

布里渊散射法测量盐度及温度不同的海水中的声速*

刘大禾 汪华英 周 静

(北京师范大学物理系 北京 100875)

提要 报道了不同盐度及温度海水中用布里渊散射方法得到的声速的实验测量结果。结果表明, 布里渊散射方法是一种很好的海洋监测技术。

关键词 声速, 盐度, 温度, 布里渊散射

海洋中声速的实时监测是海洋监测的一个重要内容。近二十年来, 光学实时监测方法越来越受到人们的重视^[1-6]。其中, 布里渊散射方法由于具有高分辨率和高信噪比^[7], 更成为人们研究的重点。本文作者在这方面进行了大量的工作^[8,9], 在文献[8]和[9]中对用布里渊散射进行海水中声速实时遥测的原理和方法作了报道。

当一束光射入水中时, 会发生弹性散射和非弹性散射, 布里渊散射即是非弹性散射的一种, 其特点是散射光有频移。布里渊散射的频移由下式给出

$$\Delta\nu_B = \frac{2n}{\lambda} V \sin \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

式中 λ 为入射光波长, n 为水的折射率, V 为水中声速, θ 为散射角。若水中的声速为 1500 m/s, 可得在散射角为 180° 时, 散射光频移为 7.5 GHz。

图 1 是典型的理想布里渊散射光谱。 n, V 均受海水温度和盐度的影响, 故(1) 式可表示为

$$\Delta\nu_B(S, T) = \frac{2n(S, T)}{\lambda} V(S, T) \sin \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

n, V 随温度和盐度的变化可用下述经验公式表示

$$n(S, T) = n_0 + \{n_1 T + n_2 T^2 + n_3 T^3 + S[n_4 + n_5 T + n_6 T^2 + n_7 T^3]\} \times 10^{-5} \quad (3)$$

$$V(S, T) = C_0 + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3 + C_4 S + C_5 S^2 + C_6 T S + C_7 T^2 S \quad (4)$$

(3) 和(4) 式中的各个系数均为已知常数。

在上面各式中有 5 个变量, 即 $n, S, T, \Delta\nu_B, V$ 和 3 个关系式, 即(2) ~ (4) 式, 其中有两个变

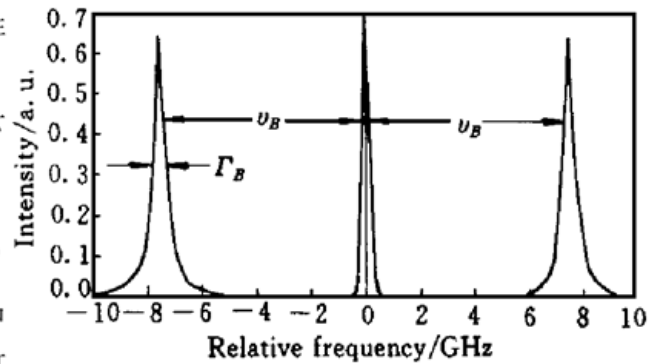


图 1 典型的布里渊散射光谱

Fig. 1 Typical spectrum of Brillouin scattering

* 国家 863 计划(818-09-02)和国家自然科学基金(69988001)资助项目。

收稿日期: 1999-09-22; 收到修改稿日期: 1999-11-08

量是独立的,即盐度 S 和温度 T 。但我们可以选任意两个变量为独立变量。在本项目中,由于要测量的是布里渊频移 $\Delta\nu_B$,故 $\Delta\nu_B$ 应被选作一个独立变量。在其余 4 个变量中,盐度 S 是最稳定的,而且不同条件下的盐度值也可以从数据库中查找,因此我们选盐度作为另一个独立变量。

选定 $\Delta\nu_B$ 和 S 作独立变量,则由(2),(3)和(4)式可得

$$\begin{aligned}
 V(S, \Delta\nu_B) = & d_{00} + d_{01}S + d_{02}S^2 + d_{03}S^3 + d_{04}S^4 + \\
 & [d_{10} + d_{11}S + d_{12}S^2 + d_{13}S^3 + d_{14}S^4](\Delta\nu_B - 7.5) + \\
 & [d_{20} + d_{21}S + d_{22}S^2 + d_{23}S^3 + d_{24}S^4](\Delta\nu_B - 7.5)^2 + \\
 & [d_{30} + d_{31}S + d_{32}S^2 + d_{33}S^3 + d_{34}S^4](\Delta\nu_B - 7.5)^3 + \\
 & [d_{40} + d_{41}S + d_{42}S^2 + d_{43}S^3 + d_{44}S^4](\Delta\nu_B - 7.5)^4 \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中系数 d_{ij} 均为已知常数。 $\Delta\nu_B$ 的单位为 GHz, S 的单位为%, V 的单位为 m/s。(5) 式的适用范围为 $0 \leq S \leq 40\%$, $7.0 \text{ GHz} \leq \Delta\nu_B \leq 8.0 \text{ GHz}$ 。实际的测量条件也正好在这个范围内。根据实验测得的布里渊频移,即可由(5)式得到海水中的声速。

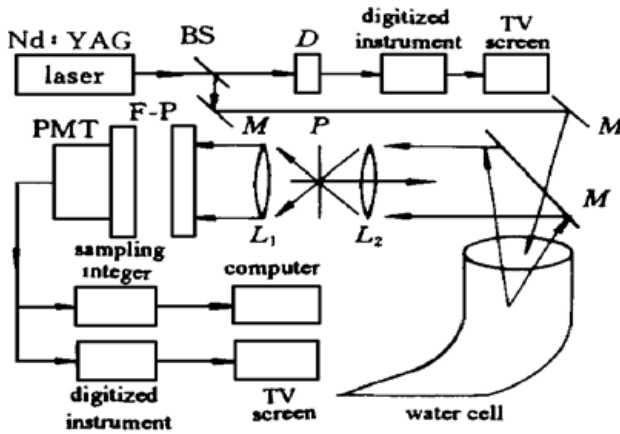


图 2 水中布里渊散射的测量装置

L_1, L_2 : 透镜; P : 针孔滤波器; M : 反射镜; $F-P$: 扫描法布里-珀罗干涉仪; BS : 532 nm 的高反镜; D : 光探测器; PMT : 光电倍增管

Fig. 2 The set-up geometry for measuring Brillouin scattering in water

L_1, L_2 : lenses; P : pin hole; M : mirrors; $F-P$: Fabry-Perot interferometer; BS : beam splitter with high reflectivity at 532 nm; D : photo detector; PMT : photo multiplier

近来,我们又用布里渊散射方法测量了不同盐度及温度海水中的声速。实验装置如图 2 所示。由于布里渊散射的频移非常小,因此,要求所用激光器具有很好的频率稳定性线宽。为保证测量精度,用注入式锁模脉冲 YAG 激光器作光源,输出波长为 532 nm,线宽为 200 MHz,脉冲宽度为 10 ns,输出能量为每个脉冲 300 mJ,脉冲重复频率为 20 Hz。对于信号检测,使用高精度扫描法布里-珀罗干涉仪,它由两个平面镜组成,每个平面镜的反射率均为 99%,因此,干涉仪可获得相当高的精细度。干涉仪的自由光谱范围为 18.54 GHz。为了尽可能降低噪声的影响,在大量实验的基础上,我们选用了直径为 15 μm 的针孔滤波器。实验中所用的海水是用美国 Sigma 公司生产的海盐配制的。除浮游生物外,其化学成分与真实海水完全一样。海水经过一个温控循环装置实现温度的控制与稳定。温度的控制精度为 0.02 $^{\circ}\text{C}$ 。在实验中,选择扫描法布里-珀罗干涉仪

的扫描周期为 100 s。这是由于在每秒 20 个脉冲的情况下,短扫描周期会造成信号的采样数过低,从而影响测量精度。

图 3 给出了部分实验结果。图中较高的峰为瑞利散射峰,瑞利散射峰两侧对称的双峰为布里渊散射峰。为了给出定标的依据,每个扫描周期均包括 3 个瑞利散射峰,相邻两个瑞利散射峰之间的距离就是干涉仪的自由光谱范围。由于瑞利散射峰的线型函数为高斯型,而布里渊散射峰的线型函数为洛伦兹型,为从另一个侧面验证实验精确与否,我们用高斯和洛伦兹混合型函数(图中的实线)对每次实验的记录数据(图中的点)进行了拟合,再由拟合的结果确定布里渊频移。可以看出,拟合的结果是令人满意的。这表明实验结果是可靠的。

布里渊散射方法具有很高的信噪比^[4],因而测量精度高。在参考文献[9]中我们已经讨论过,声速的理论测量精度达 $\delta V < 0.22 \text{ m/s}$ 。即使考虑到多种环境因素的影响,实际测量精度仍可达 $\delta V < 1 \text{ m/s}$ 。

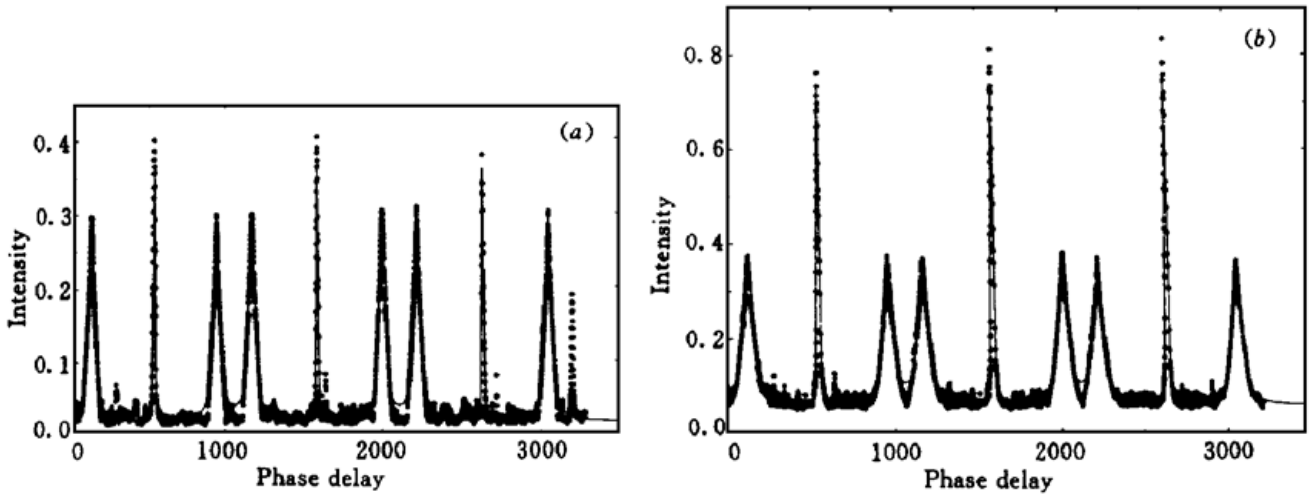


图3 用高斯和洛伦兹混合型函数对布里渊频移的实验测量结果的拟合
点为实验测量数据,实线为拟合结果

Fig. 3 Fitting on the measured results of Brillouin shift with hybrid Gaussian and Lorentzian profiles
The dots are measured results, solid line is fitting results

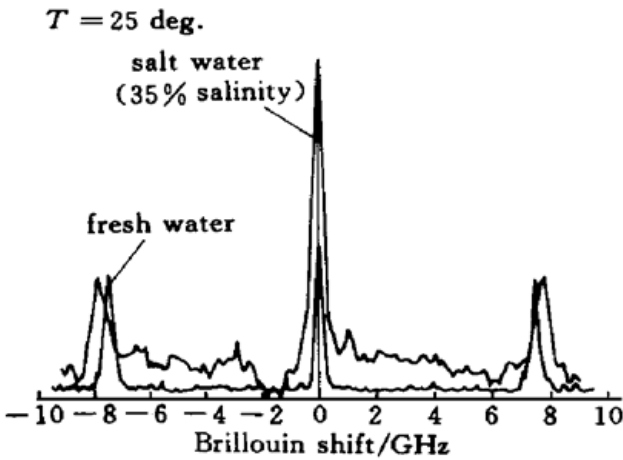


图4 多组实验数据的平均结果
每条曲线都是由相同条件下的6组实验数据
平均而得到的

Fig. 4 The average of several groups of experimental data
Each curve is an averaging result with six groups of
measured datas at same experimental conditions

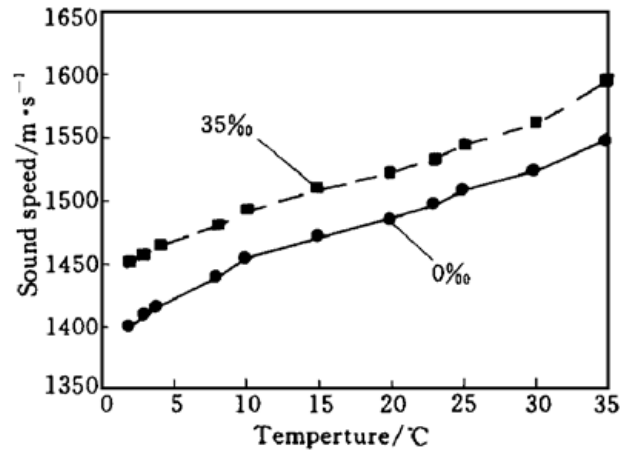


图5 水中声速的测量结果

●: 盐度为 $S = 0\%$ (纯水)的测量数据;
■: 盐度为 $S = 35\%$ (海水典型盐度值)的测量数据

Fig. 5 Measured results for sound speed in water
● is data for the water with the salinity of $S = 0\%$;
■ is data for the water with the salinity of $S = 35\%$

平均法是实验数据处理中常用的方法。图4中的每条曲线均是相同条件下的6组实验记录数据的平均结果。比较图3与图4可以看出,平均结果与单独一组实验数据符合得相当好,而且平均可使噪声降低。

表1给出了不同盐度海水中不同温度下的声速测量结果(用布里渊散射方法)。这些结果均是用图3中采用的拟合方法得到的。图5为表1结果的图示。

表 1 不同温度、盐度海水中声速的测量结果

Table 1 Measured results for sound speed in sea water with different temperature and salinity

Temperature	S = 0‰	S = 35‰	Temperature	S = 0‰	S = 35‰
2°C	V = 1399.52 m/s	V = 1450.28 m/s	20°C	V = 1485.19 m/s	V = 1520.14 m/s
3°C	V = 1409.15 m/s	V = 1455.75 m/s	23°C	V = 1496.03 m/s	V = 1531.37 m/s
4°C	V = 1416.33 m/s	V = 1463.67 m/s	25°C	V = 1508.06 m/s	V = 1543.07 m/s
8°C	V = 1438.71 m/s	V = 1478.53 m/s	30°C	V = 1523.02 m/s	V = 1558.62 m/s
10°C	V = 1454.61 m/s	V = 1490.69 m/s	35°C	V = 1546.31 m/s	V = 1591.88 m/s
15°C	V = 1470.87 m/s	V = 1507.48 m/s			

以上结果表明,布里渊散射方法是一种很好的实时监测方法。与常规声速测量方法相比,布里渊散射方法具有以下优点:由于利用了光散射,实时性好;由于采用调频探测,抗干扰性好,信噪比高,测量精度高;由于是非接触探测,适用于恶劣环境及人员、设备不便直接到达的环境的监测。

参 考 文 献

- 1 D. J. Collins, J. A. Bell, R. Zanoni. Recent progress in the ocean measurement of temperature and salinity by optical scattering. *SPIE*, 1984, **489**: 247~ 269
- 2 D. A. Leonardo, B. Caputo, F. E. Hoge. Experimental remote sensing of subsurface temperature in natural ocean water. *Geographical Research Lett.*, 1977, **4**(7): 279~ 281
- 3 D. A. Leonard, B. Caputo, F. E. Hoge. Remote sensing of subsurface water temperature by Raman scattering. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(11): 1732~ 1745
- 4 J. G. Hirschberg, J. D. Byrne. Rapid underwater ocean measurements using Brillouin scattering. *SPIE*, 1984, **489**: 270~ 276
- 5 J. G. Hirschberg, J. D. Byrne, A. W. Wouters *et al.*. Speed of sound and temperature in the ocean by Brillouin scattering. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(15): 2624~ 2628
- 6 G. D. Hickman, J. M. Harding, M. C. Carnes *et al.*. Aircraft lase sensing of sound velocity in water: Brillouin scattering. *Remote Sens. Environ.*, 1991, **36**: 165~ 178
- 7 D. A. Leonard, H. E. Sweeney. Remote sensing of ocean physical properties: A comparison of Raman and Brillouin techniques. *SPIE*, 1988, **925**: 407~ 414
- 8 Liu Dahe, Quan Xiaohong. Range and line resolved Brillouin scattering in pure water using pulsed Nd⁺⁺ YAG laser. *Chinese J. Lasers*, 1995, **B4**(2): 123~ 126
- 9 Liu Dahe. Real time measurement of sound speed in sea water suing Brillouin scattering. *Acta Acoustica* (声学学报), 1998, **23**(2): 184~ 188 (in Chinese)

Measurements of Sound Speed in Sea Water with Different Salinity and Temperature by Brillouin Scattering Method

Liu Dahe Wang Huaying Zhou Jing

(Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract It is reported that the sound speed in sea water with different salinity and temperature was measured using Brillouin scattering. The measured results show that the method using Brillouin scattering is a good technique for remote sensing to the ocean.

Key words sound speed in sea water, salinity, temperature, Brillouin scattering