

布里渊光谱仪的高精度波长标定方法研究

刘加庆^{1,2*}, 刘磊¹, 刘雷¹, 李志增¹, 吴威¹, 胡垒军, 刘志明¹

¹中电科仪器仪表有限公司, 山东 青岛 266555;

²中国电子科技集团有限公司第四十一研究所电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555

摘要 针对最高分辨率可达 0.1 pm 的布里渊近红外光谱仪波长标定的难题, 基于多次标定逐步降低波长误差的思路, 提出了一种协同融合标定原理的标定流程: 首先, 基于布里渊光谱分析理论模型, 结合泵浦信号波长、受激布里渊频移、增益谱线型函数等推导出超高分辨率光谱的理论波长; 然后, 采用 FP 标准具进行相对波长的标定; 最后, 基于气室完成绝对波长的标定。气室中充入 HCN+¹²CO+¹³CO 混合气体, 以实现 C+L 波段的覆盖。针对可能存在的光谱鬼线, 提出了一种基于受激布里渊增益谱与衰减谱共生特性的鬼线识别方法。实验结果表明: 布里渊光谱仪的理论波长偏差超过了 10 pm, 相对标定可将波长不确定度降低到 ±2.5 pm, 绝对标定可将波长不确定度进一步降低到 ±0.035 pm。

关键词 光谱学; 布里渊光谱仪; 光纤受激布里渊效应; 超高分辨率光谱; 波长标定; FP 标准具; 气室

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2030001

Wavelength Calibration of Ultra-High Resolution Brillouin Spectrometer

Liu Jiaqing^{1,2*}, Liu Lei¹, Liu Lei¹, Li Zhizeng¹, Wu Wei¹, Hu Leijun¹, Liu Zhiming¹

¹China Electronics Technology Instruments Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266555, China;

²Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory,
the 41st Research Institute of CETC, Qingdao, Shandong 266555, China

Abstract To address the problem of wavelength calibration of a Brillouin NIR spectrometer with a maximum resolution of 0.1 pm, a calibration process using the principle of collaborative fusion calibration is proposed. This process is based on the idea of gradually reducing the wavelength error of multiple calibrations. The calibration process is as follows: first, the theoretical wavelength was calculated based on the Brillouin spectral analysis modal and relative parameters, such as the pump signal wavelength, Brillouin frequency shift, and gain in spectrum lineshape; then, the relative wavelength was calibrated using the Fabry-Perot etalon; finally, the absolute wavelength calibration based on the gas chamber was completed. The gas chamber was filled with a mixed gas of HCN, ¹²CO, and ¹³CO to achieve absolute wavelength calibration in the C and L bands. A ghost identification and correction algorithm was also presented based on the commensalism of gain and loss spectrum of stimulated Brillouin scattering. Experimental results show that the theoretical wavelength deviation is more than 10 pm, and wavelength uncertainty of ±2.5 pm can be achieved by relative wavelength calibration. Moreover, the wavelength uncertainty of the absolute wavelength calibration is ±0.035 pm.

Key words spectroscopy; Brillouin spectrometer; fiber stimulated Brillouin scattering; ultra-high resolution spectra; wavelength calibration; FP etalon; gas chamber

OCIS codes 300.6320; 060.2310; 230.2285; 300.6170

1 引 言

光谱分析是通信、传感、分子光谱学、微波生成等光学应用中的关键诊断步骤。随着光通信和传输

网不断朝着超大容量、超高速率、超长传输距离方向发展, 在波分复用等技术的基础上引入各种先进调制格式提升光网络的性能成为必然选择, 而这会导致通道间隔越来越小。例如, 光正交频分复用信号

收稿日期: 2020-06-01; 修回日期: 2020-06-21; 录用日期: 2020-07-08

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0106900)、国家自然科学基金(61727821)、电子测试技术重点实验室稳定经费支持项目(KWD03012003)

* E-mail: jiaqing@mail.ustc.edu.cn

的通道间隔通常为 20~50 MHz,这就要求光谱分析仪的光谱分辨率要达到 pm 量级甚至更高,以满足先进光传输系统的测试和监测,以及光放大器、光纤滤波器等有源和无源光器件的量化分析^[1-2]。

布里渊光谱仪基于光纤受激布里渊效应的选频进行放大,通过可调谐激光器的推扫实现感兴趣光谱区域的测量分析。得益于非线性光纤受激布里渊效应的独特优势,测量光谱数据可以实现高达 40 dB 的近峰动态范围,这就允许研究人员可以对靠近光学载波的信号成分进行精确测量。因此,布里渊光谱分析技术优于色散光栅、法布里-珀罗(FP)滤波器或外差相干等光谱分析技术,是一类非常有前景的光谱分析路线^[3]。

布里渊光谱仪具有超高的光谱分辨率,其测量波段范围可以覆盖 C、L 等光通信波段。因此,如何实现布里渊光谱仪的高精度波长标定是一个极具挑战性的难题。现有的波长标定方法,如激光光源法、卤素灯法、积分球光源法、FP 标准具法、气体吸收法等^[4-8]都存在一定的局限性,难以满足新一代光通信用超高分辨率光谱仪的波长标定需求。本文提出了一种协同融合标定原理的 pm 量级分辨率的波长标定流程:首先根据布里渊光谱分析模型得到理论波长,然后基于 FP 标准具进行相对波长的标定,最后基于气体吸收法完成绝对波长的标定。为提高标定精度,本文将宽工作波段分为若干个子区间,分别计算标定系数。实验结果表明,标定波长的不确定度优于 ±0.035 pm。此外,本文还识别校正了光纤受激布里渊效应引入的光谱鬼线。

2 布里渊光谱分析仪的原理

布里渊光谱分析仪的原理模型可用数学公式描述为^[9-10]

$$\frac{dI_p(z, \lambda)}{dz} = -\alpha I_p(z, \lambda) - \frac{g_B}{A_{\text{eff}}} I_s(z, \lambda) I_p(z, \lambda) - I_{\text{esp}}(z, \lambda), \quad (1)$$

$$\frac{dI_s(z, \lambda)}{dz} = \alpha I_s(z, \lambda) - \frac{g_B}{A_{\text{eff}}} I_s(z, \lambda) I_p(z, \lambda) - I_{\text{esp}}(z, \lambda), \quad (2)$$

$$\frac{dI_B(z, \lambda)}{dz} = \frac{g_B \left(\lambda - \frac{2\pi}{\Omega_B} \right)}{A_{\text{eff}}} I_p(z, \lambda) I_s \left(z, \frac{2\pi}{\Omega_B} \right), \quad (3)$$

式中: z 为介质光纤上的位置; λ 为波长; I_p 、 I_s 、 I_B 分别为泵浦信号、待测信号和斯托克斯后向散射信号; A_{eff} 、 α 分别为介质光纤的有效面积和衰减系数; I_{esp} 为由热波动引起的自发布里渊散射信号; Ω_B 为受激布里渊频移, Ω_B 为正时产生衰减谱, Ω_B 为负时产生增益谱; g_B 为布里渊增益系数。

待测信号 I_s 从 $z=L$ 处注入待测光纤,泵浦信号由 $z=0$ 处注入待测光纤,由(1)~(3)式所述受激布里渊过程可知,待测信号经受激布里渊放大后,在 $z=0$ 处的输出信号为

$$I_s(0, \lambda) = I_s(0, \lambda_B) + I_s(0, \lambda \neq \lambda_B) = I_s(L, \lambda_B) \exp[g_B I_p(0, \lambda_p) L_{\text{eff}}] + I_s(L, \lambda \neq \lambda_B) \quad (4)$$

式中: λ_B 为布里渊峰值波长; λ_p 为泵浦光波长; $I_s(0, \lambda_B)$ 表示待测信号中被受激布里渊放大的光谱组分; $I_s(0, \lambda \neq \lambda_B)$ 表示待测信号中未被放大的带外光谱组分; $I_s(L, \lambda_B)$ 表示 $z=L$ 处经布里渊放大的光谱成分; $I_s(L, \lambda \neq \lambda_B)$ 表示 $z=L$ 处未被放大的带外光谱组分; $I_p(0, \lambda_p)$ 表示由 $z=0$ 处注入光纤的泵浦信号功率; λ_p 为泵浦波长, $\lambda_p = \lambda_B + 2\pi/\Omega_B$; L 表示介质光纤的长度; L_{eff} 表示介质光纤的有效长度。

当没有泵浦光注入时,在 $z=0$ 处测量得到的输出信号为

$$\tilde{I}_s(0, \lambda) = I_s(L, \lambda_B) + I_s(L, \lambda \neq \lambda_B). \quad (5)$$

布里渊光谱分析仪测量得到的分光光谱信号 $S_p(\lambda)$, 可以通过移除待测信号中的未放大带外组分得到,即

$$S_p(\lambda) = I_s(0, \lambda) - \tilde{I}_s(0, \lambda) = I_s(L, \lambda_B) \{ \exp[g_B I_p(0, \lambda_p) L] - 1 \}. \quad (6)$$

布里渊光谱分析仪的工作原理如图 1 所示。基于前面的数学描述,光谱测量流程如图 2 所示。利用光纤受激布里渊效应,通过选频放大得到待测信号在某一波长处的光谱成分所对应的分光光谱信号,并通过可调谐激光器连续推扫,获取待测信号在不同波长处的光谱成分所对应的全波段分光光谱,然后通过光谱重构算法得到待测信号的测量光谱数据 $S_m(\lambda)$, 就可以实现感兴趣波长区域的光谱测量与分析。

3 波长标定流程

3.1 基于布里渊光谱分析模型计算理论波长

由布里渊光谱仪的工作原理可知,增益的谱型近似为高斯线型。测量光谱的理论波长可由泵浦信

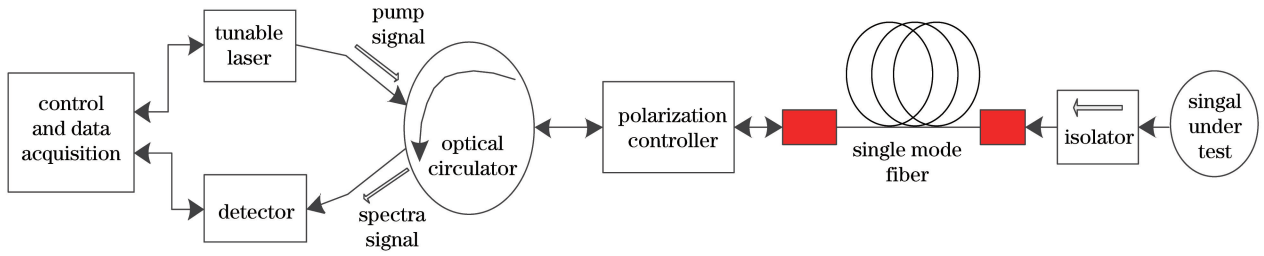


图 1 布里渊光谱仪的工作原理

Fig. 1 Principle of Brillouin spectrometer

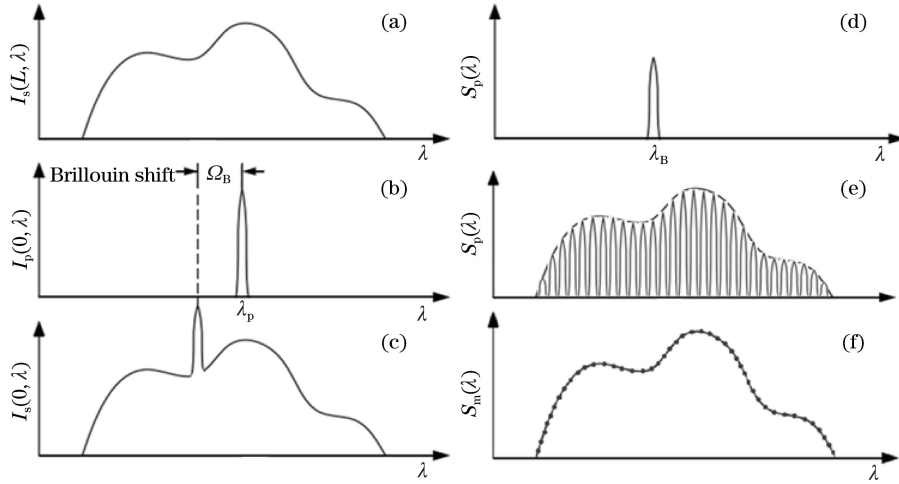


图 2 布里渊光谱仪的光谱测量流程。(a)待测信号;(b)泵浦信号;(c)受激布里渊效应放大后的输出信号;(d)基底移除后的分光光谱信号;(e)采用可调谐激光推扫得到的全波段分光光谱信号;(f)利用光谱重构算法得到的测量光谱

Fig. 2 Spectra measurement procedure of Brillouin spectrometer. (a) Signal under test (SUT); (b) pump signal; (c) output signal amplified by stimulated Brillouin scattering; (d) split spectra after baseline removing; (e) full band split spectra by tunable laser; (f) measured spectra obtained by spectrum reconstruction algorithm

号波长和布里渊频移给出,即

$$\lambda_B = \lambda_p - 2\pi/\Omega_B = \lambda_p - \frac{\lambda_p}{2nv_a}, \quad (7)$$

式中: n 为光纤折射率; v_a 为光纤中的声速。

需要指出的是,受泵浦信号波长漂移、仪器线型函数、器件缺陷等的影响,理论波长与真实波长之间存在一定偏差,需要进行校正。

当布里渊频差为负时会引入衰减谱,此时可能会在测量光谱中引入鬼线。因此,在相对和绝对波长标定前,需要根据受激布里渊效应增益谱与衰减谱的共生特性,对此类鬼线进行识别和校正。

3.2 基于 FP 标准具的相对波长标定

FP 标准具的光路图如图 3(a)所示,其核心单元是两块固定的、具有很小楔角且涂有高反射涂层的平板玻璃。当波长连续变化的光入射后,光会在两个距离为 h 的平行平板 G1、G2 间发生多次反射和折射,出射光强度与波长的关系为

$$I_{out}(\lambda) = 4I_{in}(\lambda) \cos^2(\delta/2) =$$

$$4I_{in}(\lambda) \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} \kappa h \cos i'\right), \quad (8)$$

式中: $I_{out}(\lambda)$ 为出射光强度; $I_{in}(\lambda)$ 为入射光强度; κ 为平板玻璃 G1、G2 的折射率; i' 为楔角; δ 为光程差。对于不同波长的入射光,当满足 $\delta = 2\pi, 4\pi, 6\pi, \dots$ 时,透射光强达到最大值;当满足 $\delta = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$ 时,透射光强为最小值。这样便可以锁定入射光的系列固定波长,如图 3(b)所示,用作波长标定的参考。图 3(a)中的符号 S、P 为 FP 标准具的光纤耦合接口。

FP 标准具在宽波段上拥有众多等间距的固定波长通道,但通道中心波长的准确度大概为数 pm 量级。因此,可采用 FP 标准具对理论波长进行相对波长的标定,以降低理论计算波长的误差。布里渊光谱仪的分光光谱信号经过 FP 标准具后可得到如图 3(b)所示的光谱曲线,对曲线进行高斯拟合,由(7)式可得到各个拟合峰值点对应的理论波长 λ_{fit} 。理论波长 λ_{fit} 与 FP 标准具通道中心波长的标称值 λ_{FP} 之间的关系为

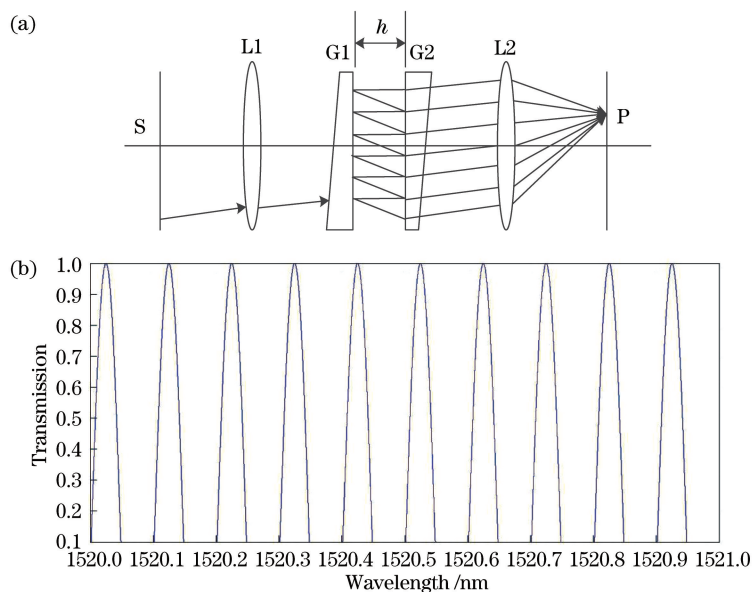


图 3 FP 标准具的光路图和波长透过特性。(a)光路图;(b)波长透过特性

Fig. 3 Optical path and wavelength transmission property of FP etalon. (a) Optical path; (b) wavelength transmission property

$$\lambda_{FP} = a_n \lambda_{fit}^n + a_{n-1} \lambda_{fit}^{n-1} + \dots + a_0, \quad (9)$$

式中:系数 a_n 、 a_{n-1} 、 a_0 等为相对波长的标定系数,可由最小二乘拟合方法计算得到。然后,利用(9)式对理论波长进行标定,得到相对标定波长 λ_{rw} 。

3.3 基于气体吸收法的绝对波长标定

气体吸收法^[11]是基于朗伯-比尔定律进行波长标定的。它的基本原理是当入射光经过气室时,光会因气体吸收而产生特征吸收谱线,该特征吸收谱线可用作波长标定的参考基准。经气体吸收后的特征谱线幅值为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\kappa(\lambda)cl], \quad (10)$$

式中: $I_0(\lambda)$ 与 $I(\lambda)$ 分别为入射光和出射光的强度; $\kappa(\lambda)$ 为吸收系数; c 为气体的体积分数; l 为光与气体相互作用的长度。

由 HITRAN 光谱数据库^[12]可知,HCN 在 1520~1565 nm 之间有 54 条强吸收谱线,¹²CO 在 1560~1600 nm 之间有 41 条强吸收谱线,¹³CO 在 1595~1630 nm 之间有 41 条强吸收谱线,如图 4 所示。HCN+¹²CO+¹³CO 混合气体可为 C+L 波段的绝对波长标定提供多个稳定的参考波长。

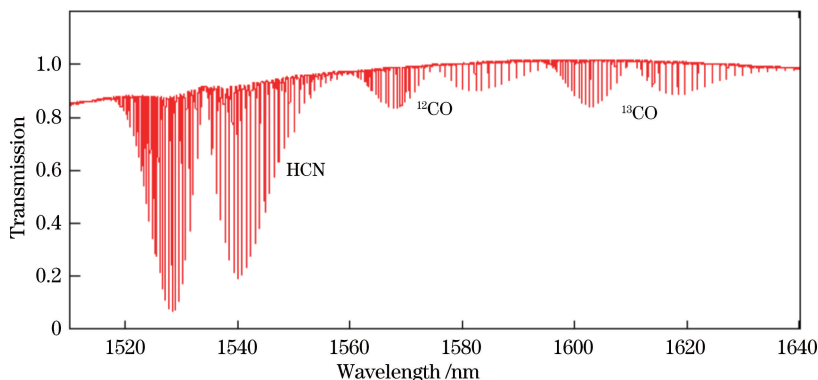


图 4 HCN+¹²CO+¹³CO 混合气体的特征谱分布

Fig. 4 Characteristic spectrum of HCN+¹²CO+¹³CO mixed gas

进行绝对波长标定时,布里渊光谱仪的分光光谱信号经过气室后可以得到如图 4 所示的测量谱线;然后采用 Voigt 线型对测量谱线进行拟合,便可以得到由混合气体的吸收作用而产生的系列特征吸

收谱线的波谷点。每个特征谱线波谷点的测量波长 λ_m 可采用(7)式给出理论值,并采用(9)式进行波长修正,以降低理论波长的偏差;同时,用作绝对定标的混合气体特征吸收谱线的波长(即混合气体同一

特征吸收谱线的测量波长 λ_m 与标称波长的偏差,也就是布里渊光谱仪经相对波长标定后的波长偏差)是已知的。采用最小二乘拟合算法对混合气体系列特征吸收谱线的测量波长 λ_m 与标称波长进行多项式拟合,即可得到绝对波长标定时的波长标定系数。标称波长与测量波长的关系可描述为

$$\lambda_{\text{gas}} = b_n \lambda_m^n + b_{n-1} \lambda_m^{n-1} + \dots + b_0, \quad (11)$$

式中: λ_{gas} 为气体特征吸收谱线的标称波长;系数 b_n 、 b_{n-1} 、 b_0 等为绝对波长标定系数。然后,基于(12)式进行绝对标定,得到绝对标定波长 λ_{cal} ,此即

为最终的测量光谱数据的标定波长。

$$\lambda_{\text{cal}} = b_n \lambda_m^n + b_{n-1} \lambda_m^{n-1} + \dots + b_0. \quad (12)$$

4 分析与讨论

4.1 鬼线识别与校正

由受激布里渊效应可知,泵浦信号与待测信号间的布里渊频移为正时产生增益谱,为负时产生衰减谱^[12],这会导致测量光谱中存在如图5(b)所示的鬼线。鬼线的存在不但会影响后续波长的标定,还会引入错误的虚假光谱信息。

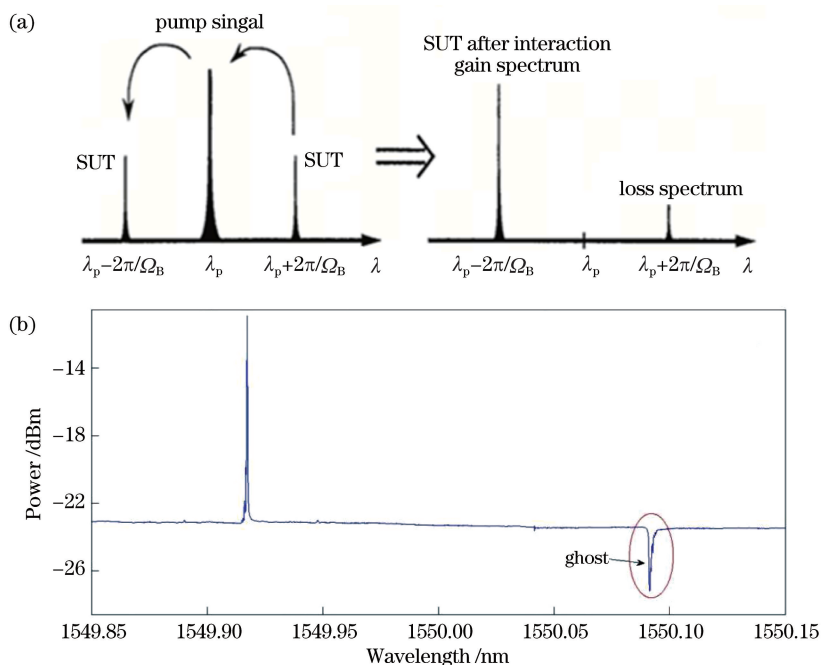


图5 布里渊光谱仪产生鬼线的机制。(a)受激布里渊增益特性;(b)包含鬼线的测量数据
Fig. 5 Ghost lines generation mechanism in Brillouin spectrometer. (a) Gain property of stimulated Brillouin scattering; (b) measured data with ghost

鬼线识别算法利用的是受激布里渊效应增益谱与衰减谱共生的特性,而且增益谱与衰减谱之间的频差近似为 $2\Omega_B$ 。鬼线识别流程如图6所示:1)通过 AMPD 算法^[13]检出测量光谱中包含的波峰和波谷;2)对成对出现的波峰和波谷进行谱型拟合,如果拟合波峰与波谷间的频差近似为 $2\Omega_B$,则判定波谷为鬼线;3)用鬼线邻近的基线采样点代替鬼线,完成鬼线的校正。

4.2 基于 FP 标准具的相对波长标定实验

进行相对波长标定的实验装置如图7(a)所示,主要包括布里渊光谱仪实验装置和用作标定的FP标准具、偏振控制器、起偏器等。实验所用热稳定FP标准具的波长精度为 ± 1 pm,自由光谱范围为 50 GHz。对测量数据进行计算得到理论波长,移除鬼线后再进行插值拟合,以确定各个峰值的理论波

长,然后将其与各个峰值的标称值(也就是对应的FP标准具通道的中心波长)代入(9)式计算相对波长标定系数,标定结果如图7(c)所示。完成相对波长标定后,标定波长的残差如图7(d)所示。考虑到FP标准具的波长精度,相对波长标定的不确定度在 $-2.5 \sim 2.5$ pm 以内。

4.3 基于多波段混合气体吸收谱的绝对波长标定实验

完成布里渊光谱仪相对波长的标定后,采用图8(a)所示的实验装置进行绝对波长的标定。实验装置主要包括布里渊光谱仪实验装置和用作标定的装有混合气体的气室、超连续光源等。气体特征吸收谱线具备非常高的波长精度和稳定性,是绝对波长标定的理想参考基准^[14-15]。根据(10)式所示的朗伯-比尔定律得到的测量数据以及利用Voigt线

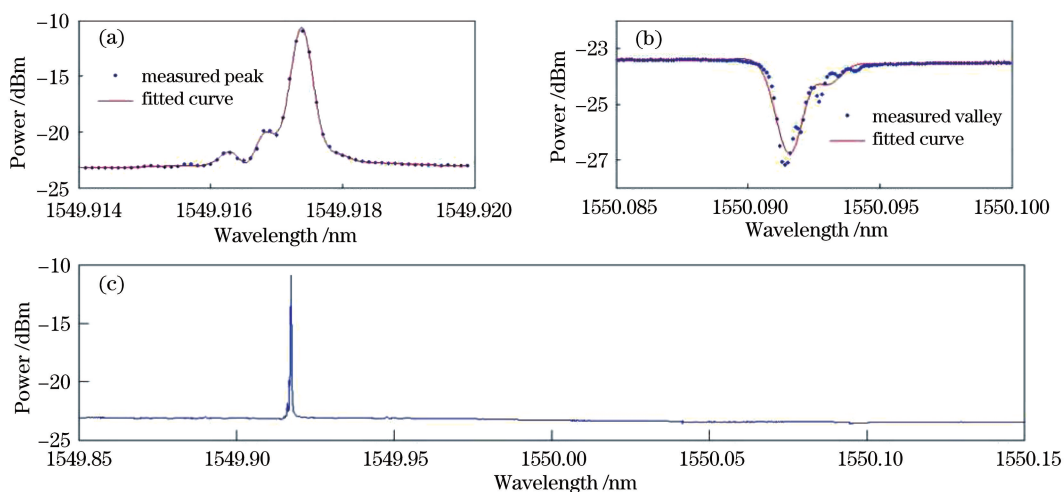


图 6 鬼线识别校正流程。(a)波峰拟合;(b)波谷拟合;(c)鬼线校正后的测量光谱
Fig. 6 Ghost lines identification and correction procedure. (a) Peak fitting; (b) valley fitting;
(c) spectra after ghost lines correction

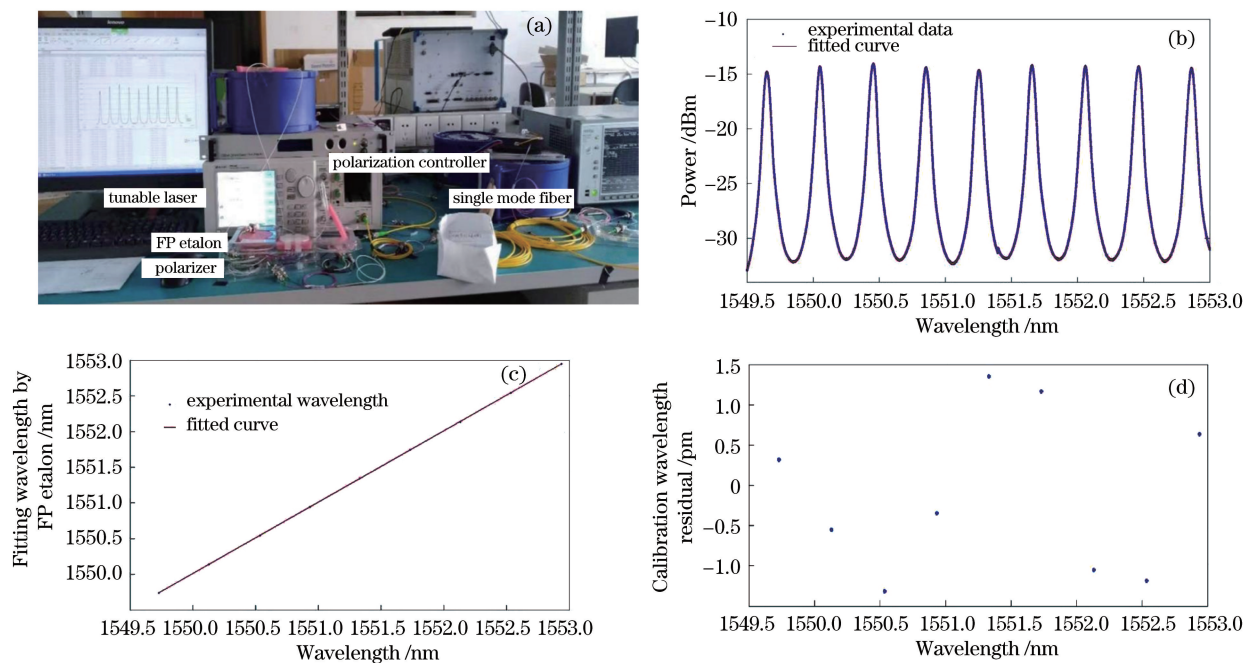


图 7 相对波长的标定。(a)实验装置;(b)测量数据;(c)波长标定的拟合结果;(d)标定波长的残差
Fig. 7 Calibration of relative wavelength. (a) Experimental setup; (b) measured data;
(c) fitting result of wavelength calibration; (d) residual of calibration wavelength

型拟合后的结果如图 8(b)所示。然后,基于特征谱线波峰的拟合值和标称值,利用(11)式计算标定系数并完成标定,结果如图 8(c)所示。完成绝对波长定标后,将相对波长标定和绝对波长标定实验获得的标定系数,作为布里渊光谱仪测量光谱的波长标定系数,然后测量含有 4 种特征吸收峰的 HCN 标准气体的吸收光谱,比较测量光谱吸收峰值波长和基准值的偏差,结果如图 8(d)所示。

由图 8(d)可见,最大的波长偏差约为 0.025 pm。因此,可以认为本文所提方法的波长标定不确定度为 ± 0.025 pm。考虑到气体特征谱线的波长不确定度约为 ± 0.01 pm,可知布里渊光谱仪标定波长的不确定度约为 ± 0.035 pm。

在完成布里渊光谱仪的波长标定后,分别对光纤光栅滤波器、正交调制电光调制器产生的调制信号进行测量,测得的光谱数据如图 9 所示。

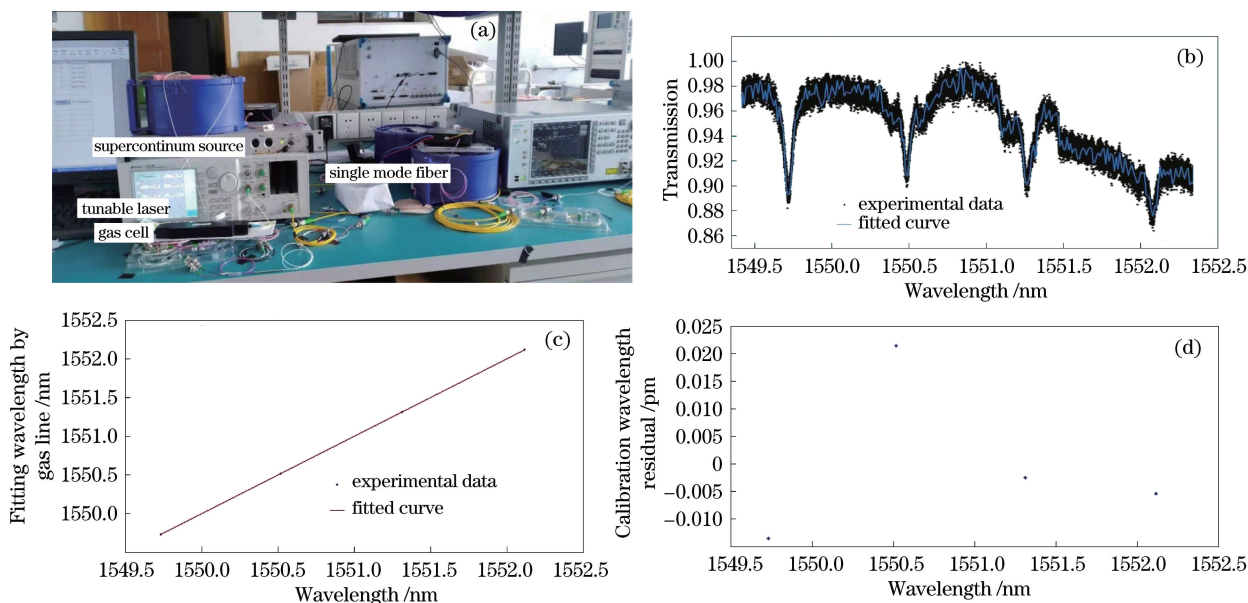


图 8 绝对波长标定。(a)实验装置;(b)测量数据;(c)波长标定的拟合结果;(d)波长标定残差

Fig. 8 Calibration of absolute wavelength. (a) Experimental setup; (b) measured data; (c) fitting result of wavelength calibration; (d) residual of calibration wavelength

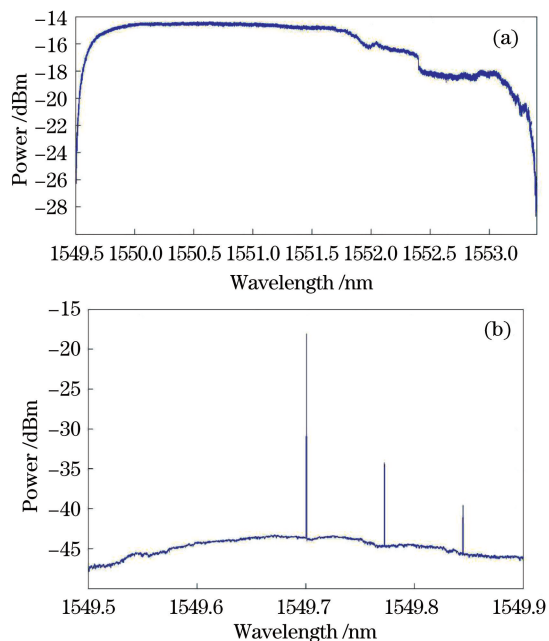


图 9 测量光谱。(a)光纤滤波器;(b)单边带调制信号

Fig. 9 Measured spectra. (a) Optical fiber filter; (b) single side-band modulation signal

5 结 论

本文提出了一种基于 FP 标准具和气室的高精度波长标定方法,以满足新一代光通信测试所需的超高分辨率布里渊光谱分析仪的波长标定需求。本着多次标定逐步降低测量光谱波长误差的思路,首先基于布里渊光谱分析模型推导给出理论波长,然后基

于 FP 标准具进行相对波长的标定,最后采用多波段混合气体吸收谱完成绝对波长的标定。实验结果表明,标定波长的不确定度可降低到 $\pm 0.035 \text{ pm}$,实现了超高分辨率、宽波段的布里渊光谱分析仪的波长标定。

此外,本文还利用受激布里渊增益谱和衰减谱的共生特性,对测量光谱中可能存在的鬼线进行了有效的识别校正。本文的波长定标方法对其他的超高分辨率光谱仪、可调谐光学滤波器、可调谐激光器等的波长标定,也具有一定的借鉴参考作用。

参 考 文 献

- [1] Al-Sammak M M A, Fyath R. Performance investigation of OFDM-based software-defined optical network[J]. International Journal of Networks and Communications, 2018, 8(1): 18-28.
- [2] Cartledge, John C. Performance of coherent optical fiber transmission systems[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2018, 11(2): 128-133.
- [3] Budarnykh A, Vladimirskaia A, Lobach I, et al. High-resolution analysis of the wavelength stopping effect in a self-sweeping fiber laser[J]. Laser Physics Letters, 2019, 16(8): 085104.
- [4] Manescau A, Araujo-Hauck C, Pasquini L, et al. High resolution wavelength calibration: advancements with the laser frequency comb development[M]//Astrophysics and Space Science Proceedings. Dordrecht: Springer Netherlands: 411-413.

- [5] Rowe M A, Swann W C, Gilbert S L. Multiple-wavelength reference based on interleaved, sampled fiber Bragg gratings and molecular absorption [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(17): 3530-3534.
- [6] Duffin K, McGettrick A J, Johnstone W, et al. Tunable diode-laser spectroscopy with wavelength modulation: a calibration-free approach to the recovery of absolute gas absorption line shapes [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(10): 3114-3125.
- [7] Tateda M, Dong M H. Ferrule material dependence of axial force sensitivity of a tunable optical frequency filter made of fiber Fabry-Perot etalon [J]. *Optical Review*, 2011, 18(1): 39-41.
- [8] Rivera E, Thomson D J. Accurate strain measurements with fiber Bragg sensors and wavelength references [J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15(2): 325-330.
- [9] Yeniay A, Delavaux J M, Toulouse J. Spontaneous and stimulated Brillouin scattering gain spectra in optical fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20(8): 1425-1432.
- [10] Fabrega J M, Sevillano P, Svaluto Moreolo M, et al. OFDM subcarrier monitoring using high resolution optical spectrum analysis [J]. *Optics Communications*, 2015, 342: 144-151.
- [11] Swann W C, Gilbert S L. Pressure-induced shift and broadening of 1510-1540-nm acetylene wavelength calibration lines [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2000, 17(7): 1263-1270.
- [12] Gilbert S L, Swann W C, Dennis T. Wavelength standards for optical communications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4269: 184-191.
- [13] Rabin M W, Swann W C, Gilbert S L. Interleaved, sampled fiber Bragg gratings for use in hybrid wavelength references [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(34): 7193-7196.
- [14] Tian X, Wang M, Wang Z F. Stimulated Brillouin scattering filters based on tilted fiber Bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1006002. 田鑫, 王蒙, 王泽锋. 基于倾斜光纤 Bragg 光栅的受激布里渊散射滤波器 [J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1006002.
- [15] Gilbert S L, Etzel S M, Swann W C. Wavelength accuracy in WDM: techniques and standards for component characterization [C]//Optical Fiber Communication Conference and Exhibit. 17-22 March 2002, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2002: 391-393.