

文章编号: 0253-2239(2008)10-1861-06

# 舰船尾流气泡层散射相位函数及其后向散射信号特性分析

石晟玮<sup>1</sup> 王江安<sup>2</sup> 蒋兴舟<sup>1</sup> 马治国<sup>1,2</sup> 余 扬<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033; <sup>2</sup> 海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要** 根据实测舰船的尾流气泡分布模型, 利用米氏理论计算得到尾流气泡层的散射相位函数, 并将其应用于尾流气泡层后向散射光接收信号的 Monte Carlo 仿真分析中, 以便为实际海况下的舰船尾流气泡层后向散射光探测的实验设置与信号预测、分析提供可靠的依据。通过对不同距离处尾流气泡层的散射相位函数及后向散射光接收信号特性的分析, 可以得出: 尾流中气泡层散射相位函数的变化不明显, 且对接收信号的影响较小; 气泡数密度的变化导致的多次散射效应和气泡层衰减系数的变化是引起后向散射光强度变化的主要原因, 数密度越大, 散射光信号中的多次散射光成分越大; 当气泡层厚度达到一定倍数的衰减长度时, 继续增加气泡层厚度对后向散射接收信号的影响较小。

**关键词** 海洋光学; 米氏散射; 后向散射; 蒙特卡罗; 尾流气泡; 散射相位函数; 多次散射

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082810.1861

## Analysis of Scattering Phase Function and Backscattering Signal Characteristic of Bubble Films in Ship Wake

Shi Shengwei<sup>1</sup> Wang Jiang'an<sup>2</sup> Jiang Xingzhou<sup>1</sup> Ma Zhiguo<sup>1,2</sup> Yu Yang<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Arms Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)  
(<sup>2</sup> Electronic Engineering College, Navy University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

**Abstract** Scattering phase function of wake bubble films is obtained based on Mie theory and the distribution model of ship wake bubbles. Using the function the backscattering signal of bubble films is simulated by Monte Carlo method, which is useful to detect and analyze the backscattering signals of ship bubble wakes in situ measurement. The analysis of the scattering phase function and the backscattering signal characteristic in different regions of ship wake, shows scattering phase functions of bubble films in different wake region change little and affect the signal little; the variety of bubble density which causes the variety of multiple scattering and the bubble attenuation coefficient is the dominating reason influencing the backscattering intensity. Multiple scattering intensity becomes stronger when the bubble film is thick. When the thickness of bubble film is larger than a given times of attenuation length, the backscattering signal changes little with the increase of bubble film thickness.

**Key words** ocean optics; Mie scattering; backscattering; Monte Carlo; wake bubbles; scattering phase function; multiple scattering

## 1 引 言

舰船尾流气泡层的激光后向散射特性已作为一种重要的舰船目标探测源而受到越来越多的重视与

研究。Zhang Xiao-dong 等<sup>[1,2]</sup>首先对海洋中存在的气泡散射光特性进行了大量的理论研究; 李微等<sup>[3]</sup>利用几何光学的原理对水中单个大气泡的散射

收稿日期: 2008-01-18; 收到修改稿日期: 2008-03-06

作者简介: 石晟玮(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事光电子技术在军用目标探测与制导等方面的研究。

E-mail: shishengwei81@163.com

导师简介: 王江安(1951—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事红外与激光技术在军用目标探测技术等方面研究。

E-mail: gdyfzx@163.com

相位函数进行了推导;李建民等<sup>[4]</sup>则提出了一种分析气泡远场干涉的理论模型;石晟玮等<sup>[5]</sup>在实验水槽内测得了气泡幕的后向散射信号,并对实验信号的相关变量进行了初步的分析。各项研究充分证明对舰船尾流气泡后向散射信号进行实船探测的可行性。

根据舰船尾流气泡分布的实际测量结果建立的气泡分布模型,计算了距离目标舰船不同距离处的尾流气泡群散射相位函数,并据此通过 Monte Carlo 模拟的方法得到了不同尾流距离处的气泡层后向散射光信号的仿真结果,为实际海况下舰船尾流的后向散射光探测的实验设置与信号预测、分析提供了重要的依据。

## 2 舰船尾流气泡分布模型

大量的实际海上测量结果表明,舰船尾流气泡能在尾流中长时间地存在,其中尾流气泡的尺寸主要集中在  $1000 \mu\text{m}$  以下;特别是在远程尾流中,气泡的尺寸为  $10 \sim 300 \mu\text{m}$ <sup>[6]</sup>。而尾流气泡的分布函数则与海洋背景相似,但气泡数密度比海洋背景中的气泡数密度高。

Miner<sup>[7]</sup>对舰船尾流中半径分别为  $80 \mu\text{m}$ 、 $160 \mu\text{m}$ 、 $400 \mu\text{m}$  和  $1070 \mu\text{m}$  的气泡分布密度进行了测量,结果如图 1 所示<sup>[7]</sup>。海水中气泡的大小分布函数可表示为

$$n(r) = N_0 p(r), \quad (1)$$

式中  $N_0$  为单位体积中的气泡总数,  $p(r)$  为半径为  $r$  的气泡的概率密度函数。Medwin 等基于 Crawford 和 Wu 的研究结果<sup>[8]</sup>,给出海洋中 DI 型气泡概率密度函数的形式:

$$p(r) = \begin{cases} c_1 r^4, & 0 < r < r_a \\ c_2, & r_a \leq r < r_b \\ c_3 r^{-4}, & r_b \leq r \end{cases} \quad (2)$$

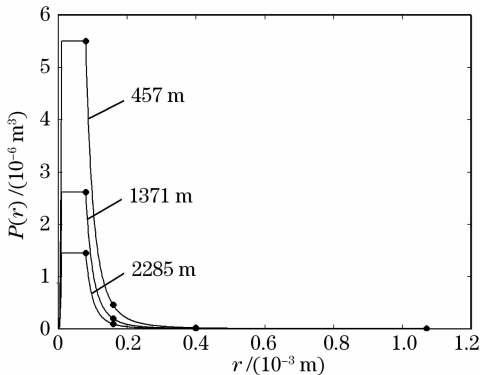


图 1 不同距离处尾流内的气泡分布图

Fig. 1 Bubble distribution in different wake regions

其中  $r_a$  和  $r_b$  为定义上下限的气泡半径,  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  唯一地由  $r_a$  和  $r_b$  确定。

结合 Miner 的实验结果与尾流中气泡的分布规律,设定  $r_a = 10 \mu\text{m}$ ,  $r_b = 80 \mu\text{m}$ ,并将概率密度函数中的指数设定为随尾流距离的增长而变化,其范围在  $3.5 \sim 4.5$  之间,得到距离航行舰船不同距离  $D$  处尾流内的气泡分布曲线如图 1 所示。根据计算曲线,得到尾流内单位体积内的气泡总数  $N_0$  分别为:  $N_0 |_{D=457 \text{ m}} = 2.83 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$ ,  $N_0 |_{D=1371 \text{ m}} = 1.32 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$ ,  $N_0 |_{D=2285 \text{ m}} = 7.16 \times 10^7 \text{ m}^{-3}$ 。

## 3 尾流气泡散射相位函数的计算

光在某个给定方向单位立体角中散射的能量与在所有方向上平均的单位立体角中散射能量之比,称为散射相位函数  $f(\theta)$ <sup>[9,10]</sup>。散射相位函数的计算是研究尾流气泡光散射特性的一个重要的物理量。对于激光在尾流气泡中传输这一激光探测的多次散射问题可将米氏理论的递推公式进行推广应用,结合尾流中气泡的分布密度函数,得到气泡群的散射相位函数。

由米氏散射理论,球形粒子的散射光强度可表示为

$$\begin{aligned} i_1 &= S_1(m, \theta, \alpha) \cdot S_1^*(m, \theta, \alpha), \\ i_2 &= S_2(m, \theta, \alpha) \cdot S_2^*(m, \theta, \alpha), \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $i_1$ 、 $i_2$  分别表示垂直及平行于散射平面的散射强度函数,  $\alpha$  为粒子尺寸参数 ( $\alpha = 2\pi r/\lambda$ ),  $m = m_1 + im_2$  为粒子相对周围介质的折射率。而  $S_1$ 、 $S_2$  表示幅值函数,具有无穷级数的形式:

$$\begin{aligned} S_1(\theta) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n + b_n \tau_n], \\ S_2(\theta) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n + b_n \pi_n], \end{aligned} \quad (4)$$

式中散射系数  $a_n$ 、 $b_n$  及参数  $\pi_n$ 、 $\tau_n$  可利用勒让德、贝塞尔和汉克尔函数的递推公式进行推导<sup>[11]</sup>。

假定一束光强为  $I_0$  的自然光入射到分布函数为  $n(r)$  的气泡群,则由米氏理论,在距离为  $R$  处的点上,单位体积内所有气泡的散射光强为

$$I_{sc} = I_0 \frac{\lambda^2}{4\pi^2 R^2} \int_{r_1}^{r_2} n(r) \cdot \frac{i_1 + i_2}{2} dr, \quad (5)$$

式中  $\lambda$  为入射光波长,采用在海水中吸收较小的  $532 \text{ nm}$  波长的入射光。而单位体积内所有气泡的总散射截面,即气泡群体散射系数  $\beta_{sc}$  可表示为

$$\beta_{sc} = \pi \int_{r_1}^{r_2} r^2 n(r) Q_{sc}(\alpha, m) dr, \quad (6)$$

式中  $Q_{sc}(\alpha, m)$  为单个气泡的散射效率因子, 定义为散射截面与几何截面之比<sup>[12]</sup>:

$$Q_{sc}(\alpha, m) = \frac{\sigma_{sc}(\alpha, m)}{\pi r^2} = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2), \quad (7)$$

其中  $\sigma_{sc}$  为单个气泡的散射截面。

根据上述结论, 由散射相位函数的定义可得到分布函数为  $n(r)$  的气泡群散射相位函数:

$$f(\theta) = \frac{I_{sc} r^2}{I_0 \beta_{sc} / 4\pi} = \frac{4\pi}{\beta_{sc}} \frac{\lambda^2}{4\pi^2} \int_{r_1}^{r_2} n(r) \cdot \frac{i_1 + i_2}{2} dr. \quad (8)$$

将尾流中的气泡分布密度函数  $n(r)$  代入(8)式可得尾流气泡群的散射相位函数随散射角度的分布, 如图 2 所示。由图 2 可知, 舰船通过后其尾流内气泡群的散射相位函数基本不变, 仅在散射角为  $180^\circ$  附近的值随着尾流距离的增加, 略有减小。形成上述尾流气泡群散射相位函数特性的主要原因是不同距离处尾流内的气泡群分布密度函数相似[概率密度函数  $p(r)$  中指数有微小变化], 仅在气泡密度上有较大的差别。

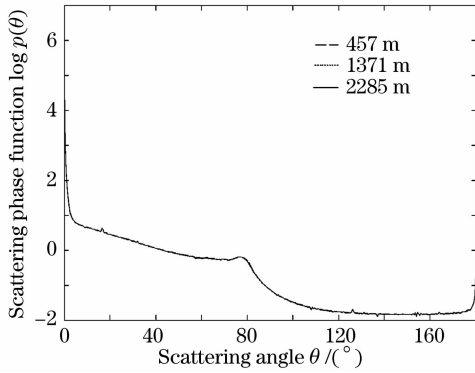


图 2 不同距离处尾流内的气泡群散射相位函数

Fig. 2 Bubble scattering phase function in different wake regions

## 4 尾流气泡后向散射光信号的 Monte Carlo 模拟

### 4.1 模型建立

采用 Monte Carlo 方法实现对尾流气泡后向散射光信号的仿真。在研究水中气泡层的后向散射时, 根据光的粒子性, 可以把光束看成是由很多光子组成的光子束, 于是光在介质中的传输和散射问题

转化为光子的传输与散射问题。

从尾流气泡后向散射的应用方向出发, 建立如图 3 所示的仿真模型。图中  $L_B$ 、 $L_W$  分别为尾流气泡层厚度及发射接收平面距气泡层的距离。

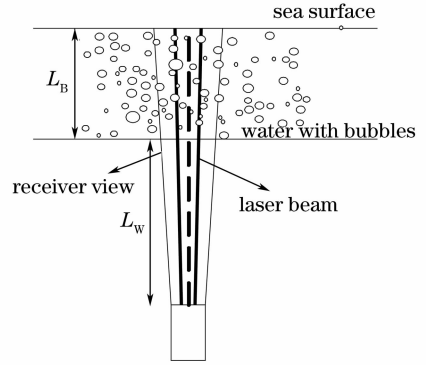


图 3 尾流气泡后向散射接收信号仿真模型

Fig. 3 Simulation model of wake bubble backscattering signal

光子在水中和尾流气泡层中的运动步长分别由水的衰减系数  $c_w$  和气泡层的衰减系数  $c_b$  决定; 光子在水中的散射角由 H-G 函数确定<sup>[13]</sup>; 而在尾流气泡层中的散射角概率分布函数则由气泡群的散射相位函数  $f(\theta)$  确定:

$$P(\theta) = 2\pi \int_0^\theta f(\theta) \sin \theta d\theta, \quad (9)$$

式中  $P(\theta)$  为光子散射角为  $\theta$  时的概率函数。根据(8)式、(9)式可得不同距离处尾流气泡群的散射角概率分布函数  $P(\theta)$  曲线如图 4 所示。计算中, 对运动光子任取  $r \in (0, 1)$ , 当  $P(\theta_i) \leq r < P(\theta_{i+1})$  时, 则该光子运动的散射角为  $\theta_i$ 。

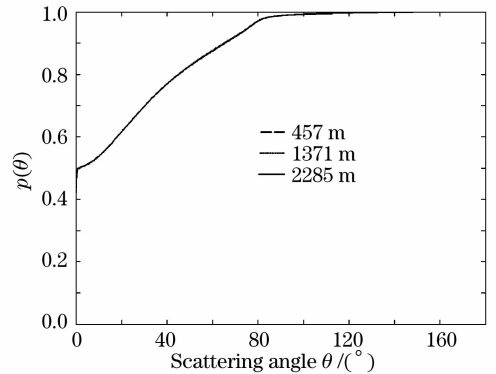


图 4 尾流内的气泡群散射角概率分布函数

Fig. 4 Probability distribution function of wake bubble scattering angle

采用光子返回概率的方法对接收信号进行模拟, 在接收视场内每次碰撞对返回信号都有贡献。首先判断光子的每个碰撞点位置是否在探测器的视

场角范围内,如果光子不在探测器作用体积内,则对光子继续跟踪;如果光子在作用体积内,则该光子返回概率可表示为<sup>[14]</sup>

$$p = \frac{f(\theta)}{4\pi} \frac{A}{h^2} \exp(-c_w d_1 - c_b d_2) \omega_m, \quad (10)$$

其中  $A$  为探测器接收面积,  $h$  为由当前散射点到探测器的距离,  $d_1$  为散射点到探测器的距离中经过水介质的距离,  $d_2$  为经过气泡层的距离,  $\omega_m$  为光子的单次散射率。

## 4.2 结果分析

根据模型,由于尾流气泡层与接收器距离较近,经气泡层散射后的光子从发射到接收的时间与激光发射脉宽相差不大,因此模拟过程中需考虑激光发射脉宽对接收信号的影响。假定激光发射信号是一个脉宽为 7 ns 的高斯脉冲,  $\omega_m = 0.8$ ,  $A = 7 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ,  $L_B = 5 \text{ m}$ ,  $L_W = 5 \text{ m}$ , 接收器视场  $\text{FOV} = 5 \text{ mrad}$ , 则不同距离  $D$  的尾流处气泡群后向散射信号如图 5 所示。图中接收信号的第一个峰值为激光发射脉冲在海水中散射所返回的信号,其峰值大小基本相同;第二个峰值为气泡层后向散射信号,该峰值信号对应的时间满足  $T_B = T_W + 2L_W c_w / c$  ( $T_W$  为水体散射信号峰值对应的时间,  $c$  为光在真空中的速度)。

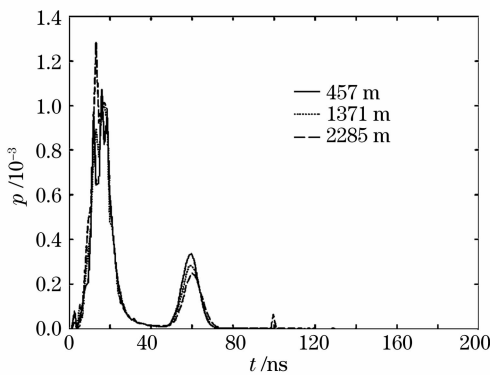


图 5 不同距离处的尾流气泡接收信号曲线

Fig. 5 Wake bubbles backscattering signal in different wake regions

随着尾流距离  $D$  的增加,尾流中单位体积内的气泡数  $N_0$  不断减小,气泡层散射相位函数  $f(\theta)$  的后向散射减弱(如图 2 所示),从而导致气泡层后向散射信号的不断减小。为分析两者对后向散射信号的影响大小,现以  $D = 2285 \text{ m}$  处的尾流气泡层为例,将不同变量  $N_0$  及  $f(\theta)$  代入程序进行计算,结果如图 6 所示。图中,在其它参数不变的情况下,分别用  $D = 457 \text{ m}$  处尾流的  $N_0$  和  $f(\theta)$  替换  $D = 2285 \text{ m}$  处的相应值计算。由计算结果可知,当将  $f(\theta)|_{D=2285 \text{ m}}$  替换为  $f(\theta)|_{D=457 \text{ m}}$  时,气泡层后向散

射信号变化不大,而将  $N_0|_{D=2285 \text{ m}}$  替换为  $N_0|_{D=457 \text{ m}}$  时,接收信号的波形与  $D = 457 \text{ m}$  处的气泡层后向散射信号相似。因此,尾流中气泡层数密度的变化是引起气泡后向散射信号变化的主要原因,而散射相位函数的变化对信号的影响较小。

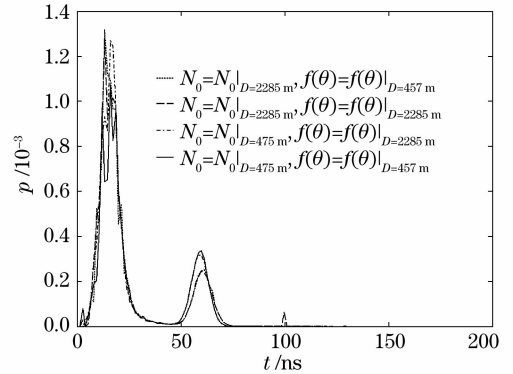


图 6 不同  $N_0$  和  $f(\theta)$  下的接收信号曲线

Fig. 6 Signal curves for different  $N_0$  and  $f(\theta)$

气泡层数密度  $N_0$  增加将同时导致两种效应:光子在气泡层内被散射的次数和气泡层的衰减系数的增加。下面分别就这两种效应进行分析。

### 1) 气泡层的多次散射效应增强

为说明尾流气泡层数密度增加时光子的多次散射效应增强,对气泡层返回信号的散射次数进行模拟。图 7 为尾流距离  $D$  分别为 457 m 和 2285 m 时,气泡层后向散射信号的多次散射模拟结果。由图可知,气泡层后向散射信号中单次散射占主导地位,第二次以上的散射信号较弱,但随着  $N_0$  的增加,高次散射的贡献明显增强。因此,气泡数密度  $N_0$  的增加使得多次散射的作用增强,从而导致气泡层后向散射接收信号增强。

### 2) 气泡层内光束的有效传输厚度减小

气泡层后向散射信号随气泡数密度  $N_0$  的增大(尾流距离  $D$  减小)而增强,但相对于  $N_0$  的增加值,后向散射信号增强非常有限,即两者之间并不成线性的关系。例如,图 5 中当尾流距离  $D$  从 2285 m 变为 457 m 时,  $N_0$  从  $7.16 \times 10^7 \text{ m}^{-3}$  增大为  $2.83 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$ , 增大近 4 倍,而尾流气泡层的后向散射信号强度只增强 1.35 倍左右。这是由于随着  $N_0$  的增大,气泡层的衰减系数  $c_b$  增大,光束在气泡层内的衰减加快,从而使得气泡层内部的光子返回概率大大降低,对后向散射接收信号有贡献的气泡层内光束的有效传输厚度减小,从而限制了接收信号的增加幅值。

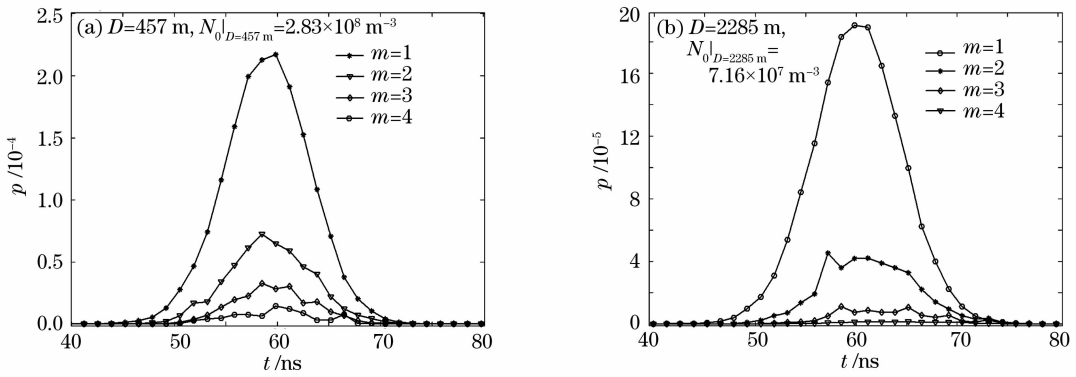


图 7 气泡层后向散射信号的多次散射模拟

Fig. 7 Multiple backscattering signal simulation of bubble films

为此,将光子与接收器的距离  $h$  划分为几个不同的区间,分别对各个尾流距离  $D$  上的不同光子接收距离  $h$  的后向散射信号进行计算,结果如图 8 所示。图中当  $h=4\sim 5$  m 时(如图 8 中曲线 a 所示),计算光子主要为经水—气泡层界面散射回水中的少量光子,该部分光子对气泡层后向散射信号的贡献很小。当  $h \geq L_B$  时,光子进入气泡层,大量光子经气泡散射后返回接收器,光子返回概率  $p$  大大增加。由图 8 可知,随着  $N_0$  的增大,光子在气泡层表面处的信号强度越来越大(如图 8 中曲线 b 所示),

而在气泡层内部的信号强度则越来越小(如图 8 中曲线 c~h 所示),即  $N_0$  越大,气泡层初始厚度部分在接收信号中所占的比重越大(如图 8 中曲线 b 所示)。计算结果显示,当光子在气泡层内的传输厚度达  $1.3/c_b$  (1.3 个衰减长度)时,该部分光子的返回概率在整个后向散射接收信号中所占的比重将达到 90% 左右。因此,随着尾流内气泡数密度  $N_0$  的增加,对接收信号有贡献的有效气泡层厚度不断减小,当尾流气泡层厚度满足 1.3 倍衰减长度时,继续增加气泡层厚度对接收信号强度的影响不大。

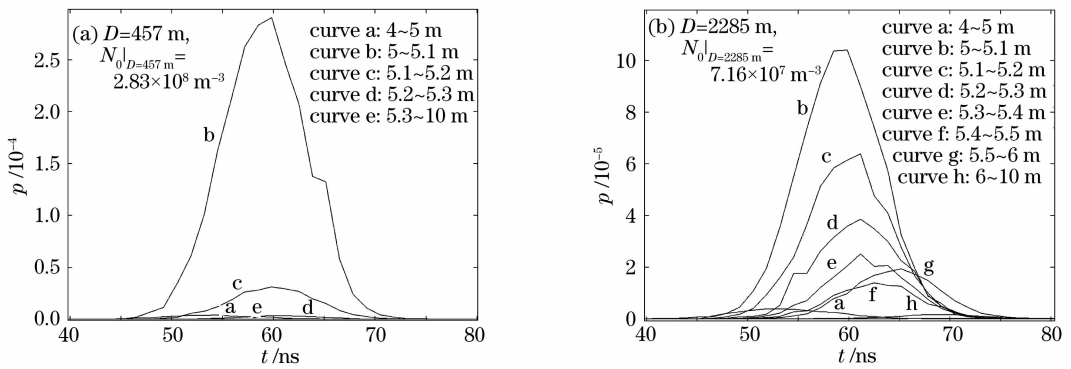


图 8 不同尾流深度处的气泡层后向散射信号

Fig. 8 Backscattering signal of bubble films in different wake depths

### 5 结 论

根据舰船尾流气泡分布的实测结果,建立了尾流中的气泡分布函数的模型,通过对该模型散射相位函数的推导、后向散射信号的仿真计算及其特性分析,得到几个结论:

1) 随着舰船后尾流距离的不同,气泡层的散射相位函数的变化较小,且对后向散射信号的影响不明显;

2) 舰船尾流气泡层在激光的入射下能产生明显的后向散射信号,且随着尾流距离的增加,后向散

射信号逐渐减弱;

3) 引起尾流气泡层后向散射信号变化的主要原因是气泡层数密度变化所导致的多次散射效应与气泡层衰减系数的变化,数密度越大,信号中多次散射成分越高,光束在气泡层内的有效传输厚度越小;

4) 当尾流气泡层厚度达到 1.3 倍衰减长度时,继续增加气泡层厚度对接收信号的影响不大。

### 参 考 文 献

1 Zhang Xiaodong, Marlon Lewis, Bruce Johnson. Influence of

- bubbles on scattering of light in the ocean[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(27): 6525~6536
- 2 Zhang Xiaodong, Marlon Lewis. The volume scattering function of natural bubble populations[J]. *Limnology & Oceanography*, 2002, **47**(5): 1273~1282
- 3 Li Wei, Yang Kecheng, Zhang Xiaohui *et al.*. Simulation and computation of bubbles volume scattering function in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 647~651  
李 微, 杨克成, 张晓晖 等. 水中气泡上的体散射函数的模拟和计算[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 647~651
- 4 Li Jianmin, Yang Fu, Wei Jianyu *et al.*. Far-field interferometric analysis and application of bubble[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1301~1304  
李建民, 杨 富, 魏建宇 等. 气泡的远场干涉分析及应用[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1301~1304
- 5 Shi Shengwei, Jiang Xingzhou, Wang Jiangan *et al.*. The characteristic study of pulsed laser light backscattering of the simulated wake bubbles[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(12): 1508~1512  
石晟玮, 蒋兴舟, 王江安 等. 舰船尾流模拟气泡的脉冲激光后向散射特性研究[J]. *光电子 • 激光*, 2007, **18**(12): 1508~1512
- 6 Carrica P M, Drew D A, Bonetto F J *et al.*. A poly-disperse model for bubbly two-phase flow around a surface ship[J]. *Int J. Multiphase Flow*, 1999, **25**: 257~305
- 7 Miner E W, Griffin O M, Skop R A. Near surface bubble motions in sea water [R]. Washington D. C., AD-A168395, 1986
- 8 Medwin H, Breitz N D. Ambient and transient bubble spectral densities in quiescent seas and under spilling breaker [J]. *J. Geophys Res.*, 1989, **94**(12): 12751~12759
- 9 Toublanc D. Henyey-Greenstein and Mie phase functions in Monte Carlo radiative transfer computations[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(18): 3270~3274
- 10 Sharma S K, Roy A K. New approximate phase functions: test for non-spherical particles [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, 2000, **64**: 327~337
- 11 Yang Y, Zhang Z X, Jiang D Z. Numerical calculation of Mie scattering[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **18**(4): 17~19  
杨 晔, 张镇西, 蒋大宗. Mie 散射物理量的数值计算[J]. *应用光学*, 1997, **18**(4): 17~19
- 12 Bohren C F, Huffman D R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* [M]. John Wiley & Sons, Inc., 1983. 101~104
- 13 Du Zhufeng, Lu Yimin, Huang Tiexia *et al.*. The approximate calculation of scattering phase function[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 1998, **9**(5): 422~425  
杜竹峰, 卢益民, 黄铁侠 等. 散射相位函数的近似计算[J]. *光电子 • 激光*, 1998, **9**(5): 422~425
- 14 Du Zhufeng, Lu Yimin, Yang Zongkai *et al.*. Monte Carlo calculations of the received oceanic lidar signals[J]. *Chin. J. Lasers*, 1999, **26**(1): 52~56  
杜竹峰, 卢益民, 杨宗凯 等. 海洋激光雷达接收信号的 Monte Carlo 计算[J]. *中国激光*, 1999, **26**(1): 52~56