

海雾中舰船目标的偏振探测能力研究

倪歆玥^{1,3}, 余书田^{1,3}, 唐玉俊^{1*}, 陈凡胜^{1,2}

(1. 中国科学院智能红外感知重点实验室 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:在对海面舰船进行红外探测时,海雾作为影响大气透过率的重要因素,会降低舰船目标与海面背景的对比度。随着海雾浓度的增大,目标对比度小于探测阈值,基于传统强度信息的红外探测方法无法探测到舰船。针对上述问题,分析了海雾场景的偏振特征,提出基于海面偏振特性的背景辐射抑制方法来增强目标对比度。首先,分析不同条件下海雾的大气透过率与红外热辐射之间的关系。然后,分析海面辐射的偏振特征,建立场景偏振对比度与强度对比度的数学模型。最后,通过仿真分析不同舰船-海面温差、不同探测角度和不同探测高度下阈值透过率(τ_{th})和偏振/强度对比度提升倍数(*INC*)的变化规律。仿真结果表明,随着舰船海面温差和探测角度的减小,*INC*逐渐增大,强度 τ_{th} 始终大于偏振 τ_{th} ,且强度 τ_{th} 与偏振 τ_{th} 的差值逐渐升高。因此,该方法对低大气透过率海雾环境中的舰船探测提供了有益的参考。

关键词: 红外偏振; 对比度提升; 阈值透过率; 场景仿真

中图分类号: TP702

文献标识码: A

The research on polarimetric detection capability of ship targets in the sea fog

NI Xin-Yue^{1,3}, YU Shu-Tian^{1,3}, TANG Yu-Jun^{1*}, CHEN Fan-Sheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China;

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

Abstract: Sea fog, as an important factor affecting the transmittance of the atmosphere, reduces the contrast between the ship targets and the sea-surface background in the infrared detection of ship targets on the sea. The traditional detection method based on infrared intensity cannot obtain ship targets as the contrast is less than the detection threshold with the increase of sea fog concentration. In view of the above situations, a background radiation suppression method based on sea surface polarimetric characteristics was developed to enhance the contrast according to the polarimetric characteristics of the sea fog scene. First, the relationship between the atmospheric transmittance of sea fog and infrared thermal radiation under different conditions is analyzed. Then, by analyzing the polarization characteristics of the sea surface radiation, a numerical model of the scene based on polarization contrast and intensity contrast was established. Finally, Analyzing the change regulation of threshold transmittance (τ_{th}) and contrast improvement (*INC*) under the circumstances of different detection angles, detection heights, and temperature differences between ship targets and sea surface. The simulation results indicate that *INC* gradually increases with the temperature difference and the detection angle decrease, along with the difference between the intensity τ_{th} and the polarization τ_{th} . but the intensity τ_{th} is always greater than the polarization τ_{th} . Therefore, the method provides a useful reference for ship detection in the sea fog environment with low atmospheric transmittance.

Key words: infrared polarization, contrast improvement, threshold transmittance, scene simulation

PACS:42. 68. Wt, 42. 68. Mj, 92. 10. Xc, 78. 20. Bh

收稿日期: 2020-04-09, 修回日期: 2020-10-25

Received date: 2020-04-09, Revised date: 2020-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(61975222)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61975222)

作者简介(Biography): 倪歆玥(1994—), 男(满族), 辽宁锦州人, 在读博士, 主要研究领域为偏振红外成像技术. E-mail: 963330909@qq.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: tangyujun879@163.com

引言

对海面上舰船的红外探测是目前的热门研究方向。在中波(3.7~4.8 μm)和长波(8~12 μm)红外波段海雾不仅具有明显的热辐射,还会降低大气透过率,进而降低舰船目标与海面背景的对比度。当对比度低于探测阈值时,基于传统强度信息的红外探测方法无法探测到舰船。如何实现在海雾下舰船探测对比度的提升,是目前舰船红外探测的主要问题。

近年来,红外偏振探测技术发展迅速。红外偏振探测可以获取场景的偏振特征,提供探测场景的多维度信息。海面具有明显的偏振特征^[1-2],而传输路径大气和舰船目标没有明显的偏振特征^[3-4],利用海面的偏振特性可以实现对海面背景的抑制。许多学者已经针对海雾中舰船探测进行了研究。Li CL等人^[5]利用线性偏振成像系统和水雾发生器(Mist generator)研究了不同浓度的海雾中目标成像清晰度,结果表明,随着雾浓度的增加,目标清晰度逐渐下降,但是没有与强度图像对比分析。张景华等人^[2]和Xue MG^[6]均通过实测实验表明,偏振成像可明显增强舰船对比度。Wang Feng等人^[7]通过在室内生成不同浓度的水雾环境来研究目标偏振成像与强度成像的对比度关系。结果表明,海雾条件下偏振图像的对比度均大于强度图像对比度,且随着雾浓度的增加,偏振成像对比度逐渐下降。

本文主要研究了在不同参数下偏振成像和强度成像的对比度变化规律。分析了海面辐射的偏振特征,建立场景偏振对比度与强度对比度的数学模型。以阈值透过率(τ_{th})和偏振/强度对比度提升倍数(INC)作为偏振成像对海雾中舰船探测对比度提升的评估标准,通过仿真数据对此进行分析。本文的结构如下:第1节简单介绍了本文的背景和相关研究现状,第2节介绍了海面红外辐射的偏振度特征,并分析了海面舰船探测的物理模型,进而建立了数学计算模型,第3节通过Modtran获取场景红外仿真数据,首先分析了海雾环境中大气透过率与大气路径热辐射的量化关系,然后对不同场景和不同探测参数下的阈值透过率和偏振/强度对比度提升倍数进行了量化分析。结果表明随着温差和探测角度的增大,INC逐渐降低,偏振成像的 τ_{th} 逐渐升高。

1 海面舰船红外探测模型

1.1 海面偏振模型

海面具有明显的偏振特性,其红外辐射偏振度的大小与海水折射率、探测角度等因素有关。Li HK提出了基于随机粗糙曲面阴影遮挡效应^[9]的二维(2D)海面红外发射率模型^[8],其平行分量和垂直分量分别为

$$\begin{cases} \varepsilon_{0,V} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon'_{0,V} g_0 \bar{S}_0 p(\gamma_{x_0}, \gamma_{y_0}) d\gamma_{x_0} d\gamma_{y_0} \\ \varepsilon_{0,H} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon'_{0,H} g_0 \bar{S}_0 p(\gamma_{x_0}, \gamma_{y_0}) d\gamma_{x_0} d\gamma_{y_0} \end{cases}, \quad (1)$$

其中, $p(\gamma_{x_0}, \gamma_{y_0})$ 、 \bar{S}_0 和 g_0 分别表示海面起伏高度的联合概率密度函数、均值高度的零阶照明函数和投影函数,其含义和具体表达式详见文献[8], $\varepsilon'_{0,V/H}$ 表示微面元平行/水平分量发射率, $\varepsilon'_{0,V/H} = 1 - r'_{V/H} \cdot r'_{V/H}$ 由菲涅耳方程描述

$$\begin{cases} r'_V = \frac{n \cos \chi - \cos \chi'}{n \cos \chi + \cos \chi'} \\ r'_H = \frac{\cos \chi - n \cos \chi'}{\cos \chi + n \cos \chi'} \end{cases}, \quad (2)$$

其中, n 表示海水折射率。分析公式(2)可知, $\varepsilon_{0,V}$ 恒大于 $\varepsilon_{0,H}$ 。根据偏振度的计算公式

$$\text{DOP} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (3)$$

可得海面发射红外辐射和反射红外辐射的偏振度

$$\begin{cases} \text{DOP}_{\text{sea_emit}} = \frac{\varepsilon_{0,V} - \varepsilon_{0,H}}{\varepsilon_{0,V} + \varepsilon_{0,H}} \\ \text{DOP}_{\text{sea_ref}} = \frac{\varepsilon_{0,H} - \varepsilon_{0,V}}{2 - (\varepsilon_{0,V} + \varepsilon_{0,H})} \end{cases}. \quad (4)$$

仿真分析波长为4 μm 、8 μm 和12 μm 时海面偏振度的变化规律,海水折射率数值^[10]。如图1所示,DOP_{sea_emit}随着探测角度的增加而减小,当探测角度接近90°时,偏振度几乎为0。

1.2 舰船红外探测模型

红外探测系统对海雾中舰船进行探测,其物理模型如图2所示, H 表示红外探测器距离海面的高度,即探测高度, θ 表示探测角度。

红外探测器接收海面的反射辐射、海面的发射辐射、舰船的发射辐射、舰船的反射辐射以及传输路径的大气热辐射。探测器接收到的舰船总红外辐射 L_{ship} 和海面总红外辐射 L_{sea} 为

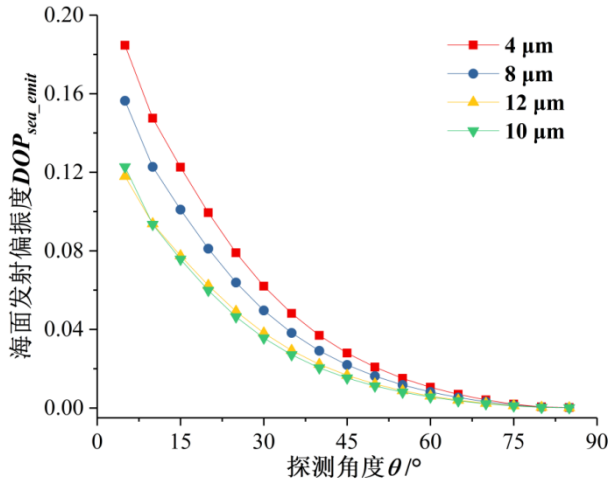


图1 海面偏振度

Fig. 1 Degree of polarization of sea surface

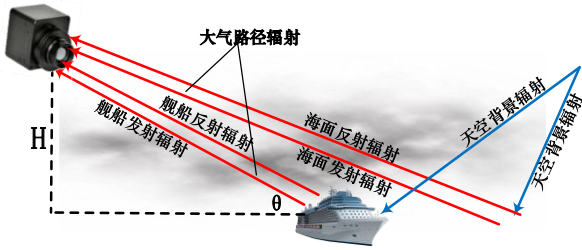


图2 红外探测物理模型

Fig. 2 Physical model of infrared detection

$$\begin{cases} L_{ship} = (1 - \varepsilon_{ship}) \tau_{atm} L_{sky} + \tau_{atm} \varepsilon_{ship} L_{ship_emit} \\ L_{sea} = (1 - \varepsilon_{sea}) \tau_{atm} L_{sky} + \tau_{atm} \varepsilon_{sea} L_{sea_emit} \end{cases}, \quad (5)$$

其中, ε_{ship} 和 ε_{sea} 分别表示舰船和海面的红外发射率, τ_{atm} 为大气透过率, L_{sky} 为天空背景辐亮度, L_{ship_emit} 和 L_{sea_emit} 表示舰船和海面发射辐亮度, 可通过普朗克定律计算得出。中波和长波红外的线偏振辐射在光学深度小于5(透过率大于0.00674)的雾中传输, 其偏振特性几乎没有改变^[11-12]。因此, 本文忽略辐射偏振度在海雾传输中的衰减, 只考虑辐射强度在大气中的衰减。海面辐射的平行分量和垂直分量分别表达为

$$\begin{cases} L_{sea_V} = (1 - \varepsilon_{sea_V}) \tau_{atm} L_{sky} + \tau_{atm} \varepsilon_{sea_V} L_{sea_emit} \\ L_{sea_H} = (1 - \varepsilon_{sea_H}) \tau_{atm} L_{sky} + \tau_{atm} \varepsilon_{sea_H} L_{sea_emit} \end{cases}, \quad (6)$$

其中, ε_{sea_V} 和 ε_{sea_H} 分别为平行分量和垂直分量红外发射率。因此, 海面辐射的偏振度为

$$DOP_{sea} = \frac{L_{sea_V} - L_{sea_H}}{L_{sea_V} + L_{sea_H}}. \quad (7)$$

由此可知, 海面的反射辐射远小于海面发射辐射, 海面辐射的平行分量大于垂直分量。将偏振片

透光方向调整到垂直于入射面的方向, 此时系统接收到的舰船、海面和大气红外辐亮度分别为

$$\begin{cases} L_{ship_pol} = \frac{L_{ship}}{2} \\ L_{sea_pol} = \frac{1 - DOP_{sea}}{2} L_{sea} \\ L_{path_pol} = \frac{L_{path}}{2} \end{cases}, \quad (8)$$

此时, 红外偏振探测的对比度 SSR_{pol} 为

$$SSR_{pol} = \frac{L_{ship} - (1 - DOP_{sea}) L_{sea}}{(1 - DOP_{sea}) L_{sea} + L_{path}}, \quad (9)$$

对于不考虑场景偏振特性的红外强度探测, 舰船与海面的强度对比度 SSR_{no_pol} 表达式为

$$SSR_{no_pol} = \frac{L_{ship} - L_{sea}}{L_{sea} + L_{path}}. \quad (10)$$

对比计算可知, $SSR_{pol} > SSR_{no_pol}$ 恒成立, 因此偏振对于对比度的提升具有增强作用。下面通过探测场景仿真量化分析海雾浓度与 SSR_{pol} 、 SSR_{no_pol} 之间的关系, 并分析偏振探测对海面舰船探测能力的提升。

2 仿真场景构建及仿真数据分析

2.1 仿真场景与参数设计

本文的探测场景仿真参考2012年 Yoon-Sik Kim 的实测环境数据^[13], 其所处位置为中纬度地区。一天内的海水温度几乎没有变化, 而舰船表面温度在一天内有较大的变化, 且各部位间的温度也存在比较明显的差异。对于陆基和机载探测而言, 探测角度较小, 主要探测舰船的两侧船身, 向阳面船身在一日内的温差变化约为 17°C ^[14], 夜间舰船的温度大约与气温相同, 因此舰船-海水的温差变化范围分别约为 $-1^{\circ}\text{C} \sim 16^{\circ}\text{C}$ 。舰船表面为灰体, 其红外发射率大约为 $0.93 \sim 0.97$ ^{[13][15][16]}, 这里舰船表面发射率统一取为 0.95 。根据上述分析, 本文的探测环境仿真参数如表1所示。

本文使用大气仿真软件 modtran 对探测场景的红外辐射进行仿真。通过 Use Army (VSA) for Aerosol Extension 功能, 在 Surface Range for Boundary Layer 中输入不同的大气能见度数值, 以获取不同大气透过率和大气路径热辐射的海雾。

2.2 海雾的表征方法

海雾主要可分为平流雾、混合雾、辐射雾和地形雾, 根据组成方式海雾气溶胶粒子可以分成三类: I类雾, 由纯水滴、纯冰晶组成; II类雾, 由以可

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

物理量	大气模型(Model Atmosphere)	气溶胶模型(Aerosol Model Used)	海水温度	舰船发射率
参数	MidLatitude Summer	Navy Maritime	290 K	0.95

溶性霾粒子为凝结核的水滴组成;Ⅲ类雾,由不溶性霾粒子或者不溶性霾粒子外包的薄水膜组成。一般来说,复杂海面背景下的海雾垂直高度约为1km,在该高度范围内,大气气溶胶近似可以认为是等温环境,即大气温度 T_{atm} 为定值。在该范围内对海面目标进行观察时,大气路径辐射与大气透过率的关系为

$$L_{path} = (1 - \tau_{atm})B(\lambda, T_{atm}) \quad (11)$$

其中, $B(\lambda, T_{atm})$ 表示大气温度为 T_{atm} 时的黑体辐射辐亮度。大气透过率 τ_{atm} 可以表达为

$$\tau_{atm} = e^{-\sigma_{\Delta\lambda}R} \quad (12)$$

其中 $\sigma_{\Delta\lambda}$ 表示特定波段内的消光系数,对于海雾环境, $\sigma_{\Delta\lambda}$ 正比于海雾浓度。

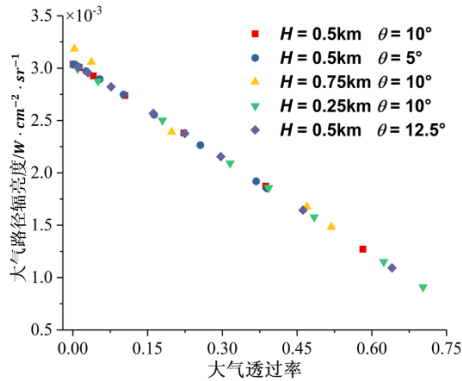


图 3 大气透过率与辐亮度

Fig. 3 Atmospheric transmittance and radiance

由式(11)可知, L_{path} 和 τ_{atm} 线性相关。分别选用不同的海拔高度 H 、探测角度 θ 和大气能见度参数值对探测场景进行仿真,获取不同的大气透过率和大气路径辐亮度数值,结果如图3所示。由图可知,海雾环境中大气透过率与大气路径辐亮度满足公式(12)的线性关系。

综上所述,本文用大气透过率来表征海雾浓度,分析大气透过率与SSR的量化关系,并讨论不同的探测参数对SSR的影响。

2.3 不同参数下SSR的变化规律分析

仿真分析大气透过率与对比度SSR的关系,图4为舰船温度为295K、探测高度为0.5km、探测角度为10°时大气透过率与SSR的关系图。由图可知,在

中波和长波波段下,随着大气透过率的增大,对比度SSR逐渐增大,且大气透过率与 SSR_{pol} 和 SSR_{no_pol} 均呈线性关系。

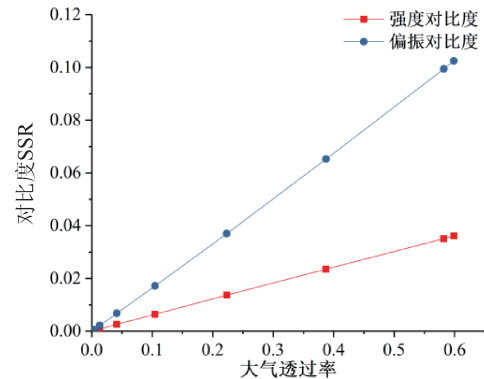
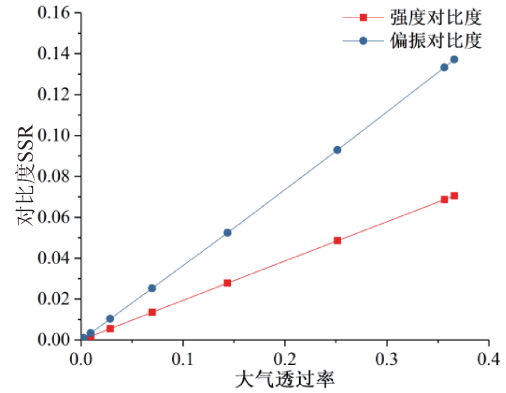


图 4 中波(左图)和长波(右图)波段舰船探测对比度(SSR)

Fig. 4 The contrast of Ship detection(SSR) in MWIR(left) and LWIR(right)

本文使用舰船探测阈值透过率 τ_{th} 和偏振/强度对比度的提升倍数INC来表征偏振对于舰船探测性能的提升。阈值透过率表示系统可以对海面舰船实现有效探测的最低大气透过率。对比度SSR和系统阈值对比度 SSR_{th} 共同决定了系统对目标的探测距离 $R^{[17]}$,中波和长波舰船探测阈值对比度分别为0.043和0.029,并由此可求得 τ_{th} 。结合公式(9)和(10),可得INC表达式为

$$INC = \frac{SSR_{pol}}{SSR_{no_pol}} \quad (13)$$

在该探测场景下,长波和中波波段下的 τ_{th} 如表2所示,长波和中波的INC分别3.4和2.1。由此可

知, 偏振探测可以降低 τ_{th} , 并提升舰船探测对比度。

表2 $T_{ship}=295\text{ K}$, $H=0.5\text{ km}$, $\theta=5^\circ$ 时阈值透过率(τ_{th})
Table 2 Threshold transmittance(τ_{th}) at $T_{ship}=295\text{ K}$, $H=0.5\text{ km}$, $\theta=5^\circ$

波段	阈值透过率 τ_{th}	
	强度	偏振
3.7~4.8 μm	0.216 6	0.103 7
8~12 μm	0.476 1	0.141 6

为证明上述结论的一般性, 通过控制变量法, 分别研究和分析舰船海面温差 ΔT 、探测高度 H 、探测角度 θ 对阈值透过率 τ_{th} 和提升倍数 INC 的影响。修改舰船温度, 研究参数 ΔT 对舰船探测的影响, 结果如图 5 所示。当温差 ΔT 为 2.5°C 时, 长波探测和中波探测的 INC 达到 10.06 和 3.74, 偏振阈值透过率仅为强度阈值透过率的 9.98% 和 27.02%。随着 ΔT 的增加, INC 逐渐降低, 强度探测和偏振探测的 τ_{th} 逐渐降低且逐渐接近。修改探测角度 θ , 研究其对舰船探测的影响, 结果如图 6 所示。随着探测角度的增加, 强度探测的 τ_{th} 几乎不变, 而偏振探测的 τ_{th} 逐渐增加, 中波探测和长波探测的 INC 逐渐降低。随着探测角度的增加, 海面辐射偏振度逐渐降低, 从而导致偏振对比度降低, 增大了阈值透过率, 减小了 INC 。修改探测高度 H , 研究其对舰船探测的影响, 结果如图 7 所示。 τ_{th} 和 INC 几乎保持恒定, 与探测高度无关。在探测角度和舰船温度不变的情况下, 探测高度对海面的偏振度没有影响, 只改变大气透过率的值, 但是不会改变阈值透过率。

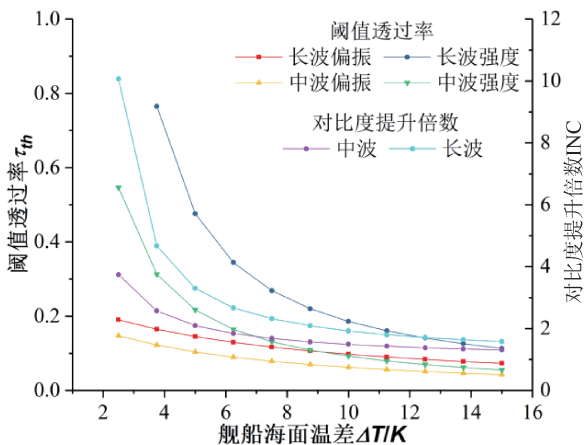


图5 舰船海面温差 ΔT 对舰船探测 τ_{th} 和 INC 的影响
Fig. 5 Impact of ΔT on τ_{th} and INC

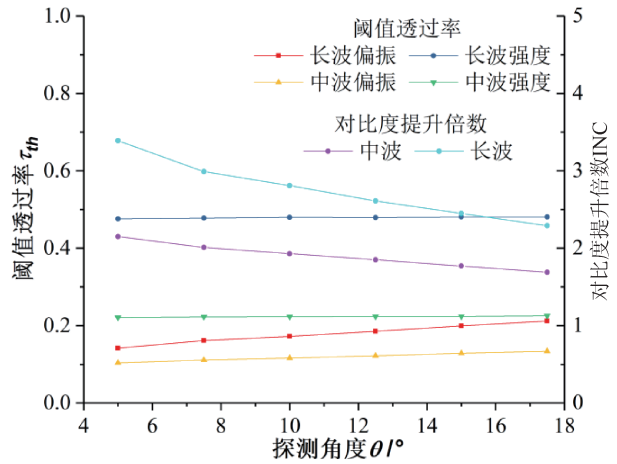


图6 探测角度 θ 对舰船探测 τ_{th} 和 INC 的影响
Fig. 6 Impact of θ on τ_{th} and INC

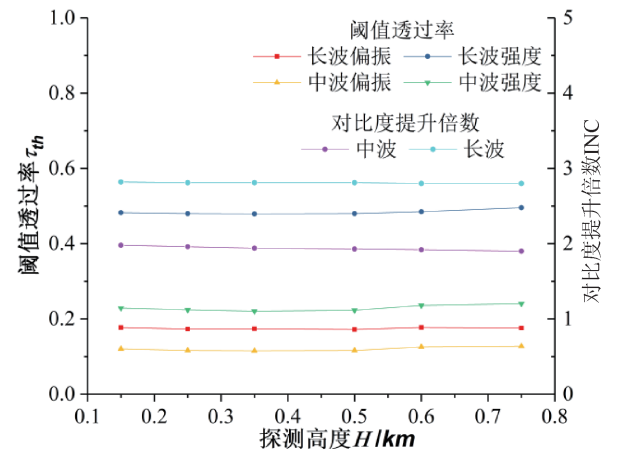


图7 探测高度 H 对舰船探测 τ_{th} 和 INC 的影响
Fig. 7 Impact of H on τ_{th} and INC

3 结论

海面辐射具有明显的偏振特征, 使用偏振探测可以有效提升海雾中海面舰船的探测能力。本文提出基于海面偏振特征的背景辐射抑制方法来增强目标对比度。以阈值透过率 τ_{th} 和偏振/强度对比度提升倍数 INC 作为评价偏振探测相对于传统强度探测的性能提升的标准, 分别分析了舰船海面的温差、探测高度和探测角度对 τ_{th} 和 INC 的影响。结果表明, 偏振成像在小探测角度和小温差场景下对海雾中舰船探测的对比度提升具有更强的作用, 此时偏振探测表现出更强的透雾性能。当舰船与海面的温差为 2.5°C 、探测角度为 5° 时, 在长波和中波波段下偏振探测相对于强度探测的对比度分别提升了 10.06 倍和 3.74 倍, 其偏振阈值透过率仅为强度阈值透过率的 9.98% 和 27.02%。本文提出的方法对低大气透过率海雾环境中的舰船探测提供了有

益的参考。

References

- [1] Zhang Jing-Hua, Zhang Yan, Shi Zhi-Guang. Study and modeling of infrared polarization characteristics based on sea scene in long wave band[J], *J. Infrared Millim. Waves* (张景华, 张焱, 石志广. 基于长波红外的海面场景偏振特性分析与建模. *红外与毫米波学报*). 2018, **37**(05): 76-84.
- [2] Zhang Jing-Hua, Zhang Yan, Shi Zhi-Guang. Enhancement of dim targets in a sea background based on long-wave infrared polarisation features[J]. *IET Image Processing*, 2018, **12**(11):2042-2050.
- [3] Walker P L, Lentz W J, Cooper A W. Atmospheric and sea state dependence of polarized infrared contrast[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1995, 2469.
- [4] Cremer F, Schwering P B W, Jong W D, et al. Infrared polarisation measurements of targets and backgrounds in a Marine Environment [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2001, 4370.
- [5] Li Cong-Li, Lu Wen-Jun, Xue Song, et al. Quality assessment of polarization analysis images in foggy conditions[J]. *2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2014, 551-555.
- [6] Xue Mo-Gen, Wang Feng, Xu Guo-Ming, et al. Polarization imaging detection technology research [C]// *ISPDI 2013-Fifth International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging*. International Society for Optics and Photonics, 2013.
- [7] Wang Feng, Yin Cheng-Liang, Wang Yong. Research of polarization imaging detection method for water surface target in foggy weather [C]// *ISPDI 2013-Fifth International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging*. 2013.
- [8] Li Hong-kun, Pinel N, Bourlier C. Polarized infrared emissivity of 2D sea surfaces with one surface reflection[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **124**(none):299-309.
- [9] Smith B. Geometrical shadowing of a random rough surface [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1967, **15**(5):668-671.
- [10] 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.
- [11] Cheung L T, Ishimaru A. Transmission, backscattering, and depolarization of waves in randomly distributed spherical particles [J]. *Applied Optics*, 1982, **21**(20):3792-3798.
- [12] Zhang Qian-Qian, Gao Jun, Xu Xiao-Hong, et al. Analysis of Multiple Scattering Polarization Transmission Properties[J]. *Chinese Journal of Lasers*(张倩倩, 高隽, 徐小红, 等. 多粒子散射的偏振传输特性分析. *中国激光*), 2012, **39**(12):1213001.
- [13] Yoon-Sik Kim. 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.
- [14] Vaitekunas D A, Fraedrich D S, Davis W R. Validation of the NATO-standard ship signature model (SHIPIR) [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1999, 3699.
- [15] Cooper A W, Walker P L, Lentz W J. Ship signature measurements for tactical decision-aid input [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1991, 1486.
- [16] Brian B, Edgar N, Roy W, et al. Infrared decoy and obscurant modelling and simulation for ship protection [J]. *Proc. SPIE 8187, Technologies for Optical Countermeasures VIII*, 81870Q (6 October 2011).
- [17] Chen Xuan, Yang Li, Sun Fengrui. Research of infrared stealth criterion of targets based on signal-to-noise ratio [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2009, **7383**:168.