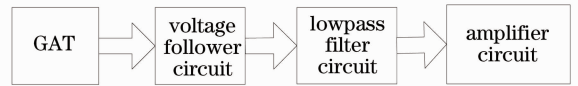


图 5 预处理电路原理框图

Fig. 5 Pretreatment circuit principle diagram

3.5 信号采集及数据处理

红外探测器探测到红外信号一般都比较弱小,经内部自带的前置放大电路,变换为电压信号,经过后续的电压跟随电路、低通滤波电路、比例放大电路将小信号放大到合适电压值,以满足信号动态范围检测要求。经 A/D 转换电路后,通过单片机内部编程进行数据的运算。采用单片机对中央控制器进行控制,主要完成对各驱动组件控制,完成数据采集,回发采集数据,串口采用标准 RS485 接口。

3.6 自动保护装置

自动保护装置通过雨量传感器传递触发信号,当外部天气状况较差时,控制镜头保护罩闭合以完成对内部器件的保护。自动保护装置通过步进电机带动小齿轮啮合弧形齿条在运动轨道上完成相应动作,同时在保护罩的起始和结束端都有光电开关和机械限位对其进行位置控制。自动保护装置如图 6 所示。

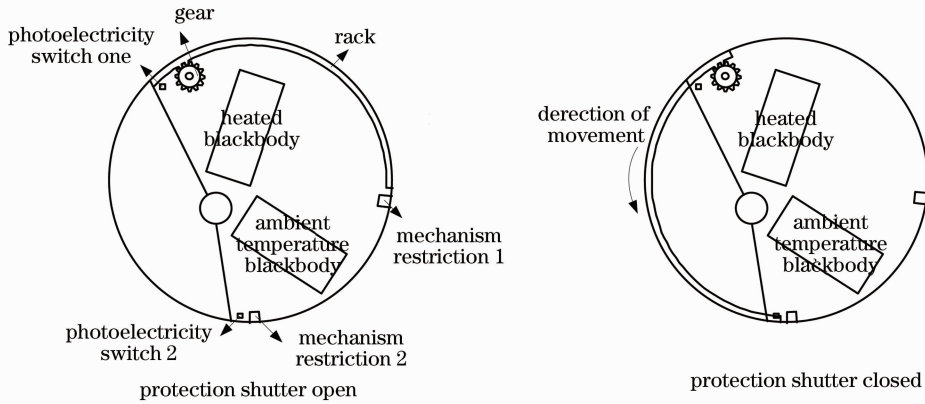


图 6 自动保护装置原理图

Fig. 6 Schematic diagram of automatic protection shutter

4 红外辐射系统实验室标定及岸边实验

4.1 室内黑体标定

为了验证红外辐射系统的测温精度,在实验室内采用标准面源黑体对设备进行精度考核及标定^[13~16]。标定设备采用 Infrared Systems Development Corporation 的面源黑体和控制系统,型号 IR-2103/301,面源尺寸 $76.2 \text{ mm} \times 76.2 \text{ mm}$,

温度范围 $-5 \text{ }^\circ\text{C} \sim +125 \text{ }^\circ\text{C}$,稳定精度 $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。将黑体放置在观测海面的窗口位置,分别设定不同的温度值来观测,系统得到的数值就是黑体所发出的标准辐射量,经过软件反演将得到的电压值最终转化为可读温度曲线。系统在实验室内在 $15 \text{ }^\circ\text{C} \sim 45 \text{ }^\circ\text{C}$ 标定的温度曲线如图 7 所示,曲线图的横坐标代表时间,纵坐标代表温度值。通过温度

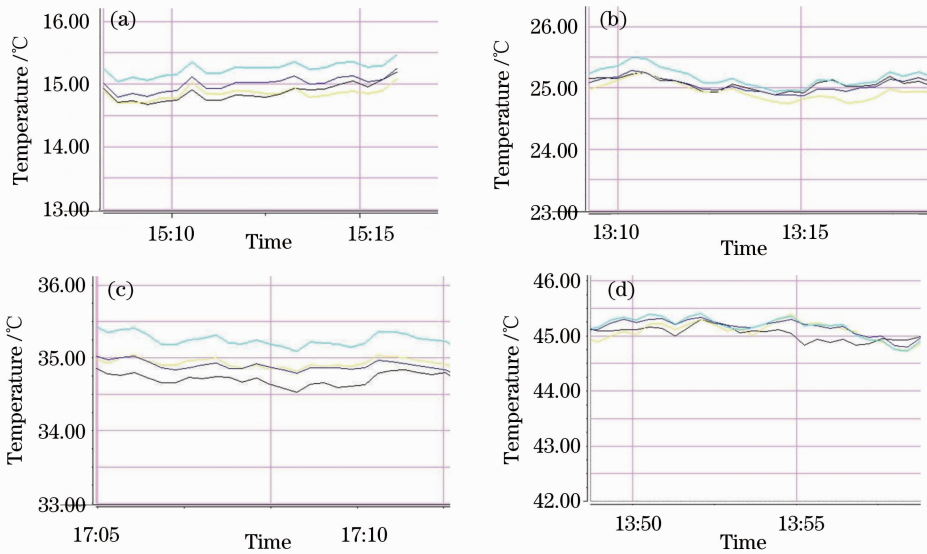


图 7 室内温度标定曲线。(a) 15 °C; (b) 25 °C; (c) 35 °C; (d) 45 °C

Fig. 7 Calibration curves of indoor temperature. (a) 15 °C; (b) 25 °C; (c) 35 °C; (d) 45 °C

曲线图可看出设备精度符合技术指标要求,即 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4.2 室外岸边实验

室内标定实验完成后,又进行了室外的岸边实验,地点:陕西西安(北纬 $34^{\circ}31'48''$, 东经 $108^{\circ}57'$) 南郊某水塘,时间:2011 年 4 月 27 日,气象条件:晴,气温 $11\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 26\text{ }^{\circ}\text{C}$,北风 2 级。上午 11:30 开始观测数据,仪器在 4 个小时实验过程中连续运行,工作正常。另外,在实验的同时用一个水温计测量水面温度并进行了实时记录与仪器的测量结果进行对比。图 8 中显示了红外辐射系统在岸边做实验的场景。

经过 4 h 的连续岸边实验,由软件反演得到的分时段池塘水面温度曲线如图 9(a) 所示。采用水温计测量池水分时段采样值(每 10 min 记录一次水温,记录时间 4 h)拟合出来的曲线与系统测量值的

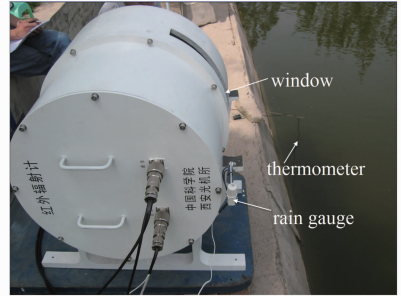


图 8 红外辐射系统岸边试验场景

Fig. 8 Shoreside test of infrared radiometer

比对结果如图 9(b) 所示,其中 IR 为系统观测池水后通过软件反演得到的温度拟合曲线,thermometer 为水温计测量池水后拟合出的曲线。曲线图的横坐标代表时间,单位小时,纵坐标代表温度,单位摄氏度。结果表明,系统测量的温度值与水温计测量的温度值基本趋势一致。

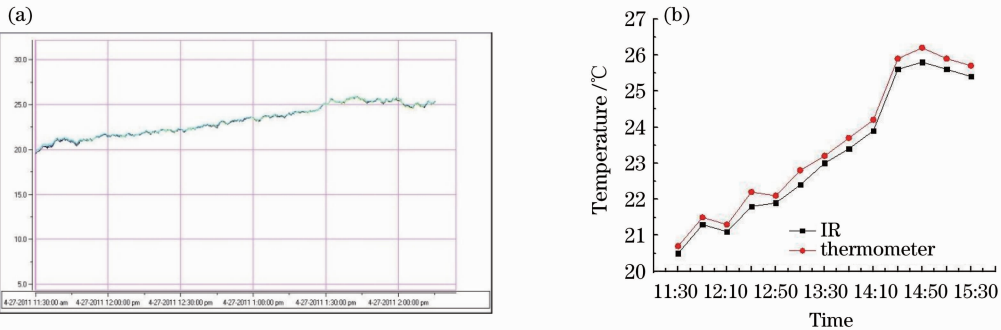


图 9 (a) 软件反演出的池水表面温度曲线和(b)水温计和反演测量的水温拟合曲线对比

Fig. 9 (a) Retrieval of water surface temperatures and (b) comparison of fitted curves of water surface temperatures measured by thermometer for measuring the water temperature and this system

5 结 论

本文对高精度多通道红外辐射测量海水表面温度的关键技术进行了研究,研制出一套多波段红外辐射系统,并对系统的工作原理,系统组成及设计方法做了详细的介绍,最后通过室内标定和室外岸边实验,取得了较为理想的实验结果。未来该系统还将与 CE312 和 ISAR 等国外类似设备进行实验对比,并通过取得的数据对系统的误差和精度进行评价计算。

多波段红外辐射系统通过扫描反射镜依次对天空、海水表面和两个黑体进行扫描,自动完成海水表面辐射定标测量并通过软件进行海水表面温度反演,其结果可验证卫星遥感设备反演海水表面温度的正确性。另外,本系统还采用光谱分光以及波段调制扫描技术,通过选用相应的中波和长波探测器,使得可测量的光学通道增加为 4 个,以便达到利用更多波段进行辐射定标测量的目的。

参 考 文 献

- I. J. Barton, P. J. Minnett, K. A. Mailliet *et al.*. The Miami 2001 infrared radiometer calibration and intercomparison. part II: shipboard results[J]. *J. Atm. & Oceanic Technol.*, 2004, **21**(2): 268~283
- R. Branch, A. T. Jessup, P. J. Minnett *et al.*. Comparisons of shipboard infrared sea surface skin temperature measurements from the CIRIMS and the M-AERI[J]. *J. Atm. & Oceanic Technol.*, 2008, **25**(4): 598~606
- P. J. Minnett, R. O. Knuteson, F. A. Best *et al.*. The marine-atmospheric emitted radiance interferometer: a high-accuracy, sea-going infrared spectroradiometer [J]. *J. Atm. & Oceanic Technol.*, 2001, **18**(6): 994~1013
- A. T. Jessup, R. A. Fogelberg, P. J. Minnett. Autonomous shipboard infrared radiometer system for in-situ validation of satellite SST [C]. *SPIE*, 2002, **4814**: 222~229
- A. Jessup, R. Branch. Integrated ocean skin and bulk temperature measurements using the calibrated infrared in situ measurement system (CIRIMS) and through-hull ports [J]. *J. Atmo. & Oceanic Technol.*, 2008, **25**(4): 579~597
- C. Donlon, I. S. Robinson, M. Reynolds *et al.*. An infrared sea surface temperature autonomous radiometer (ISAR) for deployment aboard volunteer observing ships (VOS) [J]. *J. Atm. & Oceanic Technol.*, 2008, **25**(1): 93~113
- C. J. Donlon, T. J. Nightingale. The effect of atmospheric radiance errors in radiometric sea surface temperature measurements [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(15): 2387~2392
- Zhang Chungui, Chen Jiajin, Xie Yifang *et al.*. Retrieval of sea surface temperature in coastal region by using MODIS multi-channel data [J]. *Meteor. Monthly*, 2008, **34**(11): 30~36
张春桂, 陈家金, 谢怡芳等. 利用 MODIS 多通道数据反演近海海表温度 [J]. *气象*, 2008, **34**(11): 30~36
- Wang Xiangnan. A double-channel infrared radiometer for remote sensing temperature [J]. *Ocean Technol.*, 1999, **18**(1): 28~34
王项南. 用于遥感测温的双通道红外辐射计 [J]. *海洋技术*, 1999, **18**(1): 28~34
- Ren Hongqi. Measuring the sea surface temperature with the four-band thermal infrared radiometer [J]. *Ocean Technol.*, 2003, **22**(1): 20~24
任洪启. 用 4 波段红外辐射计现场测量海表面温度 [J]. *海洋技术*, 2003, **22**(1): 20~24
- Yang Yuezhong, Cao Wenxi, Sun Zhaohua *et al.*. Development of real-time hyperspectral radiation sea-observation system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 102~107
杨跃忠, 曹文熙, 孙兆华等. 海洋高光谱辐射实时观测系统的研制 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 102~107
- Liu Lin, Shen Weimin, Zhou Jiankang. Design on athermalised middle wavelength infrared optical system with large relative aperture [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 675~679
刘 琳, 沈为民, 周建康. 中波红外大相对孔径消热差光学系统的设计 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 675~679
- Rong Zhiguo, Zhang Yuxiang, Jia Fengmin *et al.*. On-orbit radiometric calibration of fengyun geostationary meteorological satellite's infrared channels based on sea-surface measurements in the south china sea [J]. *J. Infrared & Millim. Waves*, 2007, **26**(2): 97~101
戎志国, 张玉香, 贾凤敏等. 利用南海水面开展我国静止气象卫星红外通道在轨辐射定标 [J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(2): 97~101
- Dong Renjie, Li Tongji, Chen Qinglian *et al.*. Study on the method of vicarious calibration of satellite infrared radiometer based on ocean site [J]. *Ocean Technol.*, 2006, **25**(2): 73~77
董仁杰, 李铜基, 陈清莲等. 星载红外辐射计海上辐射校正方法研究 [J]. *海洋技术*, 2006, **25**(2): 73~77
- Lu Yunjun, Li Jianjun, Zhang Wei *et al.*. Investigation of a new absolute calibration method of IR radiance calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1315~1320
卢云君, 李健军, 张 伟等. 一种新型的红外辐亮度绝对定标方法研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1315~1320
- Geng Xiang, Chen Bin, Zhu Wenjing *et al.*. Study on the relation between integration spectrum and accuracy of near infrared spectroscopic analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3551~3555
耿 响, 陈 斌, 朱文静等. 积分光谱与近红外光谱分析精度关系的研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3551~3555

栏目编辑: 谢 婧