

文章编号: 1001-3806(2008)02-0198-03

## 尾流气泡对脉冲激光时间展宽的研究

马治国<sup>1,2</sup>, 王江安<sup>2\*</sup>, 蒋兴舟<sup>1</sup>, 石晟玮<sup>1</sup>

(1. 海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033; 2. 海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430033)

**摘要:** 为了研究气泡对激光的时间展宽问题, 采用米氏光散射理论, 对气泡的光散射特性以及多次散射效应进行了理论分析, 并开展了实验研究, 得到了气泡在不同距离时后向光散射信号波形。结果表明, 气泡对激光脉冲的传输有明显的影 响, 导致了脉冲激光在时间上的展宽, 信号展宽的宽度随距离近似呈二次曲线变化。

**关键词:** 散射; 时间展宽; 米氏散射理论; 气泡

**中图分类号:** O437 **文献标识码:** A

### Research of the temporal spread of laser pulse by wake bubbles

MA Zhi-guo<sup>1,2</sup>, WANG Jiang-an<sup>2</sup>, JIANG Xing-zhou<sup>1</sup>, SHI Sheng-wei<sup>1</sup>

(1. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Aiming at temporal spreading of laser pulse by bubbles, theoretic analysis and exploratory research were made for the light scattering properties and the multiple scattering effect of wake bubbles by Mie light scattering theory, and some signal waves of light back-scattering from bubbles at different distance were gained. The results indicate that wake bubbles influence the transmission of laser in water, which makes laser pulse spread in time evidently.

**Key words:** scattering; temporal spread; Mie theory; bubble

## 引 言

舰船在航行过程中产生大量气泡,并在很长时间内存在。这就为通过尾流探测舰船提供了可能。目前,对于尾流的光学特性的研究才刚刚开始,对于尾流光学性质的认识还远远不够全面。要发展尾流在现代海战中的应用,需要进行大量的基础研究,尤其是在尾流气泡的后向光散射特性方面<sup>[1]</sup>。

由于气泡的存在,尾流的光学特性与无气泡时会有显著的区别。当气泡的线度远大于所使用的光的波长时,气泡的影响主要是对光的反射、折射和吸收;当气泡的线度与所使用的光的波长可比拟时,其影响还有非常重要的一方面——散射<sup>[2]</sup>。

在激光水下探测中,通常采用蓝绿光波段的激光。尾流中存在着各种不同直径的气泡,较大气泡很快浮上海面破裂消失,只有小气泡才能在海水中长期存在,其线度与光的波长是可以比拟的,因此,其散射效应非常明显<sup>[3-4]</sup>。作者即针对散射效应对脉冲激光的时间展宽特性进行研究,以利于后续对尾流气泡的探测和识别。

作者简介:马治国(1978-),博士研究生,主要从事激光水下探测方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: gdyfzx@163.com

收稿日期: 2007-01-22;收到修改稿日期: 2007-03-23

## 1 理论分析

### 1.1 气泡的光散射特性

由于空气的密度和压缩率与水有显著的差异,因此,气泡在光的照射下会产生散射现象,使入射光沿不同的方向传播。根据尾流中气泡半径的分布特性,一般情况下可将尾流中的气泡散射用 Mie 散射来描述<sup>[5]</sup>。

如图 1 所示,半径为  $R$  的气泡相对于周围介质的

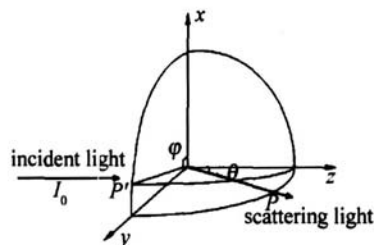


Fig 1 Light scattering by a single bubble

折射率用复数  $m$  表示。取气泡中心为坐标原点  $O$ ,真空中波长为  $\lambda$ 、强度为  $I_0$  的线偏振光沿着  $z$  轴入射到气泡上,散射光  $\vec{OP}$  与入射光方向之间的散射角为  $\theta$ ,入射光的电矢量相对于散射面的夹角为  $\phi$ 。

由 Mie 散射理论,与气 泡中心相距为  $r$  处的散射光强为:

$$I_s = I_0 \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} I(\theta, \phi) \quad (1)$$

式中, 散射光强度  $I(\theta, \phi)$  为:

$$I(\theta, \phi) = I_1 \sin^2 \phi + I_2 \cos^2 \phi = |S_1(\theta)|^2 \sin^2 \phi + |S_2(\theta)|^2 \cos^2 \phi \quad (2)$$

$I_1, I_2$  分别表示垂直及平行于散射平面的散射强度函数分量, 而  $S_1, S_2$  表示幅值函数, 具有无穷级数的形式:

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)] \quad (3)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n(\cos \theta) + b_n \pi_n(\cos \theta)] \quad (4)$$

式中,  $a_n, b_n$  为 Mie 散射系数, 是尺度参数  $\alpha = 2\pi R/\lambda$ 、相对折射率  $m$  的函数。

图 2 中给出了单个气泡的散射强度随角度的分布

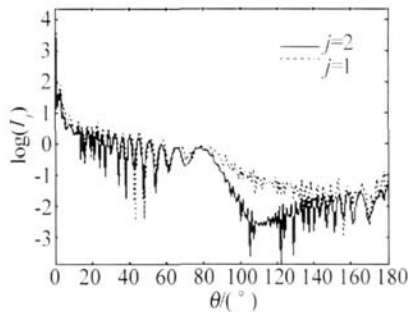


Fig 2 Mie scattering of a single air bubble

情况。  $j=1$  表示入射光与散射平面垂直,  $j=2$  表示入射光和散射平面平行。从图中可以看出, 散射光主要集中在前向, 当散射角在后向即  $180^\circ$  附近时, 散射光强度有明显的增强。

### 1.2 多次散射效应

激光在含有气泡的海水介质中传播时, 当介质的光学深度很小时, 用单次或二次散射就能很好地表达接收信号; 当光学深度加大后, 由于多次散射的影响, 使得激光接收信号的组成变得复杂<sup>[6]</sup>。尾流中存在大量的气泡, 其空间密度较大, 因此, 激光在尾流中的传输还会产生多次散射效应, 使光在尾流中的传输变得更为复杂<sup>[7-8]</sup>, 会遇到许多气泡而不断被散射, 非散射部分的直射光将变得越来越少。

海水中平面辐射正入射的光被气泡散射而偏离光轴, 经过二、三、四等多级散射后, 部分光重新进入光轴, 这一部分光被称为多次散射光。光接收器接收的实际上是一次散射光与多次散射光的组合。从几何图形上看, 多次散射光子的传输路径要比一次散射光子的传输路径长, 多次散射光子之间的传输路径也各不相同, 这样就产生了多通道效应。多通道效应使得激光脉冲在传输过程中, 不仅在空间上被扩展, 表现为光

斑的逐步发散; 在时间上也会发生展宽现象, 表现为激光脉冲的时间展宽。

DU 等人<sup>[9-10]</sup>根据经典激光雷达公式推导出了多次散射激光雷达公式, 并对多次散射光信号进行了模拟计算, 结果如图 3 所示。从图中可以看出, 多次散射

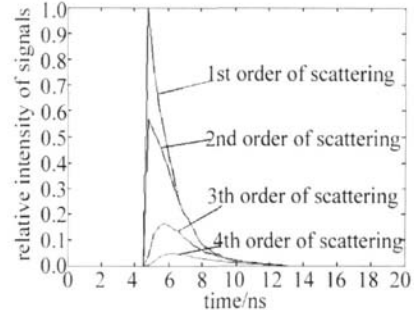


Fig 3 The multiple scattering signal

对气泡的光散射信号造成了一定的影响, 特别是前两次散射将明显地影响接收信号的强度, 表现为信号在时间上的展宽。

## 2 实验研究

### 2.1 实验装置

实验装置由激光器、气泡发生器、光接收器以及数据采集系统组成。其中, 激光器采用固体激光器, 波长为  $532\text{nm}$ , 脉冲宽度  $10\text{ns}$ , 单脉冲能量为  $40\text{mJ}$ , 发散角为  $1\text{mrad}$ 。气泡幕由微孔陶瓷管阵列产生, 以模拟尾流气泡。采用雪崩光电二极管作为接收器来对气泡幕的后向光散射信号进行接收。接收器与激光器置于水槽同一端面, 用于测量气泡幕的散射光。实验在玻璃水槽内进行, 水槽尺寸为  $7\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ 。由于近距离水分子的后向散射光较强, 对接收气泡的散射光不利, 这里采用光学遮挡的方法对近距离 ( $3\text{m}$  以内) 的后向散射光进行了抑制, 以利于对气泡幕后向散射光的接收。

### 2.2 实验结果及分析

实验中, 气泡幕的距离在  $4\text{m} \sim 6\text{m}$  之间间隔  $0.5\text{m}$  移动, 在每个位置采用多次测量求平均值的方法测得相应位置处的激光脉冲宽度。这里仅给出部分实验结果, 如图 4~图 6 所示。当气泡幕距离较远时, 信号波形较

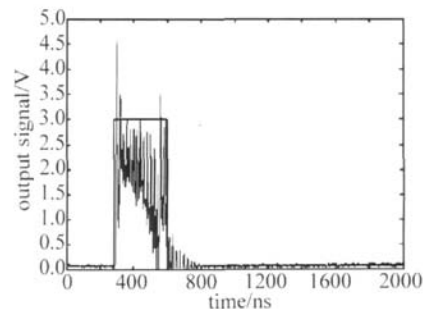


Fig 4 Output signal(no bubbles)

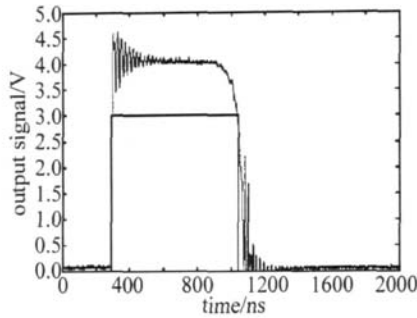


Fig 5 Output signal (4m)

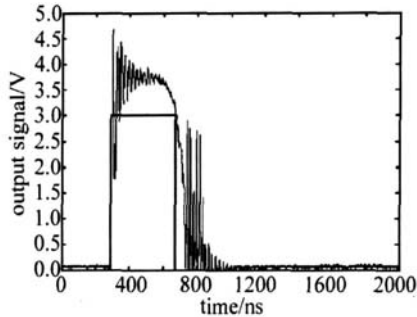


Fig 6 Output signal (6.5m)

不规则,后期起伏较大,这里采用取幅度阈值二值化的方法对信号波形进行了规整,以计算信号脉冲宽度。

从图4~图6可以看出,由于气泡幕的作用,后向光散射信号强度有了明显的增强,信号波形也得到了明显的展宽。对4m~6.5m间隔0.5m共6个点所测得的数据进行计算,得出激光脉冲展宽宽度与距离之间的变化曲线如图7所示。从图中可以看出,随着距

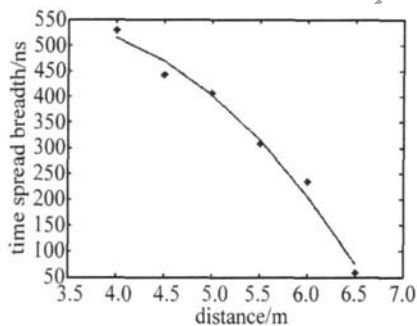


Fig 7 Time spread breadth vs distance of bubbles

离的增大,气泡幕对激光脉冲的展宽作用逐渐减弱,脉冲展宽宽度对距离的变化规律非常接近于二次拟合曲线。

### 3 结论

气泡幕的存在会对激光脉冲的传输产生明显的影响。空间密度较大的气泡具有多次散射效应,导致了脉冲激光在时间上的展宽,信号展宽的宽度随距离近似呈二次曲线变化,距离越远,展宽宽度越小。

### 参考文献

- [1] WANG J A, JIANG X Zh, MA Zh G, *et al* Study on back light-scattering property of bubbles in ship wake [J]. Laser Technology, 2005, 29 (2): 205-206 (in Chinese).
- [2] ZHANG J Sh, SUN Ch D, LU D. Air bubbles in water [J]. Journal of Xian Institute of Technology, 2000, 20 (1): 5-6 (in Chinese).
- [3] ZHANG X D, MARLON L. The volume scattering function of natural bubble populations [J]. Limnology & Oceanography, 2002, 47 (5): 1273-1282.
- [4] ZHANG X D, MARLON L, BRUCE J. Influence of bubbles on scattering of light in the ocean [J]. Appl Opt, 1998, 37 (27): 6525-6536.
- [5] KOKANOVSKY A. Single light scattering: bubbles versus droplets [J]. America Journal Physics, 2004, 72 (2): 258-263.
- [6] ZACCANTI G, BRUSCAGLIONI P, DAMI M. Simple inexpensive method of measuring the temporal spreading of a light pulse propagating in a turbid medium [J]. Appl Opt, 1990, 29 (27): 3938-3944.
- [7] STROUD J, MARLON L. Transient bubble oscillations associated with the under water noise of rain detected optically and some properties of light scattering by bubbles [M]. Netherlands: Bubbles Dynamics and Interface Phenomena, 1994: 161-169.
- [8] QU H H. Eliminating high-order scattering effects in optical micro-bubble sizing [J]. J O S A, 2003, 20 (4): 690-697.
- [9] DU Zh F, LU YM, HUANG T X. The analytic calculation of multiple backscattering lidar received signal [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technique, 1998, 26 (1): 52-54 (in Chinese).
- [10] DU Zh F, LU YM, YANG Z K, *et al* The simulations of multiple-scattering lidar received signal [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1998, 15 (5): 503-508 (in Chinese).