

文章编号:1004-4213(2011)10-1590-5

基于 Fournier Forand 体积散射函数的水中激光脉冲后向散射特性分析模型

韩彪¹, 刘继芳¹, 周少杰¹, 孙艳玲¹, 刘昆仑², 王旭²

(1 西安电子科技大学 技术物理学院 501 教研室, 西安 710071)

(2 中国船舶重工集团公司第七〇五研究所, 西安 710075)

摘 要:基于 Fournier Forand 体积散射函数,建立了一种水中激光脉冲后向散射仿真模型.运用该模型可用 Monte Carlo 方法模拟光子在水中的传播过程,并得到光波后向散射的冲击响应.将初始激光脉冲与冲击响应进行卷积并求其傅里叶谱,即可得到激光脉冲后向散射信号的时域和频域特征.利用该模型分析了入射为高斯型激光脉冲时,水中散射体的尺度分布、散射体与纯水的相对折射率以及水体衰减系数对激光脉冲后向散射特性的影响.结果表明:随着小尺度散射体相对数量的增多、散射体与纯水相对折射率的增加、水体衰减系数的增大,激光脉冲后向散射信号能量增强,宽度增加,低频分量显著增大.

关键词:水下探测;后向散射;Monte Carlo 方法;激光脉冲

中图分类号: TN249

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114010.1590

0 引言

光波在水中传播时,会发生散射和吸收现象.研究激光脉冲在水中传播时的后向散射特性,对于海洋激光雷达探测^[1]、舰船尾流跟踪^[2]和激光水下成像^[3]等领域的应用有重大意义.这方面的研究一般采用实验测量和模拟仿真两种方法进行.实验测量可以得到可靠的数据,但费用昂贵.因此建立一种适当的仿真分析模型,对于激光脉冲后向散射特性的研究至关重要.

现有文献在做这方面的仿真研究时,多采用 Monte Carlo 方法^[4-5],即:激光脉冲由许多光子组成,通过跟踪大量光子在水中的传播过程,得到激光脉冲的后向散射特性.在这种方法中,光子发生散射时的散射角,是由体积散射函数决定的,现有文献多采用 Henyey-Greenstein 体积散射函数或其改进形式^[6-7],然而这些函数随着散射角的变化趋势与实际结果存在着较大的偏差^[8].另外,现有文献在进行水中激光脉冲后向散射特性仿真时,并未考虑初始激光脉冲的时域宽度和形状,并且对激光脉冲在水中的后向散射特性只是做时域分析,并未做频域研究.针对以上缺陷,本文在考虑初始激光脉冲时域宽度

和形状的基础上,采用与实际测量结果吻合较好的 Fournier Forand 体积散射函数来确定散射角,建立一种分析激光脉冲后向散射信号时域和频域特性的仿真模型,并运用所建立的模型分析了激光脉冲时域形状为高斯型时,水中散射体的尺度分布、散射体与纯水的相对折射率以及水体衰减系数对激光脉冲后向散射特性的影响.

1 仿真模型

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以及水中散射体的散射和吸收.相对而言,纯水对于光波的散射和吸收作用远小于散射体的作用.另外,由于光速远大于水体的运动速度,在激光脉冲传播的时间内,水体环境的随机变化并不是很明显.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,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,激光脉冲由大量光子构成,光子在纯水中自由传播,只有当其传播到散射体时,才发生散射和吸收,并且各个散射体对光子的作用相互独立;

基金项目:中国船舶重工集团公司第七〇五研究所基础研究基金资助

第一作者:韩彪(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为水下光学信息处理. Email: hanbiaoshaanxi@163.com

导师(通讯作者):刘继芳(1957-),男,教授,主要研究方向为非线性光学和光电技术应用. Email: jfliu@xidian.edu.cn

收稿日期:2011-04-13;修回日期:2011-06-09

3) 水体是均匀、各向同性的,忽略水体的非线性效应,并且光子在水中传播时,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,按如下步骤对水中激光脉冲后向散射特性进行仿真:

1) 利用 Monte Carlo 方法跟踪大量光子在水中的传播过程,对被探测器接收到的光子及其传播时间进行记录;

2) 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,然后将初始激光脉冲和冲击响应进行卷积并求进行傅里叶谱,得到激光脉冲后向散射信号的时域和频域特征。

1.1 光子的跟踪

如图 1,设初始时刻光子位于 (x_0, y_0, z_0) 并沿 z 轴方向在水中传播. 光子遇到水中散射体时,发生吸收和散射。

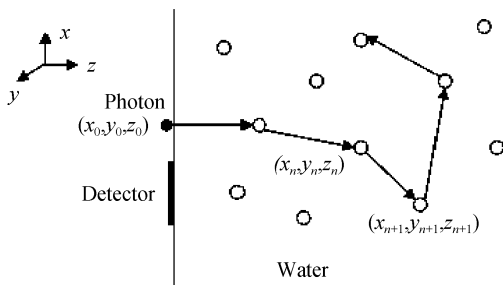


图 1 光子运动轨迹示意

Fig. 1 Schematic diagram of photon's trajectory

光子在两个相邻散射体之间的自由传播距离 s 服从统计规律^[4]

$$s = \frac{\ln(\xi)}{\mu_t} \quad (1)$$

式中 μ_t 为水体的衰减系数, ξ 是 $[0, 1]$ 区间内服从均匀分布的随机数. 光子在第 n 和 $n+1$ 个散射体间传播一段距离 s 后,其坐标变化为

$$\left. \begin{aligned} x_{n+1} &= x_n + u_x s \\ y_{n+1} &= y_n + u_y s \\ z_{n+1} &= z_n + u_z s \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 (x_n, y_n, z_n) 和 $(x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1})$ 分别为传播前后光子的坐标, (u_x, u_y, u_z) 为光子传播时的方向余弦. 散射前后,方向余弦的变化为^[4]

$$\left. \begin{aligned} u'_x &= \frac{\sin \theta}{\sqrt{1-u_z}} (u_x u_z \cos \varphi - u_y \sin \varphi) + u_x \cos \theta \\ u'_y &= \frac{\sin \theta}{\sqrt{1-u_z}} (u_y u_z \cos \varphi + u_x \sin \varphi) + u_y \cos \theta \\ u'_z &= -\sin \theta \cos \varphi \sqrt{1-u_z} + u_z \cos \theta \end{aligned} \right\} |u_z| \leq \mu_H \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} u'_x &= \sin \theta \cos \varphi \\ u'_y &= \sin \theta \sin \varphi \\ u'_z &= \text{sgn}(u_z) \cos \theta \end{aligned} \right\} |u_z| > \mu_H \quad (4)$$

式中 μ_H 是接近于 1 的正数(例如 $\mu_H = 0.99999$), ϕ 和 θ 分别为散射发生时的方位角和散射角, ϕ 由式(4)

$$\varphi = 2\pi\zeta \quad (5)$$

决定,其中 ζ 是 $[0, 1]$ 区间内服从均匀分布的随机数。

散射角 θ 由体积散射函数决定. 现有文献对体积散射函数有多种近似表达式^[9-14], 其中 Fournier Forand 体积散射函数的变化趋势和实验结果最为接近^[8]. 因此这里的模型以此函数为依据计算散射角 θ .

Fournier Forand 体积散射函数假设水中散射体的尺度分布服从指数分布规律^[15]

$$N(r) = Cr^{-m} \quad (6)$$

式中 $N(r)$ 是尺度为 r 的散射体数量, C 为常量, m 为表征水中散射体尺度分布的特征参量,取值在 3.5~5 之间, m 越大表示水中小尺度散射体的相对含量越多. 在此基础上,该函数的最新形式为^[16]

$$b(\theta) = \frac{1}{4\pi(1-\delta)^2\delta^\nu} \{[\nu(1-\delta) - (1-\delta^\nu)] + \frac{4}{u^2} [\delta(1-\delta^\nu) - \nu(1-\delta)]\} - \frac{1-\delta_\pi}{16\pi(1-\delta_\pi)\delta_\pi} \cdot (3\cos^2\theta - 1) \quad (7)$$

式中: $\nu = \frac{3-m}{2}$; $\delta = \frac{u^2}{3(n-1)^2}$; $\delta_\pi = \frac{4}{3(n-1)^2}$; $u = 2\sin(\theta/2)$. 其中 m 为散射体尺度分布特征参量, n 为散射体与纯水的相对折射率,取值在 1~1.35 之间。

研究表明,在实际水体中当散射角趋于 0 时,体积散射函数的变化并不明显^[17-18]. 但在 Fournier Forand 体积散射函数中,当散射角接近 0 时,其函数值趋于无穷大. 为使模型适用任意散射角,对 Fournier Forand 体积散射函数进行修正

$$\left. \begin{aligned} P(\theta) &= b(\theta_0/2) \quad (0 \leq \theta \leq \theta_0) \\ P(\theta) &= b(\theta) \quad (\theta_0 < \theta \leq \pi) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

即假设体积散射函数在 $[0, \theta_0]$ 区间为常量,且大小由 $b(\theta_0/2)$ 决定,式中 θ_0 小于 0.002.

计算 $P(\theta)$ 的积分函数,并对其进行归一化。

$$p(\theta) = \frac{\int_0^\theta P(\theta) d\theta}{\int_0^\pi P(\theta) d\theta} \quad (9)$$

为了得到散射角的大小,首先将 $[0, \pi]$ 区间等分为 M 份 ($M \in \mathbf{N}_+$, 并且足够大), 并计算 $p(k\pi/M)$

的值($k=0,1,2\cdots M$).然后,由计算机生成一个在 $[0,1]$ 区间内服从均匀分布的随机数 Rand.通过比较 Rand 和 $p(k\pi/M)$ 的大小来确定散射角 θ .

$$p\left(\frac{(k-1)\pi}{M}\right) \leq \text{Rand} < p\left(\frac{k\pi}{M}\right) \Rightarrow \theta = \frac{(2k-1)\pi}{2M} \quad (10)$$

受散射体吸收作用的影响,光子在传播过程中可能“湮灭”.为此,给光子设置一个权值 W ,初始时刻 $W=1$,每次经过散射体后 W 都会减小.

$$W_{n+1} = W_n(1 - \Delta W) \quad (11)$$

式中 W_n 和 W_{n+1} 为经过散射体前后,权值 W 的大小; ΔW 为 W 的减小率,由水体吸收系数 μ_a 和衰减系数 μ_t 决定

$$\Delta W = \frac{\mu_a}{\mu_t} \quad (12)$$

设置一个权值阈值 W_H (大小由探测器灵敏度决定,灵敏度越高, W_H 越小).当 $W < W_H$ 时,认为光子“湮灭”,终止对其跟踪.

另外,当光子传播到探测器所在位置,被探测器接收时,也终止对其跟踪.并根据其在水中总的传播路程 s_T ,计算总的传播时间 T 为

$$T = \frac{n_w s_T}{c} \quad (13)$$

式中的 n_w 表示纯水的折射率, c 为真空光速.

1.2 后向散射信号特征的获取

利用 1.1 中的方法,对 $N(N \in \mathbf{N}_+, \text{且大于 } 10^6)$ 个光子在水中的传播过程进行跟踪,并记录被探测器接收的光子的传播时间 $\{T\}$.

为了获得水中激光脉冲后向散射信号特征,首先对传播时间 $\{T\}$ 进行统计分类:将时间以 τ 为间隔(τ 为 ns 量级)等分为若干个小时间 $[(L-1)\tau, L\tau]$,其中 $L=1,2,3\cdots$;再根据 $\{T\}$ 的大小,统计每个小时间内的光子数,记为 $H(L\tau)$.然后,对所有的 $H(L\tau)$ 除以总的光子数 N ,得到每个区间内的相对光子数 $h(L\tau)$.以 H_n 为单位($H_n \in \mathbf{N}_+, \text{且远小于 } N$),对 $h(L\tau)$ 进行均值拟合,将得到的结果作为水中光波后向散射的冲击响应,记为 $h(t)$.

最后,假设初始激光脉冲光强的时域表达式为 $f(t)$,那么其后向散射信号 $s(t)$ 可表示为

$$s(t) = f(t) \otimes h(t) \quad (14)$$

对 $s(t)$ 进行傅里叶变换即可得到后向散射信号的频域特征 $S(j\omega)$.

$$S(j\omega) = \int s(t) \exp(-j\omega t) dt \quad (15)$$

2 水体环境对后向散射信号的影响

根据 1 中建立的模型,研究水体环境变化对激光脉冲后向散射特性的影响.设 $N=10^8, \theta_0 = \pi/$

$18000, M=18000, \Delta W=0.05, W_H=0.1, n_w=1.33, \tau=0.1 \text{ ns}, u_H=0.99999, H_n=100$;初始时光子的坐标为 $(0,0,0)$,探测器放在 $z=0$ 平面内 $0 < x^2 + y^2 < 2m^2$ 的区域中;初始激光脉冲光强的时域形状为高斯型,其表达式为

$$f(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-25}{12.5}\right)^2\right] \quad (16)$$

式中时间 t 的单位为 ns.

2.1 水体衰减系数对后向散射特性的影响

设散射体与纯水的相对折射率 $n=1.12$,散射体尺度分布特征参量 $m=4$,分别对水体衰减系数 $\mu_t=0.1 \text{ m}^{-1}, 0.15 \text{ m}^{-1}$ 和 0.2 m^{-1} 时激光脉冲的后向散射特征进行仿真,其时域特性和幅频特性分别如图 2 和图 3.

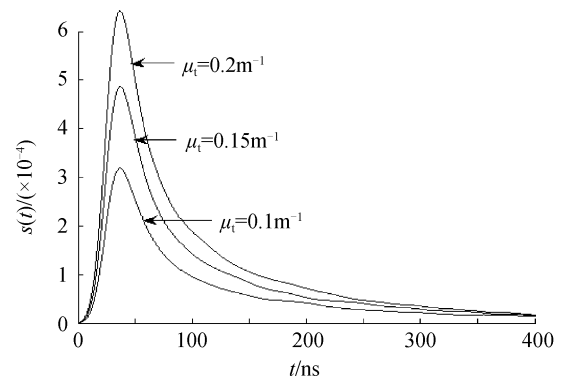


图 2 衰减系数对后向散射时域特性的影响
Fig. 2 Influence of attenuation coefficient on the time-domain characteristics of backscattering

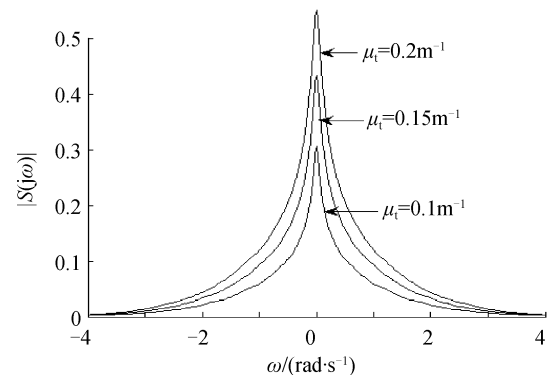


图 3 衰减系数对后向散射幅频特性的影响
Fig. 3 Influence of attenuation coefficient on the amplitude-frequency characteristics of backscattering

由图 2 和图 3 可以看到,随着水体衰减系数的增大,激光脉冲后向散射信号的能量增强,宽度增加,各频谱分量的幅值有所增大,相对而言低频分量的增大最为显著.

2.2 散射体相对折射率对后向散射特性的影响

取水体衰减系数 $\mu_t=0.15 \text{ m}^{-1}$,散射体尺度分布特征参量 $m=4$,分别对散射体与纯水的相对折射率 $n=1.08, 1.12$ 和 1.16 时激光脉冲的后向散射特征进行仿真,其时域特性和幅频特性分别如图 4 和图 5.

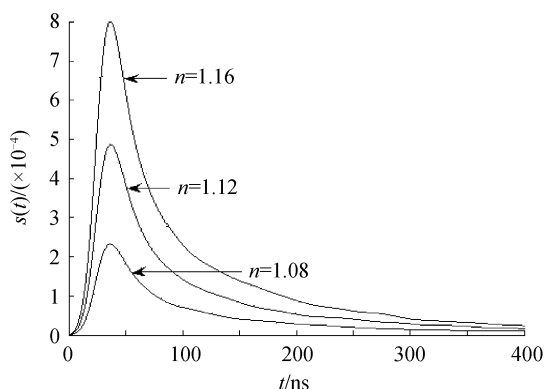


图4 散射体与纯水相对折射率对后向散射时域特性的影响
Fig. 4 Influence of scatterer to water's relative refractive index on the time-domain characteristics of backscattering

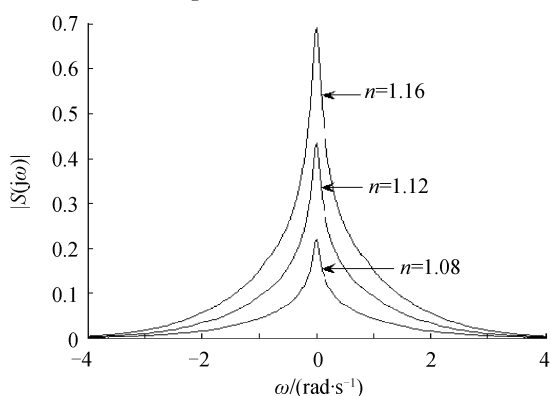


图5 散射体与纯水相对折射率对后向散射幅频特性的影响
Fig. 5 Influence of scatterer to water's relative refractive index on the amplitude-frequency characteristics of backscattering

从图4和图5中可以看到,随着散射体与纯水相对折射率的增大,激光脉冲后向散射信号的能量增强,宽度增加,各频谱分量的幅值有所增大,相对而言低频分量的增大最为显著。

2.3 散射体尺度分布对后向散射信号的影响

取水体衰减系数 $\mu_t = 0.15 \text{ m}^{-1}$, 散射体与纯水的相对折射率 $n = 1.12$, 分别对散射体尺度分布特征参量 $m = 3.9, 4$ 和 4.1 时激光脉冲的后向散射特征进行仿真,其时域特性和幅频特性分别如图6和图7。

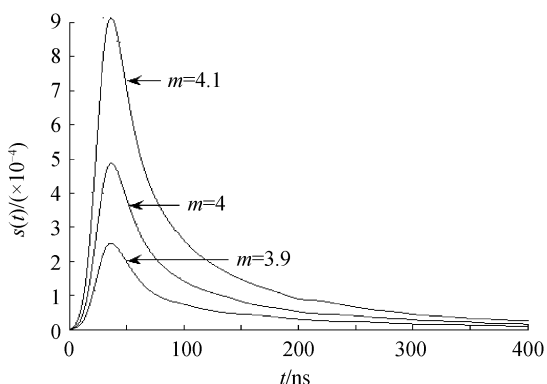


图6 散射体尺度分布对后向散射时域特性的影响
Fig. 6 Influence of scatterer's size distribution on the time-domain characteristics of backscattering

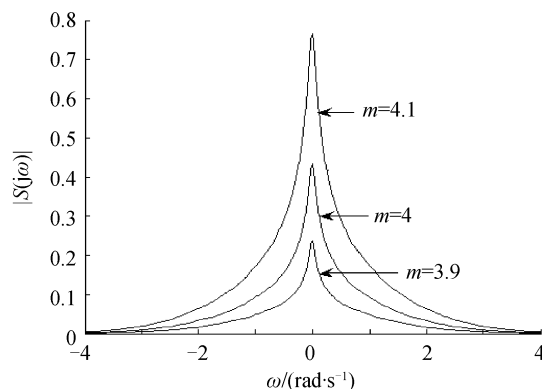


图7 散射体尺度分布对后向散射幅频特性的影响
Fig. 7 Influence of scatterer's size distribution on the amplitude-frequency characteristics of backscattering

由图6和图7可以看到,随着尺度分布特征参量 m 的增大,激光脉冲后向散射信号的能量增强,宽度增加,各频谱分量的幅值有所增大,相对而言低频分量的增大最为显著。 m 越大表示水中小尺度散射体的相对含量越多,因此,随着水中小尺度散射体相对含量的增多,激光脉冲后向散射信号的能量增强,宽度增加,低频分量显著增大。

3 结论

基于 Fournier Forand 体积散射函数,本文利用 Monte Carlo 方法建立了一种分析激光脉冲后向散射特性的模型。

利用该模型分析了不同水体环境下的激光脉冲后向散射特性。研究结果显示:随着水中小尺度散射体相对数量的增多、散射体与纯水相对折射率的增加、水体衰减系数的增大,激光脉冲后向散射信号能量增强,信号宽度增加,信号低频分量显著增大。

参考文献

- [1] DU Zhu-feng, LU Yi-min, YANG Zong-kai, *et al.* Monte Carlo calculations of the received oceanic lidar signals[J]. *Chinese Journal of 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.
- [2] RAO Jiong-hui, GE Wei-long, ZHU Dong-hua, *et al.* Ship wake detecting system based on backscattering light bubbles[J]. *Journal of 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.
- [3] CAO Nian-wen, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun. Quantitative study of improvements of the imaging contrast and imaging range by the polarization technique[J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(1): 61-66.
曹念文, 刘文清, 张玉钧. 偏振成像技术提高成像清晰度、成像距离的定量研究[J]. *物理学报*, 2000, **49**(1): 61-66.
- [4] LIHONG W, STEVEN L J. Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues in standard C[R]. Houston: University of Texas M. D. Anderson Cancer Center, 1992.
- [5] MARKUS T, ULF Ö, BRIAN P, *et al.* Sampling of time-and frequency-domain signals in Monte Carlo simulations of photon

- migration[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(1): 236-245.
- [6] ZHU Dong-hua, ZHANG Xiao-hui, XIA Min, *et al.* Simulation of the backscattered signals for laser wake guided technique[J]. *Torpedo Technology*, 2010, **18**(6): 426-430. 朱东华, 张晓晖, 夏珉, 等. 激光尾流制导后向散射信号的仿真[J]. *鱼雷技术*, 2010, **18**(6): 426-430.
- [7] WANG Xiang-wei, ZHOU Tian-hua, CHEN Wei-biao. 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.
- [8] CURTIS D M, LYDIA K S, EMMANUEL B. Phase function effects on oceanic light fields[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(6): 1035-1050.
- [9] VLADIMIR I H. Two-term Henyey-Greenstein light scattering phase function for seawater[C]. IEEE, IGARSS'99 Proceedings, Hamburg, Germany: IGARSS, 1999: 1423-1425.
- [10] VLADIMIR I H. 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, WA, USA: IGARSS, 1998: 910-912.
- [11] DOMINIQUE T. Henyey-Greenstein and Mie phase functions in Monte Carlo radiative transfer computations[J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(18): 3270-3274.
- [12] VLADIMIR I H. One-parameter sea water light scattering phase function in the form of Legendre polynomial series[C]. IEEE, OCEANS 2003 Proceedings, San Diego, California, USA: IEEE, 2003: 2842-2844.
- [13] FOURNIER G R, FORAND J L. Analytic phase function for ocean water[C]. *SPIE*, 1994, **2258**: 194-201.
- [14] NICK P, GLENN H C. Successive order, multiple scattering of two-term Henyey-Greenstein phase functions[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(18): 13637-13642.
- [15] FOURNIER G R, JONASZ M. Computer based underwater imaging analysis[C]. *SPIE*, 1999, **3761**: 62-70.
- [16] MIROSLAW J, GEORGES R F. Light scattering by particles in water[M]. San Diego, CA, USA: Academic Press, 2007: 250-251.
- [17] DAREK J B, J ANDRZEJ D, DARIUSZ S, *et al.* Comparison of near-forward light scattering on oceanic turbulence and particles[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(21): 4669-4677.
- [18] RICHARD W S, JRONALD V Z, HASONG P. Volume scattering function of suspended particulate matter at near-forward angles: a comparison of experimental and theoretical values[J]. *Applied Optics*, 1978, **17**(7): 1125-1130.

A Simulated Model for Analyzing Backscattering of Laser Pulse Propagating in Water Based on Fournier Forand Volume Scattering Function

HAN Biao¹, LIU Ji-fang¹, ZHOU Shao-jie¹, SUN Yan-ling¹, LIU Kun-lun², WANG Xu²

(1 Lab 501, School of technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 The 705th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Xi'an 710075, China)

Abstract: Based on Fournier Forand volume scattering function, a simulated model was built to analyze the backscattering properties of laser pulse propagating in water. In this model, in order to obtain light's impulse response of backscattering in water, Monte Carlo method was used to simulate the process of photon's propagating. Then, the initial laser pulse and the impulse response were convolved, and the convolution result Fourier spectral was calculated to get the time- and frequency-domain characteristic of the laser pulse's backscattering signal. Using this model, the influence of the size distribution of scatterer, the relative refractive index of scatterer to water and the attenuation coefficient on the backscattering properties of laser pulse propagating in water was analyzed when the initial laser pulse was approximated by Gaussian function. The result shows that, with the increase of the relative amount of small scatterer, the relative refractive index of scatterer to water and the attenuation coefficient, the energy of the backscattering signal is enhanced, the width is broadened, and the low frequency component is increased notably.

Key words: Underwater detection; Backscatter; Monte Carlo method; Laser pulse