

文章编号 1004-924X(2025)13-2036-20

面向海面反光抑制的最优偏振探测角度估计

刘 鹏, 倪新宇, 段 锦*, 王佳林, 董克晗
(长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:在海洋目标探测中,不同观测几何条件下接收到的偏振信号强度存在较大差异,为了提高目标的图像质量与识别能力,提出一种基于 Cox-Munk 粗糙海面模型的最优偏振探测角度估计方法,分析了不同风速、风向、太阳入射天顶角、观测天顶角和方位角对偏振反射率与偏振度的影响规律,得到了“太阳—海面—探测器”三者之间的不同观测角度组合与接收到的偏振信号强度之间的定量关系,以获取最大化偏振信号和偏振度为切入点,针对不同受限情况下的观测几何条件,得出相应的最优偏振观测角度组合方案。海面偏振反射率的有效分布主要集中在方位角 150° 至 210° 内,并且在相对方位角为 180° 时达到相对峰值。在该方位角范围内,海面偏振度的峰值出现在太阳入射天顶角与观测天顶角之和约为 $106^\circ \pm 6^\circ$ 。当太阳入射天顶角为 55° ,且相对方位角为 180° , 165° 和 150° 时,观测天顶角接近仿真预测的最优观测天顶角(分别约为 51° , 53° , 57°),通过在探测器前放置偏振方向为 90° 的偏振片可实现最佳的反光抑制效果,从而显著提升了目标的成像质量。

关键词:海面反射光;最优偏振探测角度;Cox-Munk 模型;偏振反射特性

中图分类号: O436.3 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253313.2036 **CSTR:** 32169.14.OPE.20253313.2036

Optimal polarization detection angle estimation for sea surface glint suppression

LIU Peng, NI Xinyu, DUAN Jin*, WANG Jialin, DONG Kehan

(School of Telecommunications, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: duanjin@vip.sina.com

Abstract: In marine target detection, significant variations exist in the polarization signal strength received under different observation geometries. To enhance image quality and target recognition, an optimal polarization detection angle estimation method based on the Cox-Munk rough sea surface model is proposed. First, we analyze the effects of different wind speeds, wind directions, solar incidence zenith angles, observation zenith angles, and azimuth angles on polarization reflectivity and degree of polarization. Then, we establish quantitative relationships between different combinations of observation angles and the received polarization signal strength for the three components of the sun-surface-detector system. Finally, by maximizing polarization signal and polarization degree, the paper proposes the optimal combination of

收稿日期: 2025-04-14; 修订日期: 2025-05-07.

基金项目: 国家自然科学基金重大仪器专项 (No. 62127813)

polarization observation angles under different constrained observation geometries. The effective distribution of sea surface polarization reflectance is primarily concentrated in the azimuthal range from 150° to 210° , with a relative peak occurring at an azimuth of 180° . Within this range, the peak of sea surface polarization occurs when the sum of the solar zenith angle and the observation zenith angle is approximately $106^\circ \pm 6^\circ$. When the solar incidence zenith angle is 55° and the relative azimuth angles are 180° , 165° , and 150° , the observation zenith angles are close to the optimal observation zenith angles predicted by the simulation (approximately 51° , 53° , and 57° , respectively). By placing a polarizer with a polarization direction of 90° in front of the detector, the optimal reflectance suppression effect can be achieved, significantly improving the imaging quality of the target.

Key words: sea surface reflected light; optimal polarization detection angle; Cox-Munk model; polarization reflection properties

1 引 言

在海洋目标探测过程中,海面强烈反射光所引发的耀光对探测器的成像质量和目标识别能力产生了严重的影响^[1-2]。海面反射光不仅导致图像对比度下降,还可能造成图像的大面积像素饱和,从而使目标的细节信息难以辨识,进而掩盖水面及水下目标的有效信息^[3-5]。因此,海面反射光的有效回避或抑制,成为当前海洋目标探测研究中亟待解决的问题。

研究人员提出了多种针对海面反射光的抑制方法。段锦等在分析海面耀光偏振特性的基础上,提出一种基于偏振特征区域分解的海面耀光抑制方法,利用耀光的饱和特征与偏振特性,对耀光区域进行特征分解^[6]。叶松等利用耀光的偏振时域特性,通过对生成的图像序列进行时域融合,从而实现耀光的抑制^[7]。Liang等基于动态海洋场景中耀光的时域偏振特性,提出通过旋转偏振片获取多角度线性偏振图像,并利用像素点多帧图像的最小值运算提升目标与背景之间的对比度^[8]。但上述研究均未充分考虑探测角度对成像质量的影响,其有效性可能仅限于某些特定条件,在更为复杂的海面耀光场景中的适用性不强。因此,系统分析不同观测几何条件下海面的偏振反射特性,并估计最优偏振探测角度,不仅能够有效抑制海面反射光方法的研究提供理论基础,对于提高偏振探测的精度及偏振成像质量也具有重要的应用价值。

针对海面偏振反射特性的研究多采用偏振双向反射分布函数(polarization Bidirectional Reflected Distribution Function, pBRDF)模型,对不同观测条件下的海面偏振反射特性进行分析^[9-10]。陆敏等通过结合偏振双向反射率因子与粗糙海面的概率密度分布函数,构建了粗糙海面的pBRDF模型,结果表明,不同海面风速和风向条件下会对偏振反射率产生不同程度的影响^[11]。Ren等基于偏振双向反射分布函数模型,提出了一种适用于海面溢油检测的多角度偏振测量模型,实验结果表明,溢油表面反射光的偏振特性受入射角和溢油折射率的影响^[12]。李英超等通过Cox-Munk粗糙海面概率统计模型,证明了不同溢油的可见光偏振特性存在明显差异,偏振对比度普遍高于5%^[13]。然而,上述研究均未充分考虑实际应用中探测器方位角与观测天顶角受限的情况,尤其是在某些特定场景中,观测几何参数无法自由调整,若未对最优探测角度进行评估,可能导致探测器接收到的偏振信号较弱,从而影响传统偏振抑制海面反射光方法的抑制效果。

为应对海面反射光对目标探测造成的干扰,本文提出了一种最优偏振探测角度估计方法。首先,基于Cox-Munk粗糙海面模型,明确了影响偏振反射率与偏振度的关键因素,针对不同风速、风向以及太阳入射天顶角、观测天顶角和方位角等观测条件,开展了海面偏振反射率的仿真研究,并对不同观测条件下偏振信号强度的变化

特征进行了对比分析。其次,基于偏振反射率计算得到海面反射光的偏振度,并进一步探讨了其在不同观测条件下的分布规律。然后,考虑到实际应用中观测几何可能受限,提出了“太阳-海面-探测器”三者之间的最优偏振观测角度组合估计方法,通过合理组合观测天顶角与太阳入射天顶角,以实现海面偏振度最大化,从而通过偏振抑制海面反射光的方法来降低海面反射光对目标成像的干扰。通过利用最优偏振探测角度不仅可以有效抑制海面反射光,而且提高了海面目标图像的图像质量。本文提出的最优偏振探测角度估计方法为海洋目标探测、海面搜救及侦察等实际应用场合提供了重要的科学依据和理论支持。

2 海面偏振反射特性仿真

2.1 平静海面的偏振反射特性

在风速较小的情况下,海水表面趋于平滑,在海水表面发生的反射可近似为镜面反射^[14]。当光波从空气介质入射至海水表面时,入射光可分解为垂直于入射平面的S偏振分量和平行于入射平面的P偏振分量^[15]。根据Fresnel定律可知^[16],其反射光表现出明显的偏振特性,海面反射光在垂直方向和平行方向上的偏振反射系数 r_s 和 r_p 分别为:

$$\begin{cases} r_s = \frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \\ r_p = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \end{cases}, \quad (1)$$

$$P(Z_{up}, Z_{cross}) = \frac{1}{2\pi\sigma_{up}\sigma_{cross}} \exp\left(-\frac{\xi^2 + \eta^2}{2}\right) \cdot \left[1 - \frac{1}{2}C_{21}(\xi^2 - 1) - \frac{1}{6}C_{03}(\eta^3 - 3\eta) + \frac{1}{24}C_{40}(\xi^4 - 6\xi^2 + 3) + \frac{1}{4}C_{22}(\xi^2 - 1)(\eta^2 - 1) + \frac{1}{24}C_{04}(\eta^4 - 6\eta^2 + 3)\right], \quad (3)$$

式中: Z_{up} 和 Z_{cross} 表示微小坡面逆风和侧风方向的倾斜斜率; σ_{up} 和 σ_{cross} 表示微小坡面逆风和侧风方向斜率的均方根; $\eta = Z_{up}/\sigma_{up}$; $\xi = Z_{cross}/\sigma_{cross}$ 。当风速为 v_{wind} 时,式(3)中各参数如表1所示^[22]。

为建立图1中的倾斜微平面单元的参考坐标系($O-XYZ$),将入射点和反射点共同设定为坐标系的原点,其中X轴和Z轴分别代表方位角和天

式中: θ_i 为太阳入射天顶角; θ_t 为透射光与法线的夹角; n_1 为空气的折射率,取值为1; n_2 为海水的折射率,取值为1.34。

偏振反射率和偏振反射系数分别用于描述光在介质界面反射时的强度比和电场振幅比。海面反射光在垂直方向上的偏振反射率 R_s 和平行方向上的偏振反射率 R_p ,分别由对应的偏振反射系数 r_s 和 r_p 的平方决定,即:

$$\begin{cases} R_s = |r_s|^2 = \left(\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}\right)^2 = \left(\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}\right)^2 \\ R_p = |r_p|^2 = \left(\frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)}\right)^2 = \left(\frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}\right)^2 \end{cases}. \quad (2)$$

2.2 粗糙海面的偏振反射特性

海面受到海风的影响会出现波浪起伏的现象,随着风速的增大,平静海面会发展成粗糙海面^[17]。海面偏振反射特性在整个 2π 观测空间内呈现出复杂的分布规律,因此,不能通过简单的Fresnel定律估计粗糙海面的偏振反射特性。

为了更准确地表征真实海洋表面的偏振反射特性,本文采用pBRDF^[18]结合Cox-Munk粗糙海面模型^[19],将粗糙海面视为由倾斜角度各异,近似服从高斯分布的无数微小坡面组成,且太阳光在这些微小坡面上遵循镜面反射定律。构成粗糙海面微小坡面的概率分布函数与海面风速相关,并满足Gram-Charlier展开式^[20-21],即:

顶角的基准轴, XOZ 平面与太阳入射平面保持一致,而 OY 轴垂直于入射平面。 U_{wind} 和 U_n 分别表示风向和倾斜微平面单元的法线方向, φ_{wind} 为风向方位角, ω 表示太阳光在该斜面上的入射与反射角度, β 则表示倾斜微平面单元与平面 OXY 的夹角。 θ_s 代表太阳的入射天顶角, θ_v 表示观测天顶角, φ_v 为观测方位角。

微小面元的倾斜斜率可通过其法线在OX轴

表 1 Gram-Charlier 参数

Tab. 1 Gram-Charlier parameters

Coefficients at $n=1.34$	Wind speed/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
σ_{up}	$(0.003+0.00192\times v_{\text{wind}})^{1/2}$
σ_{cross}	$(0.00316\times v_{\text{wind}})^{1/2}$
C_{21}	$0.01-0.0086\times v_{\text{wind}}$
C_{03}	$0.04-0.0033\times v_{\text{wind}}$
C_{40}	0.40
C_{22}	0.12
C_{04}	0.23

和 OY 轴上的投影 Z_x 和 Z_y 来表示,满足如下关系式:

$$\begin{cases} Z_x = \frac{-(\sin \theta_s + \sin \theta_v \cos \varphi_v)}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} \\ Z_y = \frac{\sin \theta_v \sin \varphi_v}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} \end{cases} \quad (4)$$

微小面元的倾斜角度与其方向斜率之间的关系可以表示为:

$$\tan \beta = \sqrt{Z_x^2 + Z_y^2}. \quad (5)$$

Z_x 和 Z_y 反映了海面相对于探测器和太阳位置的倾斜程度,并未考虑风向因素。 Z_{up} 和 Z_{cross}

$$\begin{cases} R_{s, \text{seawater}}(\theta_s, \theta_v, \varphi_v, \varphi_{\text{wind}}, n_{\text{seawater}}, v_{\text{wind}}) = \frac{r_s^2(\omega) P_{\text{seawater}}(Z_{\text{up}}, Z_{\text{cross}})}{4 \cos^4 \beta \cos \theta_v} \\ R_{p, \text{seawater}}(\theta_s, \theta_v, \varphi_v, \varphi_{\text{wind}}, n_{\text{seawater}}, v_{\text{wind}}) = \frac{r_p^2(\omega) P_{\text{seawater}}(Z_{\text{up}}, Z_{\text{cross}})}{4 \cos^4 \beta \cos \theta_v} \end{cases} \quad (8)$$

联立式(1)和式(8),并结合 Snell 定律,可以推导出海面反射光偏振度的表达式:

$$P_{r, \text{seawater}}(\theta_s, \theta_v, \varphi_v, n_{\text{seawater}}) = \frac{R_{s, \text{seawater}} - R_{p, \text{seawater}}}{R_{s, \text{seawater}} + R_{p, \text{seawater}}} = \frac{\cos^2[\omega - \arcsin(n_1 \sin \omega / n_2)] - \cos^2[\omega + \arcsin(n_1 \sin \omega / n_2)]}{\cos^2[\omega - \arcsin(n_1 \sin \omega / n_2)] + \cos^2[\omega + \arcsin(n_1 \sin \omega / n_2)]}. \quad (9)$$

由式(8)可以看出,粗糙海面的 S 和 P 方向偏振反射率与太阳入射天顶角、观测天顶角、方位角、风速、风向及折射率等因素相关。由于海水表面风速和风向的变化会引起二维粗糙海面微小斜坡面概率分布函数 $P(Z_{\text{up}}, Z_{\text{cross}})$ 的变化,从而导致 $R_{s, \text{seawater}}$ 和 $R_{p, \text{seawater}}$ 发生同等幅度的改变,因此偏振度与风速和风向无关,主要与太阳入射天顶角、观测天顶角、方位角及折射率相关。

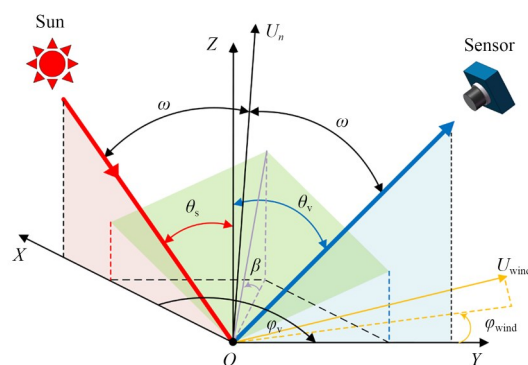


图 1 倾斜微平面单元坐标

Fig. 1 Coordinate of inclined microplanar unit

则表示微小坡面在逆风和侧风方向的倾斜斜率。通过式(6)可以将 Z_x 和 Z_y 分量在风向坐标系中调整为与风向对齐的分量。

$$\begin{cases} Z_{\text{up}} = Z_x \cos \varphi_{\text{wind}} + Z_y \sin \varphi_{\text{wind}} \\ Z_{\text{cross}} = Z_y \cos \varphi_{\text{wind}} - Z_x \sin \varphi_{\text{wind}} \end{cases} \quad (6)$$

太阳在该倾斜微平面上的入射角与反射角 ω 遵循以下关系式:

$$\cos 2\omega = \cos \theta_s \cos \theta_v + \sin \theta_s \sin \theta_v \cos \varphi_v. \quad (7)$$

联立式(3)~式(7),可以推导出粗糙海面在 S 和 P 方向下的偏振反射率表达式:

3 不同观测条件海面偏振反射率仿真

3.1 不同风速和风向对偏振反射率的影响

3.1.1 风速对偏振反射率的影响

初始参数设定海水的折射率为 1.34,固定风向为 0° ,太阳入射天顶角为 30° ,相对方位角为 $0^\circ \sim 360^\circ$,极坐标图中的径向角度代表观测天顶角,范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$,仿真得到风速为 1,3,5,7 m/s 下 $R_{s, \text{seawater}}$ 和 $R_{p, \text{seawater}}$ 的空间分布规律,如图 2 所示。

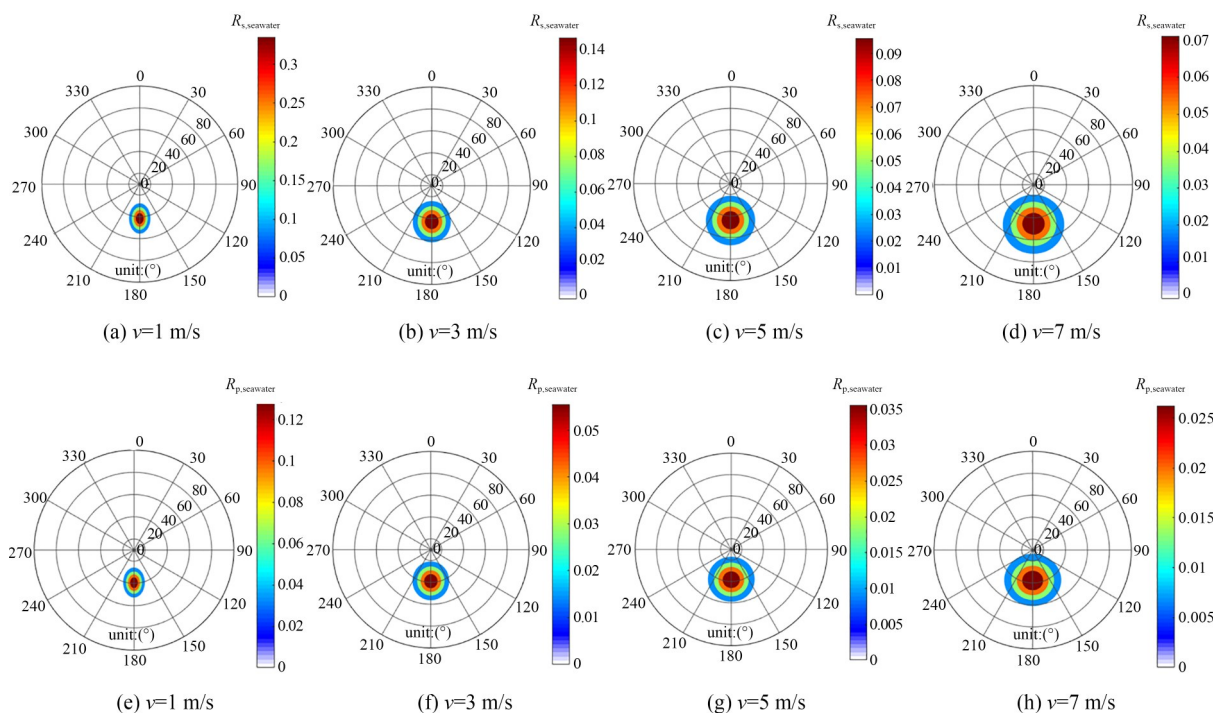


图2 不同海面风速对偏振双向反射率空间分布的影响

Fig. 2 Effect of different sea surface wind speeds on spatial distribution of polarized bidirectional reflectance

从图2中可以看出,当风速从1 m/s逐步增加至7 m/s时,偏振双向反射率在 2π 观测空间内的有效反射区域由初始的 $150^\circ \sim 210^\circ$ 逐渐扩大至 $120^\circ \sim 240^\circ$,在 180° 相对方位角附近达到最大值。S偏振反射率的峰值从 4.2×10^{-1} 下降至 8.9×10^{-2} ,P偏振反射率峰值则从 1.6×10^{-1} 下降至 3.3×10^{-2} 。这说明随着风速的增加,海面镜面反射方向的偏振信号强度有所降低,但有效偏振反射率的空间范围显著扩大,能够在更大范围的海域获得有效的偏振信息。在真实的海洋探测场景中,可以考虑将探测器方位角从 $150^\circ \sim 210^\circ$ 逐渐缩小至 180° 附近,以最大化偏振信号。而在室内实验环境模拟中,可以根据具体实验需求适当调整风速参数,以提高在不同应用场景下偏振信号的有效利用率。

3.1.2 风向对偏振反射率的影响

设定初始参数海面风速为1 m/s,海面风向分别为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$,其余初始参数与3.1.1节中不同风速的仿真初始参数一致。图3为 $R_{s,seawater}$ 和 $R_{p,seawater}$ 在不同海面风向下的空间分布规律。

图3表明,随着海面风向从 0° 逐渐旋转至

90° ,偏振双向反射率在 2π 观测空间内的有效反射区域始终集中在方位角 $150^\circ \sim 210^\circ$ 内,并在 $\varphi_v = 180^\circ$ 附近偏振双向反射率达到最大值。在不同风向条件下,偏振反射率的峰值基本保持不变,未因风向变化而产生显著波动。此外,偏振双向反射率的空间分布趋势与海面风向的旋转方向保持一致,表明风向主要影响反射分布的空间方位,而对反射强度的影响较小。

3.2 不同入射和观测条件对偏振反射率的影响

3.2.1 太阳入射天顶角对偏振反射率的影响

为便于横向对比不同太阳入射天顶角对偏振反射率的影响,在仿真计算时规定海面风速为3 m/s、风向为 0° ,仿真太阳入射天顶角为 $15^\circ, 35^\circ, 53^\circ$ 以及 75° 时,整个 2π 观测空间内海水表面的 $R_{s,seawater}$ 以及 $R_{p,seawater}$ 的分布情况,结果如图4所示。由图4可知,随着太阳入射天顶角的增加,偏振反射率的有效反射区域逐渐从最初的 $120^\circ \sim 240^\circ$ 缩小至 $150^\circ \sim 210^\circ$,最终集中于 180° 方位角附近。这一趋势表明,随着太阳入射天顶角的增大,反射能量逐渐集中于镜面反射方向,同时有效偏振反射率对应的有效方位角区间明显缩小。在 180° 的相对方位角上,随着太阳入射天

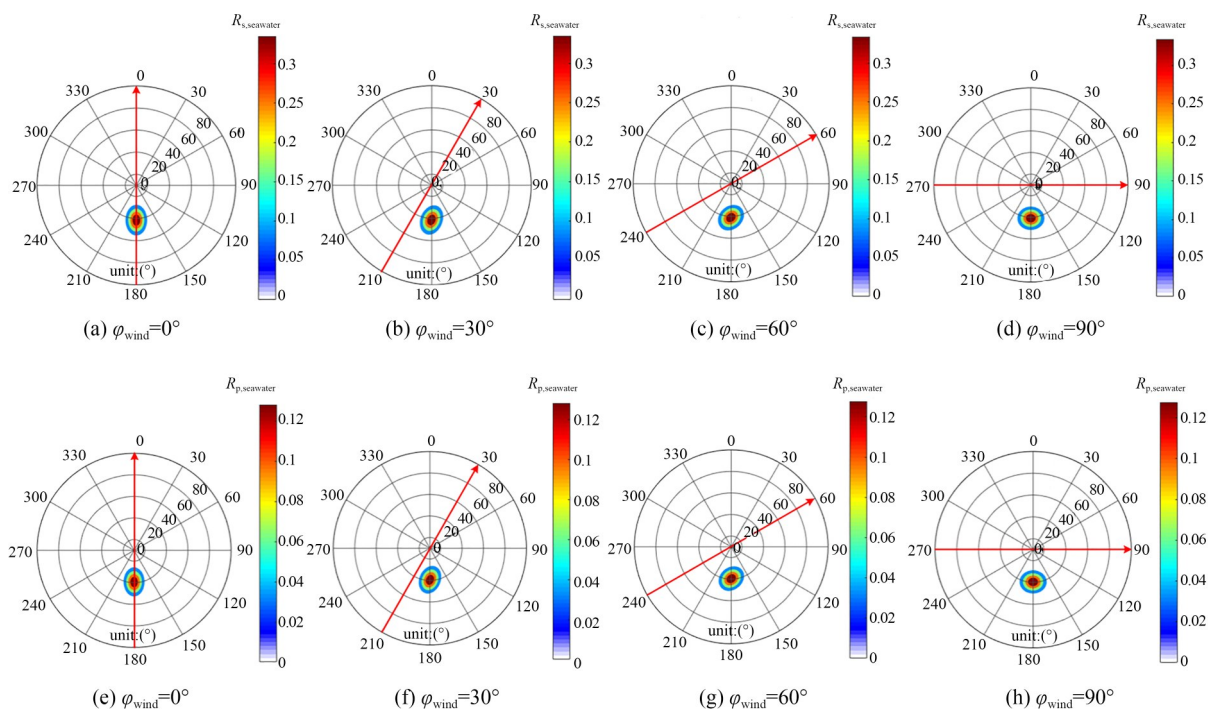


图 3 不同海面风向对偏振双向反射率空间分布的影响

Fig. 3 Effect of different wind directions on spatial distribution of polarized bidirectional reflectance over sea surface

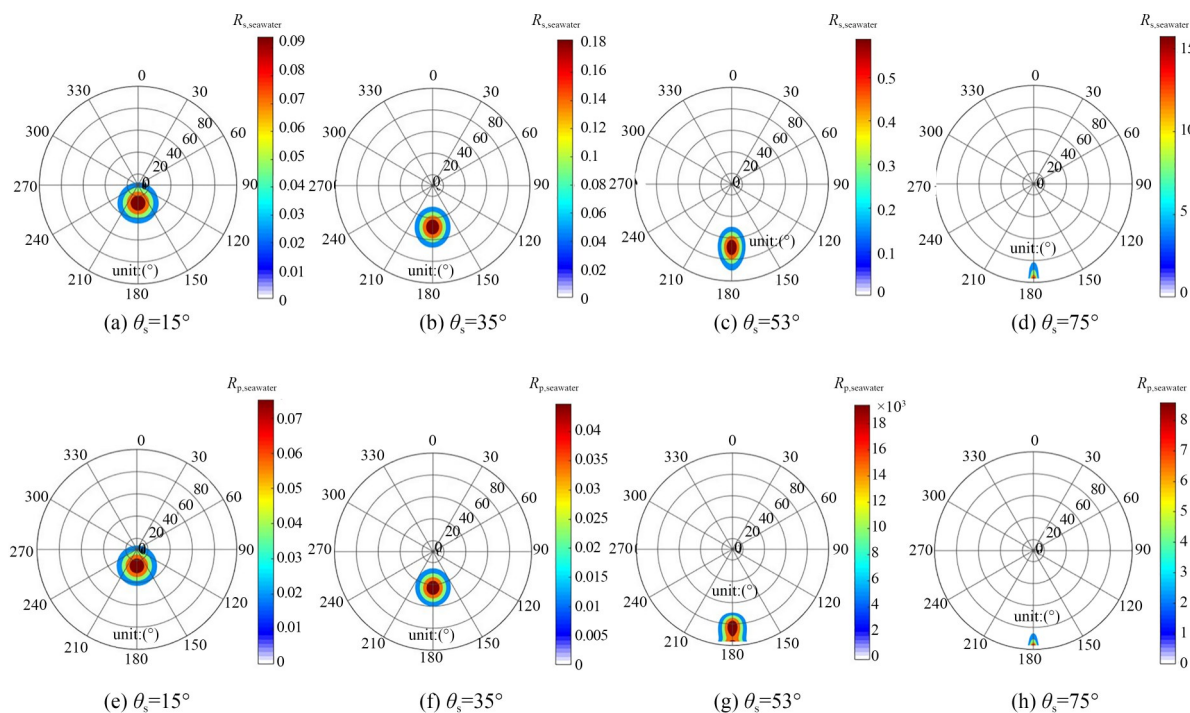


图 4 不同太阳入射天顶角下海水表面的偏振双向反射率的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of polarized bi-directional reflectance of seawater surfaces at different solar incident zenith angles

顶角增大至布儒斯特角 53° 时, $R_{s,seawater}$ 的相对峰值从初始的 1.17×10^{-1} 增加至 7.36×10^{-1} , 而

$R_{p,seawater}$ 的相对峰值从 9.43×10^{-2} 逐渐降低至近似为零, 此时 $R_{s,seawater}$ 与 $R_{p,seawater}$ 的差值达到最

大。对于空气-水界面,当太阳入射天顶角超过布儒斯特角时,P偏振光的反射率从零附近逐渐增大,而S偏振光的反射率则从 7.36×10^{-1} 继续增加。

需要特别说明的是,当太阳光接近海平面入射时,如图4(d)和4(h)所示,偏振反射率仅在观测天顶角接近水平时才有有效值,同时海面局部微小坡面呈现出显著的镜面反射特征,而在其他大多数观测天顶角下偏振反射率趋于零。然而,太阳入射天顶角和观测天顶角同时接近海平面的组合并非常规海面探测中常用的观测角度。

在常规探测角度下,当太阳入射天顶角较大时,偏振反射率趋于零,导致偏振信号微弱。因此,在后续讨论中,本文不再考虑太阳入射天顶角较大的情况,以便更准确地反映实际应用中的探测条件。

从上述结论中可以得到,偏振反射率在相对方位角 180° 附近时达到最大值。为更直观展示不同太阳入射天顶角和观测天顶角下偏振反射率的变化规律,本文进一步限定方位角为 180° 时分析偏振双向反射率的变化规律,仿真结果如图5所示。

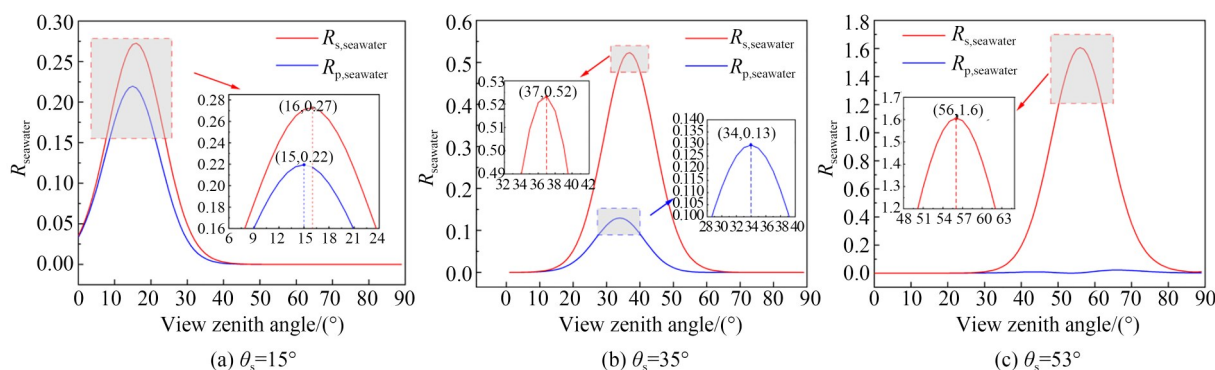


图5 方位角为 180° 时不同太阳入射天顶角下海面反射光的偏振双向反射率仿真结果

Fig. 5 Simulation results of polarized bidirectional reflectance of light reflected from sea surface at different solar incidence zenith angles for an azimuth of 180°

从图5中可以看出,S偏振反射率在不同太阳入射天顶角和观测天顶角条件下始终高于P偏振反射率,且两者均随着观测天顶角 θ_v 的增大呈现先增大后减小的变化趋势,在接近入射光的镜面反射方向时达到最大值。当光以较小的天顶角入射时,S偏振反射率和P偏振反射率的差异较小。随着太阳入射天顶角增大至 53° ,当太阳入射天顶角与观测天顶角之和接近两倍布儒斯特角 106° 附近时,S偏振反射率达到最大值;相反,P偏振反射率几乎降低至零,探测器接收到的P偏振信号非常微弱。因此,选择太阳入射天顶角 53° 和探测器观测天顶角 53° ,可以突出S偏振反射率与P偏振反射率的差异,使得观测系统只接收S偏振信号。需要说明的是,在实际海面反射光干扰目标探测中,当相对方位角为 180° 且满足太阳入射天顶角与观测天顶角之和接近两倍布儒斯特角 106° 附近

时,只需要对S偏振信号进行有效抑制,就可以达到抑制海面反射光的目的^[23]。

3.2.2 观测天顶角及方位角对偏振反射率的影响

为便于横向比较不同观测天顶角及方位角对偏振反射率的影响,图6直观地展示了在太阳入射天顶角为 53° 条件下,不同观测天顶角下海水表面的偏振双向反射率 $R_{s, seawater}$ 与 $R_{p, seawater}$ 随相对观测方位角 φ_v 的变化规律。

由图6可知,海水表面的偏振双向反射率随着相对观测方位角的增加呈现先增大后减小的变化趋势,S和P方向的偏振反射率主要集中在 $150^\circ < \varphi_v < 210^\circ$ 内,并在 180° 相对方位角附近达到峰值。在 180° 方位角条件下,当观测天顶角接近入射光的镜面反射方向(即 $\theta_v = 55^\circ$)时, $\theta_v = 55^\circ$ 对应的 $R_{s, seawater}$ 明显高于其他观测天顶角对应的 $R_{s, seawater}$ 。随着观测天顶角偏离镜面反射方向,

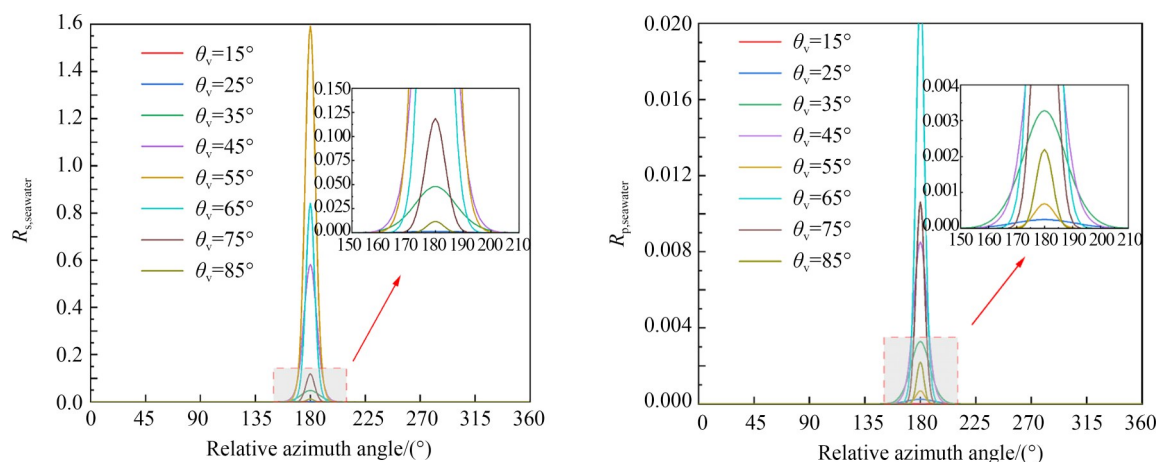


图 6 不同观测几何条件下海水表面的偏振反射率仿真结果

Fig. 6 Simulation results of polarized reflectance of seawater surface under different observation geometries

S 偏振反射率逐渐减小,但在不同观测几何条件下 $R_{s, \text{seawater}}$ 始终大于 $R_{p, \text{seawater}}$ 。

由于太阳入射天顶角、观测天顶角和相对方位角直接影响偏振反射率的分布,因此,合理选择太阳入射天顶角和观测天顶角的组合将有助于获得较高的偏振反射率。偏振反射率的强度主要集中在方位角 $150^\circ \sim 210^\circ$ 内,并在 180° 方位角时达到峰值。结合风速和风向的研究表明,在此方位角区间内始终可以获取较强的偏振信号,但往往伴随着显著的反光干扰。

综上所述,在探测器接收到的光信号中,S 偏振分量的偏振信息明显高于 P 偏振分量,在探测器前放置偏振方向为 90° 的偏振片能够有效滤除海面背景反射光中 S 偏振分量的偏振信息,抑制效果的优劣与 S 和 P 偏振分量的差值直接相关^[24-25]。从海面反射光的偏振度维度上来说,当 P 偏振分量接近零时,S 偏振分量与 P 偏振分量的差值达到最大,海面反射光的偏振度达到最大值^[26-27]。因此,合理利用海面反射光偏振度较高的条件,可以显著提升偏振方向为 90° 的偏振片对海面反光的抑制效果。

4 不同观测条件下海面偏振度仿真

4.1 太阳入射天顶角对偏振度的影响

初始参数设置海面风速为 3 m/s,风向设定

为 0° ,太阳入射天顶角为 $15^\circ, 35^\circ$ 以及 53° 时,仿真整个 2π 观测空间内海面反射光偏振度的分布情况,结果如图 7 所示。其中,黑色虚线表示偏振度为 0.5 的观测位置,虚线以外的区域为偏振度大于 0.5 的区域,虚线以内的区域为偏振度小于 0.5 的区域。当相对方位角固定为 180° 且偏振度达到 0.5 时,对应的观测天顶角分别为 $49^\circ, 29^\circ$ 和 11° 。

通过图 5 和图 7 中的数据可以分析得出,当太阳光以较小的太阳入射天顶角照射到海平面时,S 偏振反射率与 P 偏振反射率之间的差异相对较小,反射光的偏振度较小。因此,偏振度等值线在水平方向和垂直方向上的分布较为均衡,近似呈现同心圆分布。随着太阳入射天顶角的逐渐增大,S 偏振反射率逐渐增强,而 P 偏振反射率逐渐减弱,二者的差值不断增大,偏振度等值线逐渐从同心圆变为椭圆状分布。在不同太阳入射天顶角条件下,方位角 0° 至 180° 与 180° 至 360° 的偏振度分布呈现明显的对称性。

在太阳正向区域(即方位角为 0° 至 90° 及 270° 至 360°)内,海面反射光偏振度相对较低;而在太阳背向区域(即方位角为 90° 至 270°),海面反射光偏振度相对较高。因此,在选择探测器观测位置时,应优先避开太阳的正向区域,选择太阳的

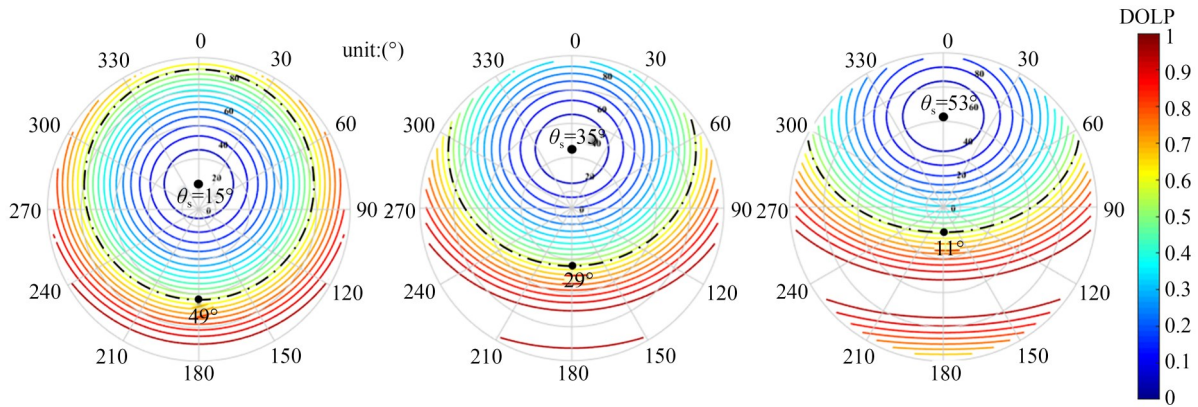


图 7 不同太阳入射天顶角下海面反射光偏振度的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of degree of polarization of sea surface reflected light under different solar incidence zenith angles

背向区域。由图 7 可知,海面反射光偏振度在入射主平面的太阳入射天顶角 θ_s 处达到极小值,并以该点为中心向外逐渐增大,呈现出显著的径向变化特征。当太阳入射天顶角较小时,背向区域的偏振度随观测天顶角的增加呈现持续增大的趋势;而当太阳入射天顶角较大时($\theta_s = 53^\circ$),背向区域的偏振度随观测天顶角的增加先增大后减小。

4.2 方位角对偏振度的影响

图 8 分别展示了在相对方位角为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 和 180° 的条件下,海面反射光偏振度随 0° 至 90° 太阳入射天顶角和 0° 至 90° 观测天顶角变化的三维分布及其对应的二维投影。仿真结果呈现了不同方位角条件下,海面反射光偏振度在不同太阳入射天顶角和观测天顶角组合下的变化规律。

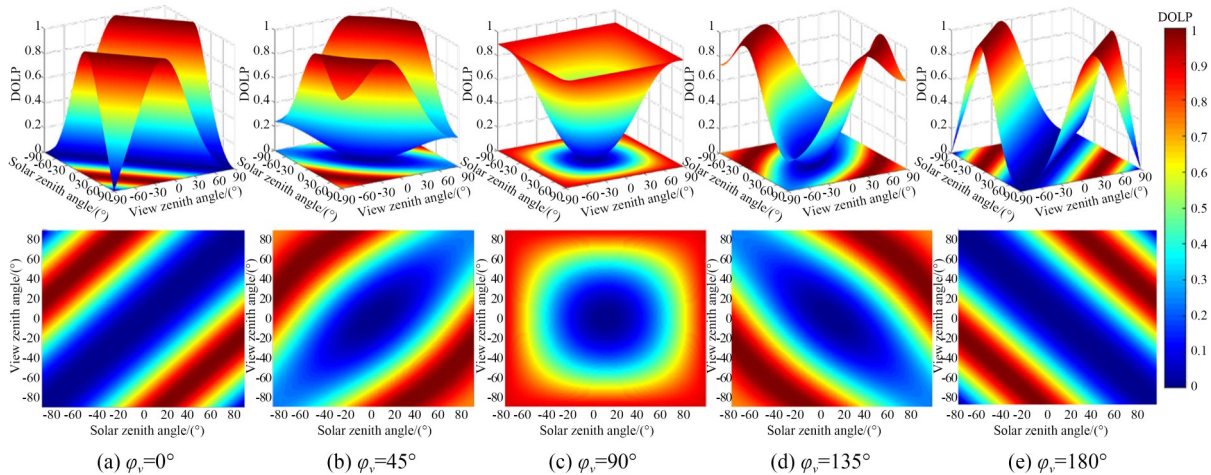


图 8 不同方位角条件下海面反射光的偏振度仿真结果

Fig. 8 Simulation results of degree of polarization of reflected light from sea surface under different azimuthal angle conditions

从图 8 中可以看出,当海面反射光偏振度分布在镜面反射方向的两侧时呈现出明显的对称性,并且与相对方位角为 90° 等距的两个方位角所对应的偏振度分布也表现出对称特征。这种对称性反映了偏振度在不同空间方位上的规律

性变化。此外,当固定相对方位角和太阳入射天顶角,且探测器观测天顶角从 0° 增加至 90° 时,偏振度的变化规律与探测器观测天顶角固定,太阳入射天顶角从 0° 增加至 90° 时偏振度的变化趋势相似。在不同方位角对应的偏振度图像中可以

看出,当太阳入射天顶角和观测天顶角均为 0° 时,图像中心位置的偏振度达到最小值,该空间位置的偏振度沿径向呈现先增大后减小的趋势。随着方位角的增加,椭球的长轴缩短而短轴逐渐拉长,并在方位角为 90° 时,图像呈现出近似圆环的分布特征。

为了更直观地分析不同太阳入射天顶角、观测天顶角以及方位角对海面反射光偏振度的影响规律,本文仿真了在不同太阳入射天顶角条件下海面反射光偏振度随方位角的变化,结果如图 9 所示。从图 9 中可以看出,在不同的观测几何条件下,海面反射光偏振度表现出不同

的变化规律。当相对方位角为 180° 时,太阳入射天顶角与观测天顶角之和小于或等于两倍布儒斯特角时,偏振度随方位角的增加呈现先增大后减小的变化趋势,并在接近 180° 方位角处达到峰值,在图中以虚线表示。当太阳入射天顶角与观测天顶角之和大于两倍布儒斯特角时,偏振度呈现出先增大再减小再增大最后减小的变化趋势,整体呈现“M”型分布特征,且最大值位于 180° 方位角的两侧,在图中以实线表示。此外,阴影框表示方位角在 $150^\circ \sim 210^\circ$ 内的区域,在此区间内海面反射光对目标探测有显著的干扰。

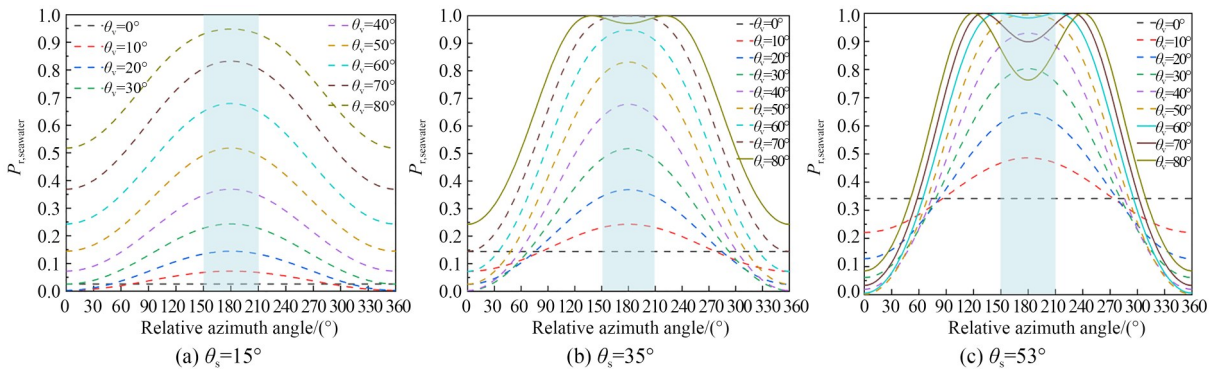


图 9 不同太阳入射天顶角条件下海面反射光偏振度的仿真结果

Fig. 9 Simulation results of degree of polarization of sea surface reflected light under different solar incidence zenith angles

5 最优偏振探测角度估计

5.1 方位角固定时太阳入射天顶角和观测天顶角的选择

由于海面反射光的偏振反射率与偏振度在相对方位角 180° 时达到最大值,因此,本文将探测器优先固定在与太阳相对的 180° 方位角附近,通过合理组合不同的太阳入射天顶角与观测天顶角来最大限度获取偏振信号。图 10 中展示了方位角固定为 180° 时,不同太阳入射天顶角条件下,偏振度随观测天顶角的变化趋势。

由图 10 中可以看出,当太阳入射天顶角为 25° 时,偏振度峰值对应的观测天顶角为 81° ;当太阳入射天顶角为 65° 时,偏振度峰值对应的观测天顶角为 41° 。随着太阳入射天顶角的增加,偏振度峰值对应的观测天顶角逐渐向较小的角度偏移。偏振度随着观测天顶角的增大呈现出先

增大后减小的变化趋势,并在太阳入射天顶角与观测天顶角之和接近两倍布儒斯特角(约 106°)

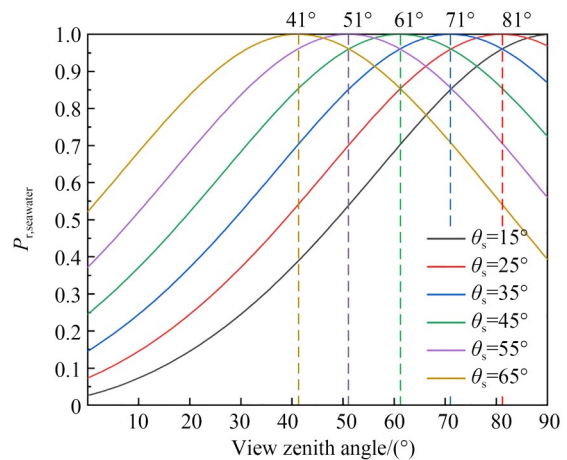


图 10 180° 方位角条件下海面偏振度的仿真结果

Fig. 10 Simulation results of sea surface polarization degree under 180° azimuth condition

时达到最大值。然而,当偏离该条件时,偏振度将逐渐减小。这表明,当相对方位角为 180° 时,对于每一个太阳入射天顶角,均存在最优观测天顶角,使偏振度达到相对峰值,从而获得最强的偏振信号。

在方位角不受限制的情况下,优先将方位角设定为 180° ,并在此探测条件下对最优偏振探测角度进行估计。若探测条件允许自由调整观测天顶角,建议在太阳入射天顶角与观测天顶角之和为 106° 时进行观测。若观测天顶角无法自由调整,根据第 4.2 节的分析可知,合理选择太阳入射天顶角尤为重要,建议等待太阳入射天顶角能够达到与观测天顶角之和为 106° 的时间点进行实验观测,以实现最优的偏振探测效果。

5.2 方位角变化时太阳入射天顶角和观测天顶角的选择

在某些特殊情况下,探测器无法根据最大化获取偏振信号的条件,选择在相对方位角为 180° 的位置进行固定。由前文可知,偏振反射率和偏

振度的有效数值通常分布在方位角 $150^\circ \sim 210^\circ$ 内,因此本文进一步探讨在方位角 $150^\circ \sim 210^\circ$ 内,太阳入射天顶角与观测天顶角的合理组合,以优化偏振探测效果。图 11 展示了不同方位角以及太阳入射天顶角 ($15^\circ, 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ, 55^\circ$ 和 65°) 条件下,海面反射光偏振度随观测天顶角变化的趋势。需要说明的是,为方便后期对比,同时展示了方位角 180° 条件下的海面反射光偏振度随观测天顶角的变化曲线。本文将偏振度在 $0.9 \sim 1.0$ 内视为最优偏振探测区间,该区间内在探测器前放置偏振方向为 90° 的偏振片可以更有效地抑制海面反光。

如图 11 所示,方位角为 $150^\circ, 165^\circ, 195^\circ$ 以及 210° 时,海面反射光偏振度的变化趋势与 180° 方位角条件下类似,均随着观测天顶角的增加呈现先增大后减小的变化趋势。随着方位角的变化,偏振度的峰值并非始终在太阳入射天顶角与观测天顶角之和等于 106° 的位置出现。尤其在方位角接近 150° 或 210° 时,偏振度峰值向更大的观

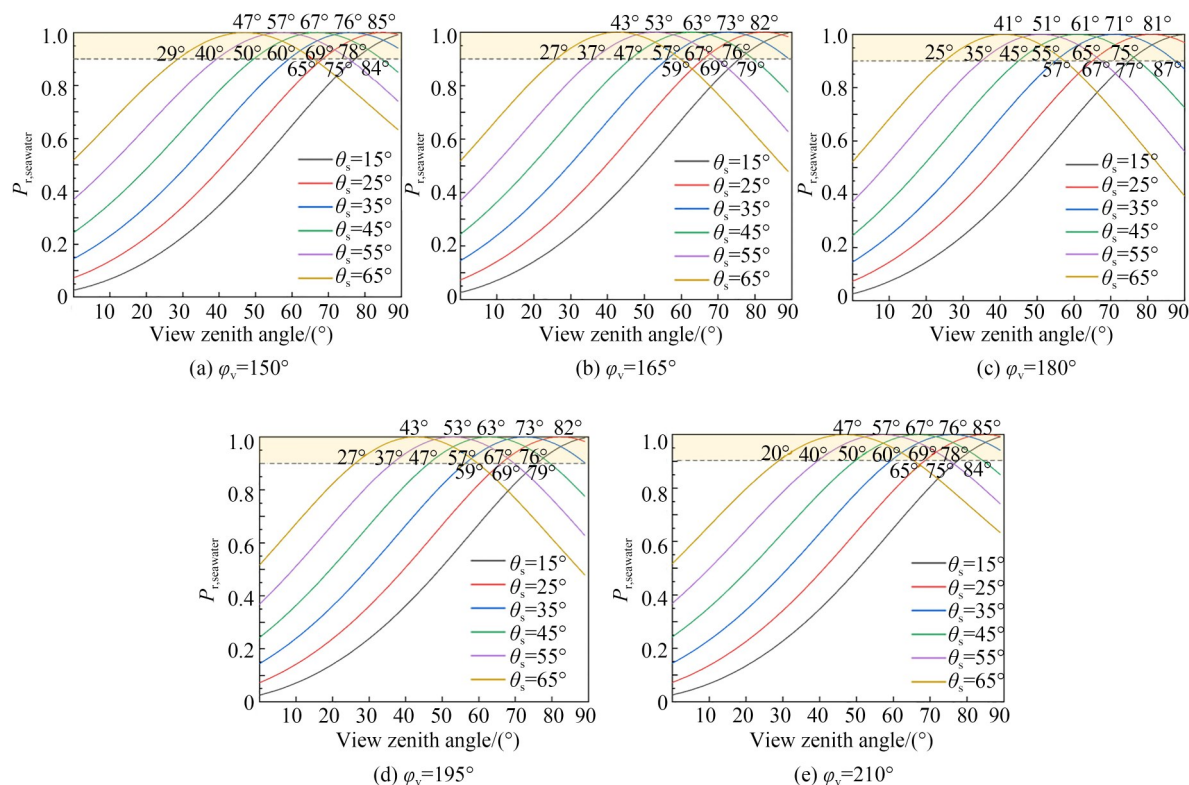


图 11 不同方位角和太阳入射天顶角条件下海面反射光偏振度的仿真结果

Fig. 11 Simulation results of sea surface reflected light polarization degree under different azimuth and solar incidence zenith angle conditions

测天顶角方向偏移,这说明方位角会对最优探测角度产生一定程度的影响。从图 11 中可以观察到,在与 180° 方位角等距的两个方位角(如 150° 和 210°)下,偏振度峰值所对应的观测天顶角位置以及最优偏振探测区间近似相同。这表明,关于 180° 方位角对称的两个观测方位角,其海面反射光的偏振特性表现出较强的对称性,其最优偏振探测条件也具有 consistency。本文通过分析不同方位角下的仿真数据,得出偏振度取最大值时观测天顶角与太阳入射天顶角的最优组合,如表 2 所示。

表 2 偏振度取最大值时观测天顶角与太阳入射天顶角的最优组合

Tab. 2 Optimal combination of observation zenith angle and solar incidence zenith angle when polarization degree reaches its maximum value ($^\circ$)

Relative azimuth angle	Optimal combination
$\varphi_v = 150$	$\theta_v + \theta_s \approx 112$
$\varphi_v = 165$	$\theta_v + \theta_s \approx 108$
$\varphi_v = 180$	$\theta_v + \theta_s \approx 106$
$\varphi_v = 195$	$\theta_v + \theta_s \approx 108$
$\varphi_v = 210$	$\theta_v + \theta_s \approx 112$

从图 11 中可以看出,当相对方位角为 150° 且太阳入射天顶角 θ_s 为 65° 时,偏振度达到最大值时的观测天顶角 $\theta_v^{\max}$ 为 47° ,观测天顶角与太阳入射天顶角的最优组合为 $\theta_v^{\max} + \theta_s \approx 112^\circ$,对应的最优偏振探测区间为 $29^\circ \sim 65^\circ$ 。结合表 2 及图 11 的数据分析,当偏振度大于 0.9 时,观测天顶角以及太阳入射天顶角的最优偏振探测区间应满足:

$$\begin{cases} \theta_v \in [\theta_v^{\max} - (16^\circ + \Delta\theta), \theta_v^{\max} + (16^\circ + \Delta\theta)] \\ \theta_s \in [\theta_s^{\max} - (16^\circ + \Delta\theta), \theta_s^{\max} + (16^\circ + \Delta\theta)] \end{cases} \quad (10)$$

其中: $\Delta\theta$ 表示角度允许误差 ($\Delta\theta \approx 2^\circ$); $\theta_v^{\max}$ 和 $\theta_s^{\max}$ 表示偏振度取最大值时的观测天顶角以及太阳入射天顶角的角度,可通过表 2 进行数值推导。

在实际海洋目标探测时,在某些场景下可能无法自由选择太阳入射天顶角的角度以及自由调整探测器的探测角度,因此考虑当方位角受限而无法固定在 180° 方位角的情况下,在不同的限制情况下进行最优偏振探测角度的估计。当探测器的观测天顶角可以自由调整时,则应将其调

整至使偏振度达到最大值的角度 $\theta_v^{\max}$ 。若无法自由调整观测天顶角,则可通过等待太阳入射天顶角至 $\theta_s^{\max}$,或调整主动照明方向的入射角至 $\theta_s^{\max}$,以满足最优探测角度的条件。综上所述,在进行具体海洋偏振探测应用时,应根据实际的太阳入射天顶角搭配合适的观测天顶角,并尽量选择海面偏振度相对较大的位置进行偏振探测,以提高探测系统的成像质量和目标识别能力。

5.3 外场验证实验

为评估本文提出的最优偏振探测角度估计方法在抑制海面反射光方面的有效性,本文在仿真分析的基础上进一步开展了外场实测实验。实验设计包括 3 种复杂环境:(1)晴朗天气及低风速条件下目标探测实验;(2)晴朗天气及高风速条件下目标探测实验;(3)多云天气及中等风速条件下目标探测实验。为避免单一目标物潜在的实验结果偶然性,实验选用多种类型的目标,以更全面地验证本文方法的有效性。实验中所选取的偏振探测器为大恒光电的 MER2-502-79U3M POL 分焦平面相机,该设备能够同时采集 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 四个方向的偏振图像。

5.3.1 晴朗天气及低风速条件下目标探测

数据采集时间为 2024 年 9 月 19 日,下午 15 时,此时太阳入射天顶角约为 55° ,天气晴,环境温度为 23°C ,风速约为 1.3 m/s ,地点为长春理工大学南校区室外水池。实验场景如图 12 所示,利用太阳光照射波浪水面所产生的反光现象来近似模拟海面反光。实验目标包括白色氧气瓶(T1)和

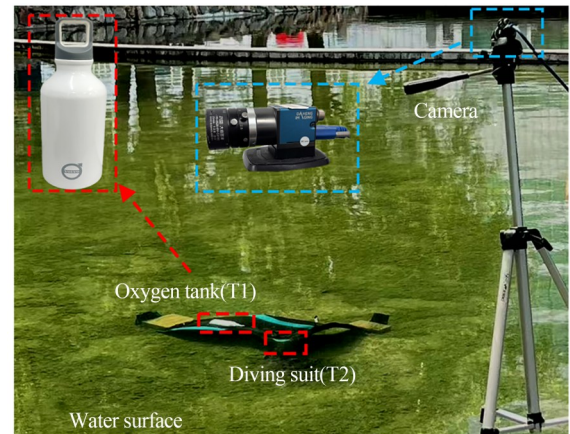


图 12 验证最优偏振探测角度的实验环境

Fig. 12 Experimental setup for validating optimal polarization detection angle

深色潜水服(T2),分别对应饱和目标和暗弱目标,通过有效评估在海面反光背景下不同目标的探测效果,从而验证本文所提方法的抑制效果。

本文分别在相对观测方位角为 180° , 165° 和 150° 的条件下,通过调整探测器的观测天顶角 (30° , 40° , 50° , 60° , 70°),获取了不同观测几何条件下普通强度图像(S_0)和探测器前放置偏振方向为 90° 的偏振片抑制海面反射光后的偏振图像(P_{90°)。其中, S_0 图像是将 0° , 45° , 90° 和 135° 图像通过 Stokes 矢量法计算得出的,用于表示场景中的总光强图像。具体实验结果如图 13 所示(彩图见期刊电子版),其中红色框表示待探测目标区域,蓝色框表示海面反射光的背景区域,黄色框则表示在该观测方位角下所确定的最优偏振探测角度。

从图 13 中可以看出,在 S_0 图像中,漂浮在水中的 T1 目标由于其材料涂色的原因,在图像中表现为灰度值较高,在目标附近背景灰度值较低的区域中可以相对容易地被分辨出来;若在目标附近背景灰度值相对较高的区域中,目标与背景之间的对比度就会明显下降,导致目标与背景不

容易被区分。而沉在水下的 T2 目标由于其暗弱目标的属性,在目标附近背景灰度值较低的区域中,由于其灰度值也相对较低,导致目标与背景不容易被区分;若在目标附近背景相对较高的区域中,背景反光遮盖了 T2 目标反射光的信息,则很难从强度维度上来清晰地区分目标与背景,从而使得目标在图像中的可见性相对较差。相比之下,在 P_{90° 图像中,背景区域的亮度明显降低, T1 目标与背景之间的亮度差异得到了明显的增大,并且覆盖在 T2 目标表面上的反光被较好地抑制,更容易观察到目标的细节特征信息。

当探测器的观测天顶角接近理论预测的最优角度时,图像中的背景反光抑制效果更为显著,饱和目标 T1 与暗弱目标 T2 的可见性均得到有效的提升。而在其他非最优观测角度下,虽然使用偏振方向为 90° 的偏振片也能抑制一部分的反光现象,但抑制效果并不显著,目标的边缘清晰度和对比度提升幅度有限。这表明最优观测角度的选择对于提高目标成像质量来说至关重要,进一步验证了本文所提方法的合理性和有

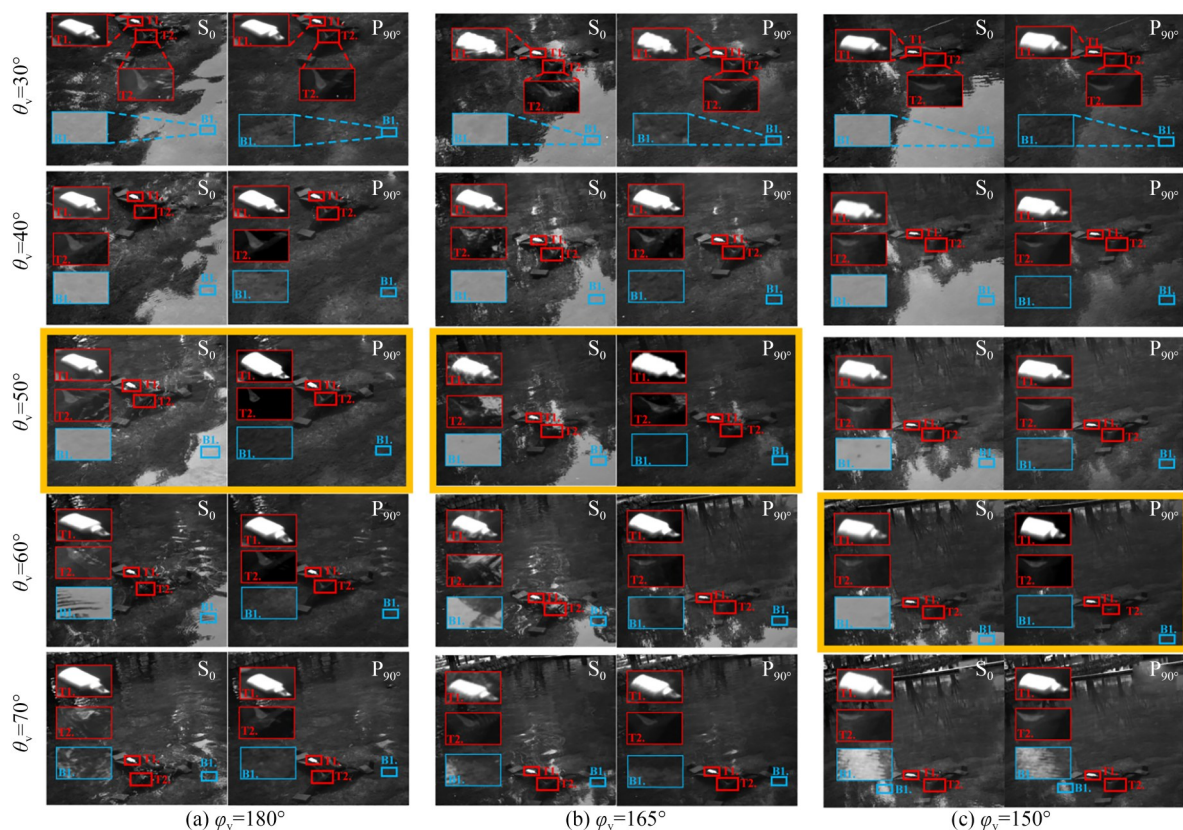


图 13 晴朗天气及低风速条件下不同观测几何条件下获取的 S_0 图像和 P_{90° 图像

Fig. 13 S_0 and P_{90° images acquired under different observation geometries in clear weather and low wind conditions

效性。

本文进一步通过对比度、平均亮度、标准差和饱和像素数等图像评价指标,定量分析了不同观测几何条件下 S_0 图像与 P_{90° 图像之间的图像质量差异。需要说明的是,由于在图像中 T2 目标表现为灰度值较低,抑制后的反光背景的灰度值也相对较低,目标与背景之间的对比度提升有限,在定量分析中提高得不够明显。因此,本文以 T1 目标为例,通过定量分析来证明本文方法的有效性。表 3~表 5 分别展示了在相对方位角为 180° , 165° 和 150° 时,不同观测天顶角条件下所获得的图像评价指标结果。

表 3 180°方位角时不同观测天顶角下拍摄图像的指标评价结果

Tab. 3 Evaluation of image quality metrics at different observation zenith angles for an azimuth angle of 180°

$\theta_v/$ (°)	Contrast			Average brightness			Standard deviation			Number of saturated pixels		
	C_{S_0}	$C_{P_{90^\circ}}$	$\frac{C_{P_{90^\circ}} - C_{S_0}}{C_{S_0}}$	$\bar{B}_{S_0}$	$\bar{B}_{P_{90^\circ}}$	$\frac{\bar{B}_{S_0} - \bar{B}_{P_{90^\circ}}}{\bar{B}_{S_0}}$	σ_{S_0}	$\sigma_{P_{90^\circ}}$	$\frac{\sigma_{S_0} - \sigma_{P_{90^\circ}}}{\sigma_{S_0}}$	N_{sat, S_0}	$N_{sat, P_{90^\circ}}$	$\frac{N_{sat, S_0} - N_{sat, P_{90^\circ}}}{N_{sat, S_0}}$
30	0.13	0.30	131%	54.96	48.89	11%	26.91	19.08	29%	1447	1306	10%
40	0.05	0.44	836%	68.09	55.74	18%	37.75	17.57	53%	2344	1808	23%
50	0.02	0.51	2882%	69.57	48.98	30%	46.77	15.61	67%	2337	1612	31%
60	0.05	0.45	909%	65.33	51.43	21%	42.48	17.43	59%	1964	1484	24%
70	0.32	0.49	54%	52.41	42.85	18%	32.27	16.48	49%	1781	1509	15%

通过分析可知,当太阳入射天顶角为 55° 且方位角为 180° 时,观测天顶角接近 51° 时可实现偏振信号获取的最大化。根据表 3 的定量结果可知,观测天顶角为 50° 时所对应的目标图像在多个评价指标上表现最优。具体表现为:在对比度指标方面, P_{90° 图像的对比度增加幅度由 0.02 提升至 0.51,增幅显著高于其他观测角度下目标图像的对比度,说明在该角度下进行目标探测,能够最大程度地增大目标与背景之间的亮度差异;在平均亮度指标方面,不同观测天顶角对应的图像的平均亮度下降幅度分别为 11%, 18%, 30%, 21%, 18%, 这表明在观测天顶角为 50° 的条件下探测目标时, P_{90° 图像的整体亮度下降最明显,可以有效减少由于海面反光所引起的大面积像素饱和;在标准差指标方面,当观测天顶角为 50° 时, P_{90° 图像的标准差下降幅度相对最大,这说明在该角度下抑制反光后的图像亮度分布更加均匀,目标的细节特征更容易辨识;在饱和像素数指标方面,不同观测天顶角下所对应的目标图像的饱和像素数下降幅度分别为 10%, 23%, 31%, 24%, 15%。这说明在观测天顶角为 50° 时,使用偏振方向为 90° 的偏振片抑制反光后能够有效减少反光区域的饱和像素。

通过分析可知,当太阳入射天顶角为 55° , 且

表 4 165°方位角时不同观测天顶角下拍摄图像的指标评价结果

Tab. 4 Evaluation of image quality metrics at different observation zenith angles for an azimuth angle of 165°

$\theta_v/$ (°)	Contrast			Average brightness			Standard deviation			Number of saturated pixels		
	C_{S_0}	$C_{P_{90^\circ}}$	$\frac{C_{P_{90^\circ}} - C_{S_0}}{C_{S_0}}$	$\bar{B}_{S_0}$	$\bar{B}_{P_{90^\circ}}$	$\frac{\bar{B}_{S_0} - \bar{B}_{P_{90^\circ}}}{\bar{B}_{S_0}}$	σ_{S_0}	$\sigma_{P_{90^\circ}}$	$\frac{\sigma_{S_0} - \sigma_{P_{90^\circ}}}{\sigma_{S_0}}$	N_{sat, S_0}	$N_{sat, P_{90^\circ}}$	$\frac{N_{sat, S_0} - N_{sat, P_{90^\circ}}}{N_{sat, S_0}}$
30	0.10	0.53	443%	68.52	55.49	19%	25.99	19.76	24%	1151	1137	1%
40	0.05	0.42	744%	64.35	56.43	12%	37.29	17.81	52%	1262	1075	15%
50	0.02	0.35	2088%	52.30	39.81	24%	45.85	16.92	63%	1553	1294	17%
60	0.04	0.35	861%	54.69	45.69	16%	34.26	13.98	59%	3636	2757	24%
70	0.60	0.68	13%	49.21	42.81	13%	27.35	15.61	43%	783	749	4%

表 5 150°方位角时不同观测天顶角下拍摄图像的指标评价结果

Tab. 5 Evaluation of image quality metrics at different observation zenith angles for an azimuth angle of 150°

$\theta_v /$ (°)	Contrast			Average brightness			Standard deviation			Number of saturated pixels		
	C_{S_0}	$C_{P_{90^\circ}}$	$\frac{C_{P_{90^\circ}} - C_{S_0}}{C_{S_0}}$	$\bar{B}_{S_0}$	$\bar{B}_{P_{90^\circ}}$	$\frac{\bar{B}_{S_0} - \bar{B}_{P_{90^\circ}}}{\bar{B}_{S_0}}$	σ_{S_0}	$\sigma_{P_{90^\circ}}$	$\frac{\sigma_{S_0} - \sigma_{P_{90^\circ}}}{\sigma_{S_0}}$	N_{sat, S_0}	$N_{sat, P_{90^\circ}}$	$\frac{N_{sat, S_0} - N_{sat, P_{90^\circ}}}{N_{sat, S_0}}$
30	0.05	0.40	782%	58.35	53.79	8%	29.20	24.00	18%	758	647	15%
40	0.46	0.53	14%	52.84	43.89	17%	29.67	16.86	43%	5431	4572	16%
50	0.02	0.54	3493%	71.68	51.03	29%	56.05	19.73	65%	831	685	18%
60	0.02	0.57	3713%	73.02	49.42	32%	52.34	17.10	67%	1020	756	26%
70	0.39	0.48	24%	70.04	56.95	19%	46.19	16.69	64%	909	753	17%

相对方位角分别为 165°和 150°时,最优观测天顶角分别接近 53°和 57°。结合实验所得到的表 4 和表 5 中的数据可知,在所提出的最优观测天顶角条件下,抑制后的 P_{90° 图像在对比度、平均亮度、标准差以及饱和像素数等指标上,相较于其他观测天顶角条件下获得的图像评价指标提升幅度最为明显。进一步验证了当相对方位角分别为 165°和 150°时,相应的最优观测天顶角应位于 50°和 60°附近。

为验证在目标与背景偏振方向几乎一致的情况下,在探测器前放置偏振方向为 90°的偏振片是否仍然能够有效抑制海面反射光,提高目标

与背景之间的对比度。本文计算了不同方位角条件下最优观测天顶角所对应的偏振角 (Angle of Polarization, AOP) 图像,如图 14 所示。

由图 14 可以看出,AOP 图像中几乎无法有效区分目标和背景,说明目标 T1 和 T2 与反光背景的偏振方向几乎一致。在此场景下,在探测器前放置偏振方向为 90°的偏振片仍然能够有效地抑制海面背景反光,目标的可见性得到了显著的提升。结合表 3~表 5 的定量分析结果可知,本文所提的最优偏振探测角度估计方法在目标与背景偏振方向几乎一致的情况下仍然具有很好的适用性。

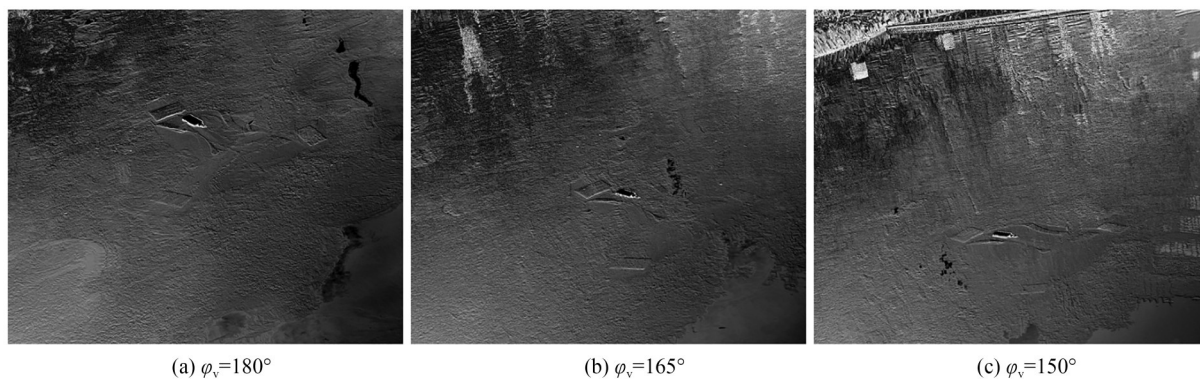


图 14 不同方位角条件下最优观测天顶角对应的 AOP 图像

Fig. 14 AOP images corresponding to optimal observation zenith angles under different azimuthal conditions

5.3.2 晴朗天气及高风速条件下目标探测

数据采集时间为 2025 年 5 月 11 日,下午 16 时,此时太阳入射天顶角约为 54.7°,天气晴,环境温度为 20 °C,风速约为 5 m/s。本节在高风速、晴朗天气、近岸浅水环境下设计了多目标对比实验。实验目标包括饱和和高反射目标白色木棍

(T1)、表面纹理丰富的中等反射目标瓷砖(T2),以及非饱和和低反射目标蛙人模型(T3),实验结果如图 15 所示。

由于晴朗天气下太阳直射,海面反射强度增强,尤其在高风速引起的波动海面下,形成了大面积的耀光区域,对目标成像造成严重干扰。从

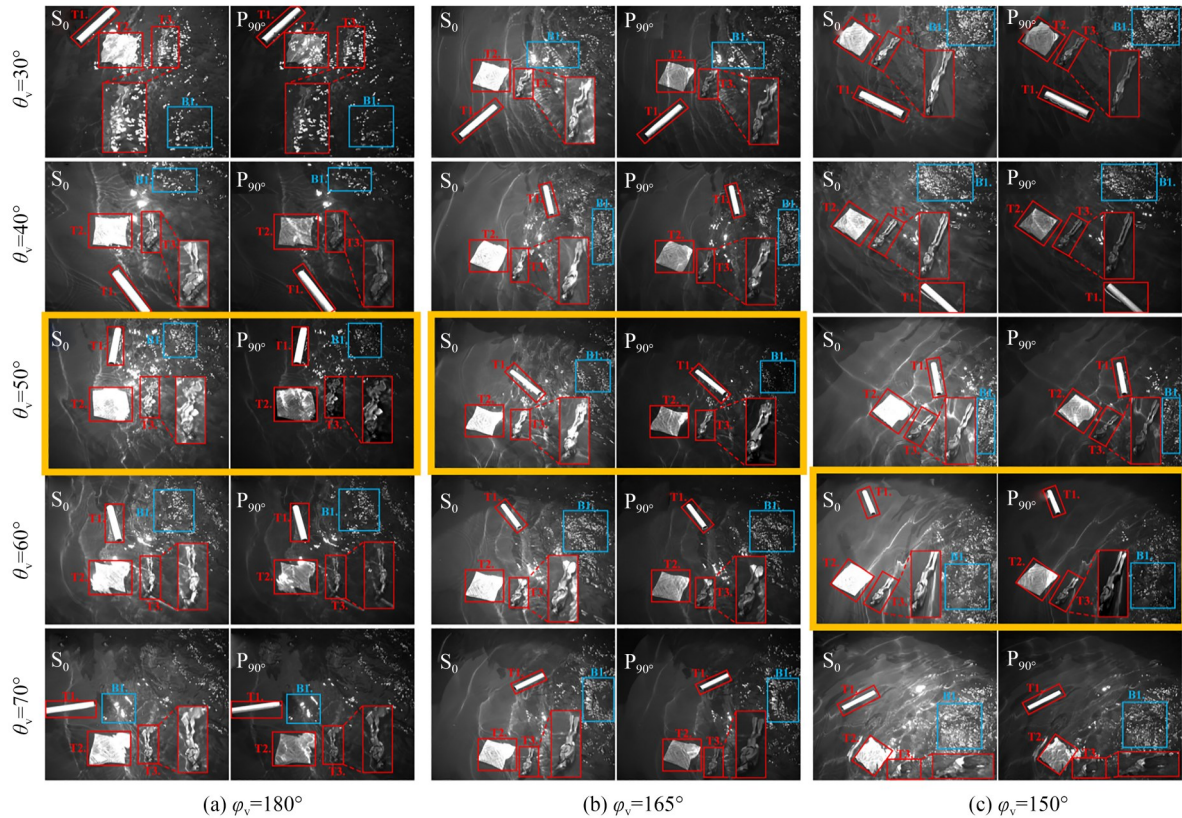
图 15 晴朗天气及高风速下不同观测几何条件获得的 S_0 图像和 P_{90° 图像Fig. 15 S_0 and P_{90° images acquired under different observation geometries in clear weather and high wind speed conditions

图 15 中的 S_0 图像可以看出,当反射强度较高的 T1 和 T2 目标位于背景低灰度值区域时,目标与背景之间的对比度较高,能够较为清晰地分辨目标;但是当 T1 和 T2 目标位于背景高灰度值区域时,目标与背景之间的对比度显著下降,且目标的纹理信息被强烈的背景反光掩盖。在图像中表现为灰度值较低的暗弱目标 T3,若同样位于灰度值较低的背景区域中,目标与海面反光背景的对比度较低,难以有效区分目标与背景;当 T3 目标位于背景高灰度值区域时,海面反光会严重掩盖目标的细节以及边缘特征,导致目标在图像中的可见性进一步下降。相比之下,在 P_{90° 图像中,耀光区域明显变暗。T1 目标与背景之间的亮度差异得到了明显增强;覆盖在 T2 目标表面上的反光得到了有效抑制,表面纹理清晰度得以恢复;T3 目标也从反光背景中有效分离,三类目标的对比度和可见性均得到了显著提高。

进一步对比不同观测天顶角的 P_{90° 图像发现,在晴朗天气与高风速条件下,当观测天顶角接近本文理论估计的最优观测天顶角(相对方位

角 $\varphi_v = 180^\circ$ 时 $\theta_v^{\max} \approx 51^\circ$, $\varphi_v = 165^\circ$ 时 $\theta_v^{\max} \approx 53^\circ$, $\varphi_v = 150^\circ$ 时 $\theta_v^{\max} \approx 57^\circ$) 时,图像中抑制海面反射光干扰的效果最为明显,目标可见性得到了明显的改善。相比之下,当探测器的观测天顶角偏离最优偏振探测角度时,虽然能观察到一定程度的海面反光抑制,但其抑制海面反光效果“大打折扣”,目标的细节特征信息不容易辨识,目标可见性也未得到显著改善,部分目标区域甚至无法被清晰识别。

5.3.3 多云天气及中等风速条件下目标探测

为验证本文方法在低照度复杂天气条件下的稳定性,本文进一步在多云天气、中等风速和近岸浅水环境下开展对比实验。数据采集时间为 2025 年 5 月 9 日,下午 16 时,此时太阳入射天顶角约为 55.14° ,天气多云,环境温度为 13°C ,风速约为 3.3 m/s ,实验所选目标与 5.3.2 节一致,实验结果如图 16 所示。

从图 16 中可以观察到,在 S_0 图像中,受自然光照强度降低的影响,图像整体灰度值偏低,但海面反射光仍然干扰探测器对目标的识别。

对于灰度值较高的目标 T1 和 T2, 它们与背景之间的对比度较高, 能够较为清晰地地区分目标与背景, 但 T1 目标局部出现轻微饱和, T2 目标表面的纹理部分丢失。灰度值较低的目标 T3 与背景亮度接近, 导致其可见性相对较差。相比之下, 在 P_{90° 图像中, 目标周围的海面反射光明显得到了抑制, 特别是在最优观测天顶角附近, T1 和 T3 周围的反光区域明显减少, 目标的边缘更加明显, T2 表面的纹理细节也得到了有

效恢复, 三类目标的整体可见性得到了显著提升。

综上所述, 通过不同天气环境下的外场实验充分验证了最优偏振探测角度估计方法在复杂环境中的有效性与稳定性。该方法不仅适用于不同天气、风速和水体深度, 而且面对不同类型的目标, 也能够有效地提高目标的成像效果以及目标与背景之间的对比度, 为实际工程应用中合理设置探测器的观测角度提供了参考。

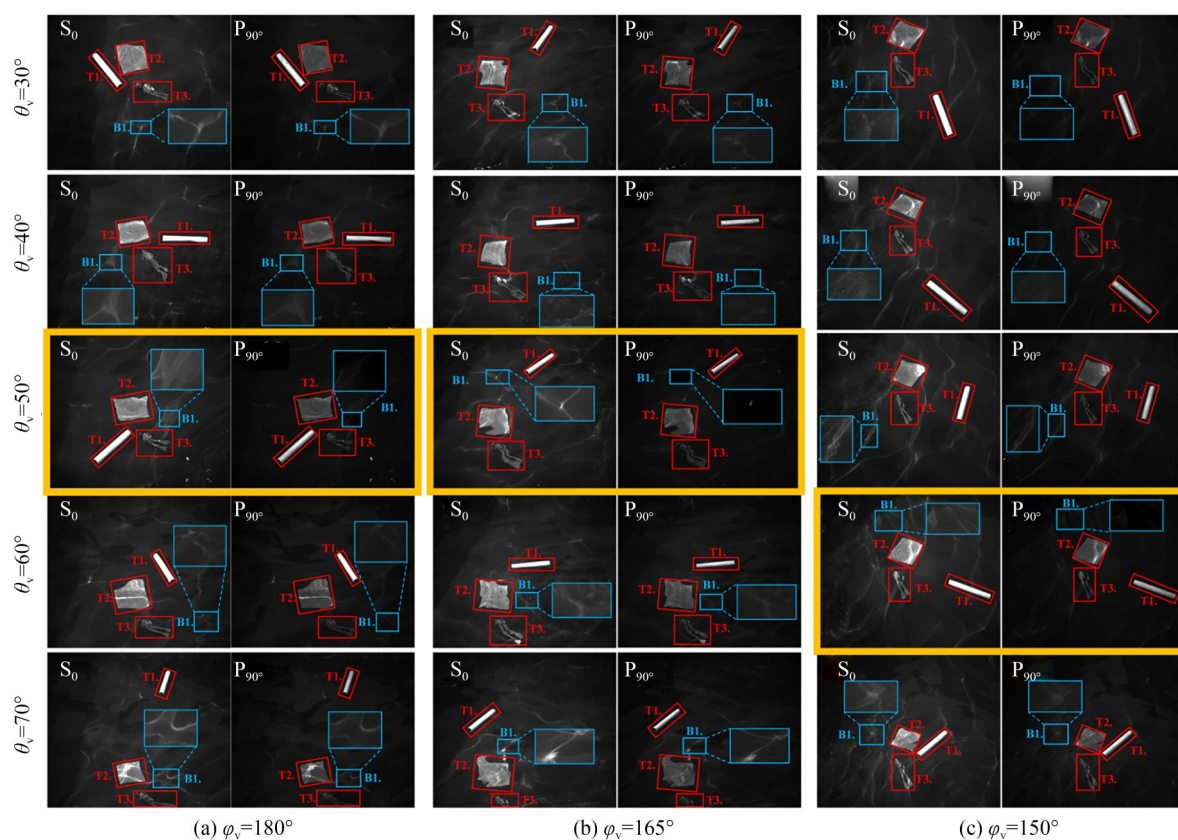


图 16 多云天气及中等风速下不同观测几何条件获得的 S_0 图像和 P_{90° 图像

Fig. 16 S_0 and P_{90° images acquired under different observation geometries in cloudy weather and moderate wind conditions

6 结 论

本文基于 Cox-Munk 粗糙海面模型, 提出了“太阳-海面-探测器”三者间的最优偏振观测角度组合估计方法, 系统分析了不同观测条件下的海面偏振反射率和偏振度分布规律, 针对相对方位角为 $150^\circ \sim 210^\circ$ 的强偏振信号获取区间, 在实际受限观测几何条件下进一步推导出, 实现海面反光抑制的最优观测角度组合关系。为验证所

提方法的适应性与实用性, 在不同天气条件下开展了外场实验, 并在不同的观测角度组合下对图像质量与目标可见性进行了对比分析。实验结果与仿真预测结果一致, 验证了本文方法在复杂海洋观测条件下的稳定性。在方位角不受限制的情况下, 将方位角优先设定为 180° , 并调节探测器的观测天顶角, 使其与太阳入射天顶角之和接近两倍布儒斯特角, 以最大化获取偏振信号。当方位角受限但探测器的观测天顶角可以自由

调整时,根据具体方位角条件,调整观测天顶角至相应的最优角度 $\theta_v^{\max}$,以获得最优的偏振信号。若探测器的观测天顶角无法自由调整时,可通过等待太阳入射天顶角至 $\theta_s^{\max}$,或调整主动照明方向的入射角至 $\theta_s^{\max}$,以达到最优偏振探测条件。

本文提出的最优偏振探测角度估计方法为复杂海洋环境下的目标探测提供了技术支持,同时为有效抑制海面耀光研究奠定了理论依据。为了进一步提升探测精度,后续研究将考虑更多的环境因素(如海面温湿度及海盐浓度等)来优

化仿真模型,从而提高数据的准确性和可靠性。

作者贡献声明:

刘鹏:理论完善,论文修订与润色;

倪新宇:论文撰写,理论分析,实验设计与数据分析;

段锦:项目管理与资金支持,论文指导与审阅;

王佳林:论文构思,算法实现,创新性与实用性评估;

董克晗:数据采集与处理。

参考文献:

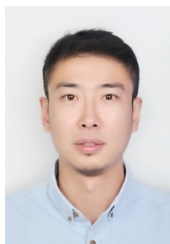
- [1] 宋明珠,郭蓉,李立洲,等.基于偏振特征重构的海面耀光抑制方法研究[J].中国光学(中英文),2024,17(6):1297-1306.
SONG M ZH, GUO R, LI L ZH, *et al.* Sea surface glint suppression method based on polarization feature reconstruction[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(6): 1297-1306. (in Chinese)
- [2] 陈卫,孙晓兵,乔延利,等.海面耀光背景下的目标偏振检测[J].红外与激光工程,2017,46(S1):69-74.
CHEN W, SUN X B, QIAO Y L, *et al.* Polarization detection of marine targets covered in glint[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(S1): 69-74. (in Chinese)
- [3] WANG J L, DUAN J, XIE G F, *et al.* Sea surface target image enhancement method based on separable reflection and refraction [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 112012.
- [4] 张聪立,周俊焯,纵园,等.基于偏振信息的海面太阳耀光抑制[J].光学精密工程,2023,31(15):2181-2192.
ZHANG C L, ZHOU J ZH, ZONG Y, *et al.* Sun glint suppression from sea surface based on polarization information[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(15): 2181-2192. (in Chinese)
- [5] 王玉坤,徐淑卿,贾娜.海面耀光的偏振特性预估与抑制方法[J].光学技术,2025,51(1):101-107.
WANG Y K, XU SH Q, JIA N. Polarized characteristic and suppression method of sea surface glint [J]. *Optical Technique*, 2025, 51(1): 101-107. (in Chinese)
- [6] 段锦,方瑞森,陈广秋,等.基于偏振特征区域分解的耀光抑制方法[J].光学精密工程,2024,32(10):1456-1469.
DUAN J, FANG R S, CHEN G Q, *et al.* A method for suppressing glare based on polarization feature region decomposition[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(10): 1456-1469. (in Chinese)
- [7] 叶松,屈文学,李树,等.基于偏振时域特性的海面耀光抑制方法[J].光学学报,2021,41(10):1001003.
YE S, QU W X, LI SH, *et al.* Sea surface glint-suppression method based on the polarization time-domain characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(10): 1001003. (in Chinese)
- [8] 梁健,巨海娟,张文飞,等.偏振光学成像去雾技术综述[J].光学学报,2017,37(4):9-21.
LIANG J, JU H J, ZHANG W F, *et al.* Review of optical polarimetric dehazing technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 9-21. (in Chinese)
- [9] 张伟,战俊彤,张肃,等.粗糙水面环境溢油目标多角度可见光偏振特性[J].光学学报,2023,43(6):139-151.
ZHANG W, ZHAN J T, ZHANG S, *et al.* Polarization characteristics of multi-angle visible light of oil spill target in rough water environment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(6): 139-151. (in Chinese)
- [10] 栾晓宁,廖玉昆,糕堃,等.面向水面溢油检测的多角度偏振反射特性仿真研究[J].光学学报,2023,43(6):239-247.
LUAN X N, LIAO Y K, ZHUO K, *et al.* Simu-

- lation investigation of multi-angle polarization reflection characteristics for marine oil spill detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(6): 239-247. (in Chinese)
- [11] 陆敏, 王治乐, 高萍萍, 等. 海面油膜的偏振反射特性仿真实验[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(4): 249-255.
- LU M, WANG ZH L, GAO P P, *et al.* Simulation experiment of polarization reflection characteristics of the oil slick[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(4): 249-255. (in Chinese)
- [12] REN K, LV Y Y, GU G H, *et al.* Calculation method of multiangle polarization measurement for oil spill detection [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(12): 3317-3324.
- [13] 李英超, 刘嘉楠, 史浩东. 基于偏振特性的海洋溢油油种识别研究[J]. *光子学报*, 2021, 50(7): 137-146.
- LI Y CH, LIU J N, SHI H D. Research on identification of marine oil spill based on polarization characteristics [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(7): 137-146. (in Chinese)
- [14] HIERONYMI M. Polarized reflectance and transmittance distribution functions of the ocean surface [J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): A1045-A1068.
- [15] GYAPRASAD, KANSERI B. Degree and state of polarization control using Brewster's law in a nematic liquid crystal[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 157: 108705.
- [16] WOLFF L B, BOULT T E. Constraining object features using a polarization reflectance model[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 13(7): 635-657.
- [17] 陈兴峰, 顾行发, 程天海, 等. 真实海洋表面的太阳耀光偏振辐射特性仿真与分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(6): 1648-1653.
- CHEN X F, GU X F, CHENG T H, *et al.* Simulation and analysis of polarization characteristics for real sea surface sunglint [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(6): 1648-1653. (in Chinese)
- [18] FU Q, LIU X W, WANG L Y, *et al.* Analysis of target surface polarization characteristics and inversion of complex refractive index based on three-component model optimization[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 162: 109225.
- [19] GANGULY D, ALI S M, RAMAN M. Sun glint characterization in an ocean color sensor with different payload tilts and correction algorithms for glint: a study using oceansat-II ocean colour monitor[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2021, 49(12): 3013-3025.
- [20] TAKASHIMA T, MASUDA K. Degree of radiance and polarization of the upwelling radiation from an atmosphere-ocean system[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(15): 2423-2429.
- [21] KAWATA Y, YAMAZAKI A. Multiple scattering analysis of airborne POLDER image data over the sea[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(1): 51-60.
- [22] COX C, MUNK W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the Sun's glitter[J]. *Journal of the Optical Society of America* (1917-1983), 1954, 44(11): 838.
- [23] 王佳林, 段锦, 付强, 等. 基于 Mueller 矩阵的偏振抑制反光方法[J]. *光学学报*, 2023, 43(20): 162-174.
- WANG J L, DUAN J, FU Q, *et al.* Polarization suppression reflection method based on mueller matrix[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(20): 162-174. (in Chinese)
- [24] YANG X, CHENG C, DUAN J, *et al.* Polarized object surface reconstruction algorithm based on RU-GAN network [J]. *Sensors*, 2023, 23(7): 3638.
- [25] ZHAO H J, JI Z, ZHANG Y, *et al.* Mid-infrared imaging system based on polarizers for detecting marine targets covered in Sun glint[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16396-16409.
- [26] 邓宇, 付强, 张肃, 等. 基于偏振检测技术的海面太阳耀光抑制方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(20): 57-65.
- DENG Y, FU Q, ZHANG S, *et al.* Method of suppressing sea surface solar flare based on polarization detection technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(20): 57-65. (in Chinese)

- [27] 杨梅梅,赵佩瑶,冯斌,等. 偏振滤光结合多项式拟合的水面太阳耀光抑制方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(24): 125-136.
- YANG M M, ZHAO P Y, FENG B, *et al.* Wa-

ter surface Sun glint suppression method based on polarization filtering and polynomial fitting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58 (24) : 125-136. (in Chinese)

作者简介:



刘 鹏(1982—),男,博士,博士生导师,2015年于长春理工大学获得博士学位,主要研究方向为军用光电装备测试技术、光电检测与智能信息处理、视频图像处理等技术。E-mail: louis585760@126.com

通讯作者:



段 锦(1971—),男,吉林长春人,博士,博士生导师,2004年于吉林大学获得博士学位,主要从事偏振成像探测、图像处理与模式识别、数字光学环境仿真研究。E-mail: duanjin@vip.sina.com



倪新宇(2001—),女,吉林长春人,硕士研究生,2023年于吉林师范大学获得学士学位,主要从事偏振图像处理及偏振特性分析研究。E-mail: 1052680812@qq.com.