

# 舰船尾流气泡后向光学检测方法研究

韩彪<sup>1</sup> 刘继芳<sup>1</sup> 刘昆仑<sup>2</sup> 王旭<sup>2</sup> 周少杰<sup>1</sup> 石顺祥<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071; <sup>2</sup> 中国船舶重工集团公司第 705 研究所, 陕西 西安 710075)

**摘要** 为探索舰船尾流后向光学检测方法,研究了尾流气泡对水中激光脉冲后向散射特性的影响。首先基于 Fournier Forand 体积散射函数,利用蒙特卡罗(Monte-Carlo)方法理论分析了近距离尾流气泡对激光脉冲后向散射特性的影响。然后,采用蓝绿激光脉冲作为光源,实验研究了模拟尾流气泡对激光脉冲后向散射信号的影响。研究表明,尾流气泡的存在会使得激光脉冲后向散射信号前沿位置在时域左移,后沿位置在时域右移,信号时域宽度增加,能量增强,峰值增大且位置在时域左移。最后根据研究结果提出了一种基于激光脉冲后向散射信号特征变化的舰船尾流气泡后向检测方法。

**关键词** 海洋光学;尾流气泡检测;蒙特卡罗(Monte-Carlo)方法;激光脉冲;后向散射

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0101001

## Study of Backward Optical Detection Method for Ship Wake Bubbles

Han Biao<sup>1</sup> Liu Jifang<sup>1</sup> Liu Kunlun<sup>2</sup> Wang Xu<sup>2</sup> Zhou Shaojie<sup>1</sup> Shi Shunxiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

<sup>2</sup> The 705<sup>th</sup> Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Xi'an, Shaanxi 710075, China

**Abstract** In order to search a backward optical method for ship wake detection, the influence of wake bubbles on backscattering signal of laser pulse in water is studied. Firstly, based on Fournier Forand volume scattering function, the influence of short-distance bubbles on laser pulse's backscattering signal in water is analyzed. Secondly, using blue-green laser pulse as light source, the influence of imitated bubbles on laser pulse's backscattering signal in water is studied experimentally. The results show that, because of wake bubbles, back scattering signal's leading edge moves left, and its trailing edge moves right. Moreover, the broadening of its width, enhancement of its energy and the increase of its peakvalue also happen, and its position moves left in time-domain. Finally, according to the result, a backward detection method for ship wake bubbles is presented on the basis of the characteristic's variation of laser pulse's backscattering signal.

**Key words** ocean optics; detection of wake bubbles; Monte-Carlo method; laser pulse; backscattering

**OCIS codes** 010.4450; 010.7340; 010.1350; 010.0280; 290.7050

## 1 引 言

舰船在水中航行时,由于螺旋桨的空化作用和船体对波浪的破碎,会在船尾形成包含有大量气泡的尾流<sup>[1]</sup>。当水中存在舰船尾流时,受尾流气泡散射和吸收作用的影响,光波的光学特性会有所改变,这为实现光尾流制导提供了依据。目前,通常采用前向检测<sup>[2,3]</sup>和后向检测两类方法对尾流气泡进行光学探测。后向检测由于实用性较强而被广泛研究<sup>[4~7]</sup>,其中文献<sup>[5]</sup>通过探测激光脉冲在气泡区散

射形成的回波信号对其进行识别,已进行了外场试验,取得了较好的效果<sup>[8]</sup>。

由于水体本身对光波的吸收和散射比较强烈<sup>[9]</sup>,因此利用激光脉冲回波信号识别尾流气泡时,若探测器距离尾流气泡较远或者气泡本身散射强度较弱,回波信号会比较弱以至于无法被探测<sup>[10]</sup>;当探测器距离尾流气泡较近时,回波信号会与水体散射信号混在一起而无法辨别。另外利用回波信号探测尾流气泡时,所需的激光脉冲能量较大,这加重了

收稿日期: 2011-04-18; 收到修改稿日期: 2011-06-17

基金项目: 中国船舶重工集团公司第 705 研究所基础研究基金资助课题。

作者简介: 韩彪(1987—),男,硕士研究生,主要从事水下光学信息处理方面的研究。E-mail: hanbiao@xidian.edu.cn

导师简介: 刘继芳(1957—),男,教授,主要从事光电子技术应用方面的研究。E-mail: jfliu@xidian.edu.cn

激光器抽运源和冷却系统设计方面的困难。

当舰船驶过时,尾流气泡会在船后一定的水域内迅速扩散。若将尾流后向检测系统置于这样的水域并向水中发射激光脉冲,受探测器周围气泡散射的影响,激光脉冲后向散射信号的整体性质会有所变化。基于此,本文理论和实验研究了近距离尾流气泡对水中激光脉冲后向散射信号的影响。重点分析气泡对后向散射信号前沿位置、后沿位置、时域宽度、能量、峰值大小和位置的影响。探索利用激光脉冲后向散射信号特征变化检测尾流气泡的可能性。

## 2 理论分析

真实的水体是一个包含有多种散射体的随机介质,激光脉冲在水中传播时会受到纯水和散射体的散射和吸收,相对而言,纯水对光波的散射和吸收作用远小于散射体的作用。另外,由于光波的传播速度远大于水体的运动速度,在激光脉冲传播的时间内,水体环境的变化可以忽略。因此,针对激光脉冲在水中的传播过程,作如下假设:1)进入水中的激光脉冲是单色光,并且忽略偏振对其传播特性的影响;2)水体自身由纯水和散射体组成,光波由大量光子构成,光子在纯水中自由运动,遇到散射体时发生散射和吸收,并且各个散射体对光子的作用相互独立;3)水体是均匀、各向同性的,忽略水体的非线性效应,并且光子在水中运动时,水体的光学性质不随时间变化;4)激光脉冲在水中的传播过程,构成一个线性时不变系统。

在以上假设的基础上,首先利用蒙特卡罗(Monte-Carlo)方法跟踪大量光子在水中的运动过程,对被探测器接收的光子及其传播时间进行记录。然后,对记录的光子传播时间进行统计分析,得到水中光波后向散射的冲击响应。最后将初始激光脉冲和冲击响应进行卷积,即可得到水中激光脉冲的后向散射信号。

如图1所示,Area R1和Area R2为原始水域,Area B(即 $z=J_1$ 和 $z=J_2$ 平面所夹区域)为气泡所在区域。初始时刻光子位于 $(0, 0, 0)$ 处,沿 $z$ 轴方向进入水中。

文献[11]给出了用 Monte-Carlo 方法模拟水中光子运动过程的具体步骤。其中选择合适的体积散射函数确定光子散射角是建模的关键。体积散射函数有多种近似表达<sup>[12~17]</sup>,这里选择变化趋势和实验结果最为接近的 Fournier Forand 体积散射函数<sup>[18]</sup>。该函数假设水中散射体的尺度分布服从指

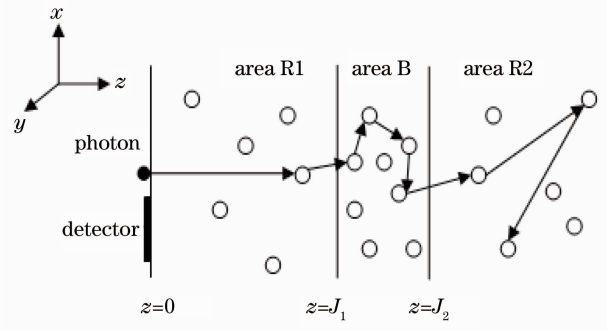


图1 光子运动轨迹示意图

Fig. 1 Schematic diagram of photon's trajectory

数分布规律<sup>[19]</sup>:

$$N(r) = Cr^{-m}, \quad (1)$$

式中 $N(r)$ 是尺度为 $r$ 的散射体数量, $C$ 为常数, $m$ 为表征水中散射体尺度分布的特征参数,取值在 $3.5\sim 5.0$ 之间。 $m$ 越大,水中小尺度散射体的相对含量越多。在此基础上,Fournier Forand 体积散射函数的最新形式为<sup>[20]</sup>

$$b(\theta) = \frac{1}{4\pi(1-\delta)^2\delta^\nu} \cdot \left\{ [\nu(1-\delta) - (1-\delta^\nu)] + \frac{4}{u^2} [\delta(1-\delta^\nu) - \nu(1-\delta)] \right\} - \frac{1-\delta^\nu}{16\pi(1-\delta^\nu)\delta^\nu} (3\cos^2\theta - 1), \quad (2)$$

式中 $\nu = \frac{3-m}{2}$ ,  $\delta = \frac{u^2}{3(n-1)^2}$ ,  $\delta^\nu = \frac{4}{3(n-1)^2}$ ,  $u = 2\sin(\theta/2)$ 。 $n$ 为散射体与纯水的相对折射率,取值在 $1\sim 1.35$ 之间。

由于 Fournier Forand 体积散射函数在散射角趋于 $0$ 时的变化情况与实验结果稍有偏差<sup>[21,22]</sup>,因此本文在确定光子散射角时,首先对其进行修正:

$$\begin{cases} P(\theta) = b(\theta_0/2), & (0 \leq \theta \leq \theta_0) \\ P(\theta) = b(\theta), & (\theta_0 < \theta \leq \pi) \end{cases} \quad (3)$$

即假设体积散射函数 $P(\theta)$ 在 $[0, \theta_0]$ 区间为常数,大小由 $b(\theta_0/2)$ 决定,且 $\theta_0$ 小于 $0.002$ 。

然后,计算 $P(\theta)$ 的积分函数并对其进行归一化:

$$p(\theta) = \int_0^\theta P(\vartheta) d\vartheta / \left[ \int_0^\pi P(\vartheta) d\vartheta \right]. \quad (4)$$

最后,为了得到散射角的大小,先将 $[0, \pi]$ 区间等分为 $M$ 份( $M \in N_+$ ,且足够大),并计算 $p(k\pi/M)$ 的值( $k = 0, 1, 2, \dots, M$ )。再由计算机生成一个在 $[0, 1]$ 区间内服从均匀分布的随机数 $R_{\text{rand}}$ 。通过比较 $R_{\text{rand}}$ 和 $p(k\pi/M)$ 的大小来确定散射角 $\theta$ :

$$p\left[\frac{(k-1)\pi}{M}\right] \leq R_{\text{rand}} < p\left(\frac{k\pi}{M}\right) \Rightarrow \theta = \frac{(2k-1)\pi}{2M}. \quad (5)$$

假设初始激光脉冲时域形状为高斯曲线,其表达式为

$$f(t) = \exp\left\{-\left[\frac{(t-25)}{12.5}\right]^2\right\}, \quad (6)$$

式中  $t$  的单位为 ns。设  $J_1=0, J_2=25$  m, 结合文献[11]给出的模拟步骤,在3种情况下对  $10^8$  个光子在水中的运动过程进行仿真,得到其后向散射信号如图2所示。

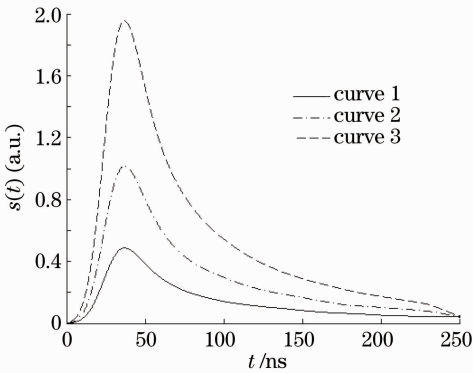


图2 后向散射信号

Fig. 2 Backscattering signal

图中 curve 1 表示水中无气泡时的信号, curve 2 和 curve 3 表示 area B 中存在尾流气泡时的情况, 且 curve 3 代表的气泡散射强度大于 curve 2 代表的气泡散射强度。

由图2可知,相对于 curve 1 曲线, curve 2 和 curve 3 曲线的能量增强,宽度增加,峰值增大,并且 curve 3 的变化得更加明显;换言之,与无气泡时的情况相比,探测器周围存在尾流气泡时,后向散射信号的整体能量增强,宽度增加,峰值增大,并且气泡散射越强,这种变化越明显。

### 3 实验装置

由于水体自身的散射会影响探测结果的对比度,因此实验时采用线偏振光作为光源,通过在探测器前放置与初始光偏振方向垂直的检偏器,对其进行抑制<sup>[23]</sup>。如图3所示,实验装置由激光器、起偏器、水槽、气泡发生器、检偏器、探测器和数据采集系统组成。

光源用波长为 532 nm 的脉冲激光器,以 1 kHz 的频率发射脉宽约 15 ns,功率为 8 mW 的激光脉冲。水槽体积为 100 cm×40 cm×40 cm,为了消除槽壁的影响,用吸光材料将水槽四周和底部遮挡起

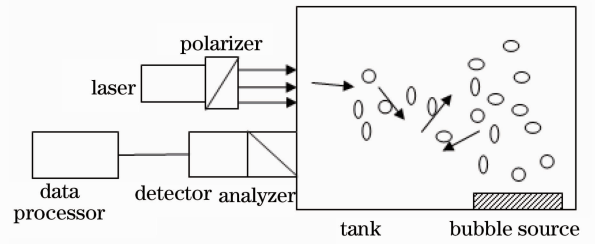


图3 实验装置框图

Fig. 3 Block diagram of experimental setup

来。起偏器和检偏器都选用偏振分光棱镜,且偏振方向相互垂直,检偏器紧贴水槽槽壁,其中心距离激光入射点 3 cm。探测器紧贴检偏器,选用增益系数大于  $10^6$  的光电倍增管。用数字示波器作为数据采集装置对探测到的信号进行采集和存储,采样率为 5 GS/s。选用与气泵相连的微孔陶瓷阵列作为气泡发生器,通过调节气泵气压控制气泡的数量。微孔陶瓷阵列面积为 25 cm×10 cm,实验时将其横向放置在距离探测器约 80 cm 处。

实验时,首先向水槽中注满水并将其放置约 1 h,待水体静止后开始测量。得到水中无气泡、气泡较少(气泵压强为 0.01 MPa)和气泡较多(气泵压强为 0.015 MPa)时的后向散射信号形状如图4所示。

可以看到当水中存在气泡时,后向散射信号的整体能量增强,宽度增加,峰值增大。并且当水中气泡数目增多(即气泡散射增强)时,这种变化更为明显。这和理论分析结果一致。

### 4 实验结果及分析

分别测量水中无气泡、气泡较少(气泵压强为 0.01 MPa)和气泡较多(气泵压强为 0.015 MPa)时激光脉冲的后向散射信号。每种情况采集 10000 个数据。分别对 3 种情况下激光脉冲后向散射信号的前沿位置、后沿位置、时域宽度、能量、峰值大小和位置进行分析。

从图4中可以看到,对于采集到的每个数据而言,激光脉冲后向散射信号只占其中的一部分。因此在对数据进行分析时,先得从这些数据中提取出有效的后向散射信号。具体处理办法是:先对数据进行均值滤波,然后以 0.01 V 为阈值(此阈值是根据数据的噪声大小设定的),认为数据中幅值大于 0.01 V 的部分为后向散射信号。基于此,分别计算信号的前沿位置、后沿位置、时域宽度(后沿位置和前沿位置之差)和能量(通过对时域脉冲信号进行积分,即计算脉冲信号的时域面积得到),峰值的大小和位置。

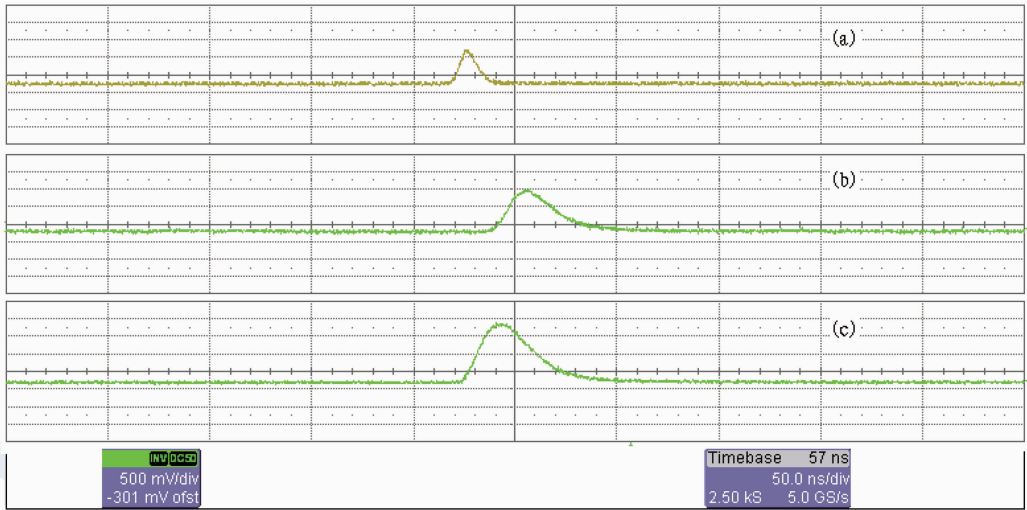


图 4 后向散射信号。(a)无气泡；(b)气泡较少；(c)气泡较多

Fig. 4 Backscattering signal. (a) No bubble; (b) a few bubbles; (c) many bubbles

由于水体散射比较复杂,单个脉冲信号的特征难以体现气泡对后向散射信号的影响。因此分析时,以 1000 个数据为单位,对计算结果进行统计处理。通过比较 3 种情况下,后向散射信号的前沿位置、后沿位置、时域宽度、能量、峰值大小和位置的统计平均值,来分析气泡对后向散射信号的影响。结果如图 5 所示。

时激光脉冲后向散射信号前沿位置减小,后沿位置增大,时域宽度增大,时域面积增大,峰值增大,峰值位置减小。并且,气泡数量越多,这种变化越明显。

换言之,气泡的存在使得激光脉冲后向散射信号的前沿位置在时域向左移动,后沿位置向右移动,时域宽度增大,能量增强,峰值增大且位置向左移动。并且气泡散射越强烈,这种变化越明显。

从图 5 中显示的数值大小可知,当水中存在气泡

另外,从图 5(b)可以看到,当水中存在气泡时,

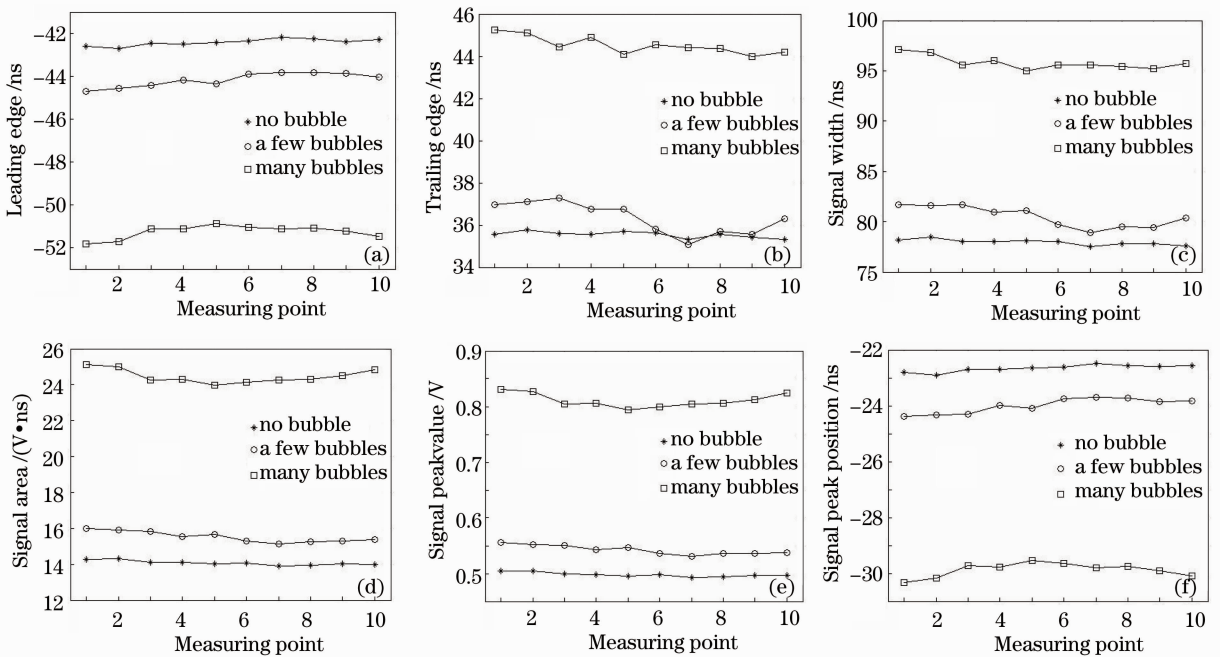


图 5 气泡对后向散射信号的影响。(a) 前沿位置；(b) 后沿位置；(c) 信号宽度；(d) 信号能量；(e) 峰值大小；(f) 峰值位置

Fig. 5 Influence of bubbles on backscattering signal. (a) Leading edge; (b) trailing edge; (c) signal width; (d) signal energy; (e) peak value; (f) peak's position

虽然信号后沿位置会向右移动,但是当气泡数量较少时,这种变化有可能变得不明显,无法从后沿位置的变化中判断出气泡是否存在。

对于实际舰船尾流而言,随着水体的运动,气泡会在一定的水域内扩散,使得这些水域激光脉冲的后向散射特性发生变化;并且距离舰船越近,气泡浓度越高,这种变化越明显。因此,可以通过向水中发射激光脉冲,检测其后向散射信号并提取前沿位置、时域宽度、能量、峰值大小和位置的特征参数,根据这些特征参数的变化对舰船尾流及其位置进行识别。

## 5 结 论

本文理论和实验研究了尾流气泡对激光脉冲后向散射特性的影响。研究表明:1)当水中存在气泡时激光脉冲后向散射信号的前沿位置在时域向左移动,后沿位置向右移动,时域宽度增大,能量增强,峰值增大且位置向左移动。并且气泡散射越强烈,这种变化越明显。2)通过向水中发射激光脉冲,检测其后向散射信号并提取前沿位置、时域宽度、能量、峰值大小和位置的特征参数,根据这些特征参数的变化可以对舰船尾流及其位置进行识别。

## 参 考 文 献

- Zhang Jiansheng. The Development and Measurement of Ship Wake Optical Specialty [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2001. 1~2
- 张建生. 尾流的光学特性研究与测量[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2001. 1~2
- Zhang Bin, Liu Jifang, Sun Yanling. A detection method for underwater laser spot drift [J]. *Electronic Science and Technology*, 2009, **22**(3): 4~6
- 张 斌, 刘继芳, 孙艳玲. 水下激光光斑漂移的一种检测方法[J]. *电子科技*, 2009, **22**(3): 4~6
- Liu Jifang, Sun Yanling, Ma Lin *et al.*. Detection System and Method of Dynamic Larget Wake in the Water Based on the Variation of Laser Wavefront [P]. Chinese Patent, 200910020852, 2009
- 刘继芳, 孙艳玲, 马 琳. 基于激光波前变化的水中动态目标尾迹探测系统及方法[P]. 中国专利, 200910020852, 2009
- Deng Zhongfang, Liu Jifang, Li Zengrong. Study of air bubbles in water based on spatial spectrum intensity of backward scattered light [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(8): 1216~1220
- 邓仲芳, 刘继芳, 李增荣. 利用后向散射空间谱强度分布尾流气泡的实验研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(8): 1216~1220
- Zhang Xiaohui, Lei Xuanhua, Rao Jionghui *et al.*. Study of homing means for laser-wake-homing torpedoes [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(5): 494~500
- 张晓晖, 雷选华, 饶炯辉等. 舰船尾流激光制导方法的研究[J]. *激光技术*, 2005, **29**(5): 494~500
- Wang Xiangwei, Zhou Tianhua, Chen Weibiao. Study on laser backscattering properties by ship wakes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 14~18
- 王向伟, 周田华, 陈卫标. 舰船尾流激光后向散射特性研究[J].

- 光学学报, 2010, **30**(1): 14~18
- Shi Shengwei, Wang Jiang'an, Jiang Xingzhou *et al.*. Analysis of scattering phase function and backscattering signal characteristic of bubbles films in ship wake [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1861~1866
- 石晟伟, 王江安, 蒋兴舟等. 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[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1861~1866
- Rao Jionghui, Ge Weilong, Zhu Donghua *et al.*. Ship wake detecting system based on backscattering light bubbles [J]. *J. Naval University of Engineering*, 2008, **20**(4): 62~66
- 饶炯辉, 葛卫龙, 朱东华等. 基于后向散射的光尾流探测系统[J]. *海军工程大学学报*, 2008, **20**(4): 62~66
- Xu Qiyang, Yang Kuntao, Wang Xinbing *et al.*. Blue-Green Lidar Ocean Survey [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 36~50
- 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. 36~50
- Yi Yuanyuan, Yang Kecheng, Zhang Xiaohui *et al.*. Laser backscattering characteristics of bubbles in water [J]. *Opt. & Optoelectron. Technol.*, 2006, **4**(6): 38~41
- 易媛媛, 杨克成, 张晓晖等. 激光在水中气泡微粒的后向散射特性[J]. *光学与光电技术*, 2006, **4**(6): 38~41
- Lihong Wang, S. L. Jacques. Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues in standard C [R]. M. D. Anderson Cancer Center, University of Texas, Houston, Texas, 1992
- Vladimir I. Haltrin. An analytic Fournier-forand scattering phase function as an alternative to the Henyey-Greenstein phase function in hydrologic optics [C]. IEEE, IGARSS'98 Proceedings, Seattle, USA: 1998; 910~912
- D. Tominique. Henyey-Greenstein and Mie phase functions in Monte Carlo radiative transfer computations [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(18): 3270~3274
- Vladimir I. Haltrin. One-parameter sea water light scattering phase function in the form of Legendre polynomial series [C]. IEEE, OCEANS 2003 Proceedings, San Diego, California, USA, 2003; 2842~2844
- G. R. Fournier, J. L. Forand. Analytic phase function for ocean water [C]. *SPIE*, 1994; 194~201
- Vladimir I. Haltrin. Two-term Henyey-Greenstein light scattering phase function for seawater [C]. IEEE, IGARSS'99 Proceedings, Hamburg, Germany, 1999, 1423~1425
- N. Pfeiffer, G. H. Chapman. Successive order, multiple scattering of two-term Henyey-Greenstein phase functions [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(18): 13637~13642
- C. D. Mobley, L. K. Sundman, E. Boss. Phase function effects on oceanic light fields [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(6): 1035~1050
- J. Miroslaw, R. F. Georges. Light Scattering by Particles in Water [M]. San Diego: Academic Press, USA, 2007. 250~251
- G. R. Fournier, M. Jonasz. Computer based underwater imaging analysis [C]. *SPIE*, 1999, 62~70
- R. W. Spinrad, J. R. V. Zaneveld, H. Pak. Volume scattering function of suspended particulate matter at near-forward angles: a comparison of experimental and theoretical values [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(7): 1125~1130
- D. J. Bogucki, J. A. Domaradzki, D. Stramski *et al.*. Comparison of near-forward light scattering on oceanic turbulence and particles [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(21): 4669~4677
- Han Biao, Liu Jifang, Zhou Shaojie *et al.*. Influence of analyze angle on backscatter characteristic of optical pulse in water [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 73~77
- 韩 彪, 刘继芳, 周少杰等. 检偏角对水中光脉冲后向散射特性的影响[J]. *光子学报*, 2011, **40**(1): 73~77