

舰船尾流的前向光散射对光束衰减测量的影响

孙春生^{1,2}, 张晓晖², 朱东华²

(1. 国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要:为优化前向光尾流自导的探测系统的设计,分析了舰船远程尾流中气泡群的前向光散射对测量气泡群衰减系数的影响。根据消光定理和 Mie 理论,推导了单散射条件下测量气泡群衰减系数的公式,给出了因前向光散射导致的测量误差因子和修正因子的表达式。基于此表达式对干净的尾流气泡群和覆盖着两种典型有机膜的脏尾流气泡群的误差因子和修正因子进行了数值计算,分析了探测系统的接收视场角和气泡表面附着的有机膜对衰减系数测量的影响。结果表明,前向散射对尾流气泡群的衰减测量影响很大,在前向 1° 的散射角范围内这种影响尤为显著;气泡表面附着的有机膜对尾流气泡群的衰减测量影响很小。

关键词:消光定理; Mie 理论; 前向光散射; 舰船尾流; 气泡群

中图分类号: O436.2; TN249

文献标识码: A

Influence of Forward Light Scattered by Ship Wakes on the Measurement of Beam Attenuation

SUN Chun-sheng^{1,2}, ZHANG Xiao-hui², ZHU Dong-hua²

(1. College of Optoelectronic Science and Technology, NUDT, Changsha 410073, China;

2. Dept. of Weaponry Eng., Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to optimize the design on detecting system of forward optical-wakes homing, the influence of forward light scattered by bubble populations on the measurement of the bubbles' attenuation coefficient in ship far wakes was analyzed. From transmission law and Mie theory, the corrected transmission law under the condition of single scattering was derived, and the error factor and correction factor resulted from forward scattering were given. Based on the derived expression, error factor and correction factor about clean bubbles and dirty bubbles coated with two mainly organic films were numerical calculated respectively. According to the calculation, the influence of field-of-view and organic film on the measurement of attenuation coefficient was further analyzed, which shows that the influence of forward light scattered by wakes bubbles is significant, especially in the small angle of forward 1° degrees; but the organic film coated to bubbles has a little influence on beam attenuation.

Key words: transmission law; Mie theory; forward light scattering; ship wakes; bubble populations

1 引言

尾流是舰船运动时产生的一段含大量气泡的湍流区域,其声学、光学、热学及电磁学等特性都与正常海水截然不同,通过对这些声学、光学、热学及电

基金项目:国家“973”项目专题;“十一五”预研资助项目。

作者简介:孙春生(1977-),男,博士生,主要从事激光探测方面的研究工作。E-mail:scs96581@163.com

收稿日期:2007-11-25;修订日期:2007-12-24

磁学等特征信号的探测和追踪,可以引导鱼雷沿着舰船的尾流运动并击中舰船。前向光尾流自导技术是利用激光束在尾流和海水中传输时光束衰减的差异来判断鱼雷是否在尾流中从而实现自导的。尾流和海水中光束衰减的差异主要是由尾流中气泡群的散射衰减造成的。气泡群的散射衰减包涵着气泡群的大小和浓度信息,准确地测量出尾流气泡群的衰减,可以提高光尾流探测和自导的准确性和可靠性。

计算光束衰减系数一般采用简单的消光定理^[1],没有考虑前向散射光的影响。实际测量离散介质的光束衰减系数时,由于探测系统总有一定的视场角,视场角内的前向散射光不可避免地伴随着透射光束进入有限孔径的探测器,从而带来测量误差^[2-4]。本文从 Mie 理论出发,推导了测量气泡群衰减系数的表达式,并给出了因气泡群前向光散射而导致的测量误差因子和修正因子的表达式,针对远程尾流中的气泡分布,通过数值计算分析了干净气泡群和覆盖着有机膜的脏气泡群的小角度前向散射误差。在本文的推导和计算中,假定尾流中气泡在测量区域内均匀分布,且气泡对光束无吸收,仅考虑单散射条件下尾流气泡群对光束的衰减,而将海水(包括悬浮粒子)对测量的影响视为背景在信号处理中减除,测量光束为波长 525nm 的平面波。

2 理论推导

为研究小角度前向散射对光束衰减系数测量的影响,需要对消光定理进行修正。下面根据 Mie 理论推导考虑小角度前向散射条件下的消光定理的修正形式。

通量密度为 $I_0/(单位为 W \cdot m^{-2})$ 的平面波在分布均匀的气泡群中传输距离 L 后,通量密度 I 满足消光定理^[2,5]:

$$I = I_0 \cdot \exp(c \cdot L) \quad (1)$$

式中, c 为气泡群的衰减系数,单位为 m^{-1} ; c 满足: $c = a + b$, a 和 b 分别为气泡群的吸收系数和散射系数。对尺寸分布函数为 $n(r)$ (单位为 $m^{-3} \cdot \mu m^{-1}$) 的气泡群, a 、 b 和 c 的计算通式为^[2]:

$$\beta_j = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \pi r^2 Q_j(x, m) n(r) dr \quad (j = \text{ext}, \text{sca}, \text{abs}) \quad (2)$$

当 j 分别取 ext, sca 和 abs 时, β_i 对应为 a , b 和 c ,

$Q_j(x, m)$ 对应为尺寸参数为 x 的气泡的衰减效率、散射效率和吸收效率, $Q_j(x, m)$ 的具体表达式见文献^[6]; 式中 $r_{\max}$ 和 $r_{\min}$ 分别为气泡群半径的上下限; 尺寸参数 $x = 2\pi r/\lambda$, r 为气泡半径, λ 为入射光波长。

实际测量时,探测系统总有一定的视场角,前向散射光不可避免地进入探测器,通过形如式(1)的消光定理不能得到真正的衰减系数 c ^[2,4]。为便于区别,将考虑前向散射时测量到的衰减系数和散射系数表示为 c' 和 b' , 对应的效率因子为 Q'_{ext} 和 Q'_{sca} , 吸收系数 a 和吸收效率因子 Q_{abs} 不受前向散射的影响, 故有: $c' = b' + a$ 。散射效率 $Q_{\text{sca}}(x)$ 是尺寸参数为 x 的气泡在所有方向散射光的表征; 假设探测系统同文献^[5]的针孔探测系统且接收视场角为 θ , 则 $Q'_{\text{sca}}(x)$ 是尺寸参数为 x 的气泡在除前向 θ 角之外的所有方向上散射光的表征。对尾流气泡群, 根据式(2)和 Mie 理论可以推导出^[6]:

$$Q_{\text{ext}} - Q'_{\text{ext}} = Q_{\text{sca}} - Q'_{\text{sca}} = \frac{1}{x^2} \int_0^\theta (i_1 + i_2) \sin\theta' d\theta' \quad (3)$$

其中, i_1 和 i_2 分别为平行和垂直于入射光偏振方向的散射强度函数, 它们是关于气泡半径 r 、散射角 θ 和气泡对外围介质的相对折射率 m 的函数, 其值可由 Mie 理论算出。为便于分析前向散射误差, 引入气泡群前向散射校正因子 $\bar{R}$ 和误差因子 $\bar{E}$ 如下^[2]:

$$\bar{R} = c'/c = 1 - \bar{E} \quad (4)$$

$$\bar{E} = \frac{\pi}{k^2} \frac{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} n(r) \int_0^\theta (i_1 + i_2) \sin\theta' d\theta' dr}{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \pi r^2 Q_{\text{sca}}(x, m) n(r) dr} \quad (5)$$

从式(4)、(5)可以看出, $\bar{R}$ 和 $\bar{E}$ 是 $n(r)$, m 和 θ 的函数。

在公式(1)中加入修正因子 $\bar{R}$ 就得到测量气泡群衰减系数的消光定理的修正形式^[2]:

$$I = I_0 \cdot \exp(c' \cdot L) = I_0 \cdot \exp(c \cdot \bar{R} \cdot L) \quad (6)$$

式(6)同时考虑了透射光和视场角内小角度散射光对衰减系数的影响, 是测量气泡群中光束衰减系数的实用形式。

3 舰船远程尾流中气泡群尺度分布的数学模型

舰船远程尾流中气泡群的运动处于准动态平衡状态, 根据 Trevorrow 的研究结果^[7], 舰船远程尾流

中气泡群的尺度分布函数 $n(r, z)$ 随气泡半径和尾流深度 z 的变化关系为:

$$\begin{aligned} n(r, z) &= n_0 (r/r_{\text{peak}})^{-4.5} \cdot \exp(-z/L) & r > r_{\text{peak}} \\ n(r, z) &= n_0 \cdot \exp(-z/L) & r < r_{\text{peak}} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, n_0 为尾流表面的气泡谱密度, 与尾流表面的气泡数密度 N_0 满足线性关系; r_{peak} 为尾流气泡的最可几半径; L 为尾流的深度标尺。

舰船尾流中半径小于 $10\mu\text{m}$ 的气泡会溶解于水, 半径大于 $150\mu\text{m}$ 的气泡会在几个数十秒之后浮升到水面而破灭^[8], 因此在远程尾流中只剩下尺度分布范围为 $10 \sim 150\mu\text{m}$ 的气泡, 在本文的计算中, 取 $r_{\text{peak}} = 20\mu\text{m}$ 。从公式(4)(5)可以看出, 在本文设定的单散射条件下, 校正因子 $\bar{R}$ 和误差因子 $\bar{E}$ 与 Z , L 和 n_0 的取值无关。

气泡一旦在海水中形成, 小于 $300\mu\text{m}$ 的气泡会在几秒中之内附上有机膜^[9], 因此舰船尾流气泡群在大部分生命时间内是由覆盖着有机膜的脏气泡组成的。有机膜的厚度从 $0.001\mu\text{m}$ 到 $1\mu\text{m}$ 不等, 其成分主要有蛋白质膜(相对折射率 $m = 1.2$)油脂膜(相对折射率 $m = 1.1$)两种^[9]。在本文的计算中, 取气泡相对于海水的折射率为 0.75 , 有机膜相对于海水的折射率分 1.2 和 1.1 两种典型情况。

4 数值计算结果及分析

为研究远程尾流中气泡群前向光散射对气泡群衰减系数测量的影响, 利用式(4)、(5)以及文献[6]中的相关公式, 采用上节中气泡群的尺度分布模型, 我们计算了干净的和覆盖着不同成分有机膜的脏气泡群的前向散射误差因子 $\bar{E}$ 和校正因子 $\bar{R}$, 如图1所示。图1(a)为前向 10° 范围内的3种气泡群(干净气泡、 $0.1\mu\text{m}$ 厚油脂膜的气泡和 $0.1\mu\text{m}$ 厚蛋白质膜的气泡)的前向散射误差因子 $\bar{E}$ 随散射角的变化关系。图1(b)为前向 10° 范围内的3种气泡群的前向散射校正因子 $\bar{R}$ 随散射角的变化关系。我们还计算了干净的和覆盖着不同厚度蛋白质膜的脏尾流气泡群的前向散射误差因子 $\bar{E}$ 和校正因子 $\bar{R}$, 如图2所示。图2(a)为前向 10° 范围内的4种气泡群(干净气泡、 $0.01\mu\text{m}$ 、 $0.1\mu\text{m}$ 和 $1\mu\text{m}$ 厚蛋白质膜气泡)的前向散射误差因子 $\bar{E}$ 随散射角的变化关系,

图2(b)为前向 10° 范围内的4种气泡群的前向散射校正因子 $\bar{R}$ 随散射角的变化关系。

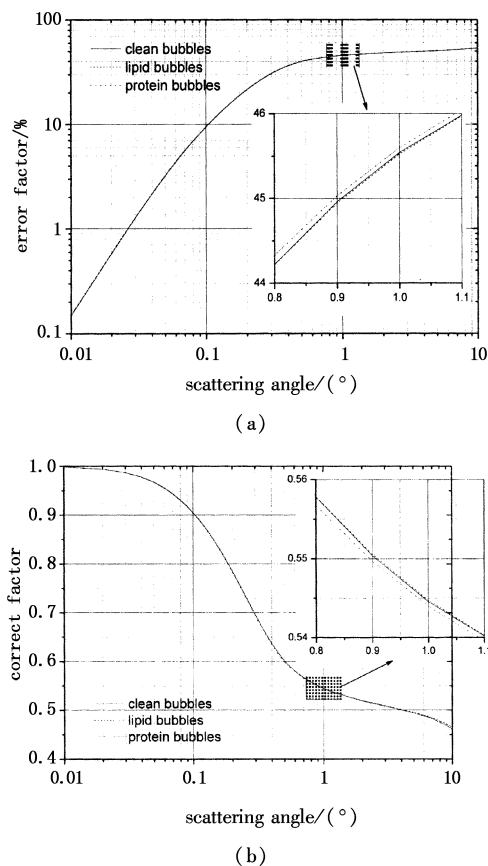


图1 干净气泡群和覆盖着不同成分有机膜的脏气泡群的散射误差因子和校正因子

Fig. 1 the error factor and correction factor of clean bubbles and dirty bubbles coated with different componental organic films

从图1和图2中我们可以看出:

1) 尾流气泡群的前向散射误差因子在小于 1° 的前向小角度散射角范围内迅速增加到40%以上, 然后随散射角的增加缓慢增加, 相应的前向散射校正因子在小于 1° 的前向小角度散射角范围内迅速减小到0.6以下, 然后随散射角的增加缓慢减小。产生这种现象的原因是因为海水中的气泡是一种特殊的离散介质, 其散射相函数在前向 1° 范围内的幅度远大于其他方向, 单散射条件下尾流气泡群近一半的散射能量集中在前向 1° 的范围内。

2) 有机膜对尾流气泡群的小角度前向散射误差因子和校正因子的影响很小。以散射角 1° 处的值为例, 图1(a)中干净气泡、 $0.1\mu\text{m}$ 厚油脂膜的气泡和 $0.1\mu\text{m}$ 厚蛋白质膜的气泡的前向散射误差因

子分别为 45.544%, 45.526% 和 45.6%。图 1(b) 中的前向散射校正因子分别为 0.54456, 0.54474 和 0.544, 变化很小。图 2(a) 中干净气泡、0.01 μm 、0.1 μm 和 1 μm 厚蛋白质膜气泡的前向散射误差因子分别为 45.544%, 45.566%, 45.6% 和 45.684%。图 2(b) 中干净气泡、0.01 μm 、0.1 μm 和 1 μm 厚蛋白质膜气泡的前向散射校正因子分别为 0.54456, 0.54434, 0.544 和 0.54316, 变化也很小。产生这种现象的原因可解释为气泡表面附着的不同成分不同厚度的有机膜对海水中气泡的前向散射强度的影响很小。

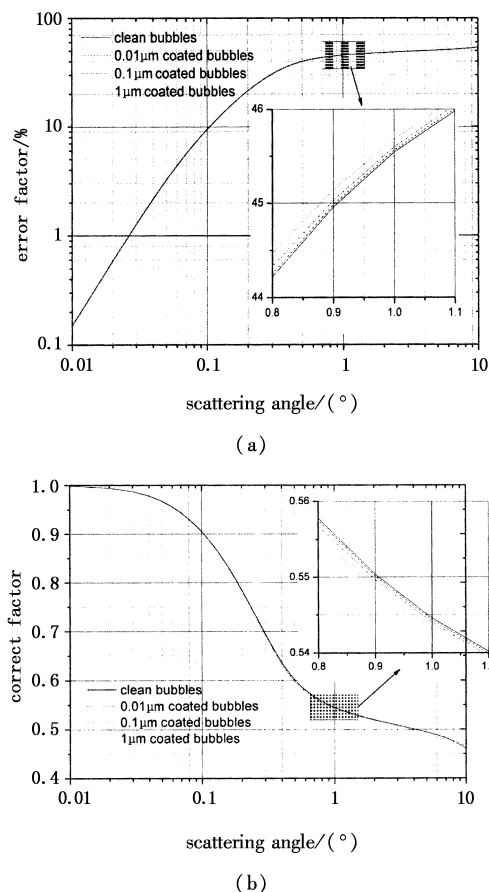


图2 干净气泡群和覆盖着不同厚度有机膜的脏气泡群的前向散射误差因子和校正因子

Fig.2 the error factor and correction factor of clean bubbles and dirty bubbles coated with different thick organic films

5 结论

本文的研究表明,前向散射对尾流气泡群的衰减测量影响很大,在设计尾流前向自导探测系统时必须考虑前向散射光的影响;本文的研究还表明,气泡表面附着的有机膜对尾流气泡群的衰减测量影响

很小,在设计探测系统可不考虑有机膜的影响。

设计尾流前向自导的探测系统时,接收视场角是一项关键参数。从图 1 和图 2 可以看出,在不同的散射角处,视场角的变化对衰减测量的影响不同。而在探测系统的机械加工和装配过程中,实际视场角难免与设计值会有一定的偏差,为了降低这种偏差对测量精度的影响,探测系统的视场角应选定在散射误差因子(或校正因子)对视场角的变化反应不灵敏处。同时,为减小环境光的影响,探测系统的视场角也不能选得太大。综合这两方面的因素,探测尾流气泡群衰减的视场角最好选定在 1° 左右。

参考文献:

- [1] Mueller J L, Austin R W, Morel A, et al. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation [R]. NASA/TM-2003-21621/Rev-Vol I:23.
- [2] Deepak A, Box M A. Forward scattering corrections for optical extinction measurements in aerosol media. 2: Polydispersions [J]. Appl. Opt., 1978, 17(19): 3169-3176.
- [3] Piskozub J, Stramski D, Terrill E, et al. Influence of forward and multiple light scatter on the measurement of beam attenuation in highly scattering marine environments [J]. Appl. Opt., 2004, 43(24): 4723-4731.
- [4] Voss K J, Austin R W. Beam attenuation measurement error due to small-angle scattering acceptance [J]. J. Atmos. Ocean. Technol., 1993, 10: 113-121.
- [5] Deepak A, Box M A. Forward scattering corrections for optical extinction measurements in aerosol media. 2: Monodispersions [J]. Appl. Opt., 1978, 17(18): 2900-2908.
- [6] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles [M]. New York: Wiley, 1983.
- [7] Trevor M V. Boundary scattering limitation of fish detection in shallow waters [J]. Fisheries Research, 1998, 35: 127-135.
- [8] Trevor M V, Vage S, Farmer D M. Acoustical measurements of microbubbles within ship wakes [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1994, 95: 1922-1930.
- [9] Zhang X, Lewis M, Johnson B. Influence of bubbles on scattering of light in the ocean [J]. Appl. Opt., 1998, 37: 6525-6536.