

海面船舶探测谱段优选与效能分析

张 蕾*, 乔 凯, 黄石生
(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 船舶等海面目标的探测对于海面管理、国防安全、搜索救援等领域有着重要意义。星载红外遥感覆盖范围广, 是实现船舶目标广域探测的有效手段。受太阳天顶角昼夜循环的影响, 船舶与海面的温差周期性变化, 导致海面船舶探测场景存在一天两次的热交叉时期, 此时使用单一探测谱段难以满足船舶目标全天时探测需求。文章以中纬度夏季和冬季海面环境为例, 建立海面船舶探测场景的 24 小时红外辐射特征, 提出多谱段优选组合方案, 通过 3.50~4.10 μm 和 10.25~10.75 μm 双探测谱段探测实现信噪比优于 16.52(夏季)和 17.64(冬季)的昼夜连续观测。所提出的双谱段探测方法为实现广域全天时海面目标探测应用提供了技术支持。

关键词: 谱段优选; 全天时连续探测; 探测场景仿真; 船舶探测

中图分类号: TP702 **文献标识码:** A

Spectrum selection and performance analysis for ship detection

ZHANG Lei*, QIAO Kai, HUANG Shi-Sheng

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The detection of ships and other sea targets is of great significance to sea surface management, national defense security, search and rescue, and other fields. Space-borne infrared remote sensing has a wide coverage, which is an effective means to achieve wide-area detection of ship targets. Affected by the diurnal cycle of the solar zenith angle, the temperature difference between the ship and the sea surface changes periodically, resulting in a thermal crossover period twice a day in the ship detection scene on the sea surface. In this paper, taking the mid-latitude summer and winter sea surface environment as an example, the 24-hour infrared radiation characteristics of the sea surface ship detection scene are established, and a multi-spectrum optimal combination scheme is proposed, which is realized by the detection of dual detection spectrum bands of 3.50~4.10 μm and 10.25~10.75 μm day and night continuous observation with signal-to-noise ratio better than 15. The proposed dual-spectrum detection method provides technical support for the application of wide-area all-time sea surface target detection.

Key words: spectrum optimization, continuous detection throughout the day, detection simulation, ship detection

引言

客船、货船等海上船舶种类繁多, 活动频繁, 对船舶的监测在海上交通、海上安全、海洋污染和渔业管理等领域有着至关重要的作用并被广泛应用。船舶监测可利用光学和雷达等传感器通过岸基、船载、机载或者星载等平台实现。不同的传感器和平台具有各自的优缺点, 传感器类型和平台选择与空间分辨率、覆盖范围、时效性等紧密相关^[1]。由于基于星载传感器的探测监测具有广域覆盖的优势, 其成为国外远域探测的重要方式。星载雷达是目前

主要的海上船舶监测手段, 不受云或光照条件的影响, 但是雷达图像受固有噪声(散斑)影响, 船舶检测受到强风和海况的严重阻碍, 导致难以检测与识别^[2]。近年来, 随着光学成像卫星数量的增加, 人们开始着力于将光学遥感卫星图像应用于海上监测。光学传感器目前普遍使用可见光、近红外波段, 难以满足夜间监测的需求。热红外传感器不依赖于太阳光照, 主要与成像物体本身的辐射相关, 可作为夜间船舶监测的重要手段, 是实现昼夜连续监测的潜在探测方法。受太阳天顶角昼夜循环的影响,

收稿日期: 2023-07-04, 修回日期: 2023-12-21

Received date: 2023-07-04, Revised date: 2023-12-21

作者简介(Biography): 张蕾(1977—), 女(汉族), 山西长治人, 工程师, 博士, 主要从事光学遥感卫星总体设计. E-mail: zlsx369lwf@163.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: zlsx369lwf@163.com

船舶与海面的温差周期性变化,导致海面船舶探测场景存在一天两次的热交叉时期,此时使用单一探测谱段难以满足船舶目标全天时探测需求。

目前,已有公开文献针对星载热红外遥感船舶探测进行了研究。Abdieh 等人利用 Landsat7 ETM+ 可见光到热红外波段($0.45\sim0.52\ \mu\text{m}$ 、 $0.52\sim0.60\ \mu\text{m}$ 、 $0.63\sim0.69\ \mu\text{m}$ 、 $0.76\sim0.90\ \mu\text{m}$ 、 $1.55\sim1.75\ \mu\text{m}$ 、 $10.40\sim12.50\ \mu\text{m}$ 、 $2.08\sim2.35\ \mu\text{m}$ 、 $1.24\sim1.39\ \mu\text{m}$),基于形状、纹理和光谱特征对船舶进行搜索^[3-4]。Wu 等人利用 Landsat-5 TM 短波红外反射谱段($2.08\sim2.35\ \mu\text{m}$)对船舶进行探测^[5-6]。L. Li 等人基于 SDGSAT-1 TIS 建立了三谱段($8\sim10.5\ \mu\text{m}$ 、 $10.3\sim11.3\ \mu\text{m}$ 和 $11.5\sim12.5\ \mu\text{m}$)热红外船舶数据集,证明了多谱段对船舶探测能力的提升^[7-8]。尽管多谱段探测方法展现了良好的前景^[9],但当前研究多集中于船舶目标检测手段,并未对周期性出现的热交叉环境展开深入的研究。

文章研究了不同季节下全天 24 小时探测场景下的船舶及海面的红外辐射特性变化趋势,考虑光照、温度等因素对船舶-海面对比度的影响,提出了优选谱段组合方案: $3.50\sim4.10\ \mu\text{m}$ 和 $10.25\sim10.75\ \mu\text{m}$ 。首先分析了不同目标背景温差下两探测谱段的信噪比,验证在任意温差下组合信噪比均优于稳定探测阈值信噪比。然后以探测信噪比为评价指标分析了不同季节下一日内的稳定探测时段,仿真一天内连续时间典型场景下的信噪比变化。文章结构如下:引言部分简单介绍了文章的背景及星载船舶探测的相关研究现状,第 1 节分析了海面及船舶的辐射特性,结合实测数据建立数学物理模型,第 2 节根据评价指标,提出了谱段优选方法,并对所选取谱段探测效能进行分析,最后对文章进行总结。结果表明,所提出的 $3.50\sim4.10\ \mu\text{m}$ 和 $10.25\sim10.75\ \mu\text{m}$ 双探测优选组合方案实现了信噪比大于 15 的昼夜连续观测。

1 探测场景辐射特性分析

海面船舶探测场景如图 1 所示,海面气温与船舶温度随着太阳天顶角的改变发生昼夜循环变化^[10]。海面船舶探测场景的红外辐射模型是研究船舶星载探测效能的前提。海面可近似为镜面,仅在特殊的观测角度和太阳天顶角下才会观测到海面对太阳的反射辐射^[11],因此对于海面背景,文章仅考虑海面的热辐射。而对于船舶,其对太阳具有漫反射作用,因此需要综合考虑漫反射和热辐射两

个辐射分量^[12]。

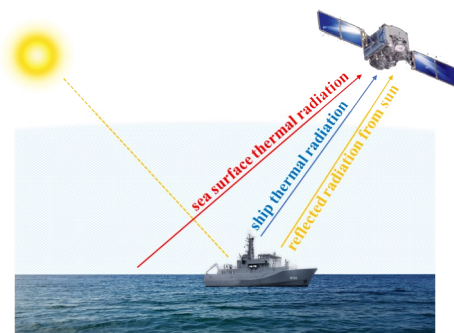


图 1 星载船舶探测数理模型

Fig. 1 Mathematical model of space-based ship detection

1.1 船舶辐射特性

1.1.1 船舶温度特性

船舶表面温度主要由海水以及周围大气共同作用,此外,由于太阳的热辐射,船舶表面会产生温度局部升高的现象。因此,考虑季节、气温及一天内的太阳天顶角,综合分析 24 小时内船舶温度的变化。Jun-Hyuk Choi 等人通过实测实验获取了 $34.52\text{ N}/128.37\text{ E}$ 位置在 1 月(冬季)和 7 月(夏季)的单日内大气温度变化^[13],如图 2(a)所示。测试时天气晴朗,日间光照充足,根据图中数据可知,单日内气温的变化范围约为 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。同样,Philip Neele 等人于 6 月份在 $52.23\text{ N}/4.42\text{ E}$ 位置对空气的温度进行了实测实验,结果显示日间气温温差在 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,与图 2(a)的测量结果较为接近^[14]。

太阳天顶角的位置与日期及地理位置有关,赤道平面与地球公转轴的夹角为 $23^{\circ}26'$ 。因此对于北纬 50 度位置的冬至/夏至时期,正午的太阳天顶角分别约为 $73^{\circ}26'$ 和 $26^{\circ}74'$,赤道位置没有季节的区分,正午时刻太阳天顶角为 $23^{\circ}26'$ 。以北纬 50 度位置为例,冬季和夏季一天内的太阳天顶角变化情况如图 2(b)所示,太阳天顶角最低时为正午时刻。

星载探测采用俯视探测,观测角度接近垂直观测。日间阳光照射会使甲板温度有所上升,且向阳面的温度明显高于背阳面。根据大气的温度变化和太阳天顶角的变化,得到南/北纬 50° 区域夏季和冬季船舶甲板平均温度,如图 3 所示。图中蓝色和绿色虚线分别代表夏季和冬季的海面平均温度。

1.1.2 船舶红外发/反射率

对于不同类型的船舶目标,其船体及其涂层所用的材料也有所区别。当前已经有很多研究人员

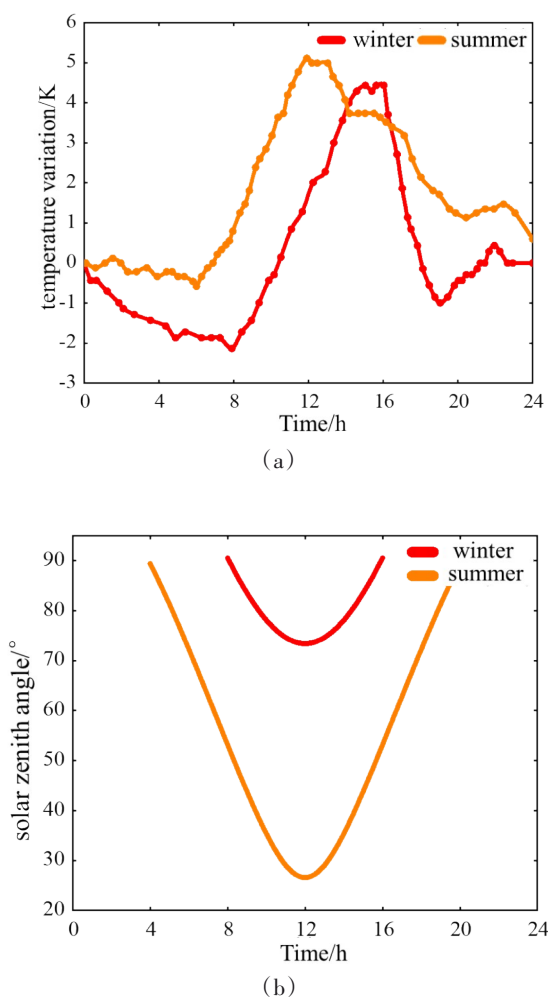


图2 一天内海面气温及太阳天顶角变化:(a)海面气温变化;(b)太阳天顶角变化

Fig. 2 Variation of sea surface temperature and solar zenith angle during one day: (a) changes in sea surface temperature; (b) solar zenith angle variation

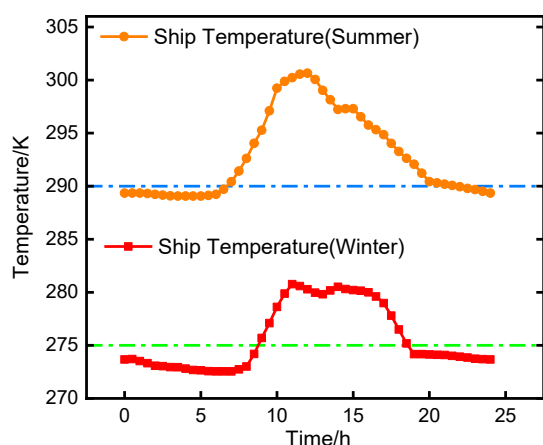


图3 船舶全天温度变化

Fig. 3 Temperature variation of the ship throughout the day

对于特定型号的船舶光谱红外发射率进行了定量化测试。MILEWSKI等人研究了船舶表面材料的红外发射率,钢板的发射率约为0.98,带涂层的绝缘板约为0.95^[15]。Yoonsik Kim等人仿真使用ShipIR软件内置的表面材料,其深灰色油漆材质发射率约为0.9,烟灰(soot,树脂)材质发射率约为0.95^[16-17]。船舶甲板表面的发射率变化不大,可近似为灰体,文章将船舶的发射率 ε_{ship} 设为0.95进行分析。

船舶甲板的漫反射率和镜面反射率系数的百分比主要与甲板的粗糙度有关,Dong-ze Qin和Wei Chen等人利用实测实验得到常规材料表面的漫反射系数约为0.2^[18]。

1.1.3 船舶红外辐亮度

船舶辐亮度主要包括自身热辐射辐亮度和反射太阳辐射的反射辐亮度。在船舶表面温度一定的情况下,其自身热辐射 L_{emit} 主要由温度决定,可表示为

$$L_{emit} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\varepsilon_{ship,\lambda} \cdot \tau_{atm,\lambda}}{\pi} \cdot \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_{ship}} - 1} d\lambda, \quad (1)$$

其中, $\varepsilon_{ship,\lambda}$ 为船舶红外发射率, T_{ship} 为船舶表面温度, $\tau_{atm,\lambda}$ 为大气透过率, λ 为波长, c_1 和 c_2 分别为普朗克第一、第二常数。反射的太阳辐射主要由太阳角度决定^[19,20],可以表示为

$$L_{ref} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{sun,\lambda} \cdot r_{diff,\lambda} \cdot \tau_{atm,\lambda}}{\pi} \left(\frac{R_{sun}}{R_{e-s}} \right)^2 \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_{sun}} - 1} d\lambda, \quad (2)$$

其中, $\tau_{sun,\lambda}$ 表示太阳辐射传输到船舶表面的大气透过率, T_{sun} 表示太阳表面温度, $r_{diff,\lambda}$ 表示船舶的漫反射率,太阳半径 $R_{sun} = 6.9627 \times 10^8$ m,平均日地距离 $R_{e-s} = 1.4960 \times 10^{11}$ m。

船舶辐射到达系统入瞳处的辐亮度可表达为

$$L_{ship} = L_{emit} + L_{ref} + L_{path}, \quad (3)$$

其中, L_{path} 为大气路径辐射。

船舶对太阳的反射辐射与太阳天顶角大小有关,太阳天顶角越大,太阳辐射到达船舶表面的大气路径越长,太阳-船舶的大气透过率越低,如图4所示。在对船舶反射辐射进行仿真时,取图2(b)中太阳天顶角的半高宽值,即夏季和冬季太阳天顶角分别取45°和75°。

1.2 海面辐射特性

海面热辐射符合普朗克定律,海面辐亮度 L_{sea} 表达式为

$$L_{sea} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{atm,\lambda} \left(\frac{\varepsilon_{sea,\lambda}}{\pi} \cdot \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_{sea}} - 1} + (1 - \varepsilon_{sea,\lambda}) L_{sky,\lambda} \right) d\lambda, \quad (4)$$

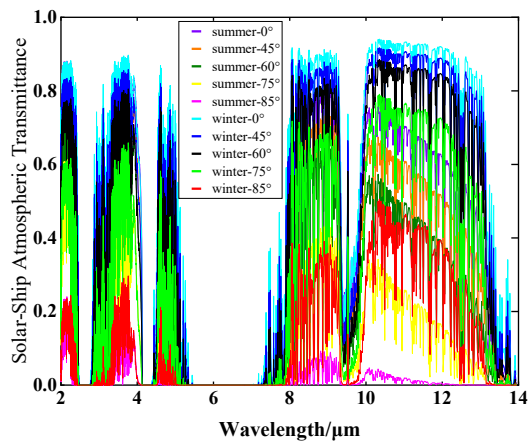


图4 太阳-船舶大气透过率与太阳天顶角的关系
Fig. 4 The relationship between sun-ship atmospheric transmittance and solar zenith angle

其中, $\varepsilon_{sea, \lambda}$ 为海面红外发射率, T_{sea} 为海面温度, λ 为波长, c_1 和 c_2 分别为普朗克第一、第二常数。海面的发射辐亮度只与海面红外发射率和海面温度有关。海面红外发射率可基于菲涅尔定律利用海面的起伏特征进行统计计算。由于海面的反射几乎为镜面反射, 只有在特定方向才会接收到太阳反射辐射, 因此海面的反射辐射不考虑太阳辐射的贡献, 只考虑海面对定向天空背景的反射辐射^[10-12]。

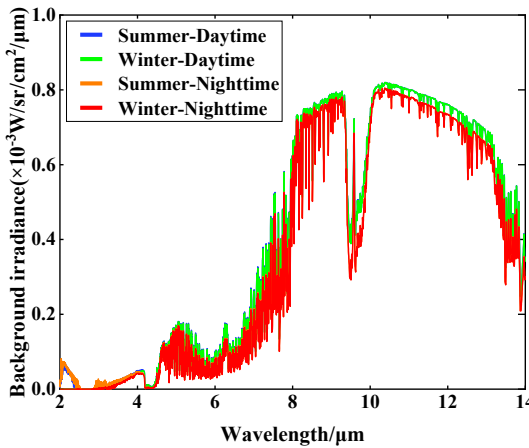


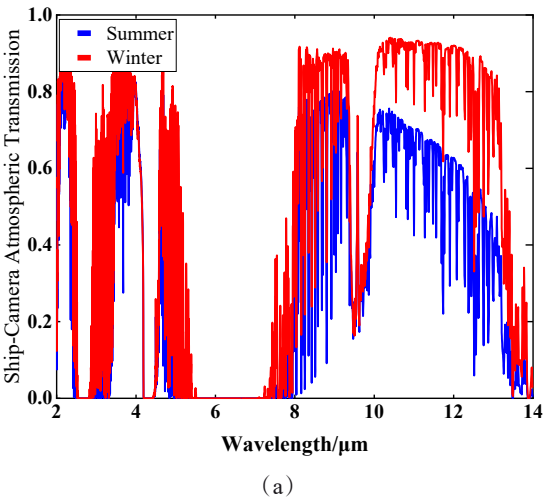
图5 海洋背景辐亮度
Fig. 5 Ocean background irradiance

由于海洋环境复杂, 全球各地的海面温度会受到洋流、季风、人类活动等多种因素影响。综合考虑下, 海面温度受到季节、纬度影响最大, 存在一定分布规律。在赤道区域, 夏季的海面温度可达 300~305 K, 冬季约为 295~300 K。而在南/北纬 50° 区域, 夏季的海面温度约为 290 K, 冬季约为 275 K。并且在单日内, 由于海水的比热容很大, 海面的温度几

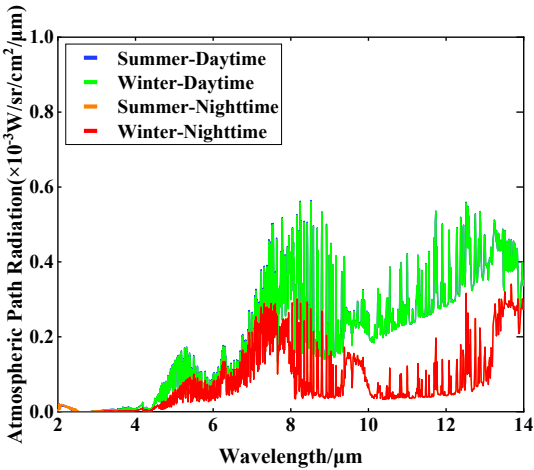
乎稳定, 可以认为是不变的。图 5 为我国渤海黄海海域附近的海洋背景辐亮度曲线, 该辐亮度是海面热辐射、大气路径辐射以及大气透过率综合作用的结果。

1.3 大气透过率模型

大气透过率是决定船舶目标能否被有效探测的主要影响因素, 不同季节下的大气透过率如图 6 (a) 所示, 冬季由于天气相对干燥, 水汽含量低, 其大气透过率高于夏季时期。同时, 由于大气透过率的存在, 大气存在一定的辐射特征, 其大气路径辐射如图 6 (b) 所示。



(a)



(b)

图6 大气透过率与大气路径辐射:(a)船舶-相机大气透过率;(b)大气路径辐射

Fig. 6 Atmospheric transmittance and atmospheric path radiation:(a) ship-camera atmospheric transmittance;(b) atmospheric path radiation

由图 6 可以看出,虽然在季节下的大气透过率不相同,但是大气透过率的窗口几乎不变,均在 2.0~2.5 μm 、3.5~4.2 μm 、4.5~5 μm 和 8~14 μm 波段范围内。

2 谱段优选与探测效能分析

2.1 探测效能数理模型

目标探测信噪比是决定船舶信号能否被探测到的主要评价指标,船舶探测信噪比 SNR_{ship} 可以表示为

$$SNR_{ship} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (L_{q,ship} - L_{q,sea}) d\lambda \cdot GR^2 \cdot A_{opt} \cdot \tau_{opt} \cdot \eta \cdot T_{int}}{R^2 \cdot noise} \quad (5)$$

其中, $L_{q,ship}$ 与 $L_{q,sea}$ 为船舶与海面的光子辐亮度, λ_1 、 λ_2 为所选谱段的起止波长, GR 为系统地面分辨率, A_{opt} 是光学入瞳孔径面积, τ_{opt} 是系统光学透过率, η 是量子效率, T_{int} 是积分时间, R 是星载探测系统与目标间的距离, $noise$ 为总噪声,包含读出噪声、光子噪声,表达为

$noise =$

$$\sqrt{\frac{\left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{q,sea} d\lambda \cdot GR^2 \cdot A_{opt} \cdot \tau_{opt} \cdot \eta + I_{dark}/q \right) \cdot T_{int}}{R^2 \cdot noise}} + n_{read}^2 \quad (6)$$

其中, n_{read} 为读出噪声电子数, I_{dark} 为相机暗电流。

对于相机探测性能的评价,一般通过噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 来表征。噪声等效温差是红外探测器能探测到的最小温差,是衡量红外探测器性能的主要指标之一。噪声等效温差可以表达为

$$NETD = \frac{noise}{\frac{1}{2} L_q \omega A_{opt} \tau_{opt} \eta T_{int} \times \frac{\partial L_q(T_b)}{\partial T} / L_q(T_b)} \quad (7)$$

其中 $noise$ 为噪声响应电子数,在实际测量噪声等效

温差时通常以室温或者 300 K 温度下的黑体为目标,并让探测系统响应灰度值处于半满状态时,所测量出来的结果为准。对于文章而言,考虑大气透过率的影响,将 NETD 推算到目标本体处来表征系统的探测能力,可近似表达为

$$NETD_{tar} = NETD / \tau_{atm} \quad (8)$$

其中, $NETD_{tar}$ 表示目标本体处的噪声等效温差, τ_{atm} 表示大气透过率。

2.2 探测谱段优选方法

探测谱段优选方法以目标本体处噪声等效温差 $NETD_{tar}$ 作为评价指标,采用遍历寻优方法对最优探测谱段进行分析,具体分析流程如图 7 所示,具体为:

(1) 建立特性数据库,包括背景数据库、太阳-船舶透过率数据库、船舶-相机透过率数据库、大气路径辐射数据库,其中背景辐射影响因素包括昼夜、季节,太阳-船舶透过率影响因素包括季节和太阳天顶角,船舶-相机透过率影响因素包括季节,大气路径辐射影响因素包括昼夜、季节和太阳天顶角;

(2) 对于特定探测谱段,根据仿真的探测场景工况在数据库选取对应数据,并根据场景辐射模型形成海面背景辐射特性和船舶辐射特性,并通过红外探测数理模型,输出该探测谱段下的探测灵敏度和探测信噪比;

(3) 遍历全部探测谱段,以本体处 $NETD$ 作为评价指标选取最优探测谱段。其中在遍历时,考虑到最优谱段均为窄谱段,将谱段的谱宽设置为 250 nm~1 μm ,并针对中波 (2.5~5 μm) 和长波 (8~14 μm) 谱段分别寻优。

2.3 谱段优选结果与效能分析

文章中探测系统仿真参数设置如表 1 所示,中波红外相机与长波红外相机采用相同的轨道高度、地面分辨率和光学口径,由于长波红外谱段的光谱

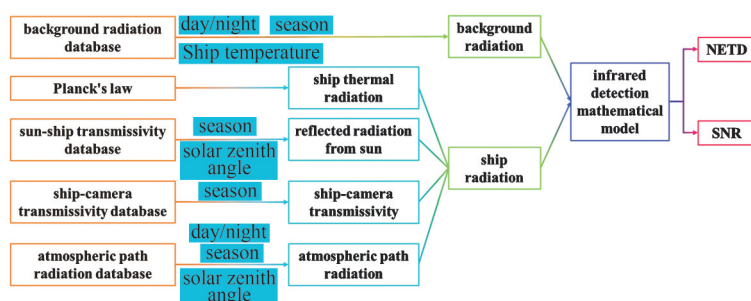


图 7 探测谱段优选方法

Fig. 7 Detection spectrum optimization method

辐亮度相对于中波红外谱段较大,因此长波红外探测器的积分电容相对更大。

表 1 探测系统参数

Table 1 The detection system parameters

| 系统参数 | 中波红外相机 | 长波红外相机 |
|-------|--------------------|---------------------|
| 地面分辨率 | | 30 m |
| 轨道高度 | | 600 Km |
| 光学口径 | | 250 mm |
| 积分电容 | 3M e ⁻ | 10M e ⁻ |
| 读出噪声 | 750 e ⁻ | 2500 e ⁻ |
| 暗电流 | — | 0.5 nA |

在进行谱段寻优时,应考虑大气扰动对探测效能的影响,因此在谱段寻优时应尽量选择大气影响较小(即大气透过率较高)的谱段,根据第 2.2 节谱段优选方法,得出最优探测谱段为 3.50~4.10 μm 和 10.25~10.75 μm。

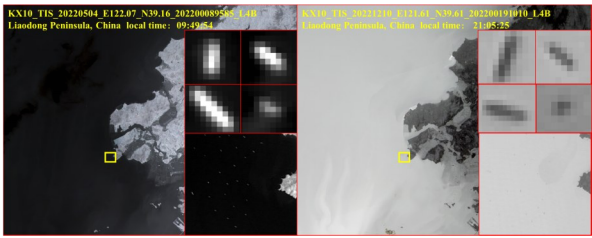


图 8 同一探测地点日间和夜间的船舶探测图像
Fig. 8 Day and night ship detection images of the same detection site

图 9 为 SDGSAT-1 热红外成像仪对日间和夜间的辽东半岛拍摄的海面船舶图像,可明显观测到在日间船舶目标灰度值高于海面背景,在夜间船舶目标灰度值低于海面背景。因此对于单谱段探测,必然存在一定时间内船舶对比度低于系统可探测阈值的情况。仿真分析在不同船舶海面温差下使用 3.50~4.10 μm 和 10.25~10.75 μm 谱段的探测信噪比关系,如图 10 所示,根据结果可知:

(1) 当使用单一谱段探测时,以信噪比为 6 作为目标可进行探测的阈值,夏季海面场景下中波谱段(3.50~4.10 μm)和长波谱段(10.25~10.75 μm)分别在船舶海面温差为 0.6~0.9 K 和 2.2~3.5 K 时目标不可被探测,而冬季海面场景下中波谱段(3.50~4.10 μm)和长波谱段(10.25~10.75 μm)分别在船舶海面温差为 0.5~0.75 K 和 1.95~2.9 K 时目标不可被探测。

(2) 当使用双谱段进行探测后,在任意温差下,

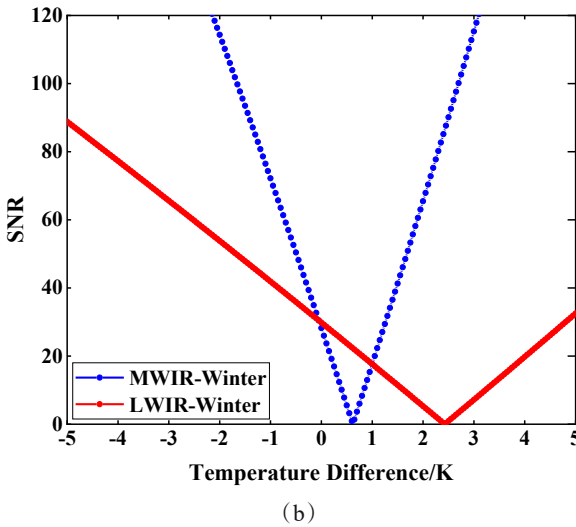
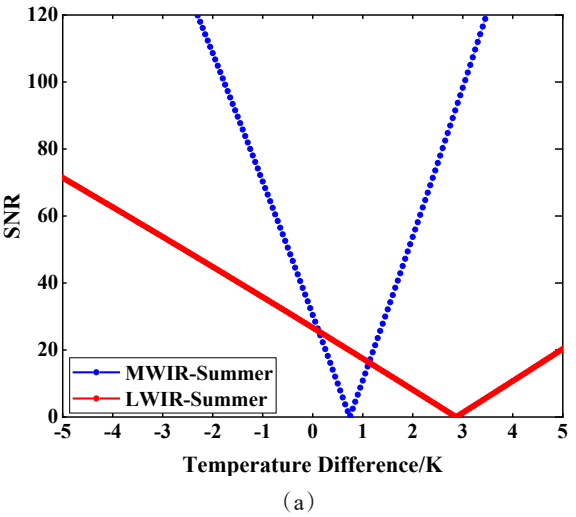


图 9 不同船舶海面温差下的探测信噪比:(a)夏季不同温差下探测信噪比;(b)冬季不同温差探测信噪比
Fig. 9 SNR under different sea-surface temperature differences:(a) detection of SNR under different temperature differences in summer;(b) SNR for detection of different temperature differences in winter

夏季和冬季条件下对海面船舶的探测最小信噪比分别为 16.52 和 17.64,优于阈值信噪比 6。因此,使用优选的中长波双谱段可实现对海面船舶的全天探测。

结合第 1 章中所述 24 小时内船舶及环境辐射特性变化,以夏季为例,计算 24 小时典型船舶目标的信噪比变化。以图 3 温度变化为例,船舶探测谱段组合后获取的最优信噪比变化如图 10 所示。根据图 10 信噪比曲线可知,在 24 小时内的任意时刻,

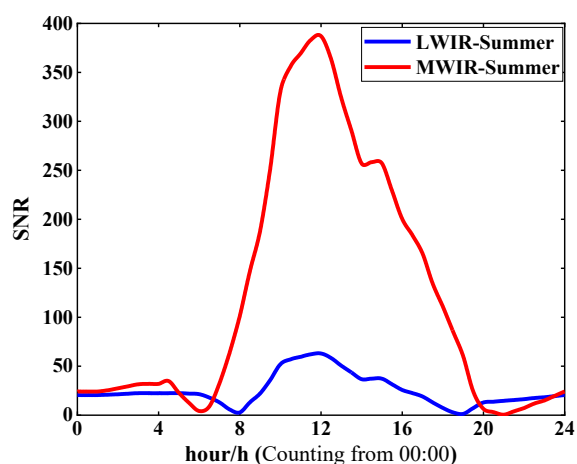


图10 一天24小时信噪比变化

Fig. 10 SNR of 24 hours in a day

双谱段联合探测信噪比均大于6。综合以上分析,所提出中波(3.50~4.10 μm)与长波(10.25~10.75 μm)双谱段组合方案实现了海面船舶的全天时探测。

3 结语

在星载红外船舶探测中,受太阳天顶角昼夜循环的影响,船舶与海面的温差周期性变化,使用单一探测谱段难以满足船舶全天时探测需求。文章提出船舶探测双谱段优选组合方案,分析温度、光照等因素对船舶及海面的红外辐射特性的影响,讨论了海面船舶在不同温差下的可探测性。结果表明,所提出的3.50~4.10 μm 和10.25~10.75 μm 谱段组合可实现海面船舶全天时高灵敏度探测,所提出的双谱段探测方法为实现广域全天时海面探测应用提供了技术支撑。

References

- [1] Kanjir U, Greidanus H, Oštir K. Vessel detection and classification from spaceborne optical images: A literature survey[J]. *Remote sensing of environment*, 2018, **207**: 1–26.
- [2] Iervolino P. Ship detection with SAR: modelling, designing and real data validation [M]. University of Surrey (United Kingdom), 2016.
- [3] Abileah R. Surveying coastal ship traffic with LANDSAT [C]// OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi-Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges. IEEE, 2009.
- [4] A Z D, C Y Y A, B B W A, et al. An approach for visual attention based on biquaternion and its application to ship detection in multispectral imagery [J]. *Neurocomputing*, 2012, **76**(1): 9–17.
- [5] G Wu, JD Leeuw, AK Skidmore, et al. Performance of Landsat TM in ship detection in turbid waters [J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2009, **11**(1): 54–61.

- [6] Xing Q, Meng R, Lou M, et al. Remote Sensing of Ships and Offshore Oil Platforms and Mapping the Marine Oil Spill Risk Source in the Bohai Sea [J]. *Aquatic Procedia*, 2015, **3**: 127–132.
- [7] Li L, Yu J, Chen F. TISD: A Three Bands Thermal Infrared Dataset for All Day Ship Detection in Spaceborne Imagery [J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(21): 5297.
- [8] Li L, Jiang L, Zhang J, et al. A Complete YOLO-Based Ship Detection Method for Thermal Infrared Remote Sensing Images under Complex Backgrounds [J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(7): 1534.
- [9] Qi L, Hu Z, Zhou X, et al. Multi-Sensor Fusion of SDG-SAT-1 Thermal Infrared and Multispectral Images [J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(23): 6159.
- [10] Masuda K. Infrared sea surface emissivity including multiple reflection effect for isotropic Gaussian slope distribution model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **103**(4): 488–496.
- [11] Li H, Pinel N, Bourlier C. Polarized infrared reflectivity of 2D sea surfaces with two surface reflections [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **147**(9): 145–155.
- [12] NI Xin-Yue, YU Shu-Tian, TANG Yu-Jun, et al. The research on polarimetric detection capability of ship targets in the sea fog [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (倪歆玥, 余书田, 唐玉俊, 等. 海雾中舰船目标的偏振探测能力研究 [J]. *红外与毫米波学报*), 2021, **40**(1): 96–101.
- [13] Choi J H, Kim J H, Jung I H, et al. Study on IR Signature Characteristics for different Transmittance over the Korean South Sea during Summer and Winter Seasons [J]. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 2010, **13**(2): 320–329.
- [14] Neele F. Infrared ship signature analysis and optimisation [J]. *Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering*, 2005, 5811: 188–198.
- [15] Milewski S, Dulski R, Kastek M, et al. Modification of infrared signature of naval vessels [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2012, **8355**(3): 83551H.
- [16] Kim Y S. A Study on the Infrared Signature of a Naval Ship under the Marine Climate [J]. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 2012, **49**(3): 264–272.
- [17] Kim Y S. A Study on Effect of the Solar Elevation on the Ship IR Signature [J]. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 2010, **24**(3): 38–45.
- [18] Qin D Z, Zhang J S, Pei S Y, et al. Prediction of Point of Impact of Anti-Ship Missile—An Approach Combining Target Geometric Features, Circular Error Probable (CEP) and Laser Fuze [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2019, **202**: 163587.
- [19] Chen Wei. Study on emissivity and reflectivity of target coating material in infrared band [C]. Other Conferences, 2021.
- [20] Zhou X, Ni X, Zhang J, et al. A novel detection performance modular evaluation metric of space-based infrared system [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, **54**(5).