

文章编号: 1001-3806(2009)01-0057-03

基于蒙特卡罗的气泡后向散射信号的视场分析

石晟玮¹, 王江安^{2*}, 蒋兴舟¹, 马治国^{1,2}, 余扬²

(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: 为了研究气泡后向散射信号强度与气泡位置及接收发射视场之间的关系, 采用蒙特卡罗方法对存在水槽边界条件下的水中气泡幕后向光散射回波信号进行了系统仿真, 并结合实际的水槽实验, 对不同气泡幕位置及接收发射轴夹角情况下的后向散射信号进行了理论分析和实验验证, 取得了相应的气泡幕后向散射信号强度的实验与仿真数据。结果表明, 对不同的接收发射轴夹角, 存在一个回波峰值, 且该峰值对应的接收发射轴线的夹角与气泡幕位置存在一一对应的关系, 这一结果对实际海况下的舰船尾流气泡后向散射光探测试验是有帮助的。

关键词: 散射; 视场角; Monte Carlo; 后向散射; 气泡群

中图分类号: O436.2 **文献标识码:** A

Field of view analysis of bubble film's backscattering signal based on Monte Carlo method

SHI Sheng-wei¹, WANG Jiang-an², JIANG Xing-zhou¹, MA Zhi-guo^{1,2}, YU Yang²

(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: In order to study the relationship between the bubbles' backscattering signal intensity and the position of bubble film and receiver angle, based on Monte Carlo method, the backscattering signal was simulated under the boundary condition of the flume. Experimental results of backscattering signal were also obtained in different bubble film positions and receiver angles. It is turned out that there is a peak in backscattering signal, which is corresponding to a certain receiver angle for different bubble film positions. The conclusions are helpful for optical detection of bubble wakes of ships on the sea.

Key words: scattering; field of view; Monte Carlo; backscattering; bubble film

引言

利用舰船尾流中气泡群对激光的后向散射效应来探测舰船具有抗干扰能力强、探测距离远、探测概率高等优点^[1], 已成为水中目标探测领域的一个重要研究方向。近年来, 国内外众多学者在不同领域对气泡的后向散射光学特性展开了研究。STROUD 和 MARSTON 等人通过解析计算的方法研究了单个气泡的 Mie 散射效应, 结果表明, 当散射角在 180° 附近时, 气泡的后向散射光明显增强, 从而为激光尾流的后向探测提供了理论依据^[2]。ZHANG 等人首先从海洋遥感测量的角度出发, 对亚微米气泡及覆盖有机膜的微气泡的体散射函数进行了理论分析^[3-4]; KOKANOVSKY 在此基础上对气泡和液滴的不同散射光特性进行了仿

真比较, 并将其应用于水中气泡数密度的测量^[5]; QIU 则利用散射光的相位多普勒特性对单个微气泡半径与上浮速度的测量进行了分析, 并得到了初步的实验结果^[6]。而国内对气泡散射光特性的研究开始较晚, 目前主要以理论研究和定性实验为主^[7-10]。

作者尝试利用 Monte Carlo 法对室内水槽中的气泡幕后向散射光接收信号进行模拟, 从理论上对后向散射强度与气泡幕的位置、接收器的角度变化量之间的关系进行了定量的分析, 并通过实验进行了验证, 从而为尾流气泡群后向散射光的实际检测与准确预报提供一定的理论与实验依据。

1 Monte Carlo 仿真计算

Monte Carlo 法是基于光子运动轨迹的计算机模拟, 它利用相位函数、单次散射率和总衰减系数, 并通过随机数选取散射位置和散射角度来构成光子轨迹^[11]。在研究水中气泡幕的后向散射问题时, 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

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技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: gdyfzx@163.com

收稿日期: 2007-11-29; 收到修改稿日期: 2008-03-13

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。

1.1 气泡幕后向散射接收信号的模型

根据气泡幕后向散射接收的实验条件,假定发射光束为准直光,将介质的边界条件设置为长方体水槽,如图1所示。令 O 点为接收发射轴的交点, L_1 为 O 点

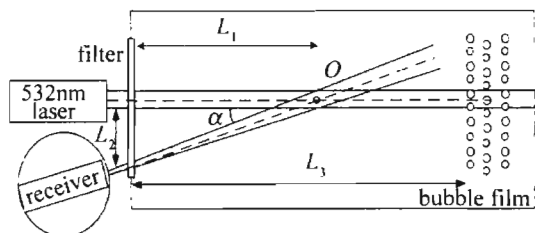


Fig. 1 The diagram of detecting bubbles with light back scattering

与接收发射平面距离, L_2 为激光器与接收器的轴线间距离, L_3 为气泡幕位置与接收发射平面距离, α 为激光发射与接收系统的轴线夹角。光子的空间位置矢量采用直角坐标系表示,方向矢量采用方向余弦来表示。

1.2 Monte Carlo 模拟步骤

根据上述模型,在模拟中主要考虑以下几个问题。

1.2.1 光子运动步长 光子在水中和气泡幕中的运动步长分别由水的衰减系数和气泡幕的密度及散射截面决定:

$$\begin{cases} L_w = -\ln\eta/\mu_l \\ L_b = -\ln\eta/(\rho\sigma_l) \end{cases} \quad (1)$$

式中, L_w 、 L_b 分别为光子在水中和气泡幕中的运动步长; η 为(0,1)间的任一随机数; μ_l 为水的衰减系数; ρ 为气泡幕的数密度; σ_l 为单个气泡的总散射截面。

1.2.2 边界条件的处理 根据模型,光子在含气泡幕的水槽中运动时存在3种边界情况:水槽壁面的反射、水面的反射和折射以及气泡幕与水的交界面的透射。

当光子碰到水槽壁面时,发生反射。将水槽壁面作为一个朗伯反射平面,光子反射后的运动方向相对于反射前光子运动方向的散射角、方位角(θ_m , φ_m)可由下式抽样得到:

$$\begin{cases} \theta_m = \pi - \arcsin(\xi_1) \\ \varphi_m = 2\pi\xi_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, ξ_1 和 ξ_2 均表示(0,1)上均匀分布的随机数。光子的权值变为: $\omega_m = \omega_{m-1}\delta$,其中 ω_{m-1} 和 ω_m 分别为光子在反射前后的权值, m 为碰撞次数; δ 为壁面的反射率。

当光子运动到水面时,计算光子被水面反射的概率,其发生内反射概率为:

$$P(\mu_i) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_i - \theta_o)}{\sin^2(\theta_i + \theta_o)} + \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_o)}{\tan^2(\theta_i + \theta_o)} \right] \quad (3)$$

式中,入射角 $\theta_i = \arccos(|\mu_i|)$,折射角 θ_o 与入射角 θ_i 的关系为 $n_i \sin\theta_i = n_o \sin\theta_o$, n_i 和 n_o 分别为入射和折射介质的折射率。产生一随机数 $\xi \in (0,1)$,如果 $\xi <$

$P(\mu_i)$,则光子返回水中,其反射方向按照反射定律计算,权值保持不变。反之,光子折射出水面,运动终止。

当光子到达气泡幕与水的交界面时,光子的运动步长以及决定光子散射角的不对称因子 g 发生变化,而光子在穿越交界面时的本次散射路径的运动方向余弦保持不变。

1.2.3 探测器接收光子概率的计算 作者采用光子返回概率的方法对接收信号进行模拟。作者认为,在接收视场内每次碰撞对返回信号都有贡献,因此平均每个光子都有几次贡献。首先判断光子的每个碰撞点位置是否在探测器的视场角所在范围内。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:

$$p = \frac{f(\theta)}{4\pi} (A/h^2) \exp(-\mu_l d_1 - \rho\sigma_l d_2) \omega_m \quad (4)$$

式中, A 是探测器接收面积; $f(\theta)$ 是修正的H-G函数^[9]; h 是由当前散射点到探测器中心的距离; d_1 是散射点到探测器中心的距离中经过水介质的距离; d_2 则是经过气泡幕的距离; ω_m 为第 m 次碰撞后光子的权值。

2 仿真结果与实验的比较

尾流气泡脉冲激光后向散射实验系统由实验水槽、光源、气泡幕产生装置、光电接收系统、角度调整平台和数据采集和处理系统组成,系统如图1所示。实验中,光源采用输出波长532nm,脉宽10ns的固体脉冲激光器;气泡幕产生装置采用微孔陶瓷管;光电接收系统采用雪崩二极管电路采集系统。

图2为气泡幕产生前后的典型接收信号曲线。无

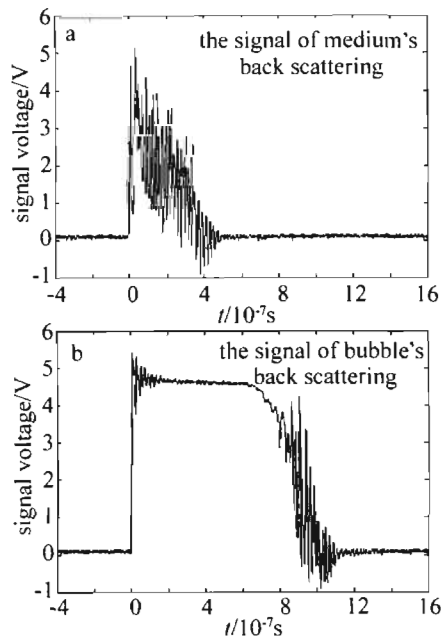


Fig. 2 The signal curve of light back scattering

气泡幕存在时,系统接收到的是水分子和杂质的后向散射光,信号强度较弱;而当气泡幕产生后,后向散射光增强,表现为信号脉冲宽度的展宽和信号线下积分面积的增加。后向散射光越强,信号持续时间越长,信号线下的积分面积越大。在实验中取信号曲线下积分面积 S 为信号特征量。分别调整实验系统中的变量 L_3 和 α ,记录不同变量时的后向散射光信号曲线的特征量 S 的变化曲线,如图3所示。

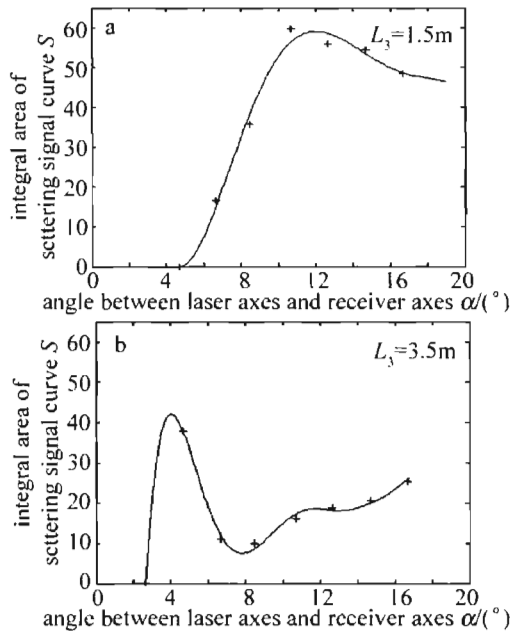


Fig.3 The back scattering experiment signal of bubble film with different situations

为与实验结果进行对比,将模拟参量设置为尽量接近实验条件的参量。根据实际的实验设备与条件,设置模拟参量如下:模拟光子数 5×10^4 个,光束半径 3mm,接收器视场角 3mrad,水的衰减系数 $\mu_t = 0.35\text{m}^{-1}$,单次散射率 $\omega_s = 0.8$,气泡半径 $350\mu\text{m}$,气泡数密度 $5 \times 10^6/\text{m}^3$ 。取光子在接收视场内的返回概率 p 为信号特征量,图4是根据上述模拟参量计算的气泡幕位于不同位置时的后向散射光信号特征量 p 随发射与接收系统轴线夹角 α 的变化曲线。

将上述仿真结果与实验图形相比较,可以看出,两条曲线具有较好的相似性。

首先,随着发射接收系统轴线夹角 α 的增大,仿真和实验的后向散射接收信号特征量均有一个增大—减小—增大的过程,不同的 L_3 参量下信号峰值分别位于 12° 和 5° 附近,如图3和图4所示。由多次散射的理论可知,当激光直接照射部分气泡群在接收区域内时,接收信号最强。通过对图1的分析可知,当变量 L_3 固定时,随着接收角度 α 的逐渐增大,进入接收区域的散射光按以下顺序依次变化:(1)水体和气泡幕的多次散射光;(2)水体的多次散射光和气泡幕的单

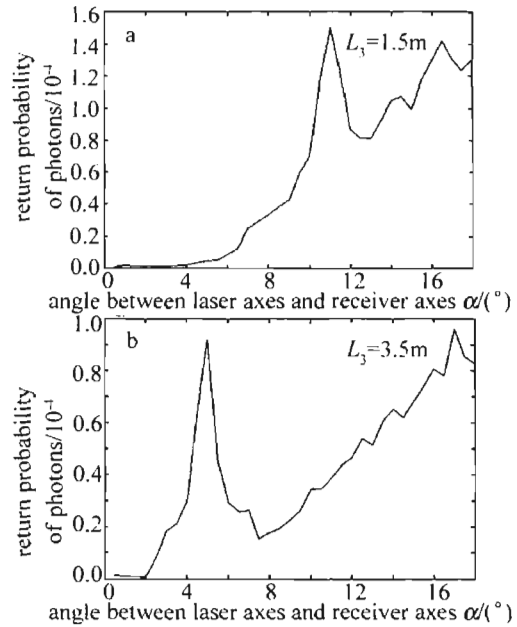


Fig.4 The back scattering simulation signal of bubble film with different situation

次散射光;(3)水体的单次散射光和气泡幕的多次散射光。因此,接收信号的强度也随之产生起伏。进一步分析可知,上述峰值点对应的轴线夹角 α' 正好位于激光在气泡幕的入射点区域,即存在如下关系: $\tan\alpha' \approx L_2/L_3$ 。

其次,在峰值点的信号强度上,仿真信号曲线也与实验曲线相吻合。由图3和图4可知,在 L_3 分别位于 1.5m 和 3.5m 时,实验接收信号的峰值特征量 S_{max} 的比值与仿真信号的光子返回概率 p_{max} 的比值分别为 1.55 和 1.67,比较接近。

因此,利用 Monte Carlo 法能够较准确地模拟出不同气泡幕位置处,后向散射信号随接收角度的变化曲线。但是,两者也存在几个不同之处。首先,实验中后向散射信号随角度变化的曲线上升速度较快;其次,实验中信号峰值区域的宽度要大于模拟曲线中的峰值宽度。通过分析,认为这主要有以下几个原因造成:(1)气泡幕模拟参量的设置存在一定的误差,该参量的设置值是根据实验中用 CCD 对气泡幕进行观察后的一个平均值,并不精确,且实验中所产生的并不是单一半径的气泡群,而具有一定的半径分布范围,气泡群密度也会产生变化,而气泡幕参量的变化将严重影响模拟中衰减系数和散射相位函数的计算;(2)实验中,水槽壁面的存在增强了气泡幕散射光的多次散射效应,从而使得进入接收器的后向散射信号强度明显增加;(3)发射光束在水中发生角度和空间的扩展;(4)水中杂质的散射光干扰。

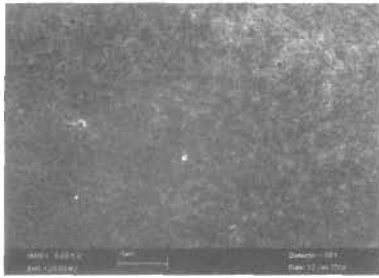


Fig.8 Microstructure of melted pool

好反映了在 SLM 过程中,金属粉末的熔化-凝固是一个动态过程,熔池前沿的激光扫描线影响着熔池后沿液相的凝固。

3 结论

通过合理控制激光工艺参量得到无明显球化效应和翘曲变形的 CuP 合金试样,试样达到完全的冶金结合;对试样进行显微组织分析,层内组织为细长枝晶;相邻两熔化层之间存在一个过渡区,过渡区组织不同于层内组织,为细小的等轴晶。

参 考 文 献

- [1] ATWOOD C, GRIFFITH M, KEICHER D, *et al.* Laser engineered net shaping: a tool for direct fabrication of metal parts [R]. Orlando: ICALEO, 1998: 1-9.
- [2] WEHMOLLER M, WARNKE P H, ZILIAN C, *et al.* Implant design

and production—a new approach by selective laser melting [J]. Computer Assisted Radiology and Surgery, 2005, 1281: 690-695.

- [3] TERRY W. Rapid prototyping, tooling and manufacturing state of the industry annual worldwide progress report [R]. Colorado: Wohlers Associates Inc, 2000: 41-52.
- [4] CHILDS T. Metals RP in Japan—technology transfer and applic rapid prototyping & tooling [J]. Industrial Applications, 2000(3): 1-2.
- [5] ABE F, OSAKADA K, SHIOMI M, *et al.* The manufacturing of hard tools from metallic powders by selective laser melting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 111(1/3): 210-213.
- [6] SUN M L, LU L, FUH J Y H, *et al.* Microstructure and properties of Fe-base alloy fabricated using selective laser melting [J]. SPIE, 2002, 4426: 139-142.
- [7] SCOTT J, HOLLISTER T, BERGMAN L. Assessment of european research and development in additive/subtractive manufacturing [R]. Baltimore: World Technology Evaluation Center Inc, 2004: 55-62.
- [8] LU L, FUH J Y H, CHEN Z D, *et al.* In situ formation of TiC composite using selective laser melting [J]. Materials Research Bulletin, 2000, 35(9): 1555-1561.
- [9] BARIN I, PLATZKI G. Thermochemical data of pure substances [M]. 3rd ed. Weinheim: VCH, 1995: 135.
- [10] GU D D, SHEN Y F, YANG J L, *et al.* Densification mechanism of multicomponent Cu-based metal powder in selective laser sintering process [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(4): 596-602 (in Chinese).
- [11] MOHANTY P S, MAZUMDER J. Solidification behavior and microstructural evolution during laser beam-material interaction [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1998, B29(6): 1269-1279.

(上接第 59 页)

3 结论

利用 Monte Carlo 法对水中气泡幕的后向散射回波信号进行分析,对不同气泡幕距离上后向散射信号随接收发射轴线夹角的变化曲线进行了仿真计算,计算结果与实验结果具有很好的相似性,充分证明了 Monte Carlo 法在水中气泡幕后向散射光特性研究中的有效性,为实际海洋环境试验和各种模拟实验提供了实验结果定量分析和系统参量设定的依据,从而可大大提高实验效率和结果的可分析性。

参 考 文 献

- [1] SHI Sh W, JIANG X Zh, WANG J A. Back scattering characteristic of laser in bubble film [J]. Torpedo Technology, 2005, 13(3): 11-14 (in Chinese).
- [2] STROUD J S, MARSTON P L. Transient bubble oscillations associated with the under water noise of rain detected optically and some properties of light scattering by bubbles [C]//Bubbles Dynamics and Interface Phenomena. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1994: 161-169.

- [3] ZHANG X D, LEWIS M, JOHNSON B. Influence of bubbles on scattering of light in the ocean [J]. Appl Opt, 1998, 37(27): 6525-6536.
- [4] ZHANG X D, LEWIS M. The volume scattering function of natural bubble populations [J]. Limnology & Oceanography, 2002, 47(5): 1273-1282.
- [5] KOKANOVSKY A. Single light scattering: bubbles versus droplets [J]. Amer J Phys, 2004, 72(2): 258-263.
- [6] QIU H H. Eliminating high-order scattering effects in optical micro-bubble sizing [J]. J O S A, 2003, 20(4): 690-697.
- [7] JI Y J, HE J H, DONG X N, *et al.* The character of the scattered light of bubbles wall in wake [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(8): 1018-1020 (in Chinese).
- [8] LI W, YANG K Ch, ZHANG X H, *et al.* Simulation and computation of bubbles volume scattering function in water [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(5): 647-651 (in Chinese).
- [9] CHEN M, HE J, WANG F. Researchs on the measurement of bubble curtains velocity based on cross-correlation [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16(10): 1231-1234 (in Chinese).
- [10] 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).
- [11] DU Zh F, LU Y M, YANG Z K, *et al.* The simulations of multiple-scattering lidar received signals [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1998, 15(5): 503-508 (in Chinese).