光电子·激光
第35卷 第11期 2024年11月 Journal of Optoelectronics·Laser Vol. 35 No. 11 November 2024

DOI:10.16136/j.joel.2024.11.0325

基于虚像相位阵列布里渊光谱仪的自由光谱范围校准方法

吴慧欢，吴华辉，梁 浩*

(暨南大学 光子技术研究院,广东 广州 511443)

摘要:基于虚像相位阵列(virtual image phased array,VIPA)的布里渊光谱技术是一种高分辨率光谱探测技术。它具有实时监测、高灵敏度等优点。目前该技术主要通过VIPA的自由光谱范围(free spectral range, *FSR*)与像素映射关系获取频率信息。然而,入射光角度变化会造成*FSR*波动。传统的测量手段均基于*FSR*不变的前提下进行,不能对测量过程中入射角度改变导致的*FSR*变化进行实时标定,从而造成测量结果出现误差。本文针对这一问题,通过分析布里渊散射特点和VIPA干涉原理,提出基于单模光纤布里渊频移的*FSR*实时校准方法以及相应的像素与频率映射关系计算方法。该方法利用单模光纤的布里渊斯托克斯与反斯托克斯光频移作为参考,减小由入射光角度变化引起的*FSR*波动造成的频率测量误差。实验利用该方法实现了532 nm波长下不同折射率环境中的微纳光纤布里渊频移的快速测量。

关键词:布里渊散射;微纳光纤传感;虚像相位阵列(VIPA);自由光谱范围(*FSR*)

中图分类号:O433.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-0086(2024)11-1121-07

Calibration method for free spectral range based on virtual image phased array Brillouin spectrometer

WU Huihuan, WU Huahui, LIANG Hao*

(Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 511443, China)

Abstract: The Brillouin spectroscopy technique based on virtual image phased array (VIPA) is a high-resolution spectral detection technique. It offers advantages such as real-time monitoring and high sensitivity. Currently, this technique primarily relies on the mapping relationship between the free spectral range (*FSR*) of VIPA and the pixel to obtain frequency information. However, variations in the incident light angle can cause fluctuations in the *FSR*. Traditional measurement methods are based on the assumption of constant *FSR* and do not provide real-time calibration for *FSR* changes caused by variations in the incident angle, resulting in measurement errors. In this paper, we address this issue by analyzing the characteristics of Brillouin scattering and the interference principle of VIPA. We propose a real-time calibration method for *FSR* based on the Brillouin frequency shift of a single-mode fiber and a corresponding calculation method for pixel-to-frequency mapping. This method utilizes the Brillouin Stokes and anti-Stokes frequency shifts of a single-mode fiber as references to reduce frequency measurement errors caused by *FSR* fluctuations due to changes in the incident light angle. Experimental results demonstrate the rapid measurement of micro/nano fiber Brillouin frequency shift in different refractive index environments at a wavelength of 532 nm using this method.

Key words: Brillouin scattering; micro/nano fiber sensing; virtual image phased array (VIPA); free spectral range (*FSR*)

* **E-mail**: tlianghao@jnu.edu.cn

收稿日期:2023-06-19 **修订日期**:2023-08-20

基金项目:国家自然科学基金(62075086)资助项目

0 引　言

布里渊散射是物质中声光相互作用的结果[1]。通过探测布里渊散射光，可以获取关于物质内部声子频率、振幅、色散等信息。这种基于声子-光子相互作用的技术称为布里渊光谱技术[2]。由于激光束可以穿透材料，散射光能够被采集并通过光学系统传递到光谱仪中进行处理和分析，因此布里渊光谱技术被广泛用于研究各种材料[3]，包括晶体、液体、气体和生物样品[4]。在布里渊光谱测量中，布里渊散射频移是最重要的特征参数，通常用来描述样品中的声光耦合效应等物理现象[5]。因此，准确快速地测量布里渊散射频移对于实现高精度布里渊光谱分析至关重要。

虚像相位阵列（virtual image phased array，VIPA）光谱仪是一种新兴的光谱快速测量技术[6]，它能够在毫秒量级的时间内实现大范围的高分辨率的光谱测量[7]，该技术已在布里渊光谱测量中获得广泛应用[8]。然而，由于布里渊光谱信号的低强度和高噪声的特点[9]，VIPA 光谱仪获取的数据需要进行相应的图像处理和光谱分析以提取布里渊频率信息[10]。常用的方法通常存在如计算结果精确度不足、稳定性差以及计算复杂度高等问题[11]。另外，目前采用的方法都是基于测量过程中 VIPA 的自由光谱范围（free spectral range，*FSR*）不变这个前提进行的[12]。一般情况下，采用 VIPA 标准具的出厂参数中的 *FSR* 固定值来计算。然而，这个 *FSR* 值只有在固定入射角时才能确保准确性，这对整个光学系统的稳定性有很高的要求。在实际测量过程中，由于入射角度无法完全一致，会造成测量结果误差[13]。

本文提出一种利用单模光纤布里渊频移对 VIPA 光谱仪的 *FSR* 进行实时校准的方法。该方法首先对所获得的光谱信号进行平均滤波处理，然后利用该光纤斯托克斯和反斯托克斯频移获取每次测量时 *FSR* 的准确值，再根据当前的 *FSR* 计算样品的布里渊频移。由于参考光纤的布里渊频移不受入射角度影响，可以利用其与像素点的位置对应关系，推算出当前 VIPA 的 *FSR* 值。此方法可以减小入射光角度变化引起的 *FSR* 波动所造成的样品布里渊频移测量误差。实验结果表明，当测量过程中 *FSR* 在 50.3—50.7 GHz 之间变化时，经过 *FSR* 校准的布里渊频移测量标准差与未经过校准的测量结果相比减小 3 倍。采用该方法实现了 532 nm 激光在微纳光纤中混合声波模式激发的布里渊频谱测量，且测量频率分辨率达到 MHz 量级。

1 基本原理

VIPA 可以看作是一个改进的法布里-珀罗标准具[14]。它通常由一对相互平行的玻璃板组成，玻璃板之间夹着一层光学透明的介质，如气体或液体。在平行玻璃板之间涂有反射率膜，通常前表面为全反射镜（*HR*），反射率为 100%，后表面为部分反射镜（*PR*），反射率为 95%。输入光束经过柱面透镜的聚焦后，以小角度进入 VIPA 的增透膜区域，并被耦合到 VIPA 的 *PR* 中。由于 VIPA 的倾斜设计，使得从 *PR* 反射出的光束能够完全入射到 *HR* 区域，从而显著提高了输入光束的耦合效率。在 VIPA 中，有多个虚拟源相互干涉，输出光束的方向取决于虚拟源之间的相位差[15]。由于相位差与频率有关，因此输出光束的方向也随频率而变化[16]。VIPA 使不同频率的光束以不同角度出射，球面聚焦透镜将角度分离转化为 sCMOS 平面上的空间分离[17]。VIPA 干涉原理如图 1 所示。

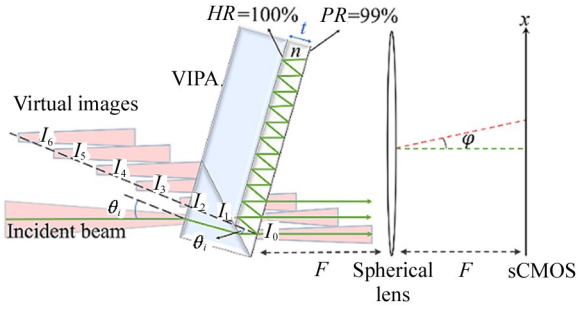


图 1　VIPA 干涉原理

Fig. 1　Interference principle of VIPA

入射光经过 VIPA 标准具后，形成多个虚拟源，如图 1 所示，$I_0 \sim I_n$ 表示虚拟源的位置分布。虚拟源沿 $\arcsin\Delta x/\Delta z$ 方向分布，Δx 表示虚拟源横向位移，Δz 表示虚拟源纵向位移。相邻源的相位差可表示为：

$$\Delta L = 2nt(\cos\theta_i\cos\varphi - \sin\theta_i\sin\varphi), \tag{1}$$

式中，n 表示内部折射率，t 为厚度，θ_i 为入射角，φ 表示出射光偏移的角度。

由三角函数二阶近似：$\sin\varphi \cong \varphi$，$\cos\varphi \cong 1-\frac{\varphi^2}{2}$，式(1) 可近似为：

$$\Delta L = 2nt\left(1-\frac{\varphi^2}{2}\right)\cos\theta_i - 2nt\varphi\sin\theta_i。 \tag{2}$$

由相位差与波长的关系 $\Delta L = m\lambda$，利用频率与波长的转化 $\Omega = c/\lambda$（c 表示真空中的光速），可以计

算出不同光束的频率差为：

$$\Delta\Omega = \Omega_i \frac{2\varphi\tan\theta_i + \varphi^2}{2 - 2\varphi\tan\theta_i - \varphi^2}, \tag{3}$$

式中，Ω_i 表示入射光频率。经过球面聚焦透镜后，成像到 sCMOS 相机上的光谱模式包括多个干涉级次，相邻级次共振峰之间的频率差为 VIPA 的 FSR，它可以通过以下式进行表示：

$$FSR = \frac{c}{\Delta L} = \frac{c}{2nt\left(1 - \frac{\varphi^2}{2}\right)\cos\theta_i - 2nt\varphi\sin\theta_i}。\tag{4}$$

由式(4)可知，FSR 随入射角 θ_i 而变化，当从 0° 增加到 12°时，FSR 的变化趋势如图 2 所示。sCMOS 相机将不同频率的光谱信号分离到不同的像素中，通过像素点位置与 FSR 频率的映射关系来获得光谱中的频率信息。传统的频率计算过程是建立在 FSR 不变的条件下进行的，因此测量过程中外部干扰导致的 VIPA 标准具角度变化会造成频率测量的误差。

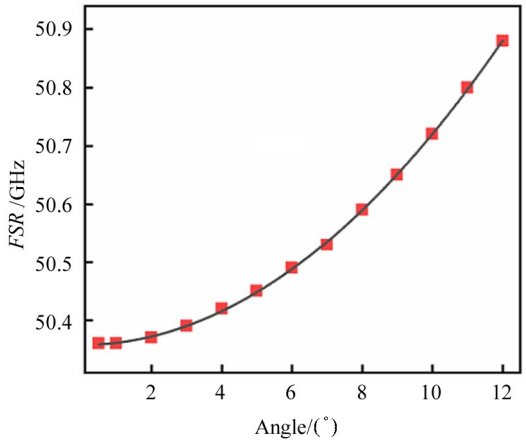


图 2　*FSR* 随角度的变化趋势

Fig. 2　The trend of *FSR* variation with the change of angle

为了抵消 FSR 变化引起的频率测量误差，采用传输波段为 532 nm 标准单模光纤的布里渊散射频移作为参考，对频率测量系统中的 FSR 进行实时校准。令入射光先经过单模光纤再进入待测样品，散射光中会得到两组布里渊散射信号，如图 3 所示。

参考单模光纤的布里渊频移可由下式确定：

$$\Omega_0 = \frac{2n_{\mathrm{eff}}}{\lambda_0}V_{\mathrm{a}}, \tag{5}$$

式中，n_{eff} 为有效折射率，V_{a} 表示材料声速，λ 表示入射光波长。

对于已知的光纤材料，其布里渊频移是不变的，在 25 ℃室温状态下其布里渊频移为 30.85 GHz。当单模光纤的散射光经过 VIPA 后，在 sCMOS 相机中呈现多个干涉级次，每个干涉级次均包含瑞利散射、布里渊斯托克斯散射和反斯托克斯散射。由于瑞利散射信号相对较强，有助于分辨与测量，因此利用相邻干涉级次中的瑞利散射峰之间的频率差来表示 FSR。

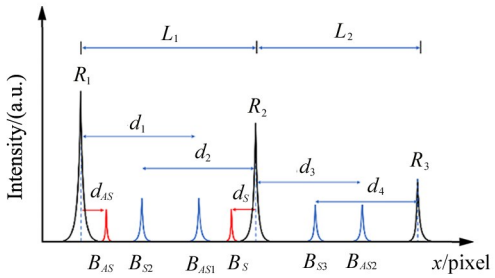


图 3　布里渊散射信号示意图

Fig. 3　Schematic diagram of Brillouin scattering signals

忽略光纤的波长色散布里渊斯托克斯频移与反斯托克斯频移相等，根据 FSR 与布里渊斯托克斯峰和反斯托克斯峰的对应关系，可推导出：

$$FSR = \frac{\Omega_0}{4}\left[L_1\left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right) + L_2\left(\frac{1}{d_3} + \frac{1}{d_4}\right)\right], \tag{6}$$

式中，Ω_0 为单模光纤在基模处的布里渊频移，L_1、L_2 为相邻瑞利散射峰的距离，d_1 与 d_3 为布里渊反斯托克斯峰到瑞利散射峰的距离，d_2 与 d_4 为布里渊斯托克斯峰到瑞利散射峰的距离。与式(4)相比，式(6)可以在入射角未知的情况下精确计算出当前的 FSR，从而实现 FSR 的实时校准。

在校准信号光谱的 FSR 后，样品的布里渊散射频移计算方法如式(7)所示。该频率由当前测量的 FSR 来确定，因此理论上其结果不受入射光角度的影响。

$$\Omega_B = d_{AS}\left(\frac{2\Omega_0 - FSR}{B_{AS1} - B_{S2}}\right) = d_S\left(\frac{2\Omega_0 - FSR}{B_{AS1} - B_{S2}}\right), \tag{7}$$

式中，d_{AS} 表示样品的布里渊反斯托克斯信号，d_S 为样品的布里渊斯托克斯信号，B_{AS1} 表示单模光纤一级干涉布里渊反斯托克斯信号，B_{S2} 表示单模光纤二级干涉布里渊斯托克斯信号。

2　实验结果与分析

2.1　实验装置

为了验证频率计算方法的准确性，搭建如图 4 所示的实验系统，测量 532 nm 激光在不同光纤中激发的布里渊散射频移。实验采用波长为 532 nm 单

频连续激光器(<100 mW),激光器输出光首先经过中性密度滤光片进行衰减,该滤光片用于调节激光强度,再由光纤准直器(F220APC-532,Thorlabs)耦合进单模光纤耦合器中,耦合效率为 85%。光纤准直器后端连接 2×2 单模光纤耦合器(TN532R5A2,Thorlabs)的输入端口 1,光纤耦合器的输出端口 3 连接光功率计(PD-100-UV,长春光电),用于实时监测输入样品的光功率;输出端口 4 与样品相连接,用于输入光信号和收集散射光。来自样品的散射光经耦合器输入端口 2 进入 VIPA 光谱仪中进行探测。使用单模光纤耦合器简化了实验装置,降低了系统复杂性。在 VIPA 光谱仪系统中,光纤中的光首先通过光纤准直器转换成空间光路,然后由柱面透镜(f=200 mm)聚焦到 VIPA 标准具(OP-6721-2000-2,Light Machinery Inc)中。实验中采用的 VIPA 标准具厚度 2 mm,*HR* 反射率为 100%,*AR* 反射率 99%,入射角设置为 2°,*FSR* 为(50.5±0.5) GHz。入射光从 VIPA 标准具的输入窗口中入射,确保入射光束焦点对准 VIPA 标准具的 *HR* 和 *AR* 区域之间的边界。当光路调节到达到最佳位置时,即干涉条纹清晰并且间距均匀,使用掩模过滤多余干涉条纹以去除不必要的干涉级次。最后,由聚焦透镜(f=200 mm)将输出光线聚焦到 sCMOS 相机(E-3ISPM45000KPA,ToupTek)进行图像处理和光谱分析。VIPA 光谱仪中的输入柱面透镜焦距决定 VIPA 内部的输入光束直径,输出聚集透镜焦距决定了 VIPA 的波长色散。由于自发布里渊散射的信号相对较弱,考虑到暗电流、读取噪声、量子效率和像素读出速率等参数的影响,实验中采用 sCMOS 相机像元大小为 2.315 μm,经 LightMachinery 公司的仿真程序 VIPA DESIGNER 确定该系统的像素有限分辨率为 0.05 pm/pixel。

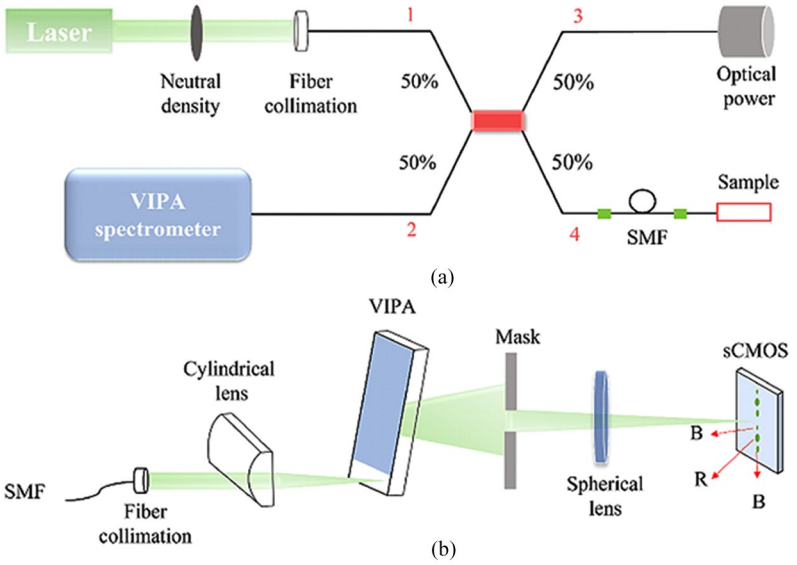


图 4　实验装置图:(a) 布里渊光谱探测系统;(b) VIPA 光谱仪系统

Fig. 4　Experimental setup diagram:(a) Brillouin spectrum detection system;(b) VIPA spectrometer system

2.2　结果分析

如图 5(a)所示为 sCMOS 相机记录到的单模光纤中的散射光信号。为了更直观地识别和处理采集到的图像,首先对图像进行极坐标转换,得到一个垂直排列在新图像上的数据图;然后,将极坐标变换后的图像转换为灰度图,对同一图像进行多次快速采样,叠加后进行平均,最终获得图 5(b)所示的像素与散射光强度的映射关系。其中 R_1,R_2,R_3 对应 3 个相邻干涉级次的瑞利散射。B_{Si} 和 B_{ASi} 分别表示第 i 级次的斯托克斯散射和反斯托克斯散射。根据所用的参考单模光纤参数,室温下其布里渊频移为 31.85 GHz,对图 5(b)中的散射峰进行洛伦兹曲线拟合计算后,得到 d_i(i=1,2,3,4)的值。带入式(7),可以获得当前系统的 *FSR* 校准值。

为了验证 *FSR* 变化对样品布里渊频移测量的影响,实验采用布里渊频移为 27.988 GHz 的色散位移光纤(DSF)作为样品。实验中将激光输入功率调整为 10 mW,sCMOS 相机曝光时间设置为 50 ms。当周期性改变入射光与 VIPA 标准具之间的夹角时,系统的 *FSR* 发生变化,对应的 DSF 布里渊频移测量结果如图 6 所示。由图 6 可见,入射角在 0.5°与 10°之间变化时,系统 *FSR* 改变量约为 0.35 GHz。经过校准后,当 *FSR* 发生变化时,测量到的布里渊频移均值为 27.982 GHz,测量标准差为 101 MHz。其测量值与光纤实际

布里渊频移一致，且具有较好的稳定性。而利用 VIPA 标准具出厂 *FSR* 参数(50 GHz，2°)进行计算的虚拟明亮条纹法(virtual bright fringes method，VBFM)[18]和多参数检测(multi-parameter detection，MPD)[19]法，得到的 DSF 频率测量频率均值分别为 26.929 GHz 和 29.01 GHz，标准差分别为 306 MHz 和 443 MHz。频移测量结果与光纤实际值分别相差 1 059 MHz 和 1 022 MHz。这两种方法产生误差的主要原因是进行频移计算所用的 *FSR* 值是 VIPA 与入射光夹角为初始固定的理论值。在实验过程中，由于入射光角度变化，会导致 *FSR* 波动，因此计算结果存在一定的误差。另外，VBFM 法将布里渊斯托克斯频移与反斯托克斯频移分别运用两种不同方式进行计算，二者差值大于 1 GHz，与理论值偏差较大；MPD 法仅通过单个布里渊散射峰与瑞利散射峰的距离进行计算，对单个峰值的像素点依赖性高，误差较大。

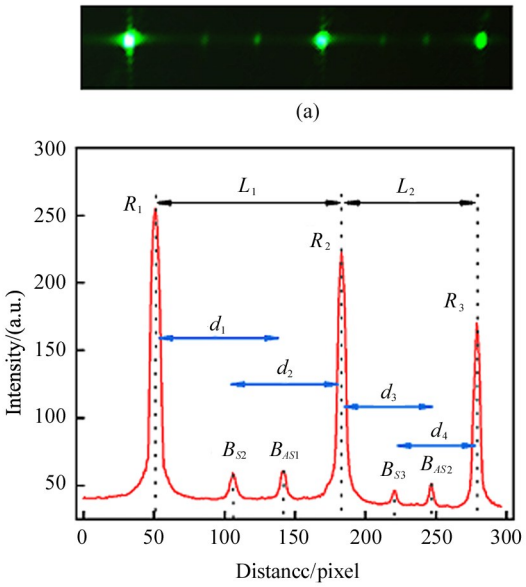


图 5　单模光纤布里渊散射信号：
(a) sCMOS 采集图像；(b) 像素与强度分布图

Fig. 5　Single-mode fiber Brillouin scattering signal:
(a) sCMOS acquisition image;
(b) Pixel and intensity distribution map

为了验证校准后的布里渊频移测量方法频率分辨率，实验中将入射光角度固定，采用腰区长度为 10 cm，直径约 0.8 μm，锥区长度为 3 cm 的微纳光纤作为样品放置在不同环境下进行测试。在制备微纳光纤过程中，为了防止微纳光纤晃动和断裂，采用了定制的封装盒对其进行封装处理，并使用紫外固化胶对其进行固定，从而保持光纤的稳定。微纳光纤封装结构如图 7 所示。另外，由于采用的激光波长处于可见光波段，可通过观察微纳光纤两端通光情况来判断是否发生断裂。

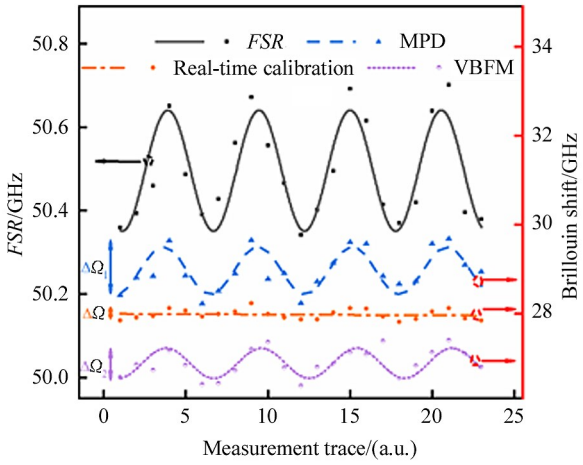


图 6　不同测量方式稳定性对比

Fig. 6　Stability comparison of different measurement methods

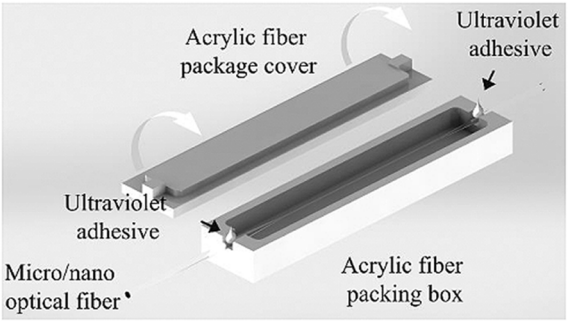


图 7　微纳光纤封装示意图

Fig. 7　Schematic diagram of packaging for micro/nano optical fiber

微纳光纤中布里渊散射主要是 R_{0m} 声场模式与 LP_{01} 光场模式的耦合结果。该微纳光纤的 R_{0m} 声场模式的分布如图 8 所示。根据布里渊散射的相位匹配条件 $\beta_a = 2\beta_0$，(其中 β_0 为光场传输常数，β_a 为声场传输常数)，理论上该微纳光纤的布里渊散射谱呈多峰结构，其峰值功率受到声光场叠加强度的影响，其中 R_{06} 声场模式和光场的叠加强度最大(如图 8 中点 *A* 所示)，其对应的布里渊频移约 10.4 GHz。

微纳光纤周围环境的变化会引起光场有效折射率改变。由 COMSOL 软件模拟出 0.8 μm 微纳光纤在不同环境下的光场分布如图 9 所示。由图 9 可知，光纤周围有倏逝场分布。当微纳光纤周围环境由空气($n=1$)改变为水($n=1.333$)时，其倏逝场增强，光纤基模的有效折射率从 1.397 变化为 1.414 9，相位

匹配条件中的光场传输常数 β_0 发生变化，引起对应的声场传输常数 β_a 增大，图 8 中 A 点右移，对应的理论频率变化量 $\Delta=50$ MHz。

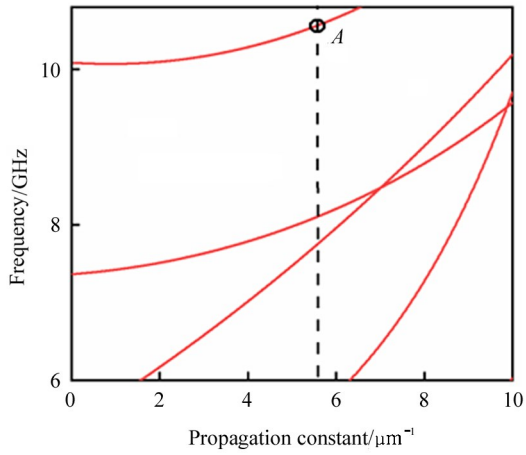
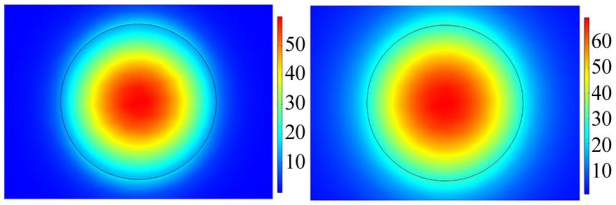


图 8　直径为 0.8 μm 微纳光纤的 R_{0m} 声场模式分布

Fig. 8　R_{0m} acoustic mode distribution of a micro/nano fiber with a diameter of 0.8 μm

实验中将微纳光纤先后置于空气和水中，并测量其布里渊频移的变化。R_{06} 模式下测量结果如图 10(a)所示。当外界环境为空气($n=1$)时，测量的布里渊频移为 10.325 GHz。当外界环境为水($n=1.333$)时，测量结果为 10.38 GHz。频率测量变化量量 $\Delta'=55$ MHz 与理论频率变化量接近。测量值与理论值的差异主要源于微纳光纤直径的不均匀性。理论上微纳光纤锥区频移稳定不变，对该微纳锥区频移变化进行测量，结果如图 10(b)所示，当 R_{06} 模式下频移随着环境发生改变时，该微纳光纤锥区频移计算结果稳定，变化量小于 6 MHz。实验结果表明，经过校准的布里渊频移测量方法频率分辨率可达到 MHz 量级。



(a) n_{eff}=1.397　　(b) n_{eff}=1.414

图 9　直径为 0.8 μm 微纳光纤在不同环境中的光场模式分布：(a) 空气；(b) 水

Fig. 9　The optical field mode distribution of a micro/nano fiber with a diameter of 0.8 μm in different environments: (a) Air; (b) Water

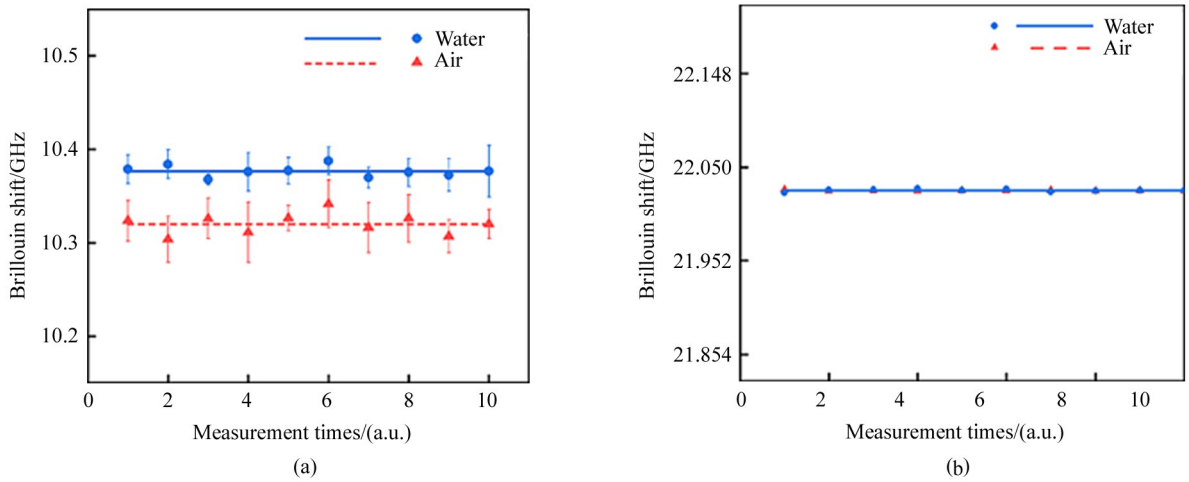


图 10　微纳光纤在不同环境下的布里渊频移测量：(a) R_{06} 模式频移变化；(b) 锥区频移变化

Fig. 10　Brillouin frequency shift measurement of the micro/nano fiber in different environments: (a) R_{06} mode frequency shift variation; (b) Taper zone frequency shift variation

3　结　论

本文针对基于 VIPA 的布里渊光谱系统提出了一种利用单模光纤布里渊频移进行实时校准的方法，避免了入射光角度变化对 *FSR* 波动的影响，并通过斯托克斯和反斯托克斯光频率对应关系进行频移计算。实验中通过不同光纤的布里渊频移测量，验证了该方法的可靠性。实验结果表明，与传统方法相比，该方法具有更好的稳定性，可实现 MHz 量级的频率分辨率。该方法为布里渊光谱技术的数据处

理提供更精确的解决方案。

参考文献:

[1] PREVEDEL R,DIZ-MUÑOZ A,RUOCCO G,et al. Brillouin microscopy:an emerging tool for mechanobiology[J]. Nature Methods,2019,16(10):969-977.

[2] TAYLOR M A,KIJAS A W,WANG Z,et al. Heterodyne Brillouin microscopy for biomechanical imaging[J]. Biomedical Optics Express,2021,12(10):6259-6268.

[3] ZHANG J,SCARCELLI G. Mapping mechanical properties of biological materials via an add-on Brillouin module to confocal microscopes[J]. Nature Protocols,2021,16(2):1251-1275.

[4] CONRAD C,GRAY K M,STROKA K M,et al. Mechanical characterization of 3D ovarian cancer nodules using Brillouin confocal microscopy[J]. Cellular and Molecular Bioengineering,2019,12:215-226.

[5] KANG J H,MIETTINEN T P,CHEN L,et al. Noninvasive monitoring of single-cell mechanics by acoustic scattering [J]. Nature Methods,2019,16(3):263-269.

[6] POON C,CHOU J,CORTIE M,et al. Brillouin imaging for studies of micromechanics in biology and biomedicine:from current state-of-the-art to future clinical translation [J]. Journal of Physics:Photonics,2020,3(1):012002.

[7] CAPONI S,FIORETTO D,MATTARELLI M. On the actual spatial resolution of Brillouin Imaging[J]. Optics Letters,2020,45(5):1063-1066.

[8] MAHMODI H,PILONI A,UTAMA R H,et al. Mechanical mapping of bioprinted hydrogel models by Brillouin microscopy[J]. Bioprinting,2021,23:e00151.

[9] CORREA N,ALUNNI CARDINALI M,BAILEY M,et al. Brillouin microscopy for the evaluation of hair micromechanics and effect of bleaching[J]. Journal of Biophotonics,2021,14(6):e202000483.

[10] ELSAYAD K,URSTÖGER G,CZIBULA C,et al. Mechanical properties of cellulose fibers measured by Brillouin spectroscopy[J]. Cellulose,2020,27:4209-4220.

[11] REMER I,SHAASHOUA R,SHEMESH N,et al. High-sensitivity and high-specificity biomechanical imaging by stimulated Brillouin scattering microscopy[J]. Nature Methods,2020,17(9):913-916.

[12] FIORE A,SCARCELLI G. Multipass etalon cascade for high-resolution parallel spectroscopy[J]. Optics Letters,2021,46(4):781-784.

[13] BAILEY M,CORREA N,HARDING S,et al. Brillouin microspectroscopy data of tissue-mimicking gelatin hydrogels[J]. Data in Brief,2020,29:105267.

[14] LAINOVIC T,MARGUERITAT J,MARTINET Q,et al. Micromechanical imaging of dentin with Brillouin microscopy[J]. Acta Biomaterialia,2020,105:214-222.

[15] WEBB J N,ZHANG H,ROY A S,et al. Detecting mechanical anisotropy of the cornea using Brillouin microscopy [J]. Translational Vision Science & Technology,2020,9(7):26-26.

[16] ADICHTCHEV S V,KARPEGINA Y A,OKOTRUB K A,et al. Brillouin spectroscopy of biorelevant fluids in relation to viscosity and solute concentration[J]. Physical Review E,2019,99(6):062410.

[17] MERKLEIN M,KABAKOVA I V,ZARIFI A,et al. 100 years of Brillouin scattering:Historical and future perspectives [J]. Applied Physics Reviews,2022,9(4):041306.

[18] XIE C,CAI C,WANG P,et al. Efficient processing of spectral measurements using virtually imaged phased array [J]. IEEE Photonics Technology Letters,2021,33(4):177-180.

[19] CORREA N,HARDING S,BAILEY M,et al. Image analysis applied to Brillouin images of tissue-mimicking collagen gelatins[J]. Biomedical Optics Express,2019,10(3):1329-1338.

作者简介:

梁　浩　(1983—),女,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事光纤传感技术方面的研究。