文章编号: 0253-2239(2008)04-0799-05

光在水中吸附膜层气泡上的散射特性

李微杨克成夏珉郑毅张威

(华中科技大学 光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 光在水中大尺度气泡上散射特性的研究多是基于 Davis 模型。该模型没有考虑到吸附膜层对光在气泡上散射的影响,而海水中的大多数气泡都有膜层附着,这些膜层会影响到气泡的光散射特性。本文从几何光学的角度出发,建立了吸附膜层气泡的体积散射函数简化公式。在此理论基础上,模拟计算了尺度远大于入射光波长的大气泡散射光强分布曲线,得出光照射下气泡上散射光强的远场特性,讨论了影响气泡散射光强分布的主要因素。并与无膜气泡光散射分布曲线比较,讨论了油膜膜厚、折射率等参量对气泡的光散射特性影响。得出结论:吸附膜层气泡的光强分布曲线与无膜气泡相似,但吸附膜层会削弱前向散射光,增强后向散射光。

关键词 应用光学; 散射特性; 几何光学; 气泡; 吸附油膜; 水体

中图分类号 O435 文献标识码 A

Distribution Characteristics of Scattered Light Intensity on Coated Air Bubble in Water

Li Wei Yang Kecheng Xia Min Zheng Yi Zhang Wei

(School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstact Most of the former studies on characteristics of scattered light on large bubbles in water are based on Davis model, in which a bubble is regarded as an uncoated spherical object. However, most of the bubbles in water are coated with oil layer, which surely influences their scattering characteristics. We establish a simplified equation to calculate how a light beam is scattered when it enters a coated bubble. A two-dimensional curve, namely volume scattering function (VSF) is plotted, that models the angular distribution of scattered intensity by a coated bubble with a diameter far larger than wavelength of incident light. The curve reveals the far-field characteristics of light scattered by the coated bubble, as well as the main influence on scattering intensity. By comparing with VSF of uncoated bubble, we discuss the parameters that influence distribution of scattering light on a coated bubble, such as thickness of the oil layer, relative index of refraction and get that oil coating weakens the forward scattering of the coated bubble while strengthens the backward scattering.

Key words applied optics; scattering characteristics of scattered light; geometrical optics; bubble; coated oil; water

1 引 言

自然界的海水中存在大量的气泡,如海浪泡 沫^[1]、鱼群气泡和舰船尾流^[2]。通过数值模拟及实 验检测经过大量气泡散射后激光散射光的光学特性 参量,可以对海洋中气泡的尺寸、形状、种类^[3],乃至 气泡的运动方向,运动速度进行判断,从而判断出相 应物体的位置和运动轨迹^[4]。研究单个气泡光散射 特性,是研究气泡群光散射特性的基础。例如,用蒙 特卡罗方法模拟探测目标群光学特性就必须以单个 探测目标^[5,6]光散射数学模型作为模拟基础。因 此,正确建立单个气泡光散射数学模型,是探讨气泡 群光散射特性的基础。

收稿日期: 2007-08-28; 收到修改稿日期: 2007-10-29

作者简介:李 微(1981-),女,博士研究生,主要从事光电子学方面的研究。E-mail:aliceliwei@gmail.com

导师简介:杨克成(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事光电子技术和激光技术等方面研究。

许多海水中微小气泡都被油膜所吸附^[1]。 Glazman^[7]提出膜层厚度应从10 nm~1 μm。这些 膜层应该会影响到海水中气泡上光散射的分布。本 文采用与无膜气泡光散射计算模型^[8]类似的研究方 法,将光束细分为若干根光线。研究理想单根光线 的光路,计算若干次折射反射后出射光线的位置和 光强,设定能量接收平面将落在同一位置的光强进 行叠加,借助计算机进行数值计算,模拟出气泡表面 光强分布。

2 吸附膜层气泡光散射数学模型

自然界的海水中存在着大量的气泡,虽然对于 他们的尺寸分布还不甚了解,但直径可能超过 200 μm,远大于可见光波长。因此,可用几何光学 原理计算这类大尺度气泡的散射光分布特性。

实际光束有一定宽度,将光束视为 N 根光线的 叠加。首先得出单根光线计算公式,则可通过叠加得 出整个光束的散射光分布。吸附油膜气泡中单个光 线光路示意图如图 1 所示,其中气泡半径 R_a ,薄膜半 径 R_b ,薄膜厚度 $R_c = R_b - R_a$,相对膜厚 $h = R_c/R_a$, 空气折射率 n_a ,水折射率 n_b ,薄膜折射率 n_c ,其中, 水、油膜、空气均为均匀介质。入射角 i 为入射光线 与x 轴正向的夹角,出射角 $r_{(m)(n)}$ 为出射光线与x轴正向的夹角,出射位置用极坐标表示为 (R_b, x) , $x_{(m)(n)}$ 为出射处法线方向。 $I_{(m')(n')}$ 为该处出射光强。 下标 m, n分别为光线在薄膜,空气中的折反射 次数。

一根光线从水中入射到气泡膜层,可能会在膜 层内折反射若干次,再进入气泡内折反射若干次,再





进入膜层内折反射若干次。也可能在气泡和薄膜内 不断穿射,即使在气泡内和膜层内折反射次数一定, 都有多种光路组合。欲推得 N 次的递推公式来研 究各种光路组合工作量非常大^[9]。因此对该公式进 行简化。计算入射角从 0°变化到临界角时的反射 率可知。除临界角附近,空泡-油膜界面的反射率 ρ_a ,油膜-水界面的反射率 ρ_b 最大值都不超过 0.04。 故一次反射后光强为 $I_1 \approx 4 \times 10^{-2} I_0$,二次反射后 其光强 $I_2 \approx 9 \times 10^{-6} - 2.5 \times 10^{-2} I_0$,二次反射后光 强对总光强的影响小于 0.1%。对总体散射光强分 布影响不大,在允许的误差范围内,可将该二次反射 后光强忽略不计。在仿真程序中,采用简化公式,仅 计算一次反射光线,所涉及的主要的公式如表 1^[10]。

表⊥	反射次数	工伙以内	的光线出射	位直,用度》	文尤至

Ray	1	2	3	4	5
Light path	$b_{00} \rightarrow a_{01} \rightarrow a_{11} \rightarrow b_{12}$	Relected on b_{00}	$b_{00} \rightarrow a_{01} \rightarrow b_{02}$	$b_{00} \rightarrow a_{01} \rightarrow a_{11} \rightarrow a_{21} \rightarrow b_{22}$	$b_{00} \rightarrow a_{01} \rightarrow a_{11} \rightarrow b_{12} \rightarrow a_{13} \rightarrow a_{23} \rightarrow b_{24}$
Exit position	$x_{(1)(2)} = \pi - i - i$	$x_{(0)(0)} = \pi - \theta_1$	$x_{(0)(2)} = \pi - \theta_1 -$	$x_{(2)(2)} =$	$x_{(2)(4)} =$
$(R_{\mathrm{b}}, x_{\scriptscriptstyle{(m)}(n)})$	$2\left(\frac{n_{\rm b}}{n_{\rm c}} \tan \theta_2\right)$		$2\left(\frac{n_{\mathrm{b}}}{n_{\mathrm{c}}}\tan\theta_{2}\right)$	$\pi - 2(\pi - 2\theta_4) -$	$\pi - 2(\pi - 2\theta_4) -$
				$2\left(rac{n_{ m b}}{n_{ m c}} an heta_{ m 2} ight)$	$4\left(rac{n_{ m b}}{n_{ m c}} an heta_2 ight)$
Exit direction	$r_{(1)(2)} = \pi - 2\theta_1 -$	$r_{(0)(0)} = \pi - 2\theta_1$	$r_{(0)(2)} = \pi - 2\theta_1 -$	$r_{(2)(2)} = \pi -$	$r_{(2)(2)} = \pi -$
$(R_{\rm b}, r_{(m)(n)})$	$2\left(\frac{n_{\rm b}}{n_{\rm c}}\tan\theta_2\right)$	$2\left(\frac{n_{\rm b}}{2}\tan\theta_2\right)$	$2\theta_1 - 2(\pi - 2\theta_4) -$	$2\theta_1 - 2(\pi - 2\theta_4) -$	
			(n_c)	$-2\left(rac{n_{ m b}}{n_{ m c}} an heta_2 ight)$	$-2\left(rac{n_{ m b}}{n_{ m c}} an heta_2 ight)$
Exit intensity	$I_{(2)(5)} = I_{00} \tau_{\rm a}^2 \tau_{\rm b}^2$	$I' = I_{\rm oo} \rho_{\rm b}$	$I_{05} = I_{00} \rho_{\rm a} \tau_{\rm b}^2$	$I_{(4)(5)} = I_{00} \rho_{\rm a} \tau_{\rm a}^2 \tau_{\rm b}^2$	$I_{(4)(9)} = I_{00} \rho_{\rm b} \tau_{\rm a}^4 \tau_{\rm b}^2$

Table 1 Exit position, angle and intensity information for rays reflected once

当 $\theta_1 < \theta'_c$,不发生全反射,散射光线主要由五条 光线构成,其出射角度,位置及光强见表 1。当 $\theta_1 > \theta'_c$,发生全反射,在 b_{02} 面上出射,光路同光线 3,此时 $\rho_{na} = 1$,均归纳到表 1。

3 吸附膜层气泡体散射函数模拟

光束视为 N 根光线的叠加。N 为抽样光线数 目。借助计算机,编程模拟计算 N 根光线反射一次 后出射的能量,则可得到气泡表面近似散射光强。 用以上公式求得出射光信息,设定能量接收平 面^[11],考察散射光到达该平面后的光强分布,可得 出气泡上散射光的远场分布特性,则可得到气泡表 面光强分布,称之为体散射函数(Volume scattering fuction, VSF),记为 *I*(θ)^[12]。θ 为散射角。*I* 为气 泡表面出射光强。

3.1 吸附膜层气泡与无膜气泡体散射函数曲线比较

使用典型的参量计算体散射函数曲线: $n_a = 1$, $n_b = 1.33$, $n_c = 1.47$, $R_a = 200 \ \mu m$, $R_c = 2 \ \mu m$,接收 平面半径 $L = 2 \ mm$,光线抽样数目 N = 20000,令输 入光束的总光强为 $I_1 = 1$ 。通过对光强分布公式进 行抽样模拟,接收平面上测得体散射函数曲线如图 2 中虚线所示。实线所示为相同气泡尺度,相同介 质折射率下的无膜气泡体散射函数。由于入射光束 为均匀光束,且入射光束相对极轴对称,因此体散射 函数 曲线 为以极 轴 为对称 轴 的对称 曲线,即 $r_n \in (0,180^\circ) 与 r_n \in (0,-180^\circ)$ 散射光强分布完全 对称;散射光强基本上分布在前向,前向散射光强远 大于后向散射光强,当 $x_n = 0$ 时出射光线最强,在 $|r_n| > 83^\circ$ 后散射光强迅速减小;当 $r_n = 83^\circ$,散射光 强有突变,光强有极大值。从模拟结果中可看出吸 附油膜气泡与无膜气泡的体散射函数曲线特征基本 相同,吸附油膜气泡的前向散射比无膜气泡前向散 射强度小(*I*_{un} < *I*_{co}),而其后向散射强度大于无膜气 泡后向散射(*I*_{un} > *I*_{co})。其分界点在散射角为 83° 处。即油膜会增强气泡的后向散射,削弱前向散射。



图 2 极坐标下气泡体散射函数曲线



温度、盐度以及入射波长都会影响水的折射率, 从而影响光在气泡上的体散射函数曲线,同样,水中 气泡尺度不同,也会影响体散射函数曲线。通过改 变计算参量,即同时改变两种气泡的气泡半径,或介 质相对折射率,得出一系列模拟计算结果表明,当介 质相对折射率改变(在油的折射率范围内),或气泡 半径改变(保持无膜和吸附膜层气泡半径相同)时, 吸附膜层始终削弱气泡上的前向散射光而增强后向 散射光。

3.2 膜厚对吸附膜层气泡上散射光分布的影响

气泡表面油膜一般在 10 nm~1 μ m 之间^[7],而 海洋中的气泡半径多为 200 μ m 大气泡。油膜厚度 记为 R_{e} ,气泡半径为 R_{a} ,设膜层相对厚度 $h = R_{e}/$ R_{a} ,用于表示膜层厚度与气泡半径的相对大小。研 究 h 在 1×10⁻⁶~1×10⁻¹范围内变化,膜层厚度对



图 3 h 分别为 0,0.06,0.15 时气泡体散射曲线. (a)极坐标下,(b)对数坐标下

Fig. 3 Valume scattering function of a coated bubble with h of 0, 0.06, 0.15 respectively, shown in polar coordinate (a)

in Cartesian logarithmic coordinate (b)

光散射分布特性的影响。在该范围内取大量不同 h 值,发现膜层厚度对气泡表面散射光强分布并非单 调变化关系。实际海洋中气泡半径与油膜的厚度有 一定的分布范围,讨论在该范围内油膜对气泡光散 射分布特性的影响,对今后将要进行的实验更有指 导意义。

图 3(a) 为极坐标下显示当 h 为 0(无膜), 0.06, 0.15 时得到气泡体散射曲线。厚度在小范 围内改变时,体散射函数改变也不大。将散射曲线 上的典型值列于表 2 中,当 h 增大时,前向散射并非 单调变化,在(0,20°)之间,h 增大,散射光强增大。 而(21°,180°)之间,h 增大,散射光强变小。当 h> 0.06 之后,散射光强随 h 变化的改变并不大,且没 有线性关系。而后向散射始终随 h 的增大而减弱 的,将体散射函数在对数直角坐标系中可更清晰的 看出后向散射的变化,如图 4 所示。

Table 2 Typical value of scattered light intensity on bubbles of different thickness of oil layer (relative intensity)

Scattering angle								
Thickness	0	19	20	50	$99 / 10^{-4}$	150	160	180
of layer (h)								
0	0.01107	0.00845	0.00822	0.00343	2.93×10^{-4}	1.40×10^{-4}	1.40×10^{-4}	1.40×10^{-4}
0.01	0.01219	0.00836	0.00804	0.00327	3.79×10^{-4}	2.52 $\times 10^{-4}$	2.55 $\times 10^{-4}$	2.60×10 ⁻⁴
0.06	0.01190	0.00824	0.00805	0.00338	3.81×10^{-4}	2.40×10 ⁻⁴	2.46×10 ⁻⁴	2.50×10 ⁻⁴
0.08	0.01189	0.00822	0.00799	0.0034	3.76 $\times 10^{-4}$	2.36×10 ⁻⁴	2.41×10 ⁻⁴	2.42 $\times 10^{-4}$
0.10	0.01188	0.00817	0.00793	0.00337	3.79 $\times 10^{-4}$	2.34 $\times 10^{-4}$	2.35 $\times 10^{-4}$	2.41×10 ⁻⁴
0.12	0.01184	0.00816	0.00795	0.00342	3.77 $\times 10^{-4}$	2.29×10 ⁻⁴	2.34×10 ⁻⁴	2.34 $\times 10^{-4}$
0.15	0.01179	0.00824	0.00794	0.00345	3.72 $\times 10^{-4}$	2.24×10 ⁻⁴	2.27 $\times 10^{-4}$	2.32×10^{-4}
			1.49					



图 4 n。分别为 1.42,1.47,1.53 时气泡体散射曲线。(a)极坐标下,(b)直角对数坐标下

Fig. 4 Valume scattering function of a coated bubble with n_c of 1.43, 1.47, 1.53 respectively. (a) Shown in

polar coordinate, (b) in Cartesian logarithmic coordinate

3.3 油膜折射率变化对散射光强的影响

油的折射率在 1.43~1.55 之间。一般的植物

油折射率为 1.47。在其他参量保持为典型参量的 情况下,改变油膜折射率,比较油膜折射率改变对气



图 5 直角坐标下当 n_c分别为 1.43, 1.47, 1.51, 1.55 时前向散射比较(a), 后向散射比较(b) Fig. 5 Comparison of forward (a), backward (b) scattering distribution of coated bubble when n_c equals to 1.43, 1.47, 1.51, 1.55, respectively, shown in Cartesian coordinate

泡散射光强分布的影响。图 4 为 n。分别为 1.43, 1.47,1.53 时气泡体散射曲线。当油膜折射率改变 不大时,气泡散射光强分布特性总体改变也不大。 研究其细部改变特征如图 5 所示。当 n。增大时,气 泡对光的前向散射减弱,而后向散射增强。分布非 常均匀,没有奇异点。

3.4 气泡半径改变对散射光强的影响

保持膜层厚度不变的情况下改变气泡半径,则 等价于改变相对厚度 h,其情况在 3.2 节中已讨论。 在保持膜层对气泡半径的相对厚度不变,即 h 不变 的情况下,改变 R_a 的值,得到体散射函数如图 6。 当 R_a 分别为 $10 \ \mu m$, $100 \ \mu m$, $200 \ \mu m$ 时得到的体散 射函数曲线几乎完全重合。可见当 h 不变时,且光 束始终大于气泡半径时,气泡半径改变对气泡的体 散射函数分布没有影响。



- 图 6 直角坐标下当 R_a 为 10 μm,100 μm,200 μm 时 气泡体散射曲线
- Fig. 6 Comparison of valume scatting function among coated bubble of different diameters: 10 μm, 100 μm, 200 μm, respectively, shown in Cartesian coordinate

4 结 论

本文在无膜气泡体散射函数模型的基础上进一 步建立了吸附膜层气泡体散射函数模型。在保证精 确度的前提下,采用简化公式计算吸附膜层气泡体 散射函数。叠加在气泡内反射两次以内的所有光 线,可得到气泡表面的体散射函数。经过模拟计算 比较,吸附膜层气泡与无膜气泡的体散射函数曲线 特征基本相同,与无膜气泡相比,吸附膜层气泡的 前向散射减小,后向散射增大。其改变幅度会受到 吸附膜层的厚度,油膜折射率的影响。适当修改模 拟计算的参量,可将该模型推广应用到其他吸附膜 层的透明球体上的体散射函数的模拟计算。

参考文献

- 1 Brace D. Johnson, Robert C. Cooke, Generation of stabilized microbubbles in seawater[J]. Science, 1981, 213(4504): 209~211
- 2 W. H. Munk, P. Scully-Power, F. Zachariasen. Ships from space[J]. Proceedings of The Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1987, 412 (1843): 231~254
- 3 Grant B. Deane, M. Dale Stroke. Air entrainment processes and bubble size distributions in the surf zone [J]. J. Physical Oceanograph, 1999, 29(7): 1393~1403
- 4 Zhang Xiaohui, Ge Weilong, Zhu Donghua. Study on light characteristics of ship wake for self guided torpedo[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1355 张晓晖,葛卫龙,朱东华. 鱼雷激光尾流自导方法的研究[J]. 中 国激光, 2004, **31**(11): 1355
- 5 Wang Jiangang, Wang Guiying, Xu Zhizhan. Monte-Carlo simulations for light propagation in striated scattering medium [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(3): 346~350 王建岗,王桂英, 徐至展等. 光在分层散射介质中传输行为的蒙 特卡罗模拟研究[J]. 光学学报, 2000, 20(3): 346~350
- 6 Yang Ruike, Ma Chunlin, Li Liangchao. Influence of multiple scattering on laser pulse propagation through sand and dust storm [J]. Chin. J. Lasers, 2007, 34(10): 1393~1397 杨瑞科,马春林,李良超. 沙尘暴多重散射对激光脉冲传输的影响[J]. 中国激光, 2007, 34(10): 1393~1397
- 7 Roman E. Glazman. Effects of absorbed films on gas bubble radial oscillations[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1983, 74(3): 980~986
- 8 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.水中气泡上体散射函数的模拟与计算[J].光学学报, 2006, 26(5): 647~651
- 9 Li Wei. Simulation and computation of bobbles volume scattering function in water[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. 13~20

李 微.水中气泡光散射模型及仿真研究[D].武汉:华中科技 大学 2005.13~20

- 10 Wei Li, Kecheng Yang, Min Xia et al.. Computation for angular distribution of scattered light on a coated bubble in water[J]. J. Optics A: Pure and Applied Optics, 2006, 8: 926~931
- 11 Gorge E. Davis. Scattering of light by an air bubble in water[J]. Opt. Soc. Am., 1955, 45(7): 572~581
- 12 Xu Qiyang, Yang Kuntao, Wang Xinbing *et al.*. Blue-Green Lidar Ocean Survey [M]. Beijing : National Defense Industry Press, 2002. 36~58 徐启阳,杨坤涛,王新兵 等. 蓝绿激光雷达海洋探测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 36~58