

文章编号: 0258-7025(2009)06-1512-05

# 基于受激布里渊散射的水中无反射物体探测

赵智刚 黄立贤 徐 德 刘 崇 陈 军 项 震\*

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 介绍了一种利用脉冲激光在水中的受激布里渊散射(SBS)探测水中无反射物体的方法。充分利用了SBS的相位共轭特性以及光学隔离系统的有限孔径,使得信噪比得到较大的提高。当使由水面反射和水体散射的激光通过法布里—珀罗标准具时,通过观察接收屏上形成的干涉图样,便可确定在水中是否发生了SBS,进而判断是否有物体在水中出现。通过使用快速响应光电二极管接收光信号,并用数字示波器显示波形,可以得到水面反射脉冲和水体后向散射脉冲之间的时间间隔,进而得到水下无反射物体所处的深度。光电二极管安置在特定位置上保证了接收信号足够高的信噪比。在实验中,对位于水面下1~10 m处的物体成功进行了探测,且实验结果与实际情况符合得很好。

**关键词** 非线性光学;水下探测;受激布里渊散射;标准具

**中图分类号** O437.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093606.1512

## Stimulated Brillouin Scattering Based Detection of No-Reflection Object in Water

Zhao Zhigang Huang Lixian Xu De Liu Chong Chen Jun Xiang Zhen\*

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** An method for detection of underwater no-reflection object is introduced. It makes full use of the phase-conjugating characteristics of stimulated Brillouin scattering and the optical isolator's finite aperture, which enhances the signal to noise ratio highly. After passing through the Fabry-Perot etalon, the light reflected by water surface and scattered by water will form different interference rings' clusters as a result of their different wavelengths. By observing the change of the interference pattern, whether there is a no-reflection object or not in water can be determined. Using photodiode to receive and digital oscillograph to display the signals, the interval between them can be gotten. The depth of the underwater no-reflection object can be calculated. Photodiodes are placed at appropriate position to ensure more higher SNR can be obtained. In experiments, a underwater no-reflection object located at the depth arange of 1-10 m is detected and the results obtained agree well with real condition.

**Key words** nonlinear optics; underwater detecting; stimulated Brillouin scattering; etalon

### 1 引 言

激光自从1960年被发明以来<sup>[1]</sup>,由于其高功率密度、高相干性和好的方向性就一直被人们用于进行各种探测活动。激光探测水下物体的传统方法是基于物体表面对激光的反射,即将激光射入水中,当其遇到水下物体的时候,由于物体表面有一定程度

的反射,使得激光发生反射,所以只要探测出射光和反射光脉冲发出与返回到达的时间差,便可以确定物体所在的深度。但是目前反探测技术的发展使得水下物体具有更加隐蔽的无反射无散射特性,这就使得传统的依靠水下被探测物体自身反射或散射的方法受到了极大的挑战。20世纪60年代之后,利

收稿日期: 2008-10-10; 收到修改稿日期: 2008-11-19

基金项目: 国家自然科学基金委-中国工程物理研究院联合基金(10876037)资助课题。

作者简介: 赵智刚(1984—),男,博士研究生,主要从事激光与非线性光学方面的研究。E-mail: zzg4298@163.com

导师简介: 陈 军(1946—),女,教授,博士生导师,主要从事激光与非线性光学等方面的研究。E-mail: chenjun1@zju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: xiangzhen@zju.edu.cn

用拉曼散射技术探测海洋温度以及利用布里渊散射技术探测海水声速的工作尤为引人注目<sup>[2~9]</sup>。截至 2001 年,利用拉曼散射测量水温的精度可达  $\pm 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而使用布里渊散射测量海水声速的精度可达  $\pm 0.75\text{ m/s}$ <sup>[2]</sup>。1999 年,刘大禾等<sup>[10]</sup>提出了基于溴和碘分子吸收池的水中布里渊散射的边缘探测方法;2004 年,又提出了使用布里渊散射探测水下物体的新方法,但是他们所采用的是自发布里渊散射技术,信噪比不高<sup>[11]</sup>。2006 年,又提出了基于受激布里渊散射 SBS 的水下物体探测系统,但是信号发射和接收系统为非共轴放置,不能充分利用 SBS 的相位共轭特性<sup>[12]</sup>。同年,吕月兰<sup>[13]</sup>提出了使用偏振片和  $\lambda/4$  波片作为信号提取系统的共轴探测系统。2008 年,刘大禾等又在文献<sup>[11,12]</sup>的基础上,提出了使用法布里-珀罗(F-P)标准具和带门限开关的 ICCD 作为信号收集装置的利用 SBS 探测海洋的新系统<sup>[14]</sup>;吕月兰对探测水下物体的光学特性作了详尽细致的分析<sup>[15]</sup>。在以上的大部分这类实验装置中使用了偏振片和  $\lambda/4$  波片作为信号提取系统。

本文提出的水下探测系统,使用格兰棱镜和法拉第光学隔离器作为信号提取系统可以提高信号的信噪比。一方面是由于 SBS 的相位共轭特性,使用格兰棱镜和法拉第光学隔离器的隔离方法将更加有效地阻拦具有相位共轭特性的后向 SBS 光注入激光振荡器,很好地保护了单纵模激光器。同时也必然地提高了从格兰棱镜输出的 SBS 信号光强度。实验中还使用了 F-P 标准具和光电二极管同时探测信号的频域信息和时域信息。这样既可以判断是否有 SBS 发生,以及有没有水下物体的存在,又可以获得水下物体的深度信息。

## 2 基本原理

利用后向 SBS 探测水中无反射物体的方法是基于激光在水中的 SBS 原理<sup>[9]</sup>。SBS 作为一种重要的非线性光学现象,有明显的阈值特性和相位共轭特性<sup>[16]</sup>。当水中待探测位置处没有任何物体时,入射激光会聚在此处,且当激光强度超过了水的 SBS 阈值时,就会产生后向散射,此时由于声子场运动导致的多普勒频移,而使得后向 SBS 光的频率相对于入射激光波长有一定的变化,产生量级在吉赫兹的微小频移。后向 SBS 频移可以计算为

$$\Delta\nu_B = \nu_B - \nu_0 = \frac{2nV_{\text{sound}}}{\lambda_0} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (1)$$

其中  $n$  为激光波长在水中的折射率,  $V_{\text{sound}}$  为水中的声速,  $\lambda_0$  为激光在真空中的波长,  $\theta$  为入射光方向和散射光方向的夹角。使用水中的相关参数  $n = 1.33$ ,  $V_{\text{sound}} = 1500\text{ m/s}$ ,  $\lambda_0 = 532\text{ nm}$ ,  $\theta = 180^{\circ}$ , 计算可得水中的布里渊频移约为  $7.5\text{ GHz}$ 。

而当水中待探测位置处存在无反射物体,即表面反射很弱或者表面涂覆有对特定波段电磁波具有吸收特性的材料的物体时,即使入射激光强度超过了水体的 SBS 阈值,也不会产生后向 SBS。因为此时发生 SBS 的介质——水的空间体积,已经被无反射物体所占据,除非激光强度超过水下固态物体的 SBS 阈值,而这在所使用的激光功率下是不可能的。故而此时水中的 SBS 是无法发生的。

为了探测散射光,或者说为了区分入射激光和散射光,就必须知道并且利用它们之间的差异。目前可利用的主要有两个特性,即两者之间的光谱变化和光程差异。如前所述,因为水的 SBS 频移约为  $7.5\text{ GHz}$ ,光谱发生了变化,所以利用 F-P 标准具分光可以观察到频移后的散射光的多光束干涉环簇与入射光的多光束干涉环簇直径有变化。因此就可以通过这一现象来判别水中是否发生了 SBS,即当只有水表面的反射光时,看到的将只是单环簇的干涉环图,而当有水中的 SBS 和水面上的反射光同时存在时,便会看到双环簇的干涉环图。这样,单环簇干涉图样和双环簇干涉图样就分别对应于水中待探测位置处有物体和没有物体的两种情况。但是利用标准具观察干涉环簇的办法只能确定物体的存在与否,而不能确定其水下深度。为了确定其深度信息,就要利用它们所经历的光程有所差异的特点,即它们分别从水表面反射和从水中散射。所以使用光电二极管接收返回的水面反射信号和水体 SBS 信号,并在数字示波器上显示,便可获得两个信号之间的时间差,从而得到无反射物体在水中的深度信息。

## 3 实验研究

采用的实验装置如图 1 所示,其中 M 为反射镜;WP 为  $1/2$  波片;GP 为格兰棱镜;FI 为法拉第隔离器;PL 为正透镜;NL 为负透镜;FP 为 F-P 标准具;PD 为光电二极管。图示中的种子注入调 Q 激光器(美国 Continuum 公司)具有单纵模激光脉冲输出,其输出激光波长为  $532\text{ nm}$ ,该波长在水中的吸收系数为  $0.01\sim 0.05\text{ /cm}$ 。脉冲宽度为  $5\text{ ns}$ ,脉冲能量在  $20\sim 250\text{ mJ}$  内可变,单纵模输出光谱线

宽小于 1 GHz。532 nm 激光在水中的折射率为 1.333, SBS 增益系数为 0.0048 cm/MW。λ/2 波片与适用于高功率脉冲激光的格兰棱镜一起用以改变透过的光强度。格兰棱镜与法拉第隔离器构成了对于激光器的隔离,并使得返回信号从格兰棱镜输出。会聚系统用于将入射激光会聚进入水池,并通过调节正负透镜之间的距离来选择会聚于水池中不同的深度。F-P 标准具用于在光谱域对返回信号检测,而光电二极管和示波器组合用于在时间域对返回信号进行检测。

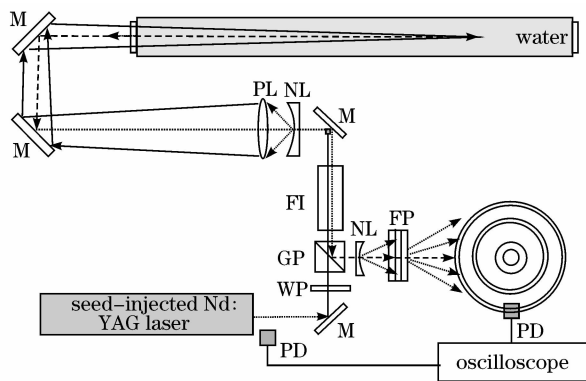


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

首先,在水池中不存在无反射物体的情况下。从激光器出射的单纵模 532 nm 激光经过 λ/2 波片、格兰棱镜和法拉第隔离器后,由正负透镜组成的会聚系统会聚射入长度为 10 m 的水池。实验中水池窗口到激光器出口距离约为 7 m,会聚点距离水池窗口在 1~10 m 可变。当会聚点的光强达到水的 SBS 阈值光强时,激光便在水中产生后向 SBS,且得益于 SBS 的相位共轭特性,后向散射光沿原路返回,再次反向经过扩束会聚系统使光束缩束。反向通过法拉第旋光器时偏振方向按同一旋转方向继续旋转 45°,这样一次来回后偏振方向总共旋转了 90°,从格兰棱镜的反射口输出。

输出的后向散射光通过发散透镜后照射到 F-P 标准具上,通过标准具后可以看到返回的散射光和水面反射光形成的干涉环簇图样如图 2 所示(此图为没有放置 PD 时所拍摄的,如果放置 PD,则只是占据干涉图样的某个地方而不会影响对于干涉双环簇的观察)。如图 2 中,外干涉环簇对应于入射激光的波长,即由水面反射返回的激光形成;而内干涉环簇对应于水体后向 SBS 光的波长。然后,将两个光电二极管分别放置在标准具后面的合适位置以及激光器出口旁边,接收光脉冲信号并转换为电信号显

示在数字示波器上如图 3 所示,由于水中的激光会聚点与水面之间有一定距离,所以在示波器上可以看到 3 个脉冲,即图 3 中的 Peak-1, Peak-2 和 Peak-3,分别对应于激光器出射处的脉冲、由水面反射回的激光脉冲和由水体后向 SBS 光脉冲。可以用 Peak-2 和 Peak-3 之间的时间差和水中的光速来计算得到水中会聚点和水表面的距离。由图 3 可得两个脉冲之间的时间间隔为 54 ns,由表达式

$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2n} \quad (2)$$

计算可得所对应的会聚点到水表面的距离为 6.1 m,与实际情况相符合。

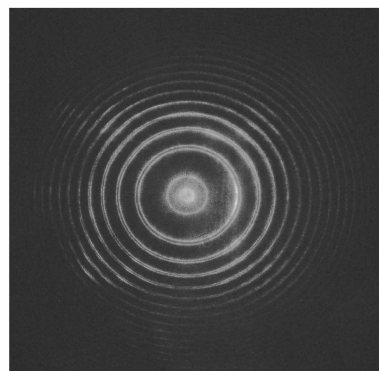


图 2 水表面反射光和水体后向 SBS 光的干涉双环簇图

Fig. 2 Interference pattern formed by light that are reflected by water surface and scattered by water

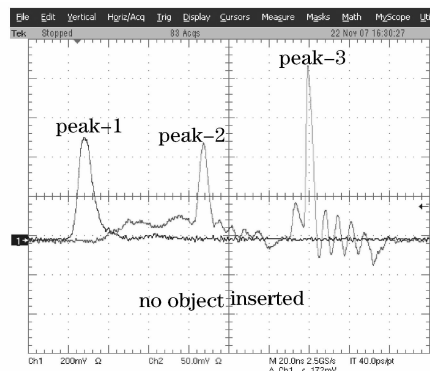


图 3 水中不存在无反射物体时得到的激光器出口脉冲信号 peak-1, 水面反射信号 peak-2 和水体后向 SBS 信号 peak-3

Fig. 3 In the absence of the no-reflection object, three signals are obtained. peak-1 is from the laser exit, peak-2 reflected by water surface, and peak-3 scattered by SBS of water

在水池的不同深度安置无反射物体进行了测试。图 4 所示的为在 6.1 m 处放置一个无反射物体时,此时标准具后面出现的干涉环簇图是单干涉环簇,且对应于由水面发射的激光波长,也即入射激

光波长,而与水体后向 SBS 光波长相对应的干涉环簇却消失了。这就说明了在水的会聚点上正好有无反射物体存在时,激光就无法在液体中产生后向 SBS。同样由光电二极管接收,由数字示波器显示的脉冲波形也只出现了 Peak-1 和 Peak-2,而 Peak-3 却消失了如图 5 所示。所以光谱域信号和时间域信号都说明此时并没有发生 SBS。

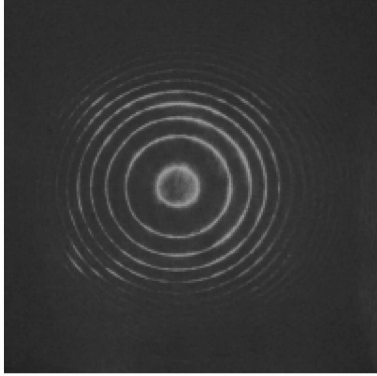


图 4 水表面反射光的干涉单环簇图

Fig. 4 Interference pattern formed by the light that are reflected by water surface

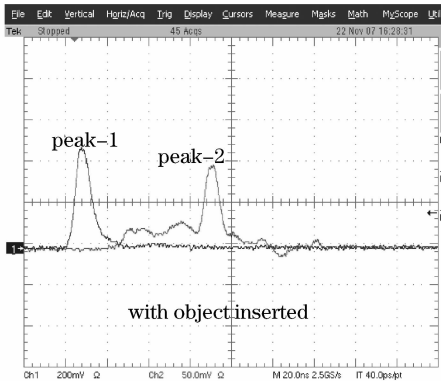


图 5 水中存在无反射物体时得到的激光器出口脉冲信号 peak-1 和水表面反射信号 peak-2

Fig. 5 In the presence of no-reflection object, only two signals are obtained. peak-1 is from the laser exit, and peak-2 reflected by water surface

当改变扩束会聚系统中的发散透镜和会聚透镜之间的距离时,激光就在水中的不同深度处会聚。一方面,可通过观察标准具后面由入射激光会聚于不同深度时相应的返回光信号所形成的干涉环簇来确定水中是否有物体存在。这种光谱方法虽然不能确定物体的深度信息,但是它可以通过光谱信息告诉我们所对应的光脉冲是否是由布里渊散射返回的光脉冲。另一方面,可以通过在示波器上观察测量在 SBS 光脉冲消失之前的那个会聚点深度和水表面之间的脉冲时间差,就可以探测到水下物体存在

与否以及它所在的深度。

实验中由于被测物体位于水下 1~10 m,在 1 m 水深时只需要 50 mJ 的激光能量就足够了,计算表明,加大激光能量到 250 mJ,可以测量 10~20 m 水深处的受激布里渊散射光的信号,从而可以探测到无反射物体到水面的距离。

## 4 讨 论

本文提出的方法由于是利用对水中的 SBS 光的探测,而不是利用对水下物体直接的反射光测量,因此,即使物体是隐形的,不论是对可见光还是对其他波段的电磁波,只要它阻断了入射的激光,就不可能在水中产生 SBS,这样,即使它没反射任何光线,仍然可以通过探测 SBS 存在与否来探测到物体的存在与否。

实验中采用的扩束和会聚系统,需要进行光学设计和计算,一方面使得激光束在水中会聚点足够小,可以产生 SBS,另一方面可以调节会聚点在水下的深度,假如配以纵向扫描系统,便可以连续扫描不同深度,从而对不同深度下的物体进行探测。同时这个会聚系统的应用使得会聚点处产生的是受激散射而不是自发散射,这比之于以往的自发布里渊散射具有更强的反射信号,并且由于 SBS 的相位共轭特性,反射光几乎沿入射光原路返回,发散角极小,使得探测信号更大,信噪比大大提高。

另外,由于采用了格兰棱镜、磁光隔离器系统,使得返回的光只有受激散射的光可以通过并输出,而将其他元件表面的各种散射光大部分都拦截在口径之外,大大提高了信噪比。从实验中得到的图 3 所示的信号可以看出,受激散射光的脉冲信号强度大约是噪声的 30 倍。

## 5 结 论

通过探测由脉冲激光在水中产生的 SBS 的后向散射光信号,探测水中的无反射目标物的方法弥补了传统激光水下探测只依赖于物体表面反射光的不足,将探测范围扩展到无反射无散射的隐形物体。实验中已经对距离水表面 1~10 m 的水中物体进行了探测,通过检测其反射光的光谱以及光电接收器的信号,可通过光谱域和时间域信号同时确定水下物体的存在与否,并通过示波器上显示的反射波形在时间轴的不同位置,获得信号之间的间隔进而获得物体在水面以下的距离。

## 参 考 文 献

- 1 T. H. Maiman. Optical and microwave-optical experiments in ruby [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1960, **4**: 564~566
- 2 Joyanto Mukerjee. Remote sensing of ocean waters with Raman and Brillouin scattering [R]. Maritime Operations Division, Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 2001
- 3 D. A. Leonard, B. Caputo, F. E. Hoge. Remote sensing of subsurface water temperature by Raman scattering [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(11): 1732~1745
- 4 J. L. Guagliardo, H. L. Dufilho. Range resolved Brillouin scattering using a pulsed laser [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1980, **51**: 79~81
- 5 J. G. Hirschberg, J. D. Byrne, A. W. Wouters *et al.*. Speed of sound and temperature in the ocean by Brillouin scattering [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**: 2624~2628
- 6 J. G. Hirschberg, J. D. Byrne. Rapid underwater ocean measurements using Brillouin scattering [C]. *SPIE*, 1984, **489**: 270~276
- 7 D. A. Leonard, H. E. Sweeney. Remote sensing of ocean physical properties; A comparison of raman and Brillouin techniques [C]. *SPIE*, 1988, **925**: 407~414
- 8 D. A. Leonard, H. E. Sweeney. A comparison of stimulated and spontaneous laser radar methods for the remote sensing of ocean physical properties [C]. *SPIE*, 1990, **1302**: 568~582
- 9 G. D. Hickman, J. M. Harding, M. Carnes *et al.*. Aircraft laser sensing of sound velocity in water; Brillouin scattering [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1991, **36**: 165~178
- 10 Liu Dahe, Jefferey W. Katz. Edge technique for the measurements of Brillouin scattering in water [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(4): 307~311  
刘大禾, Jefferey W. Katz. 水中布里渊散射的边缘探测方法 [J]. *中国激光*, 1999, **A26**(4): 307~311
- 11 W. Gong, R. Dai, Z. Sun *et al.*. Detecting submerged objects by Brillouin scattering [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**: 635~639
- 12 J. Shi, G. Li, W. Gong *et al.*. A lidar system based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **86**: 177~179
- 13 Lü Yuelan. Submarine objects detection based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(S1): 339~341  
吕月兰. 基于受激布里渊散射的水下物体探测 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(s1): 339~341
- 14 J. Shi, M. Ouyang, W. Gong *et al.*. A Brillouin lidar system using F-P etalon and ICCD for remote sensing of the ocean [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **90**: 569~571
- 15 Yuelan lü, Lihua Wu, Xueqing Chong. Nonlinear optical properties of stimulated Brillouin scattering process in submerged object detection [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(2): 137~140
- 16 Chen Jun. Optical Phase Conjugation and Application [M]. Beijing: Science Press, 1999  
陈军. 光学位相共轭及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999