

# 舰船尾流气泡多重散射偏振特性研究

周宁, 王江安, 梁善勇, 吴荣华

(海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 舰船尾流气泡的多次散射效应对光尾流探测领域的研究具有重要意义。针对水中气泡多次散射对后向散射光强以及偏振度的影响规律问题, 基于矢量 Monte Carlo 方法, 采用欧拉矢量法对光子在水中气泡后向散射偏振态进行跟踪, 对比分析了线偏振、圆偏振激光入射情况下, 不同散射次数回波信号在强度和偏振度特性上的差异性, 验证了欧拉矢量法用于光尾流探测仿真领域的可行性。

**关键词:** 多次散射; 后向散射; 偏振度; 蒙特卡罗

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2013.06.007

## Multiple scattering polarization characteristics of bubble based on Monte Carlo method

ZHOU Ning, WANG Jiang-an, LIANG Shan-yong, WU Rong-hua

(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Multiple scattering effect about Ship wake bubble is important for optical wake detection. Aiming at the effect of multiple bubble scattering on backscattering light intensity and degree of polarization, the polarization state of the photon was tracked by Euler vector method. Under the incident conditions of linearly polarized light and circularly polarized light, the characteristics difference was analyzed, which the different echo signals produce in the backward scattering light intensity and the degree of polarization, and the feasibility that the Euler vector method is used to optical wake of detection field is verified.

**Key words:** multiple scattering; back-scattering; degree of polarization; Monte Carlo

### 1 引言

舰船在航行过程中, 由于螺旋桨搅动产生的空化现象、海面波浪的翻卷、破碎, 以及从吃水线部分卷入的大量空气, 在舰船的尾部形成了一条含有大量气泡的气幕带, 这就是常说的尾流<sup>[1]</sup>。尾流中的气泡群由不同半径的气泡组成, 气泡密度与深度和时间相关<sup>[2]</sup>。舰船尾流中气泡的存在不仅能够改变声波的传输特性, 对于激光在海水中的传输也同样具有散射和吸收作用, 入射的偏振光被水分子散射后偏振态会发生改变, 偏振态的变化随着激光传输距离的增加而增大<sup>[3]</sup>。由于激光的超短波特性和传播介质变化的感知比声波灵敏得多, 相对声波而言, 有望实现更远距离的探测。

本文以线偏振光与圆偏振光后向散射光强与偏振度为出发点, 利用欧拉矢量法对光子的偏振态进行追踪, 进而采用 Monte Carlo 仿真方法对线偏振光与圆偏振光入射到多层多分散光传输模型<sup>[4]</sup>中, 在光子的不同散射次数, 不同气泡半径条件下对线、圆偏振光后向散射光强与线偏振度(DOLP)、圆偏振度(DOCP)进行对比分析。

### 2 欧拉矢量法概述

Bartel<sup>[5]</sup>等在光子偏振态问题的求解中首先提

基金项目: 预研基金项目(No. 9140A26030110JB11)资助。

作者简介: 周宁(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事水下光电探测方面的研究。E-mail: zhouning555@126.com

收稿日期: 2012-12-11

出了欧拉矢量法。后来,该方法被广泛应用于生物医学、皮肤病探测等诸多领域<sup>[6]</sup>。本文基于该方法对光子在水下激光传输过程中光子的偏振态进行追踪。

计算一个光子到达边界时,光子的偏振参考系随时按一个预定的顺序来跟踪每个单位旋转角和散射角的方位,定义三个旋转矢量  $\nu, u$  和  $w$ 。 $w$  是在  $\nu$  和  $u$  的基础上引申出来的单位向量,有<sup>[6]</sup>:

$$w = \nu \times u [\partial\Psi] \quad (1)$$

这种方法变换的单位矢量是直观的,易于实现。光子与介质相互作用的过程中需要不断地更新参考平面和对应的斯托克斯矢量。

### 2.1 欧拉矢量法两种旋转方式

欧拉矢量法采用两种旋转的方式,以下依次进行介绍,如图1所示<sup>[6]</sup>:图1(a)中,角度  $\beta$  是沿  $oz$  反向看去,坐标系  $uvw$  沿  $ov$  轴顺时针旋转的角度,矢量  $\nu$  保持不变。图1(b)中, $\nu, u$  和  $w$  三个旋转矢量绕轴线  $u$  进行旋转,旋转角度为  $\alpha$ ,矢量  $u$  保持不变。图1中  $\nu_1, u_1$  和  $w_1$  为旋转后更新矢量。

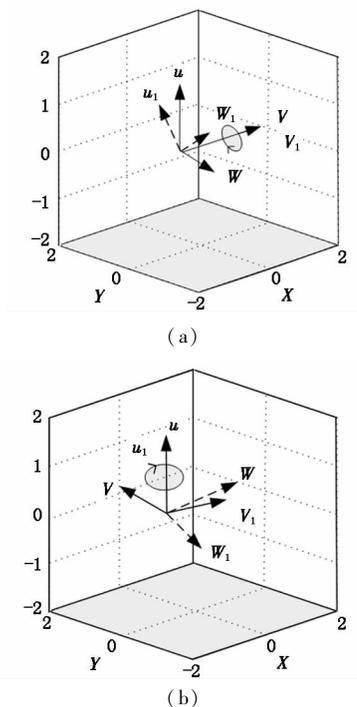


图1 欧拉矢量法两种旋转方式  
Fig.1 euler vector of two rotary

### 2.2 欧拉矢量法追踪光子的偏振态

(1)如图2(a)所示<sup>[6]</sup>,以角度  $\theta$  围绕着轴  $u$  进行旋转, $O$  为坐标原点,矢量  $\nu$  垂直于  $Z$ 。这种转动会使  $\nu$  平行于  $Z$  轴所在子午面内的平面  $wOu$ ,此平面为光子参考系所在平面。散射发生之前定义的

光子斯托克斯矢量在子午面  $wOu$  上,然后光子的斯托克斯矢量通过旋转矩阵变换到散射后的平面  $w_2Ou_2$  上,在  $w_2Ou_2$  平面上根据散射体的穆勒矩阵求出新的斯托克斯矢量,斯托克斯矢量求法详见文献<sup>[7]</sup>。 $\nu$  与  $u$  的表示如下:

$$\nu = [\nu_x, \nu_y, \nu_z] \quad (2)$$

$$u = [u_x, u_y, u_z] \quad (3)$$

子午面内 Stokes 矢量旋转到所需的角由下式给出:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{当 } \nu_z = 0, u_z = 0 \text{ 时, } \theta = 0 \\ \text{在其他情况下, } \theta = \tan^{-1} \left( \frac{\nu_z}{-w_z} \right) \end{array} \right\} \quad (4)$$

矢量  $\nu$  和  $u$  定义 Stokes 矢量参考平面,单位向量  $u$  表示光子的传播方向。其中,  $\nu_x, \nu_y$  和  $\nu_z$  分别为单位向量  $\nu$  与  $X, Y$  和  $Z$  轴正方向夹角的余弦;  $u_x, u_y$  和  $u_z$  为单位向量  $u$  与  $X, Y$  和  $Z$  轴正方向夹角的余弦。

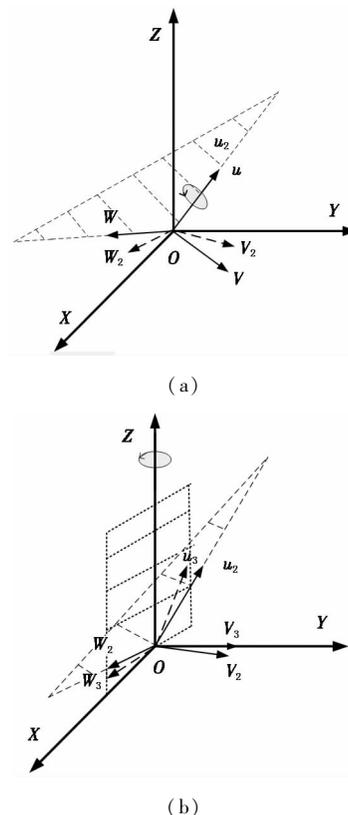


图2 偏振态的追踪

Fig.2 tracking method of polarization states

(2)如图2(b)所示<sup>[6]</sup>,以角  $\phi$  绕  $Z$  轴旋转,矢量  $u_2, \nu_2$  和  $w_2$  三个旋转矢量都执行这种旋转方式,  $\nu_3$  与  $Y$  共轴。在旋转过程中,图2(a)和图2(b)的旋转方式略有不同。角  $\phi$  表示如下:

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{u_y}{u_x} \right) \tag{5}$$

因此最终的斯托克斯矢量是:

$$S_f = R(\theta)R(\phi)S \tag{6}$$

式中,  $R(\theta)$ ,  $R(\phi)$  都为旋转矩阵;  $S$  为定义的斯托克斯矢量。

(3) 最终, 旋转到  $w_3Oz_3$  和  $XOZ$  共面, 此面为最终的光子散射平面。

### 3 实验仿真结果的对比分析

#### 3.1 欧拉矢量法蒙特卡罗仿真的实现

本文利用欧拉矢量法对光的偏振态进行追踪, 对水中气泡幕的不同情况进行 Monte Carlo 仿真。其中, 光子的接收时间间隔为 2 ns, 光子数 100000 个, 光子散射次数小于等于 30 次, 环境水层宽度为 10 m, 含气泡水层宽度 15 m, 气泡半径 5  $\mu\text{m}$ , 气泡的密度取  $5 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ , 并采用多层多分散光传输模型, 得到了线偏振光后向散射光强与线偏振度表示图, 与文献一致, 如图 3 所示。

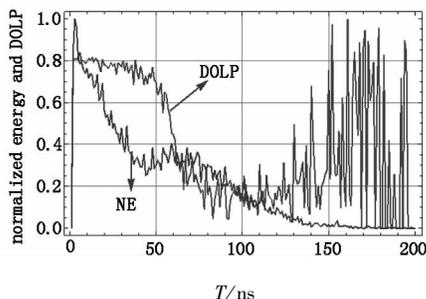


图3 线偏振光后向散射光强与线偏振度  
Fig.3 normalized energy and DOLP

从而证明了韦<sup>[4]</sup>提出的含气泡海水光传输模型和矢量蒙特卡罗仿真以及本文提出的欧拉矢量法追踪光的偏振态的正确性; 验证了 Xia 等人提出的光强信号的“双尖峰”特性<sup>[8]</sup>以及韦提出的线偏振度信号的“双下降速率”。在此基础之上以圆偏振光入射进行蒙特卡罗仿真, 圆偏振光后向散射光强与圆偏振度, 如图 4 所示。

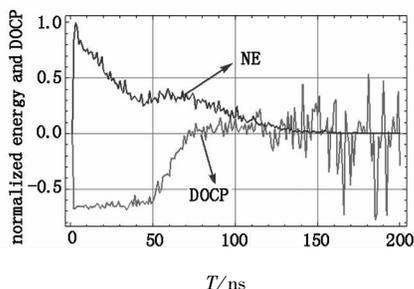


图4 圆偏振光后向散射光强与圆偏振度  
Fig.4 normalized energy and DOCP

图 3、图 4 对比可以看出, 圆偏光的偏振度小于线偏振光的偏振度, 并体现了“双上升速率”; 两种偏振光光强信号基本一致, 都体现了“双尖峰”特性。

#### 3.2 散射次数偏振光强度的变化

在偏振光入射到水中, 会发生不同程度的后向散射, 后向散射光绝大多数都经历多次散射, 只有少部分进行单次或少数次散射。

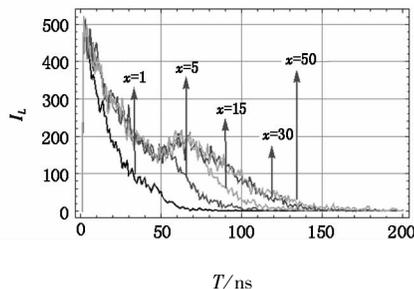


图5 线偏振态后向散射光强  $I_L$   
Fig.5 the backscattering light intensity of the linearly polarized state

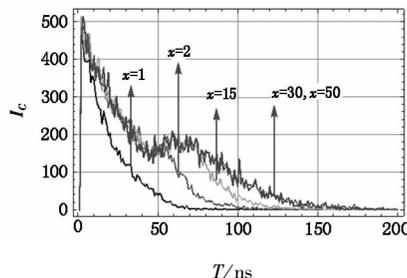


图6 圆偏振态后向散射光强  $I_C$   
Fig.6 the backscattering light intensity of the circularly polarized state

图 5、图 6 分别表示线偏振态和圆偏振态的光入射到水下气泡幕中, 不同散射次数对偏振光后向散射光强度的变化曲线, 图中曲线表示散射次数分别为 1 次, 5 次, 15 次, 30 次, 50 次的总光强。本文以含气泡的环境水层为散射粒子场。随着散射次数的增加偏振光的退偏现象逐渐增强, 从而使偏振光后向散射光强度越来越弱。图 5、图 6 中: ①假定偏振光在气泡幕中只进行 1 次散射, 随着接收时间增加光子的能量越来越少, 相对的光强信号会持续变弱; ②偏振光进行 2 次散射, 已经出现了光强曲线的“双尖峰”特性, 同时发现圆偏振度信号也具有这种特性; ③随着散射次数的增加, 散射次数为 30 次时, 偏振光的后向散射光强达到最理想状态, “双尖峰”特性也很清晰地呈现出来。同时可以在图中看出环境水层后向散射和

水中气泡幕后向散射所造成的两个很明显的尖峰;④线偏振光入射时光子散射次数为30次和50次时,偏振光强度曲线还可以看出有微弱的能量衰减变化;而圆偏振光强度曲线基本上已经重合,光子的能量衰减已经非常微弱。由此看来能量衰减的贡献大部分是由于散射次数为前30次的后向散射所造成的。

### 3.3 线偏振度探测与圆偏振度探测的对比分析

以下利用线偏振光与圆偏振光分别入射水中,进行一次或多次散射仿真,我们现在取前1次、5次、15次、25次、50次散射总偏振度信号进行统计,对线偏振光与圆偏振光入射后的偏振度变化进行对比分析。如图7所示。

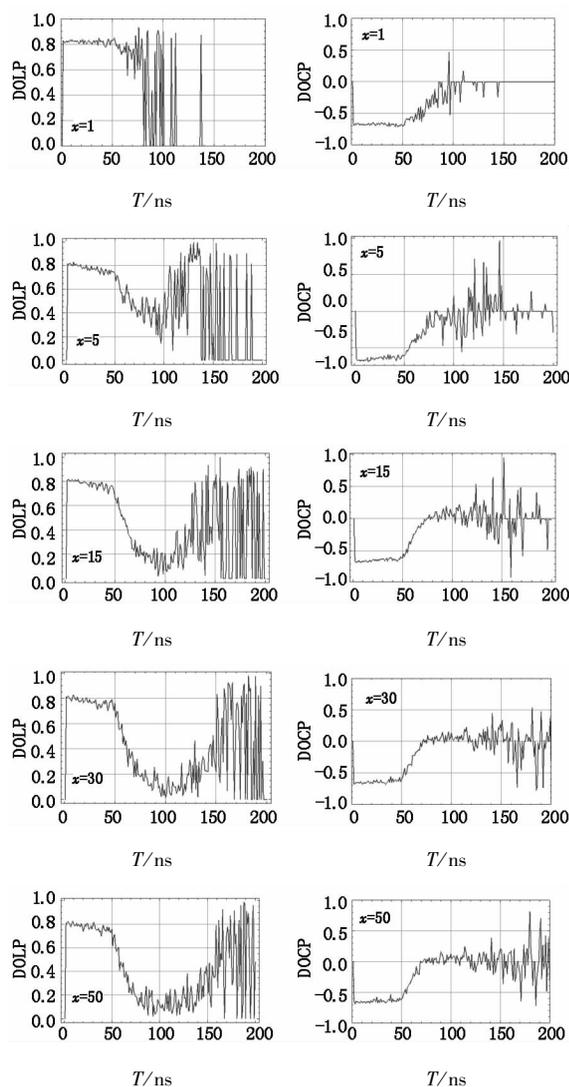


图7 1次、5次、15次、25次、50次  
散射总线、圆偏振度信号

Fig.7 the circular polarization and linear  
polarization degree signal of the  
number of different scattering

从图7中看出,在同一环境条件下,同一时间节点下,线偏振度要大于圆偏振度。①线偏振光和圆偏振光在散射次数小于30次时,偏振度有明显的变化;②在散射次数为15~30次时,125~150 ns之间可以明显的看出线偏振度持续变小,圆偏振度在125~150 ns也在变小,但在150~160 ns之间有明显的增强趋势;③在散射次数为30次时,线、圆偏振度曲线达到最佳;④当散射次数大于30次时,偏振度的变化基本上趋于稳定。随着散射次数的增加,圆偏振度坐标轴的正负方向上都有很明显的偏振度变化。

## 4 结论

利用欧拉矢量蒙特卡罗方法,分析了线偏振光与圆偏振光入射到多层多分散模型中的气泡多次散射偏振特性。验证了欧拉矢量法追踪光子偏振态的可行性。仿真结果表明在圆偏振光入射下光强信号具有“双尖峰”特性和偏振度信号的“双上升速率”特性。同一时间节点下,线偏振度要大于圆偏振度。散射次数,对线、圆偏振光光强信号和偏振度信号影响都比较明显;偏振光的特性对后向散射光强影响不大,但对偏振度信号有一定得影响作用,并且圆偏振度的波动性比较大。

## 参考文献:

- [1] Cao Jing, Kang Ying, Jiang Xiaoqin, et al. An overview in the research of the optical properties of air bubbles in the wake [J]. Ship Science and Technology, 2005, 27(6): 5-8. (in Chinese)  
曹静,康颖,蒋小勤,等. 气泡尾流光学特性研究的发展评述[J]. 舰船科学技术, 2005, 27(6): 5-8.
- [2] Wang Xiangwei, Zhou Tianhua, Chen Weibiao. Study on laser backscattering properties by ship wake [J]. Acta Optica Sinic, 2010, 30(1): 14-18. (in Chinese)  
王向伟,周田华,陈卫标. 舰船尾流激光后向散射特性研究[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 14-18.
- [3] Cui Zhun. Research on polarization technology in the underwater laser communication [J]. Journal of Telemetry Tracking and Command, 2008, 29(6): 63-67. (in Chinese)  
崔准. 水下激光通信中偏振技术研究[J]. 遥测遥控, 2008, 29(6): 63-67.
- [4] Wei Wentao, Wang Jiangan, Ma Zhiguo, et al. Detection method for disant wake with microbubbles by degree of linear polarization of backscattering [J]. Infrared and La-

- ser Engineering, 2012, 41(6):1485 - 1489. (in Chinese)
- 韦文涛, 王江安, 马治国, 等. 远场微气泡尾流的后向散射线偏振度探测法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6):1485 - 1489.
- [5] Bartel S, Hielscher A H. Monte carlo simulations of the diffuse backscattering mueller matrix for highly scattering media[J]. Applied Optics, 2000, 39(10):1580 - 1588.
- [6] Ramella-Roman J, Prah S, Jacques S. Three monte carlo programs of polarized light transport into scattering media: part I [J]. Opt. Express, 2005, 13 ( 12 ): 4420 - 4438.
- [7] Witt A N. Multiple scattering in reflection nebulae. I-A monte carlo approach. [J]. Astrophysical Journal Supplement Series, 1977, 35:1 - 6.
- [8] Xia Min, Yang Kecheng, Zhang Xiaohui, et al. Monte carlo simulation of backscattering signal from bubbles under water[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2006, 8(3):350 - 354.