

舰船气泡尾流散射光斯托克斯特征研究

田 晶, 白光富, 江 阳

(贵州大学 物理学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要: 针对当前探测器距离尾流较近时目标回波信号淹没在水体散射信号中, 以及对低密度、微小气泡群较难探测的问题, 通过对尾流散射光的斯托克斯参量特征进行研究, 可全面反映光经过尾流散射后的完全偏振光、部分偏振光全非偏振的特征。仿真计算了尾流中微小气泡在不同半径、不同散射角条件下斯托克斯散射矩阵的变化, 并对比了水分子的散射特征, 研究分析发现: (1) 不同大小尾流微气泡的斯托克斯散射特征既有相似之处, 也有一定的差异; (2) 微气泡的散射参量, 与水分子相对应参量比较, 差异更加明显, 水分子的散射参量不存在震荡现象且散射特征稳定。利用斯托克斯参量进行光尾流特征分析, 信息量较全面, 光散射特征差异明显, 证实了其用于尾流信号分析、探测的可行性。

关键词: 尾流; 偏振; 散射

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0206003

Research of scattering Stokes parameters for ship wake bubbles

Tian Jing, Bai Guangfu, Jiang Yang

(Department of Physics, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Aiming at the problem that the target signal may be submerged in the water scattering signal when the detector is near the ship wake, as well as the difficulty of detecting the low density and small bubbles, based on our previous researches, a method was proposed by comparing and analyzing the differences of the polarization effect of scattering characteristics when laser irradiated the micro-bubbles, water, we could distinguish bubble signals, as well as by measuring the Stokes parameters of scattered light, this can fully extract the information of ship wake field's features. The scattering of the Stokes scattering matrix under different radius and scattering angles was calculated and compared with the scattering characteristics of water molecules. The results show that: (1) Stokes scattering characteristics of wake waves with different sizes have similarities and differences. (2) The scattering parameters of microbubbles are more obvious than those of water molecules. There is no oscillatory phenomenon in the scattering parameters of water molecules and the scattering characteristics are stable. Using the Stokes parameter to analyze the characteristics of ship wake, the information volume is more comprehensive, and the light scattering characteristics are obviously different, which appear to be useful for the analysis and detection of wake signal.

Key words: ship wake; polarization; scattering

收稿日期: 2017-08-08; 修订日期: 2017-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(61650403); 贵州省科技合作计划(黔科合 LH 字(2016)7426 号);

贵州省社会发展公关项目((2013)3125); 贵州省光子科学与技术创新人才团队((2015)4017)

作者简介: 田晶(1986-), 女, 副教授, 博士, 主要从事激光水下目标识别与探测技术方面研究。Email: 416197193@qq.com

0 引言

在水中舰船隐身与水下航行体反隐身的博弈中,传统的声学探测方法已渐渐失去优势,研究舰船目标探测和航行体追踪的新方法迫在眉睫,相对于传统的声学探测方法,舰船尾流光学探测方法具有很高的应用前景和实用价值。因光波波长远小于声波,故光场能感知微小场扰动,即光对尾流气泡场及涡流或紊流更为敏锐,从而能更有效探测舰船尾流场及航行体涡流场的存在。这意味光尾流比声尾流有更远的尾流自导作用距离,而且很难被干扰和欺骗,这些优点使其有很好的发展前途。

激光具有单色性好、方向性好、相干性好、能量高等优点^[1-2]。激光束经过水体后,由于散射的存在,其光学性质会发生变化。这为利用光学方法检测舰船尾流提供了可能。激光的散射可以分为前向散射和后向散射。对于光学尾流检测而言,前向散射容易实现,但实用性较差;后向散射更适合应用,但难以实现,无论前向探测还是后向探测,信号提取与分离是始终困扰在这个领域的难题。传统对激光进行抗干扰的方法如的距离选通法^[3-4]、窄带滤波法^[5]等,总是收效甚微,因为这些方法不能将环境噪声或水体自身散射对激光回波信号产生的干扰大幅度滤除。

为了获得更高质量的尾流散射信号,前期研究发现利用激光的偏振效应对尾流进行探测是较为可行方式^[6-7]。因此,研究如何更有效利用激光对微、纳米粒子的敏感特性,及其有别于声波的横波性质以提高尾流气泡的尺度分辨率,实现尾流远距离追踪与探测,不仅具有一定的科学意义,也有很强的现实需求。文中通过对比激光经尾流不同尺度微小气泡散射后光的斯托克斯特征分布,以及水体散射的光场进行对比研究,找出差异性特征,从而达到对尾流信号进行探测提取的目的:利用激光经过尾流气泡群和水体散射后偏振态的差异性实现对尾流信号的与水体散射信号特征的区分,可利用测量斯托克斯参量的方法最终实现对远距离尾流信号的探测,文章主要以米氏散射理论(远距离尾流尺度近似 $10^{-6} \sim 1.6 \times 10^{-5} \text{ m}$)为基础,理论计算和仿真了单个微小气泡斯托克斯散射矩阵随散射角的分布特性,同时利用该模型计算分析不同尺度气泡、水分子(瑞利散射)

斯托克斯散射矩阵的空间分布,为进一步进行实验探测尾流气泡散射光特征信号提供理论依据。

1 理论基础

激光入射尾流时,尾流中气泡和湍流水分子、静水水体作为散射中心散射光波,使光波传输方向以及激光的散射光场发生了变化,如偏振态、偏振强度分量或其它散射特征,通过分析、测量激光散射光场变化特征,可实现对尾流气泡、水体信号或湍流回波特征的测量。假设单色偏振光(激光)波沿(尾流方向)+z 方向入射,偏振光可以认为其由 x 轴(水平轴)和轴(垂直轴)方向振动的叠加,而且电场矢量 \vec{E} 随时间 t 做正弦变化,这样的单色平面波的电场矢量可以用复函数表示为^[8-9]:

$$\vec{E} = (E_x \hat{x} + E_y \hat{y}) \exp[i(kz - \omega t)] \quad (1)$$

$$E_x = A_x e^{-i\delta_x}, E_y = A_y e^{-i\delta_y} \quad (2)$$

式中: \hat{x} 与 \hat{y} 分别表示单位矢量; A_x 与 A_y 分别表示 x 轴与 y 轴方向上的振幅; $\delta = \delta_x - \delta_y$ 为两个方向上分量的初相位差。沿 x 轴与 y 轴方向的两个偏振分量可表示为:

$$\begin{cases} \vec{E}_x = A_x e^{-i\delta_x} \exp(-i\omega t) \\ \vec{E}_y = A_y e^{-i\delta_y} \exp(-i\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

这两个分量的振幅比和相位差决定该偏振光的偏振态。定义光的初始参数

$$\begin{cases} I = \langle \vec{E}_x \vec{E}_x^* + \vec{E}_y \vec{E}_y^* \rangle = A_x^2 + A_y^2 \\ Q = \langle \vec{E}_x \vec{E}_x^* - \vec{E}_y \vec{E}_y^* \rangle = A_x^2 - A_y^2 \\ U = \langle \vec{E}_x \vec{E}_y^* + \vec{E}_y \vec{E}_x^* \rangle = -2A_x A_y \cos \delta \\ V = \langle \vec{E}_x \vec{E}_y^* - \vec{E}_y \vec{E}_x^* \rangle = 2A_x A_y \sin \delta \end{cases} \quad (4)$$

得到斯托克斯矢量

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: 矢量 \vec{S} 中的 I 参量描述光波的强度。 Q 、 U 和 V 描述光波的偏振态。

斯托克斯参量可全面描述光束的偏振态和光强度,斯托克斯参量是光强的时间平均值,具有强度量

纲,可以直接被探测器探测。因此通过对斯托克斯参数的测量,即可确定激光光束经水体、气泡群散射后散射前后的偏振态变化。斯托克斯参量可以用来描述平面光波本振光及经介质传播散射后偏振态 $S=[I \ Q \ U \ V]$,其中 I 参量描述光波的总强度, U 和 V 描述为线偏振光, V 为圆偏振光。

依据斯托克斯矢量定义,同时结合问题的对称性、穆勒矩阵与琼斯矩阵的关系,可以得到:

$$\vec{S}_{sca} = \begin{bmatrix} I_{sca} \\ Q_{sca} \\ U_{sca} \\ V_{sca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11}(\theta) & M_{12}(\theta) & 0 & 0 \\ M_{21}(\theta) & M_{11}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{33}(\theta) & M_{34}(\theta) \\ 0 & 0 & -M_{34}(\theta) & M_{33}(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{inc} \\ Q_{inc} \\ U_{inc} \\ V_{inc} \end{bmatrix} = M(\theta) \vec{S}_{inc} \quad (6)$$

式中: \vec{S}_{sca} 为光经气泡散射后的 Stokes 向量; \vec{S}_{inc} 为入射光的 Stokes 向量,它们之间的联系由散射矩阵 $M(\theta)$ 联系。结合公式(8)与公式(9),有:

$$M_{11}(\theta) = \frac{1}{2} (|s_1|^2 + |s_2|^2), M_{12}(\theta) = \frac{1}{2} (|s_2|^2 - |s_1|^2) \\ M_{33}(\theta) = \frac{1}{2} (s_2 s_1^* + s_1 s_2^*), M_{34}(\theta) = \frac{1}{2} (s_1 s_2^* - s_2 s_1^*) \quad (7)$$

式中: $M_{34}=M_{43}$ 、 $M_{12}=M_{21}$ 、 s_1 、 s_2 为散射振幅函数^[6]:

$$s_1(\theta) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2m+1}{m(m+1)} (\xi_m a_m + \tau_m b_m) \quad (8)$$

$$s_2(\theta) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2m+1}{m(m+1)} (\xi_m b_m + \tau_m a_m) \quad (9)$$

由上述公式可见,斯托克斯矢量矩阵完整的描述了偏振光的强度与偏振状态,通过计算和仿真光的散射矩阵可以获得气泡光散射包含强度、偏振在内的较全面偏振光散射特征,可完整反映尾流的散射信息。

海水的散射包括水本身的瑞利散射和海水中悬浮粒子引起的米氏散射及透明物质折射所引起的散射^[10]。纯水的散射被当作是一种分子散射,水分子的直径比可见光波长小几百倍,因此用瑞利散射定律^[11-12]来描述。单个水分子的散射特性可由瑞利散射理论解释,如图 1 所示,半径为 a 的水分子相对于周围介质的折射率用 m 表示,取水分子中心为坐标原点 O ,真空中波长为 λ ,强度为 I_0 的线偏振光是沿

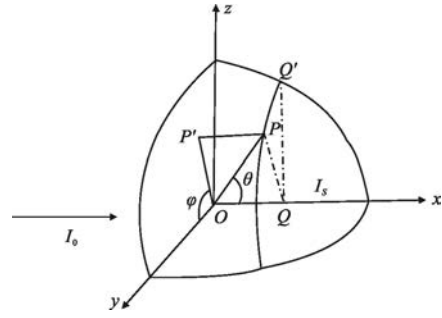


图 1 水分子的光散射模型

Fig.1 Light scattering model of water molecules

x 轴入射到水分子上的光强度, I_s 为散射光强度, 散射光 \vec{OP} 与入射光方向之间的散射角为 θ , 入射光的电矢量相对于散射面的夹角 φ 为观测角, r 是被测点 P 距离水体粒子半径 $I_{S\theta}$ 和 $I_{S\varphi}$ 分别为垂直和平行于入射面振动方向上的散射光光强。散射光的平行分量与垂直分量如下:

$$I_{S\varphi} = k^2 I_0 (\cos\varphi + \sin\varphi)^2 \quad (10)$$

$$I_{S\theta} = k^2 I_0 (\sin\varphi \cos\theta + \cos\varphi \sin\theta)^2 \quad (11)$$

$$k = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 a^3 \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \frac{1}{r} \quad (12)$$

由公式(10)、(11)可见,水分子各散射偏振分量只与散射角 θ 和探测角度 φ 有关。

2 斯托克斯散射矩阵仿真实验

结合上面理论探讨由公式(7)可以计算仿真出水中气泡的散射矩阵元随散射角的分布特性,对随机抽取的不同半径微小气泡及海水分子的四个散射矩阵元分别进行仿真,由于当舰船驶过较远距离后,尾流气泡群在尺度谱上主要以近似 $10^{-6} \sim 1.6 \times 10^{-5}$ m 小尺度、低密度气泡群为主^[6,13-14],入射激光波长为 532 nm,因此计算单个气泡散射矩阵特性时气泡半径分别随机取 10、40、80、120 μm 。其他相关参数分别选取气泡相对于海水的折射率为 0.75,海水的折射率为 1.33,海水分子尺度为水分子大小。仿真结果如图 2 所示。

图 2 仿真结果对矩阵进行了归一化,即矩阵元素 M_{11} 相对散射角为 0° 的值进行归一化,各个矩阵元素值相于与该散射角位置 M_{11} 的值进行归一化。这样,使用归一化的散射矩阵, M_{11} 表示在各个散射

角上 M_{11} 值的相对大小, 即散射光强度的相对大小分布, 其他矩阵元素表示该元素相对于 M_{11} 的相对大小, 而在各自散射角上, 这种相对于 M_{11} 的大小表示了该散射角上散射光相对于入射光偏振状态的变换, 与散射强度无关。

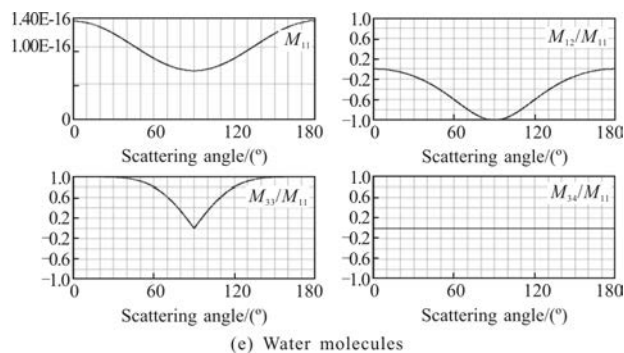
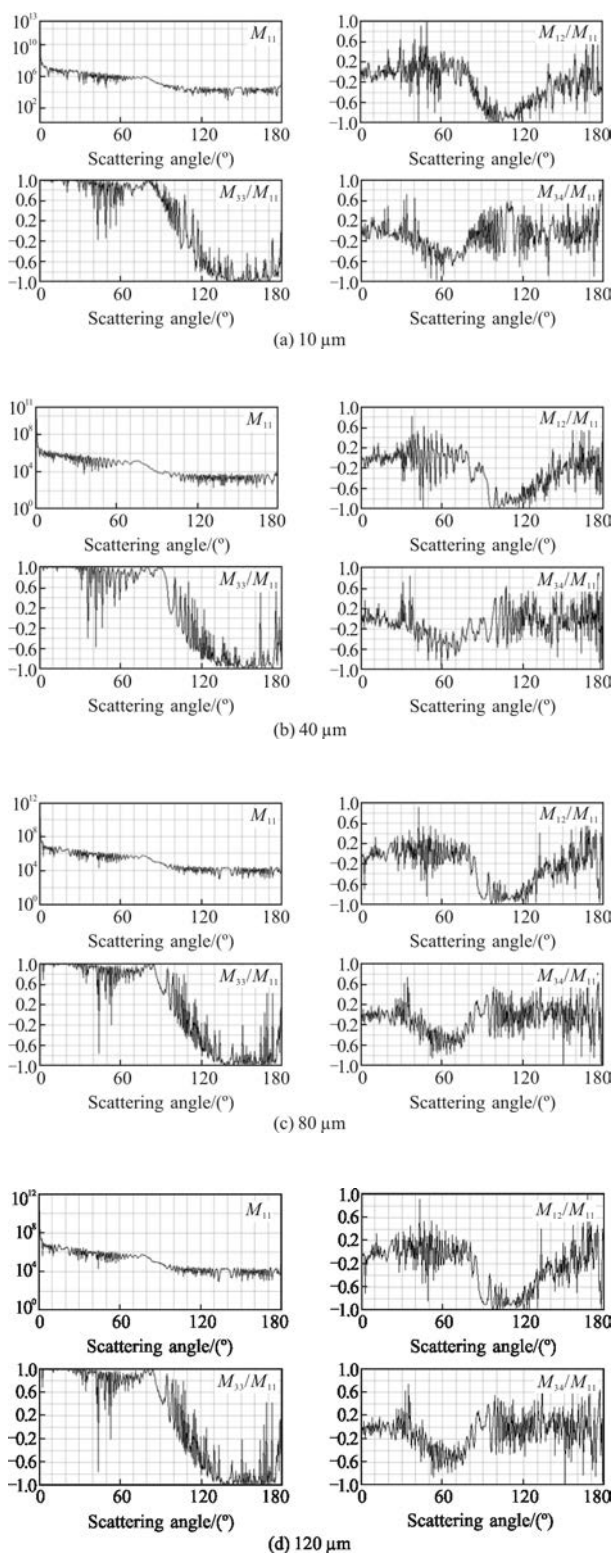


图 2 气泡以及水分子的散射矩阵元仿真图

Fig.2 Simulation diagram of scattering matrix elements for bubbles and water molecules

从结果可以看出对于不同的散射介质、不同半径的微气泡, M_{11} 、 M_{12} 、 M_{33} 、 M_{34} 四个参量的角分布各不相同, 主要体现在在相同散射角前提下, 不同半径的微气泡散射光强度不同, 其偏振分量的变化曲线也存在一定差异: (1) 对于不同半径的微气泡, M_{11} 、 M_{12} 、 M_{33} 、 M_{34} 四个参量的角分布各不相同, 不同半径的微气泡之间有一定的差异; (2) 微气泡的 M_{11} 、 M_{12} 、 M_{33} 、 M_{34} 参量, 与水分子相对应参量比较, 差异更加明显, 并且水分子的 M_{11} 、 M_{12} 、 M_{33} 、 M_{34} 参量不存在震荡现象。

3 结论

以米氏散射理论为基础, 仿真计算了单个气泡散射矩阵随散射角的分布特性, 研究表明, 不同的散射介质、不同半径的微气泡, M_{11} 、 M_{12} 、 M_{33} 、 M_{34} 四个参量的角分布各不相同, 主要体现在在相同散射角前提下, 不同半径的微气泡散射光强度不同, 其偏振分量的变化曲线也存在一定差异; 不同大小尾流微气泡的散射特征既有相似之处, 也有一定的差异; 微气泡的散射参量, 与水分子相对应参量比较, 差异更加明显, 且水分子的散射参量不存在震荡现象。利用斯托克斯参量进行光尾流特征分析, 信息量较全面, 光散射特征差异明显, 证实了其用于尾流探测的可行性。因此, 可结合前向、后向斯托克斯散射矩阵特征参量的差异性特征对微小尾流气泡进行识别, 此分析和仿真结论可以作为探测、识别舰船远距离尾流的依据。

参考文献:

[1] Zhao Yuan, Zhang Zijing, Ma Kun, et al. High sensitivity

- photon polarization laser radar system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0902001. (in Chinese)
赵远, 张子静, 马昆, 等. 高灵敏度的光子偏振激光雷达系统[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(9): 0902001.
- [2] Sun Xianming, Wan Long, Wang Haihua. Sensitivity study on lidar detection of the depolarization ratio of water clouds [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (9): 0906001. (in Chinese)
孙贤明, 万隆, 王海华. 激光雷达探测水云退偏振比的敏感性研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(9): 0906001.
- [3] Zhang Qianghui, Jin Weiqi, Qiu Su. A handheld laser range-gated imaging instrument for underwater rescue and observation[C]//Proceedings of SPIE, 2011, 8200: B1-B6.
- [4] Xu Tingfa, Su Chang, Luo Xuan, et al. Under water range gated image denoising based on gradient and wavelet transform[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 301-311. (in Chinese)
许廷发, 苏畅, 罗璇, 等. 基于梯度和小波变换的水下距离选通图像去噪[J]. 中国光学, 2016, 9(3): 301-311.
- [5] Ge Weilong, Zhang Xiaohui, Han Hongwei. Design and implementation of control system for range-gated Underwater laser imaging[C]//SPIE, 2012, 8332: 1-8.
- [6] Chen Hang, Tian Jing, Qi Qian. A signal detection method for ship wake base on laser depolarization effect [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2013, 24(8): 1563-1568. (in Chinese)
陈航, 田晶, 戚茜. 一种基于退偏效应的舰船尾流信号检测方法研究[J]. 光电子·激光, 2013, 24(8): 1563-1568.
- [7] Tian Jing, Chen Hang, Xu Wangyang. Some useful results for detecting ship wake obtained from depolarization of light scattered from micro bubbles [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2013, 31(1): 129-132. (in Chinese)
田晶, 陈航, 许望洋. 舰船尾流微气泡光偏振特性分析[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(1): 129-132.
- [8] E Yiwen, Huang Yuanyuan, Xu Xinlong, et al. Polarization sensitive terahertz measurements and applications[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 99-113. (in Chinese)
鄂轶文, 黄媛媛, 徐新龙, 等. 太赫兹偏振测量系统及其应用[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 99-113.
- [9] Naima Charhouni, Mohammed Sallaou, Abdelaziz Arbaoui. Qualification of three analytical wake models [J]. *J Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 2016, 6: 205-211.
- [10] Xu Qiyang, Yang Kuntao, Wang Xinbing, et al. Blue Green Lidar Ocean Survey [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 36-58. (in Chinese)
徐敬阳, 杨坤涛, 王新兵, 等. 蓝绿激光雷达海洋探测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 36-58.
- [11] Quinn J J, Finch J A. On the origin of bi-modal bubble size distributions in the absence of frother [J]. *Minerals Engineering*, 2012, 36-38: 237-24.
- [12] Maganga F, Germain G, King J, et al. Experimental characterisation of flow effects on marine current turbine behavior and on its wake properties [J]. *Renewable Power Generation Let*, 2010, 4(6): 498-509.
- [13] Zhang Lei, Wang Yanjie, Sun Honghai, et al. Adaptive scale object tracking with kernelized correlation filters [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24 (2): 449-459. (in Chinese)
张雷, 王延杰, 孙宏海, 等. 采用核相关滤波器的自适应尺度目标跟踪[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 449-459.
- [14] Zhang Xusheng, Guo Liang, Hu Richa, et al. Heat and mass transfer characteristics of submarine cold-thermal wake in the infrared detection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 107-114. (in Chinese)
张旭升, 郭亮, 胡日查, 等. 红外探测中潜艇冷热尾流的传热传质特性[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 107-114.