

·激光技术·

激光海水气泡幕偏振特性分析

周 宁, 王江安, 梁善勇, 张征一

(海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 针对不同环境条件下海水中的气泡幕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 方法对整个模型进行仿真。在仿真过程中, 充分考虑光子在气泡幕中的运动过程, 对比分析了圆偏振光入射不同气泡半径、不同气泡密度和不同气泡幕宽度以及线偏光不同角度入射下, 回波信号在强度和偏振度特性上的差异性; 同时验证了激光海水气泡幕偏振探测法用于激光通信探测领域的可行性。

关键词: 气泡幕; 蒙特卡罗; 圆偏振光; 偏振度

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-01-0009-05

Multiple Scattering Polarization Characteristics of Bubble Population

ZHOU Ning, WANG Jiang-an, LIANG Shan-yong, ZHANG Zheng-yi

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

Abstract: Aiming at the polarized light effect of different environment bubble group is degree of polarization and backscattering light intensity, the simulation model using Monte Carlo method is built. In the simulation process, the motion process of photo in the group of bubble is fully considered. The difference of the characteristics of the backward scattering light intensity and the degree of polarization are compared and analyzed when the polarized light incident into the water in different bubble radius, bubble density and the width of bubbles. The feasibility of water bubbles in laser incident polarization detection method used in optical communication detection field is verified and the application importance in this area is presented.

Key words: bubble population; Monte Carlo; circularly polarized light; degree of polarization

舰艇在航行过程中由于自身动力系统的原因, 会在水中制造出大量的气泡, 在水面形成气泡幕^[1]。光在海水的传输过程中, 与水分子和气泡发生无规律的碰撞运动, 会发生一次、两次或多次散射^[2], 同时光的光强、偏振态和传播方向都会发生变化。此外光在水中传输会发生明显的退偏现象, 退偏的状态会由于水中环境的不同发生不同的变化, 同时随着传输距离的增加, 退偏的状态也会随着传输距离的增加而加强^[3, 4, 5]。国外对于光探测主要有 phase-Doppler anemometry 法^[6]和 PIV 法^[7], 利用光的偏振特性具有探测距离远、受海洋环境影响小、对抗能力强、具

备反潜功能等特点^[8]; 同时对激光海水气泡幕的偏振特性进行仿真实验研究, 研究光的偏振特征, 有助于光尾流偏振探测发展。利用矢量蒙特卡罗的方法对激光海水气泡幕偏振理论模型进行仿真, 重点研究偏振光的散射光强度信号和退偏振信号的变化。

1 海水气泡幕蒙特卡罗仿真模型设计

在整个仿真过程中, 排除了一些对本仿真研究不重要的一些因素, 如水中杂质, 脏气泡等^[9], 仿真流程图如图 1 所示。蒙特卡罗仿真模拟光子在水中气

收稿日期: 2013-09-04

基金项目: 9140A26030110JB11

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。

泡的运动是基于光子运动轨迹的模拟,其基本过程是:光子以一个特殊的方向进入含气泡的水中,不断与这些气泡发生随机碰撞,每发生一次碰撞判断一下光子是否达到所设定的边界条件,如达到边界,光子判定为死亡,被接收面吸收。反之,则由适当的散射相位函数选取散射后新的运动方向继续重复进行运动。

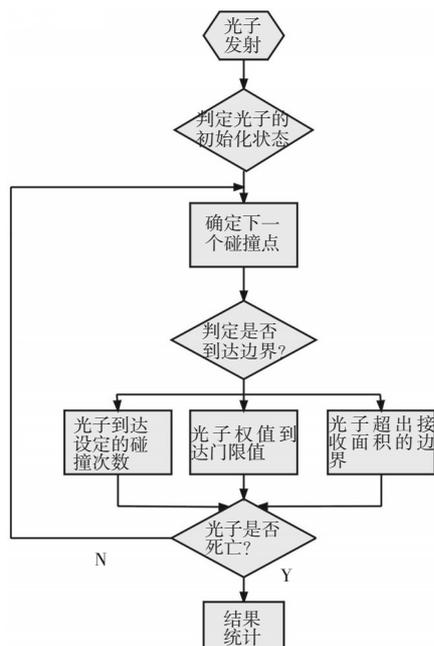


图1 蒙特卡罗仿真模拟图

海水气泡幕蒙特卡罗仿真中对光子散射的处理是非常关键的一步,以下进行详尽的分析。在仿真过程中都有一个根本性的问题就是光子散射过程中方位角 i 和散射角 α 的选取。首先 i 和 α 的选择是基于散射的相位函数和散射状态所确定的,然后定义在散射事件发生前参考面上的光子斯托克斯矢量旋转变换到散射平面上的旋转矩阵,旋转矩阵为^[8]

$$\mathbf{R}(i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2i & \sin 2i & 0 \\ 0 & -\sin 2i & \cos 2i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

光子斯托克斯矢量更新过程如图2所示。

具体斯托克斯矢量变换过程如下:

(1)以矢量 u_1 所在射线 OB 为旋转轴,确定旋转后 u_2 与 v_2 的位置, u_2 、 v_2 与平面 COD 共面,可知散射基准面 AOB 与散射过渡平面 COD 夹角为 i_1 。从而将入射光子以散射基准面 AOB 为参考面的斯

托克斯矢量 S_1 变换到以散射过渡平面 COD 为参考面的斯托克斯矢量 S_2 。

(2)以 Z 为旋转轴,旋转后 u_2 与 v_2 变换到图2中 u_3 与 v_3 的位置, u_3 、 v_3 与散射面 XOZ , 平面 EOF 、平面 GOF 共面。使过渡散射平面 COD 为参考面的斯托克斯矢量 S_2 变换到以散射平面 EOF 为参考面的斯托克斯矢量 S_3 , 过渡散射平面 COD 与平面 EOF 的夹角为 i_2 , 散射基准面 AOB 与散射面 GOF 的夹角为 α , α 即为散射角。

(3)在散射面 XOZ 上,利用穆勒矩阵 $\mathbf{M}(\alpha)$ 计算散射后光子的斯托克斯矢量 S_3 。穆勒矩阵能够准确地描述散射过程的偏振特性,斯托克斯矢量是相对于某一散射面而言的,所以需要将斯托克斯矢量 S_1 变换到散射平面 XOZ 上,利用散射穆勒矩阵 $\mathbf{M}(\alpha)$ 乘以斯托克斯矢量的方法来求解光子散射后的斯托克斯矢量,即

$$\begin{aligned} S_2 &= R(i_1)S_1, S_3 = R(i_2)S_2 \\ S_3 &= M(\alpha)S_2 = M(\alpha)R(i_2)S_2 \end{aligned} \quad (2)$$

其中, S_3 为散射后的光子相对于散射平面 XOZ 新的斯托克斯矢量。

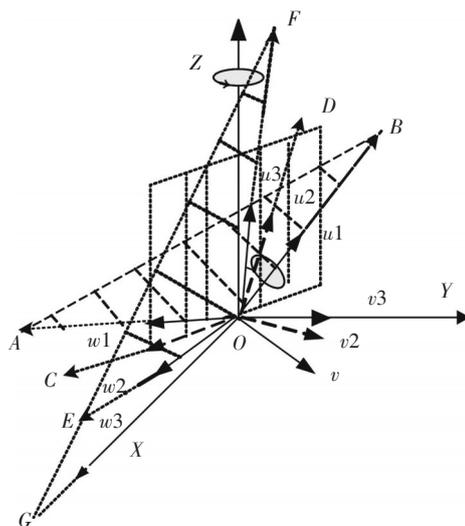


图2 光子斯托克斯矢量更新

2 激光海水气泡幕偏振特性研究

2.1 气泡尺寸不同情况下偏振光特性仿真

图3中给出了不同气泡半径情况下,后向散射光强与退偏振度随时间 T 的变化曲线。气泡半径取 $15 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m}$, 光子的接收时间取 2 ns ,

图3中可看出,在(1)40 ns 前信号图形一致,在40 ns 后接触到气泡,图形开始出现变化,随着时间的推移气泡幕后向散射光强信号的“双尖峰”特性逐渐减弱,退偏振信号呈现的“双上升”特性也在慢慢的消退;(2)在气泡为5 μs 和1 μs ,光强信号和退偏振度信号变化基本保持一致。说明在气泡越来越小时,光强的突变作用也随之衰减,并且光子在空气中的行进路程缩短,在水中的行进路程随着气泡的尺寸减小而变大,光子的能量衰减越来越大,也造成光强曲线越来越平滑;(3)气泡越来越小,并且无限接近肉眼无法观察到的范围,使得气泡无限接近水分子的形态,达到近似于水溶胶的衰减系数,会慢慢趋近于纯水环境条件下光强信号的变化形态;(4)在50~100 ns 这一时间段内,可以看到退偏振度信号数值下降明显,这是由于偏振光与气泡幕的相互作用引起的,并且与仿真所设定的气泡所在位置一致。图3中100 ns 后的退偏振度信号,随着气泡大小的变化在不断地变化,没有随着气泡的变小而失去作用。

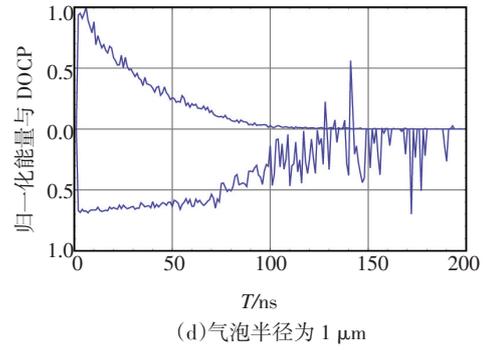
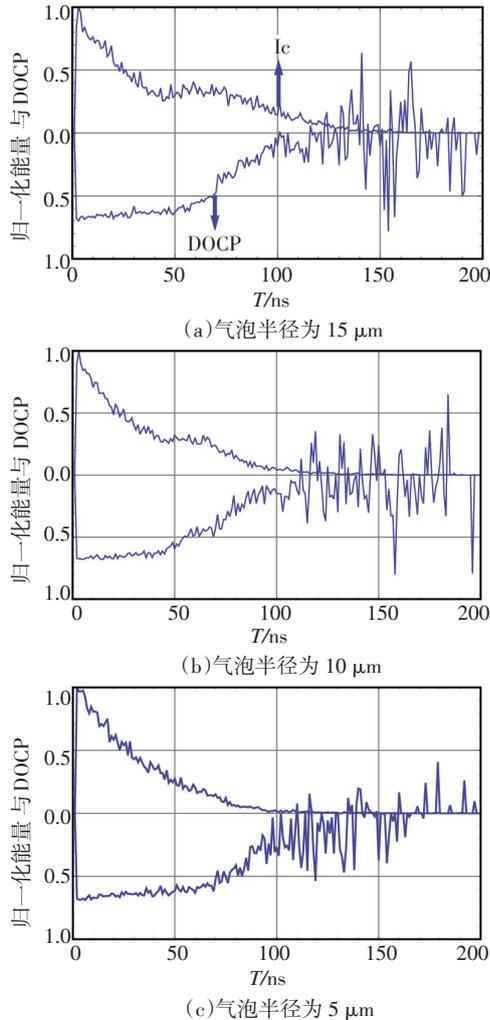
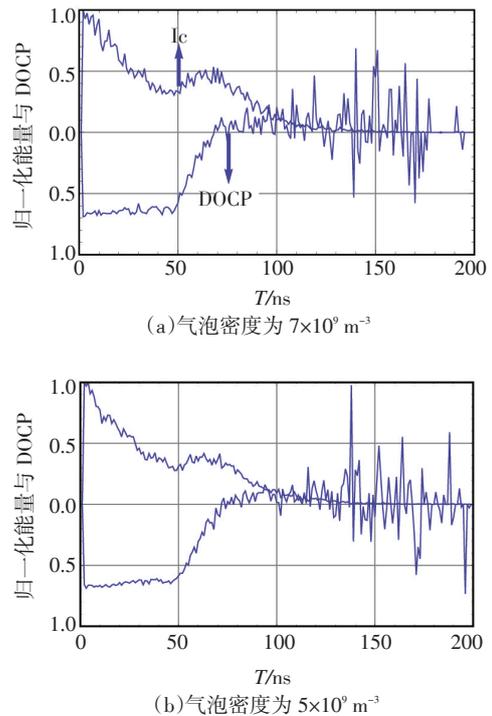


图3 不同气泡半径情况下光强与退偏振度的变化

2.2 气泡数密度不同的情况下偏振光特性仿真

不同气泡数密度后向散射光强以及退偏振度的信号曲线,如图4所示。气泡的半径5 μm ,气泡群密度取值分别为 $7 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$, $5 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$, $3 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$, $1 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ 。(1)从图4中可知,随着气泡密度的变化,光强信号和退偏振度信号也在随时发生着变化。气泡的密度增大,光强信号的“双尖峰”特性逐渐消退,在气泡密度为 $1 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ 的情况下,光强信号趋近于平缓,但退偏振度信号还有明显的图形变化;(2)气泡数密度 $5 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ 与 $3 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ 情况下相比较,接收时间在50~100 ns 之间,光强信号有非常明显的减弱变化;退偏振度信号在75~150 ns 之间变化尤为显著。



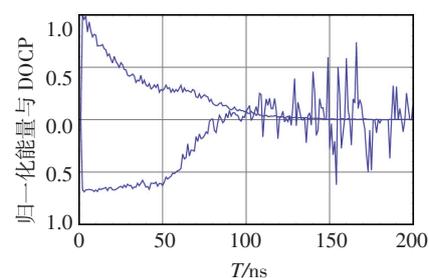
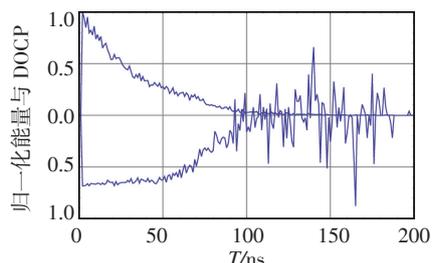
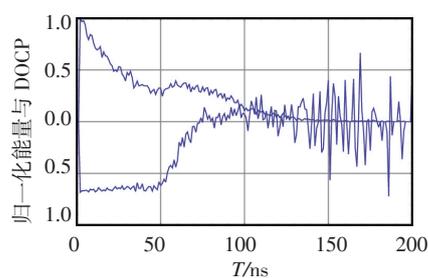
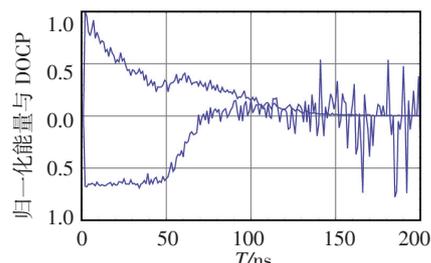
(c) 气泡密度为 $3 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ (d) 气泡密度为 $1 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$

图4 不同气泡密度情况下光强与退偏振度的变化



(c) 气泡幕宽度为 7.5 m

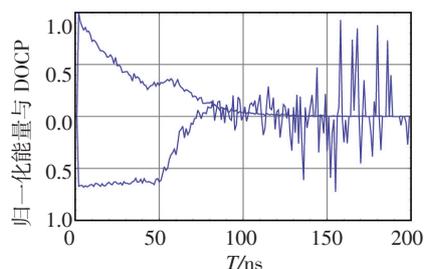


(d) 气泡幕宽度为 10 m

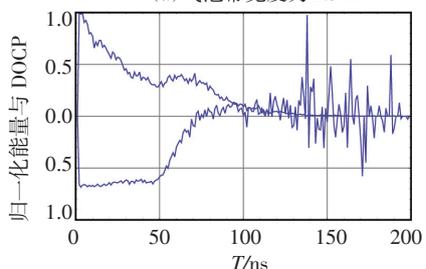
图5 不同气泡幕宽度情况下光强与退偏振度的变化

2.3 气泡幕宽度不同的情况下偏振光特性仿真

图5所示气泡幕宽度为2.5 m, 5 m, 7.5 m, 10 m的情况下后向散射光强及退偏振度的变化曲线。(1)在图5中可看出,随着气泡幕宽度的增加,在接收时间60 ns的时候光强信号的第二个尖峰在逐渐的消失,在气泡幕宽度为2.5 m时,第二尖峰的凸显特性已经消失。说明气泡幕的宽度增加,光子运动的路程也随着增加,光子的能量衰减也在增加;(2)退偏振度信号在接收时间65~200 ns之间变化比较明显,随着气泡幕宽度的增加也发生变化,但没有完全消失,还在随着气泡幕宽度的变化发生着变化。



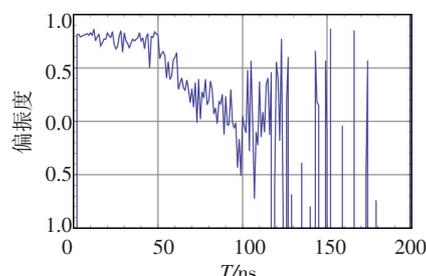
(a) 气泡幕宽度为 2.5 m



(b) 气泡幕宽度为 5 m

2.4 与X轴角度不同情况下偏振度变化分析

选取线偏振光入射,对入射光平行于X轴、与X轴成 30° 、与X轴成 45° 、与X轴成 60° 、垂直于X轴的5种情况下对偏振度进行模拟仿真,为使偏振度变化规律易于观察,偏振度统计保留了未加绝对值前的原始状态,如图6所示。发现在偏振光与X轴平行发射时,接收到的初始状态偏振度达到了正的最大值为0.807,随着角度的增大,入射角度为 30° 时,偏振度为0.2888,入射角度数为 45° 时,偏振度减小到了数值基本为0,接收时间为100 ns后没有太大的变化,光子行进了30 m左右的距离;在入射角度为 60° 时,偏振度达到-0.6952,在垂直于X轴时达到了初始状态偏振度负的最小值-0.9908。偏振度在0 ns迅速增大原因是接收器接收到的基本上发生单次散射所返回的光子。图3表明,在变换范围 90° 之间偏振度完成了1个周期性的循环,并且光子在与X轴平行和垂直方向发射时,可以得到偏振度变化的最佳状态。

(a) 入射角为 0°

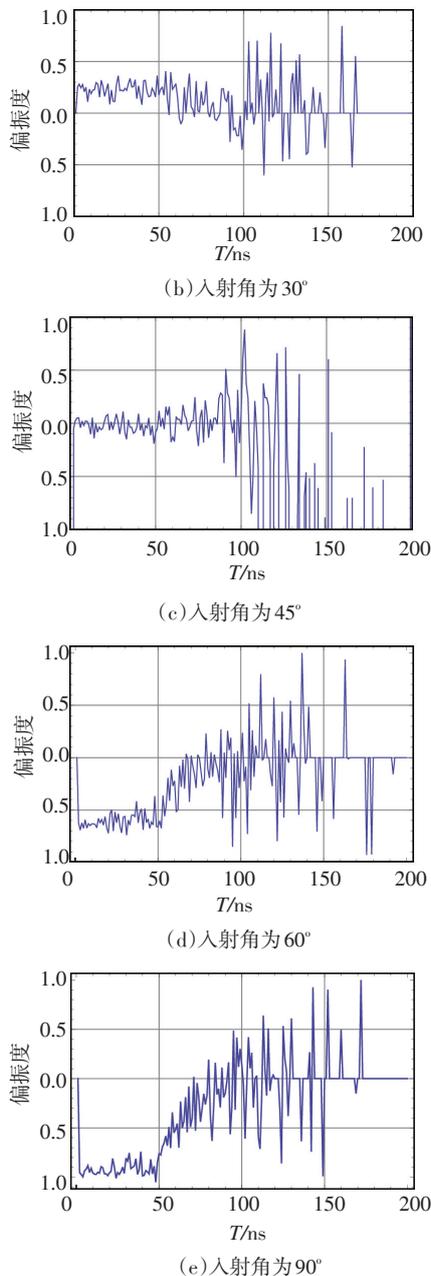


图6 入射角不同情况下偏振度变化仿真

3 结 论

文中采用了矢量蒙特卡罗的方法对不同情况下

海水气泡幕的后向散射光强和退偏振度的变化进行仿真研究。通过分析可知,气泡半径增大、气泡数密度增多、气泡幕的宽度增加都会加快后向散射退偏振度的下降,且随着传输深度的增加下降速率逐渐增加;圆偏光的后向散射退偏振度信号有“双上升现象”发生;入射角度不同情况下,角度变换范围 90° 之间偏振度完成了1个周期性的循环,并且光子在与 X 轴平行和垂直方向发射时,可以得到偏振度变化的最佳状态。

参考文献

- [1] 纪延俊,何俊华,董晓娜,等.尾流气泡幕散射光的性质[J].光子学报,2004,33(8):1018-1020.
- [2] 叶子.散射理论及应用[D].杭州:浙江大学,1995.
- [3] 陈延如,王家旺.圆偏振光和线偏振光散射特性分析与比较[J].量子电子学报,1997,6(14):551-557.
- [4] 李雅丽.散射光偏振性的推证[J].西安联合大学学报,1998,1(1):67-70.
- [5] 朱东华,张晓晖.水中微气泡光散射偏振特性的研究[J].海军工程大学学报,2005,5(17):26-29.
- [6] Naqwi A ,Durst F ,Liu X Z. Two optical methods for simultaneous measurement of particle size, velocity, and refractive index[J]. Applied Optics,1991,30(33):4949-4959.
- [7] Abe M, Yoshida N, Hishida K, et al. Multilayer PIV Technique with High power Pulse Laser Diodes[C]//Proc. of 9th Int. Symp. Appl. Laser Tech. Fluid Mech., Lisbon, Portugal, 1998:1-8.
- [8] 张裕士,田贵才.微气泡激光散射特性研究[J].通化师范学院学报,2007(4):3-5.
- [9] Trope, S A. The effect of lamgmuir circulation on the distribution of submerged bubbles caused by breaking wind waves[J]. Fluid. Mech, 1984(14):151-170.
- [10] 侯文学.水雾对红外光谱遮蔽衰减特性研究[J].光电技术应用,23(5):25-28.
- [11] 李阳龙,王伟平.激光与聚合物的相互作用及其应用[J].光电技术应用,25(2):8-13.
- [12] 陈亚楠,高鹏,杨光达.白光激光的产生及特性[J].光电技术应用,26(1):18-23.