

# 水中布里渊散射的边缘探测方法\*

刘大禾\* Jefferey W. Katz

(美国 Texas A&M 大学物理系 College Station, TX77843-4242, U. S. A.)

**提要** 提出了一种测量水中布里渊散射的新方法——边缘探测技术。分析了这种方法的原理。结合布里渊散射激光雷达在海洋监测中的应用,给出了一个基于溴和碘分子吸收池的实际探测系统,并给出了系统的响应函数。最后,讨论了边缘探测技术的特点。

**关键词** 布里渊散射,边缘探测技术,分子吸收池

## 1 引 言

布里渊散射自从被提出后,已经得到了深入的研究<sup>[1,2]</sup>,自 80 年代初期开始,布里渊散射应用于海洋及大气的遥感、监测,对水中声速、温度、海水盐度以及大气中的风速等进行实时监测<sup>[3~11]</sup>。这种布里渊散射激光雷达系统已成为海洋及大气遥感、监测的发展方向,而越来越受到人们的重视。

布里渊散射的探测需要高分辨率的光谱仪,通常是采用法布里-珀罗干涉仪。但由于法布里-珀罗干涉仪的接收立体角非常小,对入射光的平行度要求很高,在实际使用中很困难。因而,如何高精度地测量布里渊频移,成为提高布里渊散射激光雷达系统测量精度的关键问题之一。Korb 等<sup>[12]</sup>首次采用边缘探测技术对激光在大气散射多普勒频移的测量中,达到了相当高的精度。Piironen 等<sup>[13]</sup>利用碘分子滤波器发展了一种高光谱分辨率的激光雷达系统,用于大气的监测。

本文将边缘探测技术与碘分子滤波器结合起来,提出了一种用于海洋监测的布里渊散射激光雷达系统,它采用了基于溴和碘分子吸收滤波器的边缘探测技术,可以对海洋中的多项参数实现高精度的实时监测。

## 2 原 理

### 2.1 基本设想

边缘探测技术的基本原理是使被测光的频率位于一个高分辨率光学滤波器光谱响应函数的边缘。由于高分辨率光学滤波器的光谱线型轮廓具有很陡的斜率,因此,被测光频率的微小

\* 国家 863 计划资助项目。

\*\* 1998 年 5 月回国。国内工作单位:北京师范大学物理系,100875。

收稿日期: 1998-01-20

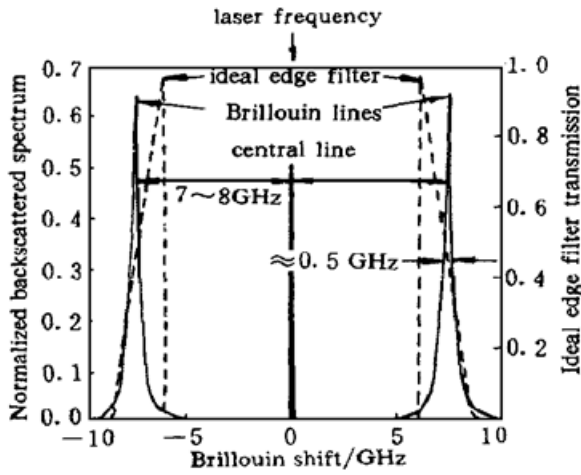


图 1 边缘探测技术的原理  
实线为水中的布里渊散射光谱  
虚线为边缘滤波器的响应函数

Fig. 1 The principle of edge technique. Solid line is the spectrum of Brillouin scattering in water, dashed line is the response of the edge filter

变化将导致通过光学滤波器后光强的很大变化,从而实现被测光频率的精确测量。图 1 示出了边缘探测技术的基本原理。

由图 1,我们对边缘探测技术所用的光学滤波器称之为边缘滤波器,应有如下的要求:(1)完全阻挡激光的中心频率;(2)在每一个布里渊峰的中心附近都对称地有很陡的透过率边缘;(3)对布里渊峰有尽可能高的透过率;(4)对透过率边缘之外的噪声光有尽可能高的吸收。

当散射光的中心频率不同时,散射光的光谱轮廓与边缘滤波器吸收光谱轮廓的重叠面积不同,从而,透过边缘滤波器的光强发生变化。由此即可测得散射光的频移。

## 2.2 理论分析

设散射光信号的光强为  $I_0$ , 布里渊散射的线型函数为  $f(\nu, \nu_B)$ ,  $\nu_B$  为布里渊频移, 边缘滤波器吸收光谱的线型函数为  $g(\nu)$ , 滤波器的吸收光谱具有相对于中心频率完全对称的两个峰。边缘滤波器吸收被测光后所产生的荧光信号为

$$S_1(\nu) = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} f(\nu, \nu_B) g(\nu) d\nu \quad (1)$$

透过边缘滤波器的信号为

$$S_2(\nu) = I_0 - I_0 \int_{-\infty}^{\infty} f(\nu, \nu_B) g(\nu) d\nu \quad (2)$$

定义归一化的信号为

$$S(\nu) = \frac{S_1(\nu)}{S_2(\nu)} \quad (3)$$

此归一化的信号即可用于确定被测光的频率。测量的统计误差由下式表示

$$\frac{\Delta S}{S} = \sqrt{\left(\frac{\Delta S_1}{S_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_2}{S_2}\right)^2} \quad (4)$$

布里渊频移的测量精度即可由统计误差求出。关于布里渊散射边缘探测技术的测量精度估算,涉及较为复杂的理论分析,我们将另文详细讨论。

## 3 实际测量系统

目前,用于海洋监测的布里渊散射激光雷达系统,通常使用倍频后波长为 532 nm 的 Nd:YAG 脉冲激光器,脉冲宽度通常为 10 ns。上一节有关边缘探测技术的原理分析,是基于理想探测系统的,要求吸收气体具有合适的吸收谱线,荧光寿命要足够小使得系统的时间分辨率满足要求。然而,目前原子或分子的吸收谱线尚未显示出在这一频率范围内具有所要求的荧光寿命。因此,探测系统只能是基于透射信号的。

考虑到各种实际因素,我们设计了如图 2 所示的透射系统。激光雷达回波首先通过一个溴

的气体吸收池。这个吸收池吸收无频移的中央频率分量(主要是瑞利散射),而绝大部分布里渊散射分量可以通过这个吸收池。透射信号再通过一个 1:1 的分束器后,一半进入探测器 I 产生信号  $S_1$ 。另一半通过一个碘的气体吸收池后,透射光进入探测器 H,产生信号  $S_2$ 。碘吸收池的作用是吸收布里渊散射光。选择溴和碘作为气体吸收池,是因为这两个吸收池的综合作用刚好满足上一节中对边缘滤波器的要求。溴的吸收线可吸收掉 532 nm (波数为  $\nu_l = 18776.7402 \text{ cm}^{-1}$ ) 波长的光。而碘刚好具有两个对称的轮廓很陡的吸收线,且其位置恰恰位于 532 nm 的光在水中的布里渊频移范围内。

图 3 (a), (b) 分别给出了溴和碘在 532 nm 附近的吸收光谱。为了更好地理解溴吸收池和碘吸收池作为边缘滤波器的效果,将 532 nm 的光在水中的布里渊散射光谱也示于图中。可以清楚地看到,布里渊频移的微小变化将导致碘吸收池透射光强的很大变化。而溴吸收池将激光器中心频率的光吸收掉。

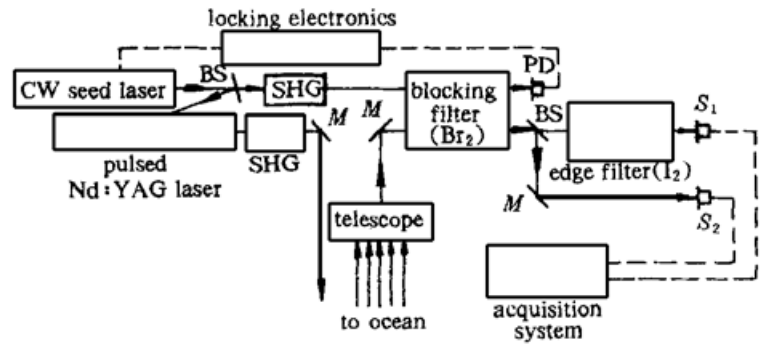


图 2 探测系统的几何结构

SHG: 二次谐波产生器件

Fig. 2 Schematic geometry of the detection system

SHG: second harmonic generator

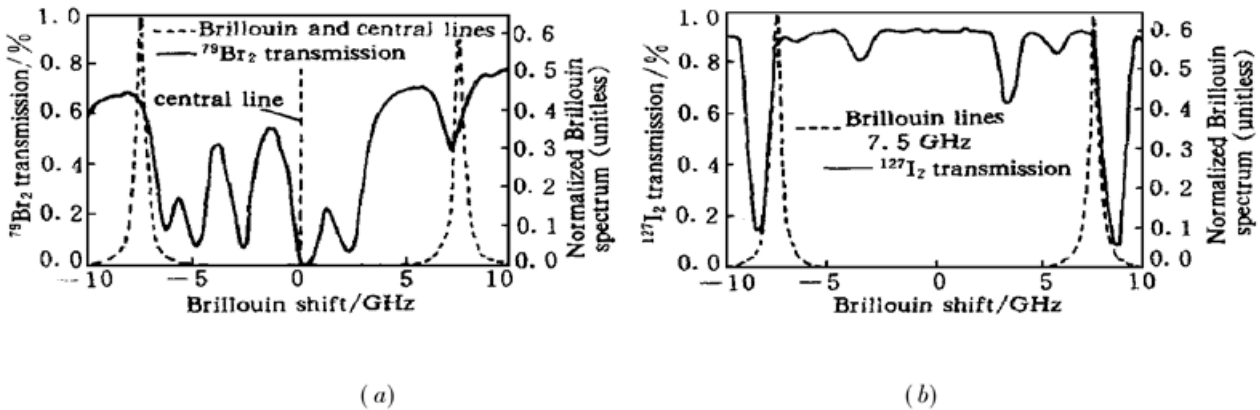


图 3 溴分子吸收池 (a) 和碘分子吸收池 (b) 的归一化透射函数  
零频对应于激光中心频率 ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ), 虚线为水中的布里渊散射光谱

Fig. 3 Normalized transmission function of the bromine absorption cell (a) and iodine absorption cell (b). The zero of the frequency scale corresponds to the laser frequency ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ). Dashed line is the spectrum of Brillouin scattering in water

水中布里渊散射的线型函数为

$$f(\nu, \nu_B) = \frac{1}{\pi\Gamma_B} \left[ \frac{1}{1 + [2(\nu - \nu_B)/\Gamma_B]^2} + \frac{1}{1 + [2(\nu + \nu_B)/\Gamma_B]^2} \right] \quad (5)$$

式中  $\Gamma_B \approx 500 \text{ MHz}$  为布里渊散射光谱的线宽。溴吸收光谱的线型函数  $g_{\text{Br}}(\nu)$  和碘吸收光谱的线型函数  $g_{\text{I}}(\nu)$  可由图 3(a), (b) 得到。设透过溴吸收池后的光强为  $I_0$ , 则有

$$S_1(\nu_B) = \frac{1}{2} I_0 \int f(\nu, \nu_B) g_{\text{Br}}(\nu) d\nu \quad (6)$$

$$S_1(\nu_B) = \frac{1}{2} I_0 \int f(\nu, \nu_B) g_1(\nu) d\nu \quad (7)$$

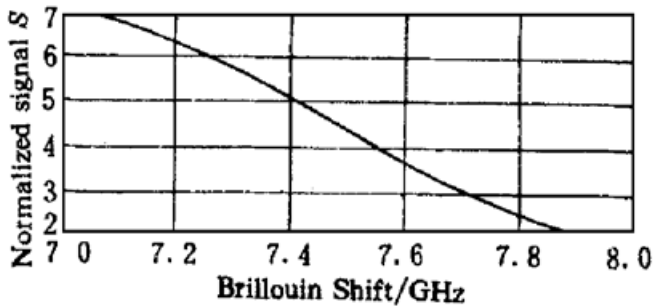


图4 作为布里渊频移函数的归一化信号  $S$

Fig. 4 Normalized signal  $S$  as a function of the Brillouin shift

定义系统归一化的布里渊信号为

$$S(\nu_B) = \frac{S_1}{S_1 - S_2} \quad (8)$$

图4即为归一化的布里渊信号。由此可确定散射光的布里渊频移  $\nu_B$ 。

图4的归一化布里渊信号是在我们设计的系统中特定的吸收池气体浓度下得到的。吸收池中的气体浓度可通过温度进行控制,以适应不同测量情况下的散射光强,以及散射光中央分量和布里渊分量的不同光强比,从而使系统达到最佳条件。

## 4 讨 论

边缘探测技术相对于常规的布里渊散射测量技术具有以下突出的优点:

- (1) 被测信号的强度随频率的变化而改变,因此,这是一种调频技术,具有相当高的信噪比。信噪比的理论值可达  $10^3 \sim 10^4$  数量级;
- (2) 频率的微小变化,将导致被测光强的很大变化,因此,边缘探测技术具有高灵敏度;
- (3) 在通常情况下,布里渊散射光谱的线型及分子吸收池吸收光谱的线型是已知的,而且是不变的。因此,边缘探测技术有很高的测量精度;
- (4) 布里渊散射光谱和分子吸收池的吸收光谱都是对称的。当激光频率发生漂移时,或分子吸收池的吸收光谱发生平移时,二光谱一侧重叠面积的减小(或增加),必定伴随另一侧重叠面积等量的增加(或减小),从而保持总光强不变。再考虑到调频技术对幅度噪声的抵御作用,因此边缘探测技术具有极好的抗干扰性;
- (5) 由于分子吸收池的吸收光谱对入射光的角度没有任何要求,光可以以任意角度入射,这使得边缘探测技术非常适合于实际应用。这是法布里-珀罗干涉仪很难实现的。

致谢 作者感谢 E. S. Fry 教授的指导和帮助。

## 参 考 文 献

- 1 I. L. Fabelinskii. Molecular Scattering of Light. New York: Plenum Press, 1968. Ch. 2, 81~ 154, Ch. 3, 247~ 438
- 2 H. Z. Cummins, R. W. Gammon. Rayleigh and Brillouin scattering in liquids: the Landau-Placzek ratio. *J. Chem. Phys.*, 1966, **44**(7): 2785~ 2796
- 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 D. A. Leonard, B. Caputo. Raman remote sensing of the ocean mixed-layer depth. *Opt. Eng.*, 1983, **22**(3): 288~ 291
- 5 J. G. Hirschberg, J. D. Byrne, A. W. Wouters *et al.*. Speed of sound and temperature in ocean by Brillouin scattering. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(15): 2624~ 2628
- 6 J. G. Hirschberg, J. D. Byrne. Rapid underwater ocean measurements using Brillouin scattering. *Proc.*

- SPIE*, 1984, **489**(Ocean Optics 卷): 270~ 276
- 7 D. J. Collins, J. A. Bell, R. Zanoni *et al.*. Recent progress in the measurement of temperature and salinity by optical scattering. *Proc. SPIE*, 1984, **489**(Ocean Optics 卷): 247~ 269
  - 8 D. A. Leonard, H. E. Sweeney. Remote sensing of ocean physical properties: a comparison of Raman and Brillouin techniques. *Proc. SPIE*, 1988, **925**: 407~ 414
  - 9 J. L. Guagliardo, H. L. Duffilho. Range resolved Brillouin scattering using a pulsed laser. *Rev. Sci. Instrum.*, 1980, **51**(1): 79~ 81
  - 10 Liu Dahe, Quan Xiaohong. Range and line resolved Brillouin scattering in pure water using pulsed Nd<sup>++</sup> YAG laser. *Chinese J. Lasers*, 1995, **B4**(2): 123~ 126
  - 11 Liu Dahe. Real time measurement of sound speed in sea water using Brillouin scattering. *Acta Acustica* (声学学报), 1998, **23**(2): 184~ 188
  - 12 C. L. Korb, B. M. Gentry, C. Y. Weng. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(21): 4202~ 4213
  - 13 P. Piironen, E. W. Eloranta. Demonstration of a high-spectral-resolution lidar based on an iodine absorption filter. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3): 234~ 236

## Edge Technique for the Measurements of Brillouin Scattering in Water

Liu Dahe\*    Jefferey W. Katz

*Physics Department, Texas A&M University, College Station, TX 77843-4242, U. S. A.*

\* *Working Department in China: Physics Department, Beijing Normal University, Beijing 100875*

**Abstract** A novel method, edge technique, for measuring Brillouin scattering in water is proposed for the first time in this paper. Combined with the application of Brillouin lidar in remote sensing in the ocean, an actual detecting system based on bromine and iodine absorption cells is suggested, and the response of the system is given. Finally, the advantages of the edge technique are discussed.

**Key words** Brillouin scattering, edge technique, molecular absorption cell