

激光布里渊散射水下目标探测原理及实验研究

苏彦兵¹ 甄玉¹ 张宁¹ 陈旭东² 刘大禾²

(¹海军装备研究院, 北京 102249; ²北京师范大学物理系, 北京 100875)

摘要 介绍了激光布里渊散射探测水下目标的原理, 采用基于新型 ICCD 的布里渊散射激光雷达系统, 进行了水下目标探测的相关实验。实验结果表明, 激光布里渊散射探测水下目标在探测深度上具有很大优势, 同时具有探测隐身目标的能力。

关键词 激光布里渊散射; 水下目标; 探测

中图分类号 O436 OCIS 120.1880 290.5830 文献标识码 A

Theory and Experiment Research of Submerged Objects Detection Based on Brillouin Scattering

Su Yanbing¹ Zhen Yu¹ Zhang Ning¹ Chen Xudong² Liu Dahe²

(¹Naval Academy of Armament, Beijing 102249, China;
²Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract The theory of submerged objects detection based on Brillouin scattering is introduced, and the relative experiment on the foundation of new ICCD camera system is done. The results indicate that the submerged objects detection technology based on Brillouin scattering has great advantages in detection depths and can detect invisible objects.

Key words laser Brillouin scattering; submerged objects; detecting; experiment

1 引言

激光探测是一项近些年发展较快的水下目标探测技术, 它基于蓝绿激光在海水中传播衰减减小因而可以穿透较深海水的特性, 通过激光器发射脉冲激光或连续激光, 测量由水下目标反射回来的反射源信息, 达到对水下目标的位置、形状和特性的掌握。用激光对水下目标进行探测, 国内外研究较早的是幅度探测法, 即采用蓝绿激光成像技术。激光入射到水中, 经被测物体的反射, 只要反射光的强度达到一定要求, 就可以根据反射光的强度大小、反射光返回的时间差判断水下物体的距离等信息, 再通过相应的同步激光扫描技术判别物体的形状等^[1~5]。目前, 机载水下激光探测系统在水中的垂直探测距离或是水平、倾斜探测距离可达 30~70 m, 已经在海洋测绘、探潜和反水雷中得到了广泛的应用^[6]。

2004 年弓文平等^[7]提出激光布里渊散射法探测水下目标, 通过测量水中布里渊散射光谱特征的变化来判断是否存在水下目标。这种探测方法不是直接探测目标的散射光谱, 而是探测目标环境场(如水、空气等)的散射光谱, 采用调频探测技术来探测回波信号的频率移动, 而不是探测回波信号的幅度, 来实现对水下目标的实时探测。利用激光布里渊散射探测水下目标的方法, 其主要优点是不仅能增大探测深度, 而且特

收稿日期: 2009-11-16; 收到修改稿日期: 2009-11-20

基金项目: 国家 863 计划(2009AA09Z101)和总参“十一五”预研(40901020201)资助课题。

作者简介: 苏彦兵(1969—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水下目标探测方面的研究。E-mail: suyanning@hotmail.com

别适合于水中声隐身目标的探测, 针对这种情况, 我们最近在南昌航空大学进行了激光布里渊散射探测水下目标的实验, 以便进一步确定相关技术指标及应用范围。

2 激光布里渊散射探测水下目标原理

当一束激光射入水中时, 会发生弹性散射和非弹性散射。弹性散射又称为瑞利散射, 这类散射光没有频移。非弹性散射与弹性散射不同, 非弹性散射光有频移, 即散射光的频率相对于入射光的频率发生移动。非弹性散射又分为两类: 拉曼散射与布里渊散射。布里渊散射的机理是: 由于多种实际因素的影响, 水的温度、密度等参数会发生随机涨落, 形成声子, 使得水中自发地存在着声波。当光与声子作用发生散射时, 由于声子运动的多普勒效应而使散射光的频率发生变化, 出现频率大于和小于入射光中心频率的两个散射光即发生频移。其频率对称地分布在入射光中心频率的两侧, 这就是布里渊散射^[8]。布里渊散射频移的大小和声速、光的散射角等有关, 在海水中

$$v_B(S, T) = \frac{2n(S, T)}{\lambda} V_s(S, T) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right). \quad (1)$$

式中 v_B 为布里渊频移, n 为海水折射率, λ 为入射光波长, V_s 为水中的声速, θ 为散射角, 即散射光方向与入射光方向的夹角, S 为海水盐度, T 为海水温度。

当水中有物体(如鱼雷、水雷、潜艇等)存在时, 物体所在处等效于无水, 而布里渊散射只在水中发生。因此, 当测量水的散射光谱时, 在物体所在处的激光回波信号中, 具有频移的布里渊散射将消失, 只有不发生频移的瑞利散射信号。只要测得水的散射光谱发生了相应的变化, 就表明在某一深度处有水中目标的存在。图 1 为原理实验结果, 其中图 1(a) 为水中没有物体, 瑞利散射信号与布里渊散射信号都存在, 3 个较高的峰为瑞利散射峰, 在瑞利散射两侧对称分布着的两个较低的峰为布里渊散射峰; 图 1(b) 为水中有物体, 布里渊散射信号消失, 只有瑞利散射信号。

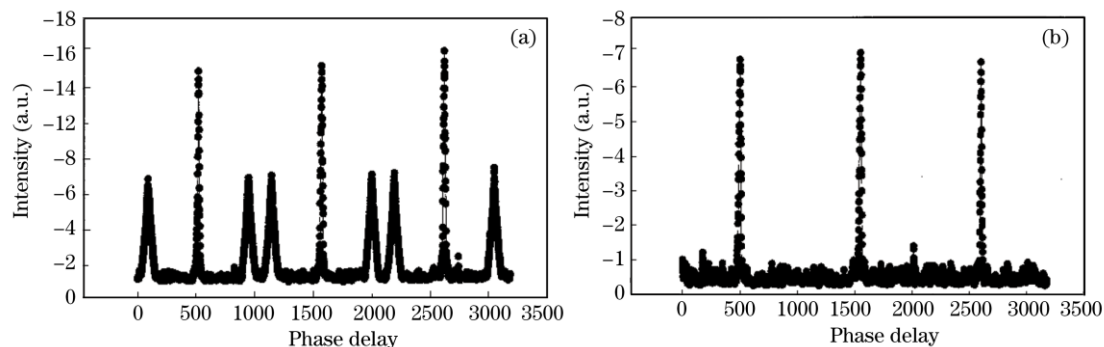


图 1 水中无物体(a)和有物体(b)的散射光谱
Fig.1 Scattering spectrum of water without (a) and with (b) object

与激光扫描技术结合, 即可获得水下物体的形状及运动方向, 深度, 甚至速度等信息。根据激光回波信号的时间延迟, 还可以得到距水中物体的距离。测量的最大距离取决于激光器的功率、海水的浑浊度、海水的衰减系数等。

3 实验系统

实验系统^[9]由激光发射装置、信号接收装置、时序控制装置与数据处理装置构成。其中发射装置包括激光器和光学元件, 接收系统包括法布里-珀罗(F-P)标准具、望远镜系统、成像系统即 ICCD 系统及其控制器。图 2 为实验系统原理框图。图 3 为实验装置的组成框图。

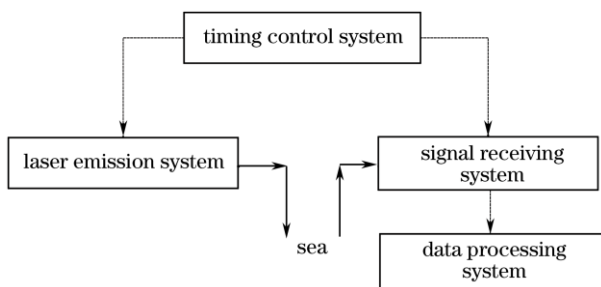
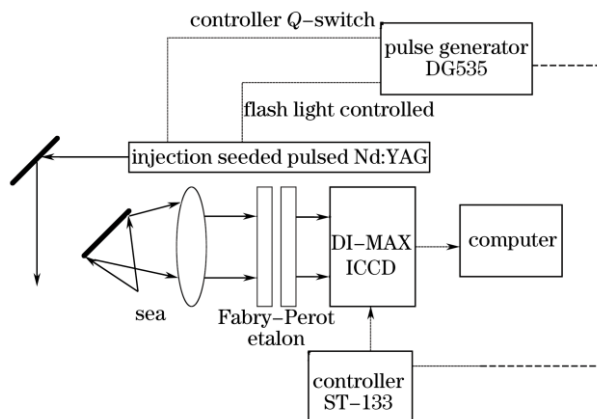


图 2 实验系统原理框图
Fig.2 Theory block diagram of the experimentation system



3 实验装置组成框图
Fig.3 Structure diagram of the experimentation system

图中实线表示光信号连接, 虚线表示电信号连接。其中透镜孔径 300 mm, 焦距 900 mm; Nd:YAG 激光器有种子注入时出光的线宽为 90 MHz, 脉冲宽度为 8 ns, 重复频率为 10 Hz, ICCD 门宽 2 ns, 光谱响应范围为 150~900 nm, 像素大小为 $26 \mu\text{m} \times 26 \mu\text{m}$, 空间分辨率为 $256 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 。时序控制装置采用 DG-535 数字延时脉冲发生器, 它可以提供基准时间, 调节各仪器之间、激光发射装置和信号接收装置的时间延迟, 还可以向 ICCD 的控制器 ST-133 发出控制信号, 进而实现 ICCD 采集图像的时间控制, 计算测量距离。根据 ICCD 门宽及激光脉冲宽度综合考虑, 该实验系统距离选通分辨率接近 1 m (以水中光速 $3 \times 10^8 / 1.33 \text{ m/s}$, 激光脉冲宽度 8 ns 计算)。

由图 3 可知, 将被探测目标置于水槽中(水槽的最大深度为 55 m), 用种子注入脉冲 Nd:YAG 激光器经过二倍频后的输出波长为 532 nm 的绿光, 将其作为光源, 用固体法布里-珀罗标准具探测散射信号, 散射光通过标准具后进入 ICCD 系统记录光谱, 由计算机进行数据采集、处理和分析其光谱的变化而判断水中是否存在物体, 整个系统通过脉冲发生器实现时序控制。激光回波进入探测光路, 经过固体法布里-珀罗标准具后形成多级干涉光谱, 每级干涉光谱包含瑞利散射分量和布里渊散射分量, 分别形成半径不同的干涉圆环。由原理可知, 若水下存在目标物体, 则布里渊散射环应该消失; 若目标不存在时, 布里渊散射环应该存在, 可以在计算机显示器上进行人工判读或通过软件实现计算机自动判读。

4 实验结果及分析

采用两种不同直径(38 mm 和 18 mm)的圆柱体作为水下目标进行探测, 分别做了两组实验, 测试在不同的激光器发射功率下, 不同的深度其光谱的变化情况。实验结果如下:

1) 探测深度 $h=3 \text{ m}$ 。分别在激光器电压为 1.22 kV(激光器能量为 277 mJ), 1.26 kV(激光器能量为 346 mJ) 下测试其光谱干涉圆环的变化情况, 探测结果如图 4 所示。水槽中无目标时布里渊散射环与瑞利散射环都清晰可见。水槽中分别放有大、小直径目标时, 布里渊散射环全部消失。激光器电压越高, 光谱干涉圆环的亮度越强。

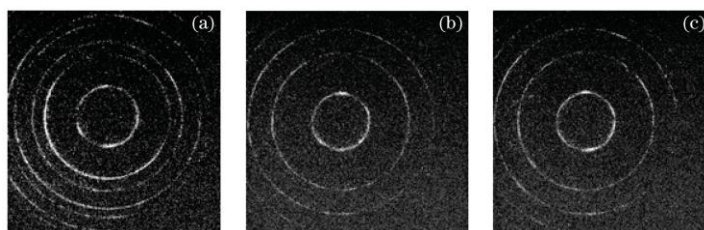


图 4 当 $h=3 \text{ m}$ 时, 水中无目标(a)有大直径目标(b)和有小直径目标(c)的散射光谱图
Fig.4 Scattering spectrum of water containing nothing (a), big object (b) and small object(c) with $h=3 \text{ m}$

2) 探测深度 $h=5$ m. 分别在激光器电压为 1.48 kV(激光器能量为 803 mJ), 1.50 kV(激光器能量为 852 mJ) 下测试其光谱干涉圆环的变化情况(随探测深度的增大需要增加激光器的功率)。探测结果如图 5 所示。水槽中无目标时, 布里渊散射环与瑞利散射环都清晰可见。水槽中分别放有大、小直径目标时, 布里渊散射环全部消失。两种大小直径的探测目标其试验结果图相同。

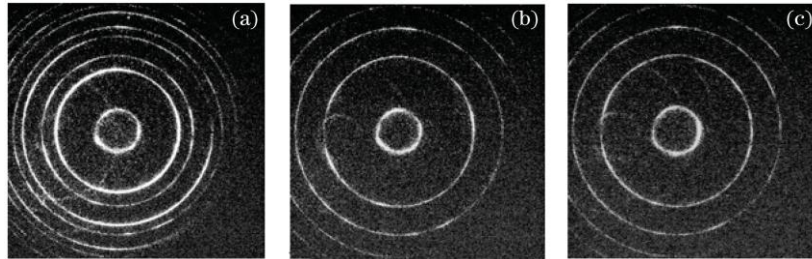


图 5 当 $h=5$ m 时, 水中无目标(a)有大直径目标(b)有小直径目标(c)的散射光谱图
Fig.5 Scattering spectrum of water containing nothing (a), big object (b) and small object (c) with $h=5$ m

由实验结果可见, 布里渊激光散射法的最大优点在于, 无论目标直径多小, 只要在探测距离内都可以被发现, 这种探测方法可以探到很小的目标物体。由于激光发射的光路经过透镜会聚到水里, 焦点处的光斑直径为 1~2 mm, 只要焦点处物体的直径大于 1~2 mm, 都可以用布里渊散射法探测得到。

实验中, 水的衰减系数为 1.2281 m^{-1} , 最大探测深度为 5 m。水的衰减系数为 0.12 m^{-1} 时, 可以探测到深度为 55 m 的目标物体。一般来说, 深海的衰减系数很小(如南海某些地区), 常用数据是 0.05 m^{-1} , 那么这套系统在深海的探测深度将大于 55 m。根据理论分析, 影响探测深度的主要因素是海水的衰减系数和浑浊度, 温度和盐度只是影响干涉环的自身宽度和两环之间的距离, 对实验结果影响不大。

5 结 论

激光布里渊散射作为一种新的水下目标探测技术, 具有广阔的军事应用前景。与传统的海洋激光雷达在探测原理上有明显的区别, 它是通过探测水中布里渊散射信号是否存在来确定水中是否有目标存在。相比传统的海洋激光雷达, 它的优点非常突出, 一是利用受激布里渊散射在同等激光发射功率条件下, 探测水深增加; 二是对于探测隐身目标非常有效, 而且探测结果与回波幅度无关, 不论水中目标是否采用声隐身技术, 其探测结果都是一样的。

激光布里渊散射探测水下目标在工程实现上还有一定差距, 主要是与声纳探测相比探测距离短; 激光同步扫描技术还没有突破, 不能得到水中目标的形状和运动方向等信息, 也就是还不具备目标识别能力。

参 考 文 献

- 1 Li Yuanhui, Zhong Xiaochun, Yang Chao *et al.*. The underwater laser target detection and its development[J]. *Optical Communication Technology*, 2008, (6): 61~64
李源慧, 钟晓春, 杨超等. 水下激光目标探测及其发展[J]. 光通信技术, 2008, (6): 61~64
- 2 Ma Yong, Ji Hang, Liang Kun *et al.*. Application of modulated lidar on optical carrier for ocean exploration[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(4): 346~349
马泳, 冀航, 梁琨等. 载波调制激光雷达技术在海洋探测中的应用[J]. 激光技术, 2008, **32**(4): 346~349
- 3 Zhang Zhengyu, Zhou Shouhuan. Study of underwater target detection by single-pulse imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(s1): 633~635
章正宇, 周寿桓. 激光水下目标单脉冲成像探测技术研究[J]. 中国激光, 2002, **29**(s1): 633~635
- 4 Wang Haiyan, Yang Tingwu, An Yuying. The usage of polarity character of underwater laser beam in target image detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(1): 9~13

- 王海晏, 杨廷梧, 安毓英. 激光水下偏振特性用于目标图像探测[J]. 光子学报, 2003, **32**(1): 9~13
- 5 Yang Shubin, Peng Fuyuan. Design and experiment of an underwater laser imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(sl): 75~78
杨述斌, 彭复员. 水下激光成像系统设计与实验[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(sl): 75~78
- 6 Yang Huayong, Liang Yonghui. Present status and prospects of airborne blue-green laser for searching underwater objects[J]. *OME Information*, 2003, (12): 6~10
杨华勇, 梁永辉. 机载蓝绿激光水下目标探测技术的现状及前景[J]. 光机电信息, 2003, (12): 6~10
- 7 Wenping Gong, Rui Dai, Zhanghua Sun *et al.*. Detecting submerged objects by Brillouin scattering[J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**(5): 635~639
- 8 Gong Wenping. Detecting Submerged Objects by Brillouin Scattering Lidar[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2003
弓文平. 用布里渊散射激光雷达探测水下目标[D]. 北京: 北京师范大学, 2003
- 9 Jinwei Shi, Guixin Li, Wenping Gong *et al.*. A lidar system based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **86**(1): 177~179