

文章编号: 1001-3806(2013)05-0561-04

## 时域傅里叶变换的受激布里渊散射线宽测量

莫小凤, 史久林\*, 陈学岗, 何兴道, 刘娟

(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

**摘要:** 为了实时精确地测量受激布里渊散射线宽, 采用了一种利用脉宽时域傅里叶变换的方法, 实验研究了在 5℃ ~ 40℃ 的温度变化范围内受激布里渊散射脉宽和线宽之间的相互关系。首先测量了不同温度下的受激布里渊散射脉宽, 然后经过傅里叶变换以及线宽校准, 得到不同温度下的受激布里渊散射线宽。结果表明, 脉宽时域傅里叶变换测量受激布里渊散射线宽的方法具有较高的测量精度, 最大测量误差小于 3.5%, 是一种简便可行的方法。

**关键词:** 非线性光学; 受激布里渊散射; 傅里叶变换; 脉宽; 线宽

**中图分类号:** O437.2      **文献标识码:** A      **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.05.001

## Measurement of SBS linewidth based on time-domain Fourier transform

MO Xiao-feng, SHI Jiu-lin, CHEN Xue-gang, HE Xing-dao, LIU Juan

(Key Laboratory of Nondestructive Test (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** A novel method was put forward to measure the line width of stimulated Brillouin scattering (SBS) in water based on time-domain Fourier transform. The pulse duration and line width of SBS was studied over a temperature range of 5°C to 40°C. Firstly, the pulse duration is measured with an oscilloscope, then the pulse duration at different temperature was obtained through Fourier transform and linewidth alignment. Experimental results and estimation of statistical error show that, this method possesses higher measurement accuracy (maximum error of measurement is less than 3.5%) and is a simple and feasible approach.

**Key words:** nonlinear optics; stimulated Brillouin scattering; Fourier transform; pulse duration; linewidth

### 引 言

受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS) 作为非线性光学的一种, 由于具有相位共轭、脉宽压缩、放大以及高分辨率、高信噪比等特性而被广泛地研究和应用<sup>[1-4]</sup>。频移和线宽作为受激布里渊散射的两个重要的参量, 由于其可以用来测量水的声速、温度和体粘滞系数等而受到广泛的关注<sup>[5-7]</sup>。因此, 精确测量 SBS 线宽是实现海洋遥感等应用的关键。目前为止, 还没有什么仪器或方法可以直接测量受激布里渊散射线宽, 现在用得较多的是 F-P 标准具和增强型电荷耦合器件 (intensified charge coupled device, ICCD) 结合, 然后通过 MAT-

LAB 数据拟合来计算出线宽<sup>[8]</sup>。这种方法虽然准确度高, 但是实验和后续数据处理过程比较复杂。作者在用布里渊散射进行海洋监测的实验研究中发现, 温度的变化影响布里渊的脉宽和线宽<sup>[9]</sup>, 由此, 提出一种通过测量不同温度条件下的 SBS 脉宽经过傅里叶变换来计算线宽的简易方法。

### 1 实验装置

测量脉宽的实验原理如图 1 所示。激光光源为倍频后波长为 532nm 的种子注入式 Nd:YAG 激光器, 激光的脉冲宽度约为 7.5ns, 重复率为 10Hz, 发散角为 0.45mrad。通过控制激光器的种子开关可以分别得到 90MHz 的窄线宽和 30GHz 的宽线宽。实验中所用介质是衰减系数为 0.06/m 的蒸馏水, 实验水槽长度为 1.2m, 用一个精度为 0.02℃ 循环水箱来控制水的温度, 温度变化范围为 5℃ ~ 40℃。为了保证激光器工作的稳定性, 尽可能地减小实验误差, 实验过程中通过改变激光器谐振腔与放大级之间的时间延迟来改变激光的输出能量。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41206084; 41066001; 41266001; 61177096)

作者简介: 莫小凤 (1987-), 女, 硕士研究生, 主要从事光散射技术研究。

\* 通讯联系人。E-mail: hyq1304@126.com

收稿日期: 2013-01-02; 收到修改稿日期: 2013-02-06

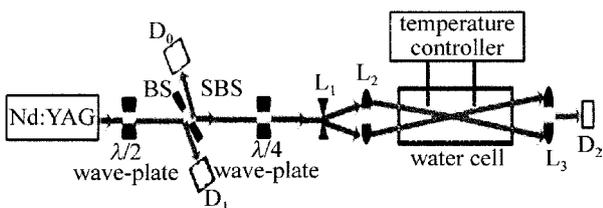


Fig. 1 Optical setup for measuring the bulk viscosity of water, BS—polarization beam splitter; D<sub>0</sub>—photodetector; D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>—wattmeters; L<sub>1</sub>~L<sub>3</sub>—lenses

从激光器输出的垂直偏振光经过半波片后变成水平偏振并被偏振分束镜分光,功率计 D<sub>1</sub> 用于监测入射光能量。透射光束经过 λ/4 波片后变成圆偏振,经过 L<sub>1</sub> 和 L<sub>2</sub> 组成的聚焦系统会聚于水槽中。当入射光能量高于受激布里渊散射的阈值时,在焦点附近产生受激布里渊散射。SBS 脉冲宽度由光电探测器 D<sub>0</sub> (Silicon PIN Detector ET-2000, Electro-Optics Technology INC.) 及带宽为 1GHz 的高精度数字存储示波器 (InfiniiVision DSO7104A, Agilent Technologies) 采集。剩余抽运光能量用功率计 D<sub>2</sub> (Moletron PM 500A) 来监测。

## 2 实验结果及分析

首先测量了不同温度下的 SBS 脉宽,其随温度的变化特性如图 2 所示。图中每个数据点均由 10 个脉冲宽度平均所得,并给出相应的误差棒。从图中可以清楚地看出,SBS 脉宽  $P(T)$  随着温度  $T$  的升高而增大,其温度依赖性规律可用如下公式表示:

$$P(T) = 1.2909[1 - \exp(-9.8682T)] + 0.7941[1 - \exp(-0.063T)] \quad (1)$$

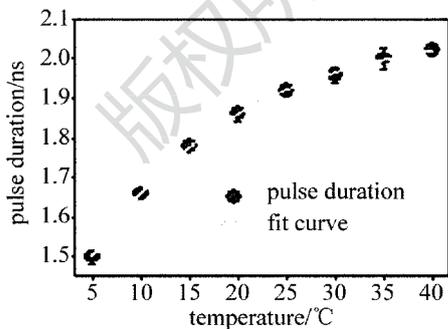


Fig. 2 Change of pulse duration of SBS with the change of temperature

由于 SBS 脉宽和线宽彼此之间满足傅里叶变换,不同温度下的线宽随着脉宽的变化而变化,两者之间的测量也有密切的联系。图 3 所示为高斯型入射光脉冲的傅里叶变换,变换得到的线宽为 79MHz,并且具有良好的洛伦兹线型。需要指出的是,激光器输出脉冲的窄线宽是 90MHz,这与通过

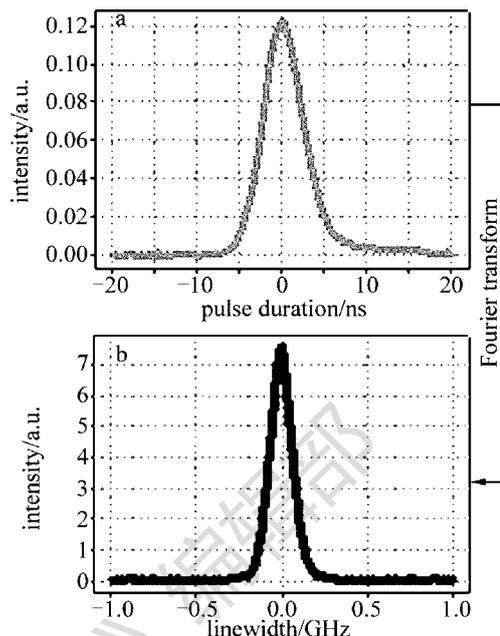


Fig. 3 Fourier transform of pulse duration of incident laser  
a—pulse duration b—frequency-domain waveform

脉宽傅里叶变换计算得到的线宽之间存在一定的误差。产生误差的原因主要有两方面:一方面,入射光脉宽的线型函数并不是理想的高斯型,这将导致傅里叶变换后产生计算误差;另一方面,示波器的最小分辨率及抖动所带来的脉宽测量不确定度也会给线宽计算引入额外的误差。为了尽可能地减小误差,将对线宽的计算进行校准补偿。

图 4 所示为不同温度下测量的 SBS 脉冲时域剖面图和变换的 SBS 线宽。图 4a 和图 4c 为不同温度下的脉宽,具有较好的高斯线型;图 4b 和图 4d 是在相同温度下,经脉宽傅里叶变换后的线宽,具有较好

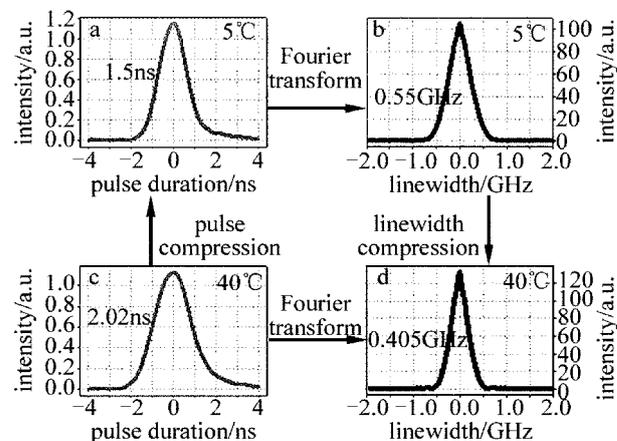


Fig. 4 The correlativity between pulse duration and linewidth of SBS at different temperature  
a,c—pulse duration of SBS at 5°C and 40°C, respectively b, d—transformational linewidth of SBS at 5°C and 40°C, respectively

的洛伦兹线型。从图中可知,不同温度下时域的脉宽压缩对应于频域的展宽。为了更形象地描述脉宽与傅里叶变换线宽随温度的变化关系,图 5 中给出了不同温度下的实验测量和计算结果。由此可以很清楚地看到,温度较低时,脉冲压缩效应或者说线宽展宽效应比较明显。另外,为了确保脉宽和线宽更好地满足傅里叶变换,SBS 的时域剖面图要尽可能地接近高斯线型函数。因此,在实验中入射光的强度要控制在恰好比 SBS 阈值稍高一些,以保证 SBS 脉宽时域轮廓不会因为过高的抽运能量而造成波形失真<sup>[10]</sup>。

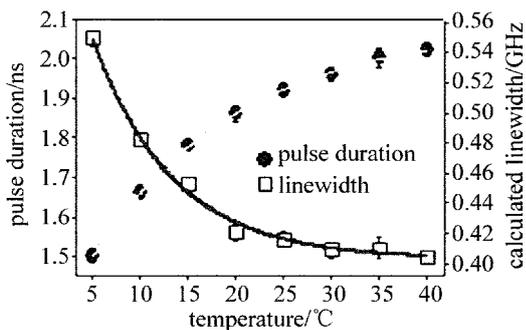


Fig. 5 The changes of pulse duration and calculated linewidth of SBS vs. the change of temperature

值得注意的是,以上所述是假设脉宽剖面为理想的高斯线型函数。经傅里叶变换后计算的线宽与实际值会存在一定误差,为此,需要对傅里叶变换线宽进行校准。采用 F-P 标准具及 ICCD 来对 SBS 信号进行采集,对数据进行拟合,可以得到较为精确的 SBS 线宽值。F-P 标准具的自由光谱范围 (free spectral range, FSR) 为 20.1GHz,精细度  $F \geq 300$ ; ICCD(PI-MAX 1003) 像元尺寸为  $12\mu\text{m}$ 。图 6 所示为 ICCD 测量的精确值对傅里叶变换计算的线宽进行的数据校准,校准公式如下:

$$C(T) = 1.1512\exp(-0.1558T) + 0.5421\exp(-0.0078T) \quad (2)$$

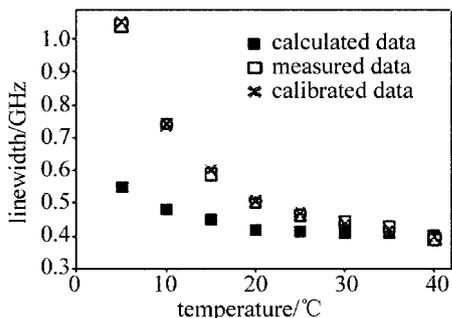


Fig. 6 Data calibration for the calculated linewidth through Fourier transform of pulse duration using directly measured data

由此可以得到 SBS 线宽的校准方程为:

$$\Gamma_{\text{cal}}(T) = \Gamma_{\text{FT}}(T) \times C(T) \quad (3)$$

式中,  $\Gamma_{\text{cal}}(T)$  即表示校准后的线宽,  $\Gamma_{\text{FT}}(T) = \mathcal{F}[P(T)]$  表示傅里叶变换线宽。

图 7 所示为 SBS 脉宽与线宽之间的映射关系,对实验数据进行拟合,得到线宽  $\Gamma_{\text{cal}}(T)$  关于脉宽  $P(T)$  的映射方程:

$$\Gamma_{\text{cal}}(T) = 0.2036 + 54.497 \times \exp[-2.7773P(T)] \quad (4)$$

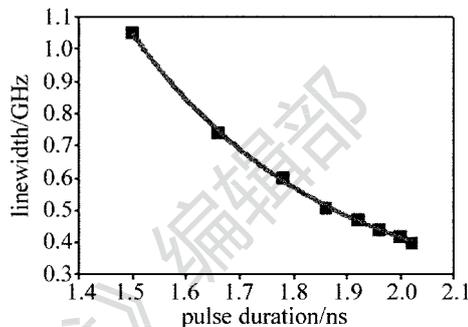


Fig. 7 Mapping relation between pulse duration of SBS and line width

如果知道不同温度下的 SBS 脉宽,利用(4)式就可以很方便地计算出相应温度下的 SBS 线宽。

### 3 误差分析

傅里叶变换线宽的不确定度  $\sigma_{\Gamma_{\text{FT}}}$  依赖于 SBS 脉冲延时测量的不确定度  $\sigma_p$ :

$$\sigma_{\Gamma_{\text{FT}}} = \frac{\partial \Gamma_{\text{FT}}}{\partial P} \sigma_p \quad (5)$$

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_{p,A}^2 + \sigma_{p,B}^2} \quad (6)$$

式中,  $\sigma_{p,A} = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (P_i - \bar{P})^2 / 9}$  和  $\sigma_{p,B} = \Delta_{\text{osc}} / \sqrt{3}$  分别为 A 类不确定度和 B 类不确定度,  $P_i$  和  $\bar{P}$  分别代表脉冲宽度及其平均值,  $\Delta_{\text{osc}} = 100\text{ps}$  为示波器的允许误差。代入(6)式、(7)式计算可得  $\sigma_p = 58\text{ps}$ , 傅里叶变换线宽不确定度  $\sigma_{\Gamma_{\text{FT}}}$  的最小值为 7.46MHz (温度为 40°C 时), 最大值为 30.79MHz (温度为 5°C 时)。在 5°C ~ 40°C 变化范围内, 水中 SBS 实际线宽大约为 400MHz ~ 1GHz<sup>[8]</sup>, 因此, 利用脉宽傅里叶变换的方法来测量不同温度下的 SBS 线宽最大相对误差小于 3.5%, 满足实际测量的需求。

### 4 结论

由于 SBS 脉宽和线宽彼此之间满足傅里叶变换, 不同温度下的线宽随着脉宽的变化而变化, 两者之间的测量有密切的联系。因此, 基于脉宽时域傅里叶变换的 SBS 线宽实时测量方法在原理上是可行的。由

实验测量结果及分析可知,时域傅里叶变换方法具有较高的测量精度,相对于其它方法来说更简便。另外,利用这种方法还可以用于海水温度、盐度等的实时遥感探测,是一种比较有效的测量方式。

参 考 文 献

[1] SCHNEIDER T, JUNKER M, LAUTERBACH K U. Time delay enhancement in stimulated-Brillouin-scattering-based slow-light systems[J]. *Optics Letters*,2007,32(3): 220-222.

[2] SHI J W, LI G X, GONG W P, *et al.* A lidar system based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Applied Physics*,2007, B86(1): 177-179.

[3] SHI J W, OUYNAG M, GONG W P, *et al.* A Brillouin lidar system using F-P etalon and ICCD for remote sensing of the ocean[J]. *Applied Physics*,2008,B90(3): 569-571.

[4] GAO W, SUN D, BI Y F, *et al.* Stimulated Brillouin scattering with high reflectivity and fidelity in liquid-core optical fibers[J]. *Applied Physics*,2012, B107(2): 355-359.

[5] LIU D. Real time measurement of sound speed in sea water using Brillouin scattering[J]. *Acta Acustica*,1998,23(2): 184-188(in Chinese).

[6] LIU D H, WANG H Y, ZHOU J. Measurements of sound speed in sea water with different salinity and temperature by Brillouin scattering method[J]. *Chinese Journal of Lasers*,2000,27(4): 381-384(in Chinese).

[7] XU J F, REN X, GONG W P, *et al.* Measurement of the bulk viscosity of liquid by Brillouin scattering[J]. *Applied Optics*, 2003,42(33): 6704-6709.

[8] HE X D, WEI H J, SHI J L, *et al.* Experimental measurement of bulk viscosity of water based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Optics Communications*,2012,285(20): 4120-4124.

[9] HE X D, TANG Y J, SHI J L, *et al.* Investigation of the influence of temperature on threshold value and pulse duration of stimulated Brillouin scattering in liquid water[J]. *Journal of Modern Optics*, 2012,59(16): 1410-1414.

[10] LU Z W, HASI W L J, GONG H P, *et al.* Generation of flat-top waveform by double optical limiting based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Optics Express*,2006,14(12): 5497-5501.

· 简 讯 ·

请向邮局订阅 2014 年度《激光技术》!

国内邮发代号:62-74;国内统一刊号:CN51-1125/TN