

## 基于水面特征波纹的潜艇多波段光电偏振 成像探测性仿真研究

吴恒泽, 王大成, 金伟其\*, 裘 溯, 薛富铎, 杨 洁

(北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

**摘 要:** 潜艇探测技术是海疆国防急需的关键技术, 潜艇的“直接”和“间接”成像探测往往都涉及到水面波纹的检测问题。基于偏振成像的探测方法能有效地探测水面的三维波纹面形, 其中对水面偏振特性的检测与计算是面形重建的重要一环。建立了水面光电偏振模型, 对不同气象条件、水温下昼夜可见光与红外波段水面偏振特性进行了仿真分析, 结果显示水面可见光和短波红外波段偏振主要是  $s$  偏振, 中波/长波红外波段偏振是  $p$  偏振; 随着入射角的增大, 偏振度先增大后减小, 且水面红外偏振度随着温度的升高而增大。搭建了基于 Stokes 矢量的偏振成像检测系统, 对可见光波段、中波红外和长波红外波段的水面偏振度进行了实验测量, 仿真结果与测量结果基本一致, 证明了光电偏振探测模型的有效性。分析了常见波段偏振成像探测的特点, 可为水面偏振特性的分析及计算提供理论仿真和实验方法。

**关键词:** 偏振探测; 潜艇探测; 水面偏振模型; 仿真计算

中图分类号: O436.3; TP321 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20190547

## Multiband submarine photoelectric polarization imaging detection simulation study based on water surface characteristics ripple

Wu Hengze, Wang Dacheng, Jin Weiqi\*, Qiu Su, Xue Fuduo, Yang Jie

(MOE Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Submarine detection is a key technology of coastline defense, the direct and indirect imaging to detect submarines both involves solving the problem of detecting the water surface ripple. 3D surface measurement method based on polarization detection can effectively detect the water corrugated surface, in which the detection and calculation of surface polarization characteristics is an important part of surface reconstruction. The model of water surface polarization was established. Visible and infrared waveband of the water polarization characteristic under different water temperature, different meteorological conditions were simulated and analyzed. The results show that the surface polarization is  $s$  polarization in the visible waveband and  $p$  polarization in the middle and long infrared waveband, degree of polarization first increases with the increase of incident angle and then decreases, moreover the degree of water surface polarization increases with the rising of temperature. The degree of water surface polarization in visible, middle infrared and long infrared waveband was measured by polarization

收稿日期: 2020-02-08; 修订日期: 2020-03-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (61575023)

作者简介: 吴恒泽 (1994-), 男, 硕士生, 主要从事为光电偏振成像方面的研究。Email: wuhengzeas@163.com

通讯作者: 金伟其 (1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事夜视与红外技术、光电图像处理、光电检测与仪器方面的研究。Email: jinwq@bit.edu.cn

measurement system based on Stokes vector. The results of the simulation were consistent with the measured results, which proved the accuracy of the polarization model used. The characteristics of polarization imaging detection in common wavebands were analyzed, which can provide theoretical simulation and experimental methods for the analysis and calculation of polarization characteristics of water surface.

**Key words:** polarization detection; submarine detection; polarization model of surface; simulation calculation

## 0 引言

潜艇由于其高度的隐蔽性与机动性,对海洋安全造成了巨大的威胁,因此,水下潜艇的探测技术一直都是国防重点发展的关键技术。探潜技术可分为声呐探测和“非声”探测两类,声呐探测作为传统的探测方式早在第二次世界大战中就投入使用,是十分有效的潜艇探测手段,但潜艇消音技术的快速发展大大降低了其探测效率,急需发展“非声”探潜技术。光电成像探潜技术具有成像直观,便于搜索等优点,成为国内外重点发展的非声探潜技术之一,特别是机载和星载形式。间接探潜技术主要是对潜艇留下的“痕迹”进行探测,主要包括水动力尾迹、水泡和热尾流等。潜艇留下的“痕迹”具有范围广,信号微弱的点,随着传感器技术和计算能力的发展,间接探潜技术成为了当前研究的热点。潜艇在水下运动会在海面形成与潜艇的形状、速度和深度有关<sup>[1]</sup>的特定形状波纹——“伯努利水丘”和“开尔文尾迹”,据美国文献报道,即便潜艇在水下 1 000 ft(1 ft=0.305 m) 的深度航行,在海面依然可能探测到潜艇航行的水动力尾迹。不论是直接探测中为了校正由于水面波纹带来的图像扭曲,还是间接探测中为了获取潜艇在水面产生的特征波纹,都需要对水面波纹的进行探测。然而由于水面波纹密集,特征匹配角点不明显,传统的主被动“强度成像”模式难以有效地获得水面波纹形状。

近年来偏振成像技术用于透明物体三维面形测量受到人们关注,其根据无偏光入射条件下界面反射辐射以及界面自发辐射的偏振特性获取界面处的法向量,实现透明或光滑介质面形的测量。1979年日本 K. Koshi kawa 提出利用偏振探测技术测量了光滑表面形状<sup>[2]</sup>;2008年美国哥伦比亚大学 Zappa C J 等提出水面波纹二维倾角偏振成像测量方法<sup>[3-4]</sup>;2009年美国马赛诸瑟大学 Schultz Howard 和 Corrada-Emmanuel Andres 提出“透过不规则水面成像的系统

和方法”<sup>[5]</sup>的发明专利,通过偏振成像测量水面几何结构,进而去除海面起伏时引起的图像扭曲。2013年以来笔者所在团队研究了基于水面波纹的水下运动目标光电偏振成像理论,进行了水面波纹的可见光和红外偏振成像检测实验,提出了基于向量运算的水面波纹光电偏振成像检测方法<sup>[6]</sup>。

一般地,成像系统偏振像元对应的水面微元可看作是具有一定倾角的平面微元,水面波纹是诸多不同倾角的平面微元的集合。基于偏振成像的水面波纹的成像测量方法通过微面元偏振度、偏振角计算微面元法向量,由法向量积分重建曲面。因此,为研究通过光电偏振成像方法提取水下运动潜艇的水面波纹三维面型的可探测性,文中从镜面水面入手,在水面光电偏振成像探测模型的基础上,分析影响水面偏振特性的因素,计算水面在可见光 VIS(0.4~0.7  $\mu\text{m}$ )、短波红外 SWIR(0.9~1.7  $\mu\text{m}$ )、中波红外 MWIR(3~5  $\mu\text{m}$ )和长波红外 LWIR(7.5~14  $\mu\text{m}$ )波段的偏振度,分析目标的探测性,并通过设置偏振成像系统倾角的方式,对不同水面倾角的偏振度进行实验测量,验证模型的正确性。研究结果可为昼夜潜艇偏振成像探测技术的发展提供基础理论和实验支撑。

## 1 水面波纹的光电偏振成像探测模型

### 1.1 模型概述

根据电磁波理论,光波电矢量可分解为在入射面内的平行分量  $p$  和垂直于入射面的垂直分量  $s$ 。根据菲涅尔公式和基尔霍夫定律可知,水面对  $s$  和  $p$  分量的反射率和发射率不同,这是无偏光经过水面反射会变成偏振光的基本原理。

如图 1 所示为镜面水面的成像过程<sup>[7]</sup>,天空辐射  $L_{\text{atm}}$  入射水面(如无特别说明,文中的入射辐射均为无偏辐射),入射能量被分为三部分:一部分能量被水面反射到达成像设备;一部分能量被水体吸收,根据能量守恒定律这部分能量又会通过自发辐射的形式

释放出来;另一部分则穿过水面向下传播。成像设备接受到的辐射包括水面的反射辐射  $L_R$  和自发辐射  $L_{sfc}$ 。此外在水面和成像设备之间还有一段大气路径,其会产生无偏的辐射  $L_{Iatm}$ ,并对通过其中的反射辐射和自发辐射产生衰减。将光波电矢量分解为互相垂直的两个分量:  $s$  和  $p$  分量,可得到达成像设备的  $s$  和  $p$  分量辐射:

$$L^{s,p} = \tau \left( L_{sfc}^{s,p} + L_R^{s,p} + L_{Iatm} \right) = \tau \left( L_{sfc}^{s,p} + R_{sfc}^{s,p} * L_{atm} / 2 + L_{Iatm} / 2 \right) \quad (1)$$

式中:  $L$  为成像设备接收的光辐射;  $L_{sfc}$  为水面自发辐射,其能量集中在红外中长波段;  $R_{sfc}$  为水面的反射率;  $L_{atm}$  为入射的无偏振天空辐射,入射到水面的  $s$  分量和  $p$  分量强度相等 ( $= L_{atm} / 2$ );  $\tau$  为水面和成像设备之间的大气透过率。需要指出的是,文中在仿真计算的过程中认为反射辐射和自发辐射是两个独立的辐射量,对其进行分开求解,在实际情况中并无法将二者分离。

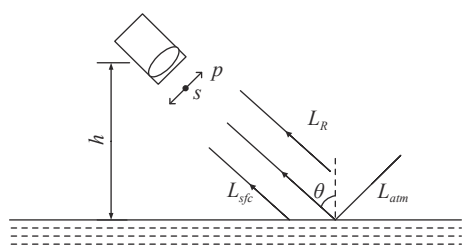


图 1 水面光电偏振探测模型

Fig. 1 Photoelectric polarization detection model for water surface

根据物理光学,偏振度为完全偏振辐射占总辐射的比例,其定义为:

$$DoLP = \frac{L^s - L^p}{L^s + L^p} \quad (2)$$

$DoLP$  的正负表示光辐射的偏振方向,偏振度大于 0 时是  $s$  偏振,当偏振度小于 0 时是  $p$  偏振。这就是水面光电偏振探测模型。

### 1.2 水面反射辐射

在可见光波段,由于自然条件下水体温度较低,自发辐射可以忽略,到达相机的辐射只需考虑反射部分  $L_R$ 。将水面当作光滑的镜面处理,反射辐射等于反射率与入射辐射的乘积,  $s$  分量和  $p$  分量的光谱反射率可以用菲涅尔公式进行计算:

$$R^s(\lambda, \theta) = \left| \frac{\cos(\theta) - \bar{n}(\lambda) \cos(\theta_r)}{\cos(\theta) + \bar{n}(\lambda) \cos(\theta_r)} \right|^2 \quad (3)$$

$$R^p(\lambda, \theta) = \left| \frac{\bar{n}(\lambda) \cos(\theta) - \cos(\theta_r)}{\bar{n}(\lambda) \cos(\theta) + \cos(\theta_r)} \right|^2 \quad (4)$$

式中:  $R^s(\lambda, \theta)$ ,  $R^p(\lambda, \theta)$  分别是水面反射辐射  $s$  光和  $p$  光的光谱反射率;  $\bar{n}(\lambda)$  是水体的复折射率(水折射率数据来自 George M. Hale 等的计算数据<sup>[8]</sup>);  $\theta$  是入射角,  $\theta_r$  是折射角, Snell 定律给出了入射角和折射角之间的关系:

$$\theta_r(\lambda, \theta) = \arcsin[\sin(\theta) / \bar{n}(\lambda)] \quad (5)$$

图 2 给出可见光波长 500 nm 单色光以不同入射角入射时水面的  $s$  光和  $p$  光反射率,  $s$  光反射率始终大于  $p$  光,水面反射辐射是  $s$  偏振的部分偏振光。天空辐射强度随天气状况而变化,天空云量、大气温度和湿度都影响天空辐射强度,进而影响水面的偏振度,根据不同的天气状况准确地计算天空辐射是计算水面偏振度的关键环节。使用通用大气仿真软件 MODTRAN 计算天空光谱辐射,获取从水面向上不同天顶角斜路经的天空光谱辐亮度  $L_{atm}$ 。图 3 给出 5  $\mu\text{m}$  波长处气溶胶模型下能见度 5 km 的中纬度冬/夏季天空光谱辐射辐亮度(下文所用气溶胶模型与此相同)。可以看出:夏季的天空辐射强度远大于冬季,这是因为夏季的大气温度较高,且大气湿度和密度更大。天空辐照度值随着天顶角的增大而增大,路径越倾斜,大气路程也越长,程辐射值越大。因此,在计算天空辐射强度时必须考虑大气状况以及大气路径的影响。

利用求得的光谱反射率和天空光谱辐射亮度,可求出  $s$  光和  $p$  光在波段  $[\lambda_1, \lambda_2]$  的反射辐射为:

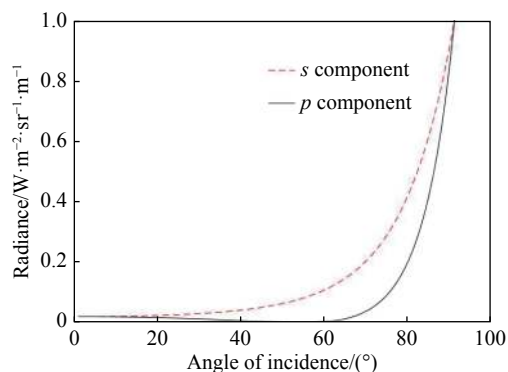


图 2  $s$  光和  $p$  光的反射率随入射角  $\theta$  变化的曲线

Fig. 2 Curves of the reflectivity of  $s$  and  $p$  light with the  $\theta$

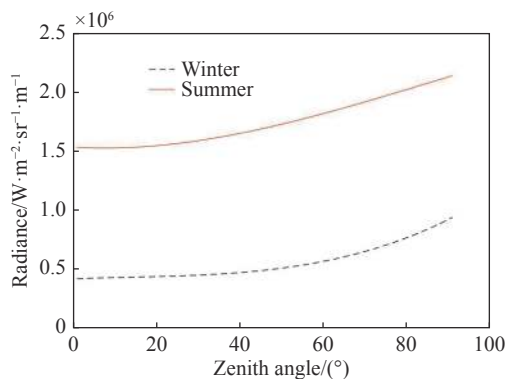


图 3 中纬度冬/夏天空辐射随天顶角的变化曲线

Fig.3 Variation curve of winter/summer atmosphere radiation with zenith angle in mid-latitude

$$L_R^{s,p} = \frac{1}{2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R^{s,p}(\lambda, \theta) L_{am}(\lambda, \theta) d\lambda \quad (6)$$

反射辐射偏振度表达式为:

$$DoLP_R = (L_R^s - L_R^p) / (L_R^s + L_R^p) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [R^s(\lambda, \theta) - R^p(\lambda, \theta)] L_{am}(\lambda, \theta) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [R^s(\lambda, \theta) + R^p(\lambda, \theta)] L_{am}(\lambda, \theta) d\lambda} \quad (7)$$

虽然反射辐射偏振度与  $R^s(\lambda, \theta)$ 、 $R^p(\lambda, \theta)$  和  $L_{am}(\lambda, \theta)$  有关, 但文献大多认为  $L_{am}(\lambda, \theta)$  或者  $R^s(\lambda, \theta)$ 、 $R^p(\lambda, \theta)$  在几个大气窗口随波长的改变不明显<sup>[9-12]</sup>。笔者的仿真也表明  $L_{am}(\lambda, \theta)$  相对于反射率随  $\lambda$  变化缓慢, 在无偏光入射水面时, 公式 (7) 的  $L_{am}(\lambda, \theta)$  可作为常数提到积分外并约去

$$DoLP_R = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [R^s(\lambda, \theta) - R^p(\lambda, \theta)] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [R^s(\lambda, \theta) + R^p(\lambda, \theta)] d\lambda} \quad (8)$$

即水面反射辐射偏振度与入射光无关, 也就是与大气状况无关, 只与折射率和入射角有关。

### 1.3 水面自发辐射

在中波/长波红外波段, 水体有较强的自发辐射, 可作为灰体处理, 温度  $T$  的水面自身辐射为水面发射率与同温度黑体的辐射的乘积:

$$L_{sfc}^{s,p}(\lambda, \theta, T) = \epsilon_{sfc}^{s,p}(\lambda, \theta) L_{BB}(\lambda, T) / 2 \quad (9)$$

式中:  $\epsilon_{sfc}^{s,p}(\lambda, \theta)$  为水面辐射发射率; 上标  $s, p$  分别表示  $s$  和  $p$  光;  $L_{BB}(\lambda, T)$  为黑体辐射亮度

$$L_{BB}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi \lambda^5} \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T) - 1} \quad (10)$$

式中:  $c_1$  和  $c_2$  分别为第一和第二辐射常数。

基尔霍夫定律表明: 在给定温度下, 任何材料的发射率等于吸收率<sup>[13]</sup>。由于水体不透红外辐射, 入射到水面的红外辐射变成反射和吸收两部分。根据能量守恒, 发射率  $\epsilon_{sfc}^{s,p}(\lambda, \theta)$ 、吸收率  $\mu_{sfc}^{s,p}(\lambda, \theta)$ 、反射率  $R_{sfc}^{s,p}(\lambda, \theta)$  三者关系可表为:

$$\epsilon_{sfc}^{s,p}(\lambda, \theta) = \mu_{sfc}^{s,p}(\lambda, \theta) = 1 - R_{sfc}^{s,p}(\lambda, \theta) \quad (11)$$

水面的发射率与反射率情况正好相反, 故水面自发辐射的  $p$  光分量多于  $s$  光分量, 是  $p$  偏振的部分偏振光。

水面自发辐射在波段  $[\lambda_1, \lambda_2]$  的辐射为:

$$L_{sfc}^{s,p}(\theta, T) = \frac{1}{2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - R^{s,p}(\lambda, \theta)) L_{BB}(\lambda, T) d\lambda \quad (12)$$

自发辐射偏振度表达式为:

$$DoLP_S = (L_{sfc}^s - L_{sfc}^p) / (L_{sfc}^s + L_{sfc}^p) \quad (13)$$

### 1.4 水面综合偏振辐射

若成像系统离水面的距离较近, 成像系统和水面之间的大气影响可忽略不计, 成像系统接受的辐射由相互独立的水面的反射辐射和自发辐射组成。为了明确反射辐射和自发辐射在对水面偏振特性的影响, 可将公式 (2) 改写为:

$$DoLP = DoLP_R P_R + DoLP_S P_S$$

$$P_R = \frac{L_R^s + L_R^p}{L^s + L^p}, \quad P_S = \frac{L_{sfc}^s + L_{sfc}^p}{L^s + L^p} \quad (14)$$

式中:  $P_R$  和  $P_S$  分别为反射辐射和自发辐射在总辐射量中的比值, 且  $P_R + P_S = 1$ 。可以看出水面辐射的偏振度决定于反射辐射和自发辐射的份额比例及其各自的偏振度。

图 4 为中波红外波段的反射辐射、自身辐射和水面总辐射偏振度随入射角变化的曲线 (波段为 3~5.2  $\mu\text{m}$ ),

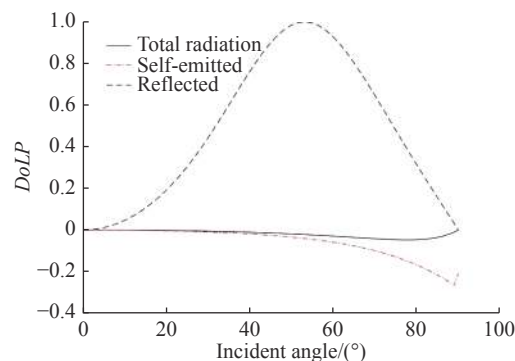


图 4 中波红外波段水面偏振度曲线

Fig.4 Polarization degree curve of water surface in MWIR

大气模型设置为中纬度冬季夜间,水面的温度为 5 ℃。可以看出,水面的反射辐射是 *s* 偏振,随着入射角增大,偏振度先增大后减小,在布儒斯特角处达到 100%;自身辐射是 *p* 偏振,偏振度绝对值随着入射角单调递增,最大偏振度是 26%;合成辐射偏振度介于两者之间,其偏振度要小于前两者的偏振度(绝对值),因为水面自发辐射和反射辐射的偏振方向相互垂直,  $DoLP_R$  和  $DoLP_S$  的符号相反。总体上反射辐射的偏振度要比自身辐射的高,但是自身辐射的强度更大,在合成辐射中占主导,因此,中波波段合成辐射是 *p* 偏振的部分偏振光。

### 1.5 水面偏振度仿真结果与分析

按照水面辐射反射和辐射模型和仿真流程,对可见光 VIS、短波 SWIR、中波 MWIR 和长波 LWIR 波段的水面偏振度进行仿真计算。

#### 1.5.1 VIS 的水面偏振度仿真

在可见光波段,来自水面的辐射只需考虑有反射辐射,即只需要对反射辐射的偏振度进行计算。为了探究大气变化对偏振特性的影响,分别计算中纬度冬季、中纬度夏季、1976 年美国标准大气三个不同的大气模式下的天空大气辐亮度,进而求得水面偏振度随入射角的变化如图 5 所示。可以看出:(1)在不同大气状况条件下,可见光波段的水面偏振度曲线几乎是完全重合的,表明水面反射辐射偏振度与入射光无关,即可见光波段的水面偏振特性与水体温度、大气状况基本不相关,由此可有效简化对水面可见光波段偏振的分析;

(2)在可见光波段,水面偏振度最大值为 1(布儒斯特角处),任何小于 1 的偏振度对应两个可能的入射角,当由偏振度来确定偏转角时存在歧义解,需要补充其它限制条件才能确定唯一解。

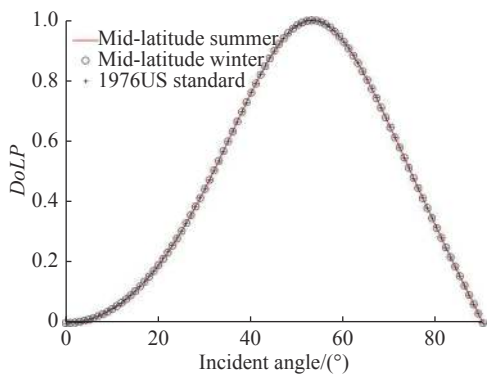


图 5 可见光波段水面仿真偏振度曲线

Fig.5 Simulation polarization degree curve of water surface in VIS

夜间 VIS 波段的水面波纹偏振成像检测可采用高性能 ICCD/ICMOS 偏振成像系统进行,特别是目前超低照度 CMOS、EMCCD 等固体成像器件不断发展,低照度分焦平面偏振成像系统可望在  $10^{-2}lx$  以上的夜天光下实现海面波纹的成像检测。

#### 1.5.2 SWIR 水面偏振度仿真

水和大气都处于常温,在昼间 SWIR 波段水面自发辐射和大气热辐射相比于太阳散射辐射可忽略,成像系统接收的主要是水面对太阳散射的反射。计算了 SWIR(0.9~1.7 μm)在中纬度夏季晴朗白天的光谱辐射。设定水温为 28 ℃,偏振度随入射角的变化曲线(如图 6(a)所示)与反射辐射的偏振曲线趋势一致,偏振度数值基本不受温度及大气状况变化的影响。

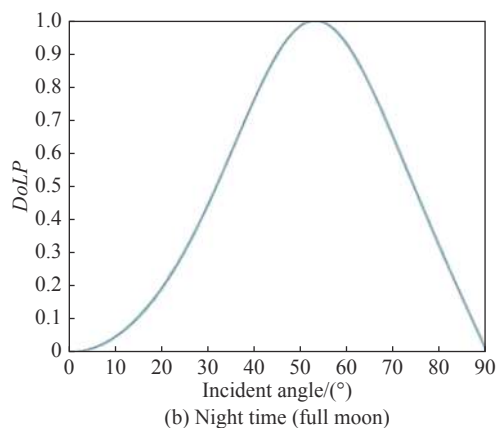
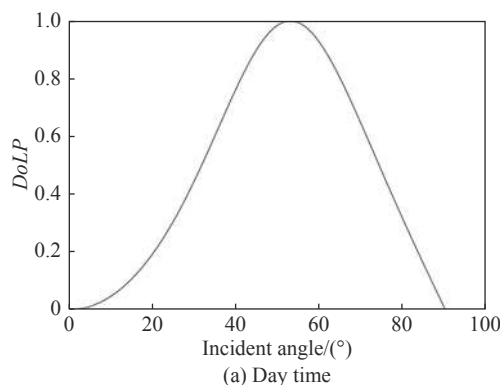


图 6 短波波段水面偏振度曲线

Fig.6 Polarization degree curve of water surface in SWIR

夜晚辐射(按强度排列)由月光、夜天光、星光、黄道光和其它热辐射组成,能量主要集中在 SWIR 波段(如图 7 所示)<sup>[4]</sup>,水面自发辐射可忽略。夜间水面 SWIR 辐射主要是反射辐射,偏振特性也比较明显,且受天气变化影响小,满月下水面的偏振特性如图 6(b)所示(水温 28 ℃)。夜间 SWIR 辐射较微弱,满月下辐

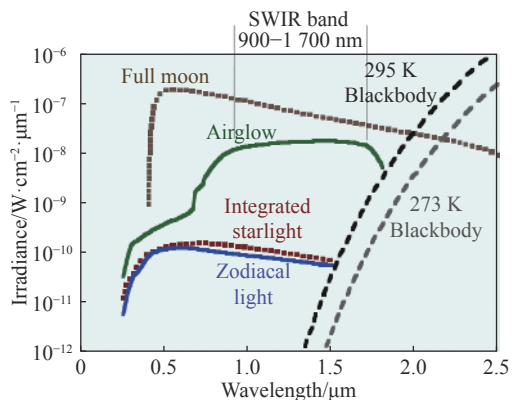


图 7 夜天空辐射光谱

Fig.7 Night sky radiation spectrum

射强度约在  $10^{-7} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})$  数量级,星光下辐射强

度更下降十倍以上,故 SWIR 水面偏振度测量对 SWIR 偏振成像系统的灵敏度要求很高。目前非制冷 InGaAs 的短波红外相机灵敏度尚不够,需要采用制冷型高灵敏度短波红外相机。

### 1.5.3 MWIR/LWIR 水面偏振度仿真

大于  $3 \mu\text{m}$  波段水面的自发辐射不可忽略,水面辐射为自发辐射和对天空辐射的反射,水面偏振等于自发辐射偏振和反射辐射偏振按比例相加。为了探究中/长波红外水面的偏振特性,对不同季节和温度下水面偏振度进行了计算。图 8 是中纬度冬季/夏季不同温度下 MWIR 和 LWIR 偏振度随入射角变化的曲线。可以看出:

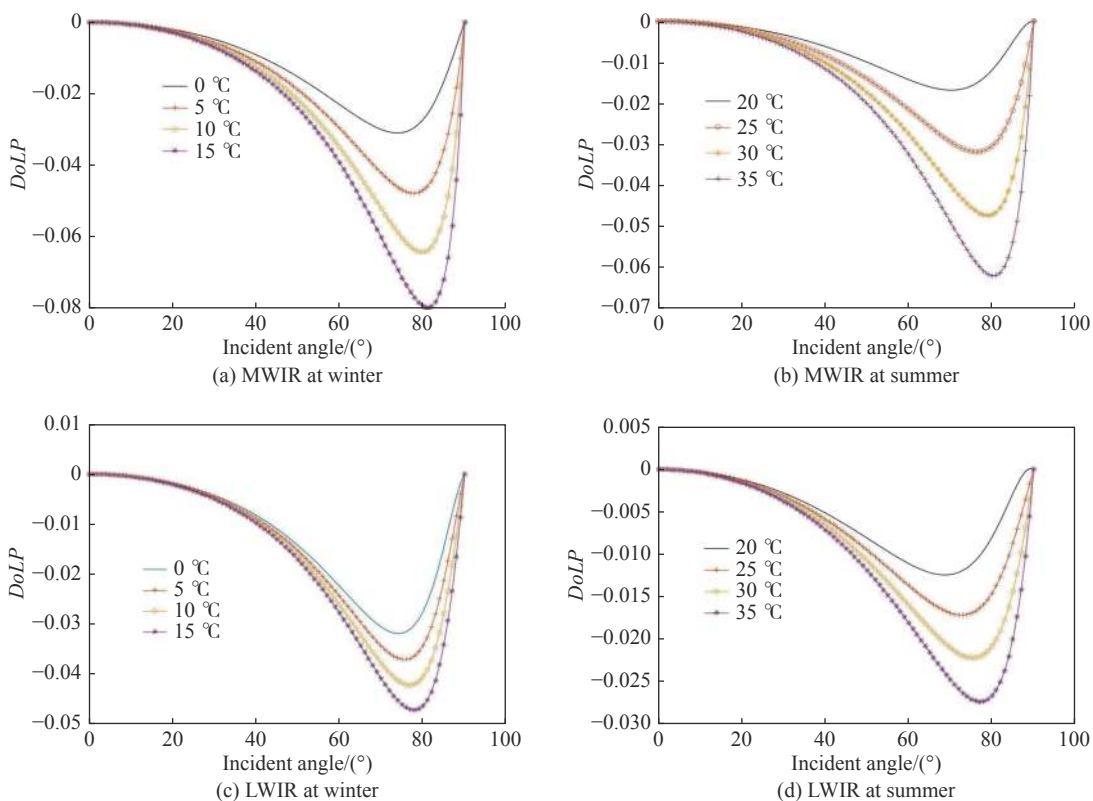


图 8 中波/长波水面偏振度仿真结果

Fig.8 Simulation results of MWIR/LWIR polarization degree of water surface

(1) 水面 MWIR 和 LWIR 辐射都是 p 偏振的部分偏振光(小于 0),随着温度的增大而增大,说明水面自发辐射处于主导地位;

(2) 同一条件下,冬季的水面偏振度大于夏季,虽然夏季水温高,但是冬季大气更干燥,更清澈,天空辐射小,夏季的天空辐射强度接近冬季的 4 倍,这将抵

消自发辐射的偏振,说明大气变化对 MW/LWIR 波段水面偏振特性的影响比水温要大;

(3) 即使在  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ (在中纬度冬季已很高)最大偏振度也不超过 10%,说明中/长波红外水面偏振程度较低;无论是冬季还是夏季,同一温度下水面 MWIR 波段的偏振度都比 LWIR 的大;

(4) 与可见光类似, 存在偏振度值与入射角的双值情况, 但其拐点处入射角较大, 在 80°附近, 即只在掠入射海面时才需要考虑入射角歧义解。

## 2 水面偏振度的测量实验与模型验证

为了验证水面偏振探测模型的有效性及其水面偏振度仿真的准确性, 采用基于 Stokes 矢量的测量方法对水面可见光波段和中波波段的偏振度进行测量。该方法需要测量多个偏振方向通道的入射偏振分量, 国内外对子通道偏振分量的选取方法进行了研究, 选择 0°、45°、90°和 135°的 4 个检偏方向以及 0°、60°和 120°的 3 个检偏方向是常见的两种方案。文中实验采用三个检偏方向的方案, 认为圆偏振分量微弱可忽略, 只对线性 Stokes 矢量进行求解。

由 Stokes 矢量计算的偏振度  $DoLP$  和偏振角  $AoP$  的公式为:

$$DoLP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, AoP = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \quad (15)$$

由计算得到的偏振度值均为正值, 无法判断水面偏振是  $s$  偏振或  $p$  偏振, 需要通过观察 Stokes 矢量的第二个分量  $Q=I_x-I_y$  来确定偏振方向, 其符号意义是与公式 (2) 的符号意义相同。

### 2.1 反射辐射的偏振度测量与模型验证

VIS 和 SWIR 水面偏振都是反射偏振, 偏振度入射角曲线只与折射率和入射角有关系。由于 VIS 水面偏振易于测量, 因此采用该波段验证反射辐射偏振曲线。

实际上, 由于可见光波段天空辐射存在一定的偏振度, 最大的偏振度可达到 15%。为了能达到无偏光入射的目的, 使用 TILO 公司 Video Checker 摄像测试用的灯箱来进行实验, 粗糙的灯箱内壁将灯光散射后可得到无偏光, 在灯箱中进行实验, 可满足无偏光入射条件, 实验场景如图 9 所示。将德国 Ueye 公司 UI-3240-CP-M-GL CMOS 相机固定在三角架上, 聚焦于放置于灯箱中黑色小盆中的平静水面, 并可在 10°~80°范围内每隔 10°调节对水面的倾角, 旋转偏振片获得水面在不同检偏角下的图像, 进而计算出水面的偏振度曲线如图 10 所示, “\*”表示实验值, 实线表示理论值。可以看出: 实验结果与理论曲线较为一致, 水面偏振探测模型对反射辐射偏振度的预测是准确的。

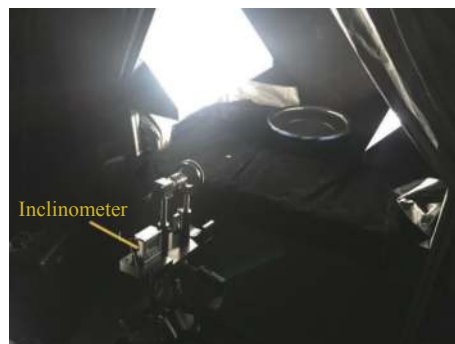


图 9 可见光波段水面偏振度测量实验场景图

Fig.9 Scene of water surface polarization degree measurement in VIS

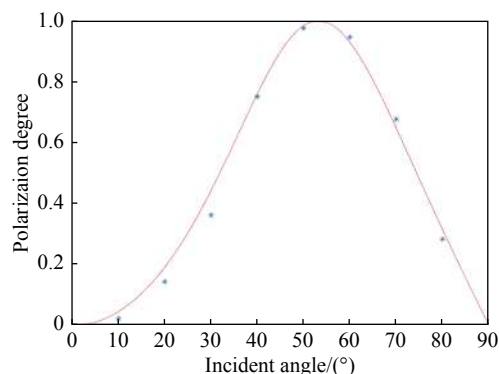


图 10 水面 VIS 偏振度测量与仿真结果

Fig.10 Experimental measurement and simulation results of VIS polarization degree of water surface

采用市售的 InGaAs 短波红外相机进行的实验表面, 虽然白天可获得比较好的偏振度测量, 但光线稍不足 (可见光相机尚可正常成像) 时, 短波红外相机已难以正常获取水面图像。

### 2.2 MWIR 水面偏振度测量及模型验证

MW/LWIR 波段水面偏振原理相同, 测量原理相近。根据仿真结果, 两者的偏振度均明显小于 VIS 波段, 为了准确获取海面偏振信息, 应采用灵敏度更高的制冷焦平面热成像系统。但相对而言, MWIR 波段较 LWIR 波段具有更大的偏振度, 对器件的灵敏度要求也相对较低, 且水面偏振度测量的干扰较小 (杂散光辐射集中在 LWIR 波段), 因此这里只对 MWIR 波段的水面偏振度进行实验测量, 以验证 MW/LWIR 波段的水面偏振探测模型。

实验选在开阔的室外进行, 使用天空辐射作为无偏的光源 (通过测量天空辐射偏振度约为 2%, 近似于

无偏)。由于在水体温度不变条件下天空辐射越低,水面偏振度越高,为了使水面的偏振特性更明显,选在晴朗干净的天气下(天空辐射小)进行实验测量。热像仪选用法国 CEDIP 公司中波红外制冷热像仪 JADE, 响应波段 3~5.2  $\mu\text{m}$ , 分辨率 320×240, NETD≤25 mK。实验前需标定热像仪输出灰度与入射辐射亮度之间的关系,将热像仪的图像灰度转化为辐射亮度。偏振片选用 GoEdmund 公司高消光比中波硅基底线栅偏振片 WP25M-IRC, 消光比> 1000:1, 平均透过率大于 85%。

采用由热像仪和旋转偏振片组成的分时偏振成像系统对平静水面的 MWIR 偏振度进行测量,将 0°、60°、120°共 3 个检偏方向的偏振片分别安装在滤波轮上。由于偏振片处于常温状态,在 MWIR 和 LWIR 波段有较强的辐射,且偏振片表面较光滑也会将热像仪自身发射的热辐射反射回到焦平面以及偏振片的非理想性等,将导致测量的入射偏振度偏低,为此,采用在参考文献 [15] 提出的前置偏振片辐射修正方法校正测得的偏振度。

实验在北京 1 月中旬晴朗干燥无风天气下的开阔楼顶进行,实验场景如图 11 所示,水面偏振度的理论计算中使用的大气模型为中纬度冬季大气模型。将热像仪架设在三角架上,对准水盆的水面,通过调节三角架的倾角来测量不同入射角的水面偏振度,并避开太阳的直接反射方向。热像仪倾角从 10°~80°,每隔 5°或者 10°转动滤波轮,拍摄在 0°、60°和 120°检偏角以及无偏振片下的水面图像。为减少噪声的影响,每次采集 100 张图像求平均得到 1 张图像,并进行中值滤波处理。由于是对平静水面成像,采用其中心视场 30×30 像素区域求平均得到该组图像的灰度值。同时,为了减小随机误差对同一倾角采集三组图像,分别计算出偏振度,剔除明显异常的偏振度值后求平均,作为最终的测量偏振度。

图 12 给出冬季水面偏振度仿真与实验测量结果,图中黑色实线表示仿真结果;‘o’表示正偏振片影响未校正的实验结果;‘\*’表示校正偏振片影响后的实验结果。白天的测量在下午进行,期间气温从 11 °C 变为 8 °C,将仿真温度设置为 10 °C,太阳散射能量也计入了天空辐射的能量;晚上的测量期间气温从 6 °C 降为 4 °C,仿真温度设置为 5 °C。从图 12 可以看出:



图 11 中波波段水面偏振度测量实验场景图

Fig.11 Scene of water surface polarization degree measurement in

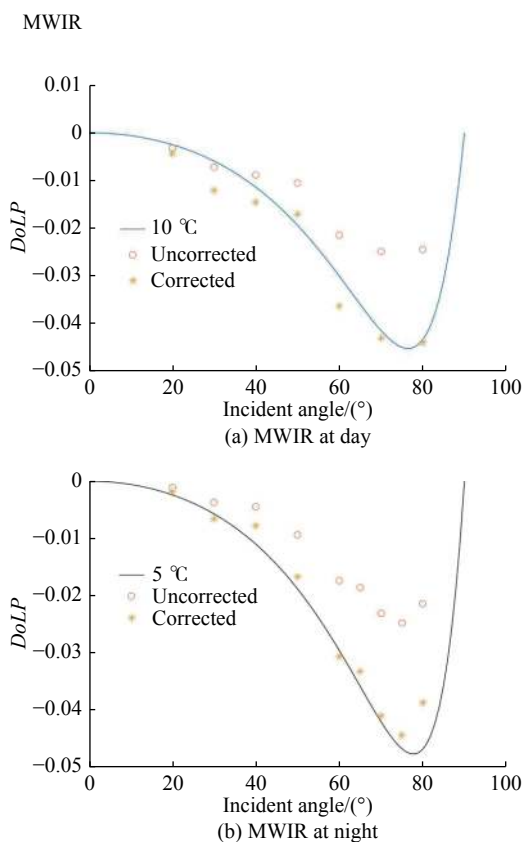


图 12 水面 MWIR 偏振度测量与仿真结果

Fig.12 Experimental measurement and simulation results of MWIR polarization degree of water surface

校正的测量结果与仿真曲线一致性较好,说明了文中水面红外偏振模型的正确性;未消除偏振片影响的测量结果偏小,偏振度越大偏差越大,说明了消除偏振



片影响对获得正确实验结果的重要性。需要指出:白天测量期间温度比夜间高约 5 ℃,但两者的偏振度却相差不大,这是因为白天的太阳散射使得天空辐射的能量高于夜间,反射的消偏作用更明显,使得水面的偏振度偏小,这进一步地说明中长波红外水面偏振易受天空辐射的影响,不同天气状况下偏振度相差较大。

从仿真结果看,LWIR 波段具有与 MWLR 波段类似的水面偏振特性,但偏振度更低。笔者采用常规的非制冷 LWIR 偏振成像系统进行过实际水面的测量,因灵敏度偏低,虽然得到的偏振度趋势一致,但稳定性较差。预期采用高性能的制冷型 LW IRFPA,特别是近年来推出的像素级数字 LW IRFPA<sup>[16]</sup>的偏振热像仪可望实现高精度的水面偏振度测量。

### 3 结 论

文中通过建立水面偏振探测模型,对 VIS, SWIR, MWIR, LWIR 的水面偏振度进行了仿真计算,研究了温度和气候变化对水面偏振特性的影响,对 VIS 波段和 MWIR 波段的水面偏振度进行了实验测量,实验结果与仿真计算结果具有很好的一致性,表明了模型的有效性。通过对模型和水面偏振度计算结果的分析,可得出以下结论:

(1) VIS, SWIR 波段水面辐射主要是反射天空辐射,只需计算反射辐射的偏振度,水面偏振度只与水的折射率和入射角有关,与温度和天空辐射的相关性较弱,具有较好的稳定性,在照明条件较好的昼间和天候下可较准确地得到水面偏振度;

(2) MWIR, LWIR 波段是合成辐射,水面偏振为自发辐射偏振和反射辐射偏振按比例相加,受天气变化和水温变化的影响较大,偏振特性不明显,MWIR 波段的偏振度大于 LWIR 波段,实现准确的水面偏振度检测不仅需要高性能偏振成像系统,而且需对天气和水温等进行一定的监测。

(3) VIS, SWIR 波段通过偏振度解出入射角时存在歧义角,MWIR 和 LWIR 波段只在大人射角时(近乎掠入射)才存在歧义解,严格来说要确定唯一的入射角需要添加额外的限制条件。由于各波段的水面偏振特性表现不同,可由此进行多波段水面偏振度探测确定唯一的入射角。

通过对可见光和红外波段水面偏振特性的计算

分析,可以掌握水面微面元的偏振情况,为在白天和夜间获取水面的三维波纹,检测水下运动潜艇的水面特征波纹,实现非声探潜的光电偏振成像技术研究奠定理论和技术基础。

### 参考文献:

- [1] Li Danmeng, Jin Weiqi, Li Li, et al. Numerical simulation and analysis of free-surface wake generated by moving submerged target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 456-463. (in Chinese)  
李丹梦,金伟其,李力,等.水下运动目标的水面波纹数值模拟及分析[J].*红外与激光工程*,2018,47(11):456-463.
- [2] Koshikawa K A. polarimetric approach to shape understanding of glossy objects [C]// Proc of the 6th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1979, 1: 493-495.
- [3] Zappa C J, Banner M L, Schultz H, et al. Retrieval of short ocean wave slope using polarimetric imaging [J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(5): 055503.
- [4] Pezzaniti J L, Chenault D, Roche M. Wave slope measurement using imaging polarimetry [C]// Proc of SPIE, 2009, 7317: 73170B.
- [5] Schultz H, Corrada-Emmanuel A. System and method for imaging through an irregular water surface: US, 7630077[P]. 2009-12-08.
- [6] Liu Jing, Lu Xiaotian, Jin Weiqi, et al. Transparent surface orientation from polarization imaging using vector operation [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(9): 2306-2313.
- [7] Shaw J A. Degree of linear polarization in spectral radiances from water-viewing infrared radiometers [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(15): 3157-3165.
- [8] Hale G M, Query M R. Optical constants of water in the 200nm to 200 $\mu$ m wavelength region [J]. *Applied Optics*, 1973, 12(3): 555-563.
- [9] Maignan F, Bréon F M, Fédèle E, et al. Polarized reflectances of natural surfaces: Spaceborne measurements and analytical modeling [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(12): 2642-2650.
- [10] Wolff L B, Boulton T E. Constraining object features using a polarization reflectance model [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1991(7): 635-657.
- [11] Vedel M, Lechocinski N, Breugnot S. 3D shape reconstruction of optical element using polarization [C]//Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing IX. International Society for Optics and Photonics, 2010, 7672: 767203.

- [12] Wolff L B. Surface orientation from polarization images[C]//Proc of SPIE, Optics, Illumination and Image Sensing for Machine Vision II, 1987, 850: 110-121.
- [13] 白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [14] Myers M M, Dayton D C, Goglewski J D, et al. SWIR air glow mapping of the night sky[C]// Advanced Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications VIII. International Society for Optics and Photonics, 2010, 7816: 78160J.
- [15] Li Shuo, Jin Weiqi, Xia Runqiu, et al. Radiation correction method for infrared polarization imaging system with front-mounted polarizer [J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26414-26430.
- [16] Bai Piji, Yao Libin, Chen Nan, et al. Progress of pixel-ADC level digital long wave cooled infrared focal plane array detector [J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(4): 301-309. (in Chinese)  
白丕绩, 姚立斌, 陈楠, 等. 像素级数字长波制冷红外焦平面探测器研究进展[J]. 红外技术, 2018, 40(4): 301-309.