

## 海洋四波段红外辐射计光学系统

王峰<sup>1,2</sup>, 张建<sup>1</sup>, 范哲源<sup>1,2</sup>, 闫阿奇<sup>1,2</sup>, 屈恩世<sup>1</sup>, 曹剑中<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**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四波段红外辐射系统, 给出了系统的测温原理, 并对系统的光学部分进行了设计。系统通过分光镜将入射红外光束分为长波红外光路和中波红外光路, 其中长波红外光路通过长波红外滤光片获取三个波段, 即 8~13  $\mu\text{m}$ , 10.3~11.3  $\mu\text{m}$  和 11.5~12.5  $\mu\text{m}$ , 中波红外光路通过中波红外滤光片获取一个波段, 即 3.5~4.0  $\mu\text{m}$ 。给出了各波段对应干涉滤光片的透过率曲线, 通过曲线可以看出, 长波和中波红外干涉滤光片达到了窄带滤光的预期效果, 并对两个光路中载有干涉滤光片用于调制目标红外辐射的长波和中波红外调制盘进行了设计, 系统最终的测温精确度可达 0.5 K。

**关键词:** 海洋光学; 自动多波段; 红外辐射计; 海洋表面温度; 红外滤光片; 调制盘

**中图分类号:** O484.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)S2-0368-06

## Optical system of a four spectral bands sea-infrared radiometer

Wang Feng<sup>1,2</sup>, Zhang Jian<sup>1</sup>, Fan Zheyuan<sup>1,2</sup>, Yan Aqi<sup>1,2</sup>, Qu Enshi<sup>1</sup>, Cao Jianzhong<sup>1</sup>

(1. Xi'an Institute of Optical and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** An automatic four spectral bands infrared radiometer system was designed for measuring the sea surface temperature. The principle of temperature measurement was given and the optical system was designed, which was divided into long-wave and medium-wave infrared optical system by using a spectroscop. Three long-wave infrared spectral bands were obtained through three long-wave infrared filters in the long-wave infrared optical system, respectively, which were 8–13  $\mu\text{m}$ , 10.3–11.3  $\mu\text{m}$  and 11.5–12.5  $\mu\text{m}$ . Similarly, a medium-wave infrared spectral band (3.5–4.0  $\mu\text{m}$ ) was acquired by a medium-wave infrared filter in the medium-wave infrared optical system. The film system transmittance curves of the four infrared spectral bands were given, showing that the desired effect about narrow-band light pass was achieved. Furthermore, the modulation reticles in the long-wave and medium-wave infrared optical system were designed to modulate the object infrared radiation. The accuracy of the system was

收稿日期: 2013-08-05; 修订日期: 2013-09-03

基金项目: 国家 863 计划(2008AA09A403); 国家自然科学基金(61201376); 中国科学院西部之光基金(Y129271213)

作者简介: 王峰(1989-), 男, 硕士生, 主要从事成像光学系统设计方面的研究。Email: wangfeng@opt.cn

导师简介: 曹剑中(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事航空相机成像系统方面的研究。Email: cjz@opt.ac.cn

张建(1978-), 男, 副研究员, 主要从事红外辐射与成像技术方面的研究。Email: zj@opt.ac.cn

better than 0.5 K.

**Key words:** oceanic optics; automatic multi spectral bands; infrared radiometer; sea surface temperature; infrared filter; modulation reticle

## 0 引言

海洋表面温度(Sea Surface Temperature, SST)是关于海洋—大气系统研究中的主要物理参量之一,在海洋学和气象学等研究领域具有重要意义。国内外针对利用红外辐射技术测量 SST 已有相关研究报道,已研制出的代表性仪器有:海洋大气发射辐射干涉仪(M-AERI)<sup>[1]</sup>,校准红外原位测量系统(CIRIMS)<sup>[2]</sup>,红外 SST 自主辐射计(ISAR)<sup>[3]</sup>和高分辨率成像辐射计(AVHRR)等。基于海水表面辐射特性考虑,用于 SST 测量的红外辐射仪器通常选择长波红外波段。然而,不同红外波段的发射率存在差异,对应相同温度下物体的红外辐射出射度可能不同,因此,根据探测对象的不同,光谱探测范围除了长波红外,有时还包括中波红外。利用中波红外对海水目标进行测量适用于温度较高的环境,当环境温度下降为较低时,中波红外辐射量也随之下降,将导致信号过于微弱,不能实现准确测量。而长波红外适用于从低温到高温的大范围温度内对海水目标进行测量。

目前,国外用于 SST 测量的多波段红外辐射设备较少,代表性的主要有 M-AERI(3~18  $\mu\text{m}$ )和 AVHRR(3.8  $\mu\text{m}$ , 10.6  $\mu\text{m}$ )等,而国内基于海洋平台用于测量 SST 的高精度多通道红外辐射仪器尚属空白<sup>[4-7]</sup>,故自主研发一套用于 SST 测量的多波段红外辐射系统是迫切需求的。

海洋四波段红外辐射计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。文中对该仪器红外光学系统进行了研究,其光学系统包括 4 个波段,通过分光镜将入射红外光束分为长波红外光路和中波红外光路,其中,长波红外光路通过长波红外滤光片获取 3 个波段,即 8~13  $\mu\text{m}$ , 10.3~11.3  $\mu\text{m}$  和 11.5~12.5  $\mu\text{m}$ , 中波红外光路通过

中波红外滤光片获取一个波段,即 3.5~4  $\mu\text{m}$ ,这 4 个不同波段可分别得到对应的海水辐亮度,最终获得海洋学和气象学研究中所需的温度物理量。为使光学系统在所需波段范围内的光束有较高的透过率,同时尽可能减小膜层厚度,对长波和中波红外滤光片的膜系分别进行了设计,其设计结果通过各波段的透过率曲线表明达到了预期效果。此外,对在两光路中用于调制目标红外辐射的长波和中波红外调制盘进行了设计。

## 1 系统工作原理

海洋四波段红外辐射计系统主要包括 8 个部分,分别是: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,中央控制器和定时器,上位机控制指令和数据收发组件,自动保护装置。

图 1 为海洋四波段红外辐射计的工作原理框图。外部场景和实时校正标准源通过扫描组件依次进入红外光学系统观察视场,并通过光学系统将外

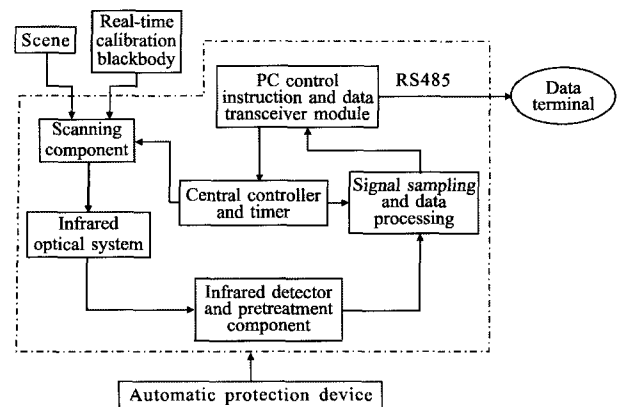


图 1 海洋四波段红外辐射计系统工作原理框图

Fig.1 Diagram of four spectral bands sea-infrared radiometer

部的红外辐射聚焦在红外探测器探测面上,红外探测器根据接收到的红外辐射通量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 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。

红外辐射计内置不同的波段滤光片，在测量时，选择需要测量的波段通道，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，测量的天顶角小于 40°，天空背景和海平面反射的天空背景像同属一个区域。

设向下测量的红外辐射为  $M_{down}$ ，则

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

式中： $\varepsilon_{\lambda}$  为海水表面在指定波长的发射率； $L_{sea}$  为海水表面的同温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； $\tau_{\lambda}$  为光学系统在特定波长的透过率。

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

当波段范围较窄时， $\tau_{\lambda}$ 、 $\varepsilon_{\lambda}$  可视为常量：

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

通过黑体标定时

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

式中： $M_A$  为黑体在温度  $T_A$  时的红外辐射出射度。

向上的红外辐射为  $M_{up}$ ，则

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

通过黑体标定时

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

式中： $M_B$  为控温黑体在温度  $T_B$  时的红外辐射出射度。

根据公式(3)~(6)，可解得：

$$L_{sea} = \frac{M_A + (1 - \varepsilon) \times M_B}{\varepsilon} \quad (7)$$

红外发射率  $\varepsilon_{\lambda}$  经测定或给定后，可根据公式(7)解算出海水表面的红外辐射，根据公式(2)求解海水表面温度<sup>[6-7]</sup>。

## 2 红外光学系统

作为海洋四波段红外辐射计系统核心关键技术红外光学系统结构<sup>[6-7]</sup>如图 2 所示。根据要求本系统包括两部分：长波红外光学系统和长波红外光学系统。

外部目标的红外辐射经保护窗和扫描镜投射在

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。光路经分光镜分成中波红外和长波红外两个波段的红外光，中波红外波段经中波红外滤光片获取波段范围为 3.5~4  $\mu\text{m}$ ，然后进入中波聚焦耦合透镜，长波红外波段进入长波聚焦耦合透镜，经长波红外滤光片组件获取要求的三个波段，其波段范围分别为 8~13  $\mu\text{m}$ ，10.3~11.3  $\mu\text{m}$  和 11.5~12.5  $\mu\text{m}$ ，其中，三块滤光镜固定在调制盘上由步进电机驱动以一定的频率要求旋转。最后，外部目标的红外辐射经中波和长波红外耦合透镜分别聚焦到对应红外探测器探测面上。中波和长波红外聚焦透镜设计的耦合参数与相应探测器应保持一致，这样可以保证最大的光能接收效率。

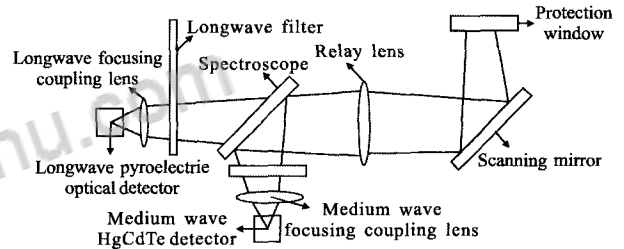


图 2 海洋四波段红外辐射计红外光学系统结构图

Fig.2 Structure of infrared optical system of four spectral bands sea-infrared radiometer

保护窗外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光学系统和探测器干燥，进而保证光学系统的透过率不出现较大的变化。

### 2.1 长波红外光学系统

长波红外光学系统如图 3 所示。由扫描转镜、准直镜、分光镜、调制盘和中继镜等元件组成，扫描镜绕

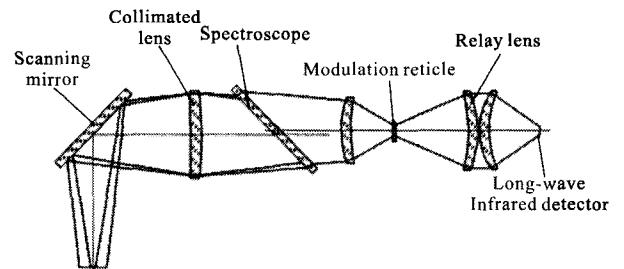


图 3 长波红外光学系统图

Fig.3 Diagram of long-wave infrared optical system

着光轴旋转,实现对两个黑体、天空、海洋目标的扫描;红外辐射经准直镜后投射至分光镜上,经分光镜分成中波红外和长波红外两个波段的红外光,其中长波红外波段投射光路经聚焦后成像在调制盘位置,长波红外的三个滤光镜分别装在调制盘上,经过调制后对光路进行斩波,获取 $8\sim 13\ \mu\text{m}$ , $10.3\sim 11.3\ \mu\text{m}$ 和 $11.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$ 三个波段,然后经中继镜后聚焦在探测面上,可产生与辐射幅值相对应的信号。

### 2.2 中波红外光学系统

中波红外系统如图 4 所示。包含扫描转镜、准直镜、分光镜、中波滤光片、聚焦镜、调制盘等部分。与长波红外系统不同之处在于,分光镜将中波红外信号通过波段反射,投射至中波红外探测器方向,经中波滤光片获取波段范围为 $3.5\sim 4\ \mu\text{m}$ ,后经聚焦镜聚焦至中波探测器,调制盘对目标光信号进行调制,使得红外探测器产生调制信号。

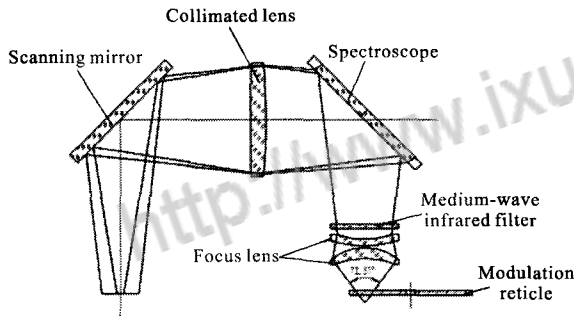


图 4 中波红外光学系统图

Fig.4 Diagram of medium-wave infrared optical system

长波和中波红外光学系统点列图分别如图 5(a)、(b)所示,长波和中波红外光学系统为了能够提

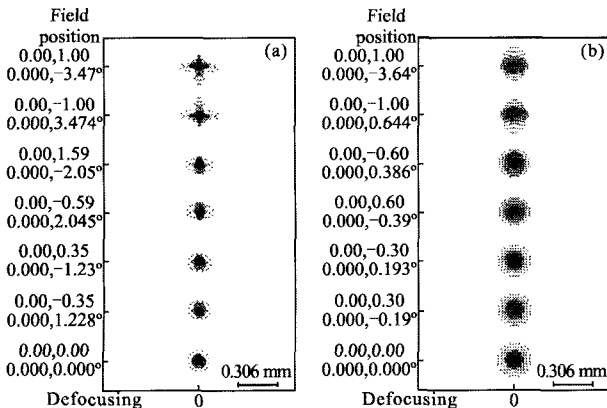


图 5 长波红外系统的点列图和中波系统的点列图

Fig.5 Spot diagram of long-wave infrared optical system and spot diagram of medium-wave infrared optical system

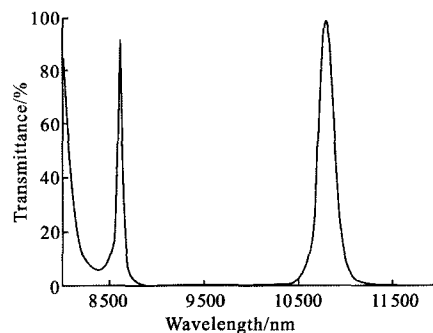
高信号幅值,采用大数值孔径的红外光学系统以便收集更多的红外信号,同时采用非球面技术,简化系统设计,减少镜片数量,以达到增加红外信号透过率的目的。光学系统为能量收集系统,感测器接收不同峰值的调制信号,系统为非成像光学系统,故采用系统点列图对系统进行评价,点列图形状接近于圆形,一致性较好。

### 3 红外滤光片设计

该海洋红外辐射计包含 4 个波段范围,分别为 $3.5\sim 4\ \mu\text{m}$ ;  $8\sim 13\ \mu\text{m}$ ;  $10.3\sim 11.3\ \mu\text{m}$ ;  $11.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$ 。在红外辐射系统中,4 个波段通道是通过干涉滤光片对波段范围进行选择的,其中包含一个中波红外滤光片,波段范围 $3.5\sim 4\ \mu\text{m}$ ,三个长波红外滤光片的波段范围分别为 $8\sim 13\ \mu\text{m}$ ;  $10.3\sim 11.3\ \mu\text{m}$ ;  $11.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$ 。

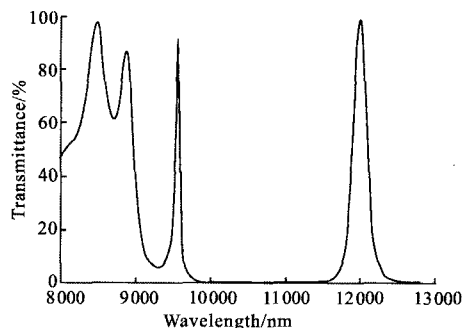
干涉滤光片是利用光学镀膜技术,在光学基片上镀制特定设计的多层膜,实现对所需波段光束的透射或反射。为了能够使得光学系统有更高的透过特性,波段范围内的光束需要具有较高的透过率,然而,透过率高,波段范围窄,所需的膜层厚度将显著增厚,使得膜层的可靠性降低,干涉滤光片容易脱膜,龟裂,因此设计时需兼顾膜层的性能和工艺。本系统的滤光片设计中,为了减小膜层厚度,采用在两个面分别镀制长波通和短波通的方式<sup>[8-10]</sup>,以达到窄带滤光的效果。

经综合考虑,最终设计的长波和中波红外滤光片膜系透过率曲线如图 6 所示,其中,图 6(a)、(b)、(c)分别对应长波波段范围为 $\lambda=10.3\sim 11.3\ \mu\text{m}$ , $\lambda=11.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$ , $\lambda=8\sim 13\ \mu\text{m}$ 的滤光片透过率曲线。



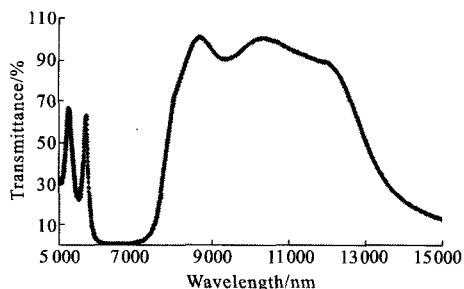
(a)  $10.3\sim 11.3\ \mu\text{m}$  膜系透过率曲线

(a) Film system transmittance curve of  $10.3\sim 11.3\ \mu\text{m}$



(b) 11.5~12.5 μm 膜系透过率曲线

(b) Film system transmittance curve of 11.5-12.5 μm



(c) 8~13 μm 膜系透过率曲线

(c) Film system transmittance curve of 8-13 μm

图 6 三个长波红外滤光片膜系透过率曲线

Fig.6 Film system transmittance curves of three long-wave infrared filters

图 7 为中波波段范围  $\lambda=3.5\sim 4\ \mu\text{m}$  的滤光片透过率曲线。从各波段红外滤光片膜系的透过率曲线可以看出设计结果达到了窄带滤光的预期效果。

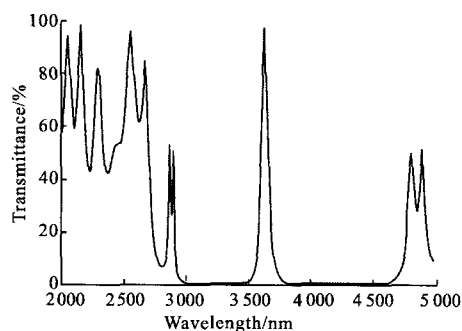


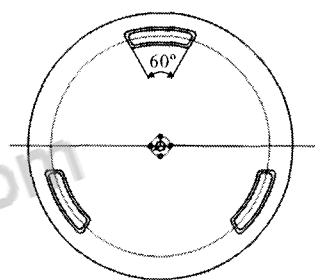
图 7 中波红外 3.5~4 μm 滤光片膜系透过率曲线

Fig.7 Film system transmittance curve of medium-wave infrared 3.5-4 μm filter

### 4 调制盘设计

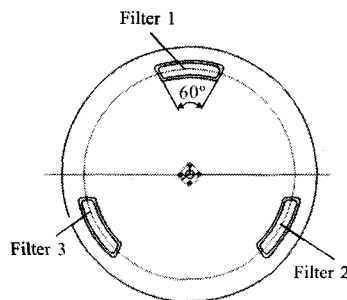
在图 2 所示的红外光学系统结构图中,调制盘分为中波红外调制盘和长波红外调制盘,分别和中波和长波红外探测器配合,通过对目标红外辐射的

调制,使得中波和长波红外探测器产生与辐射量相对应的电信号。其中,中波红外调制盘不装配滤光片,滤光片固定在光路中,产生单一中波红外辐射调制信号;长波红外调制盘上装载有长波红外的三个波段滤光片,经调制后,分别形成三个不同波段的斩波信号,长波红外调制盘设计中,充分考虑了对红外信号的调制度,增大开关信号的对比,其中滤光片 1,2,3 分别对应波长范围为 10.3~11.3 μm,11.5~12.5 μm,8~13 μm 的长波红外滤光片。调制盘的驱动由步进电机带动高速旋转,转轴连接在滑动轴承上以保证调制盘长时间转动无卡滞。中波和长波红外调制盘的设计示意图分别如图 8(a)、(b)所示。



(a) 中波红外调制盘

(a) Modulation reticle of medium-wave infrared optical system



(b) 长波红外调制盘

(b) Modulation reticle of long-wave infrared optical system

图 8 中波和长波红外调制盘示意图

Fig.8 Diagram of modulation reticle

### 5 结论

文中对海洋四波段红外辐射计的红外光学系统进行了研究,该红外光学系统通过分光镜将入射红外光束分为长波红外光路和中波红外光路,其中,长波红外光路通过长波红外滤光片获取三个波段,即 8~13 μm,10.3~11.3 μm 和 11.5~12.5 μm,中波红外光路通过中波红外滤光片获取一个波段,即 3.5~4 μm,以便达到利用多波段进行辐射定标测量的目的。通

过文中给出的各波段对应干涉滤光片的透过率曲线表明达到了所设计的红外干涉滤光片达到了窄带滤光的预期效果,系统的设计结果表明,点列图接近于圆,可良好接收红外辐射信号。此外,文中还设计了长波红外光路中装载三个长波红外滤光片的长波红外调制盘以及中波红外光路中的中波红外调制盘,由该仪器后期实际使用相关参考文献<sup>[6-7]</sup>可知,系统实际测温精度可达 0.5 K,光学系统的设计满足使用要求。

#### 参考文献:

- [1] Branch R, Jessup A T, Minnett P J, 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.
- [2] Jessup A, Branch R. Intergrated ocean skin and bulk temperature measurements using the calibrated infrared in situ measurement system (CIRIMS) and through-hull ports [J]. *J Atm & Oceanic Technol*, 2008, 25(4): 579-597.
- [3] Donlon C, Robinson I S, Reynolds M, et al. An infrared sea surface temperature autonomous radiometer (ISAR) for deployment aboard volunteer observing shipa (VOS) [J]. *J Atm & Oceanic Technol*, 2008, 25(1): 93-113
- [4] Zhang Chungui, Chen Jiabin, Xie Yifang, et al. Retrieval of sea surface temperature in coastal region by using MODIS multichannel data[J]. *Meteorological Monthly*, 2008, 34(11): 30-36. (in Chinese)  
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.
- [5] 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. (in Chinese)  
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.
- [6] Zhang Jian, Qu Enshi, Cao Jianzhong, et al. Study on a multi-spectral band infrared sea surface temperature radiometer system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32 (4): 0401003-1-0401003-7. (in Chinese)  
张建, 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): 0401003-1-0401003-7.
- [7] Zhang Jian, Qu Enshi, Cao Jianzhong, et al. An automatic multi-spectral infrared sea surface temperature radiometer [C]//IEEE, 2011: V2-339-V2-343.
- [8] Zhang Baisen, Chen Tao, Xiong Yuqing. Optimization design of an infrared broad-band long-wave pass filter [J]. *Journal of Shenyang Normal University (Natural Science)*, 2010, 28(1): 27-29. (in Chinese)  
张佰森, 陈焱, 熊玉卿. 一种长波红外宽光谱长波通滤光片的优化设计[J]. *沈阳师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 28(1): 27-29.
- [9] Zhang Baisen, Chen Tao, Xiong Yuqing, et al. Design and preparation of medium-wave infrared short-wavelength pass filter [J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2010, 16(3): 148-152. (in Chinese)  
张佰森, 陈焱, 熊玉卿, 等. 中波红外短波通滤光片的设计与镀制技术研究[J]. *真空与低温*, 2010, 16(3): 148-152.
- [10] Rong Zhiguo, Zhang Yuxiang, Liu Cheng, et al. Atomospheric radiation transmission character for fire detection in medium infrared spectrum [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 589-593. (in Chinese)  
戎志国, 张玉香, 刘诚, 等. 中波红外火情遥感的大气辐射传输特性[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(4): 589-593.

论文降重，论文修改，论文代写加微信:18086619247或QQ:516639237

论文免费查重，论文格式一键规范，参考文献规范扫二维码：



[相关推荐：](#)

[红外扫描成像系统对入射光的反射特性研究](#)

[红外和微波辐射计反演海表面温度的比较](#)

[红外和微波辐射计反演海表面温度的比较](#)

[用于遥感测温的双通道红外辐射计](#)

[海洋四波段红外辐射计光学系统](#)

[一种紧凑型大相对孔径红外光学系统的设计](#)

[红外光学系统系列化方案](#)

[圆锥扫描光学系统成像特性的三维分析](#)

[红外活体指纹采集仪](#)

[红外和微波辐射计反演海表面温度的比较\(英文\)](#)