

· 综述 ·

基于光纤受激布里渊效应的精密光谱分析方法(特邀)

刘加庆^{1,2*}, 黄琳^{1,2,3,4}, 周帅^{1,2}, 杜特¹, 张志辉¹, 刘志明¹

(1. 中电科思仪科技股份有限公司, 山东 青岛; 2. 山东省电子测量仪器技术创新中心, 山东 青岛;
3. 电子测试技术重点实验室, 山东 青岛; 4. 山东大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛)

摘要:精密光谱分析仪在高速光通信、光纤传感、光电器件及激光雷达等领域拥有广泛的应用前景。回顾了近年来精密光谱分析技术的研究进展,着重分析了基于光纤受激布里渊效应的精密光谱分析技术的原理及特点,然后介绍了研制的布里渊光谱仪及波长和功率校准方法,最后预测了精密光谱分析技术的发展趋势。

关键词:受激布里渊效应;精密光谱分析;皮米(pm)光谱分辨率;高波长精度

中图分类号: O433.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2024)-01-0001-10

Precision Spectral Analysis Based on Optical Fiber Stimulated Brillouin Scattering (Invited)

LIU Jiaqing^{1,2*}, HUANG Lin^{1,2,3,4}, ZHOU Shuai^{1,2}, DU Te¹, ZHANG Zhihui¹, LIU Zhiming¹

(1. Ceyear Technologies Co., Ltd., Qingdao, China;

2. Shandong Electronic Test & Measurement Technology Innovation Center, Qingdao, China;

3. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Qingdao, China;

4. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao, China)

Abstract: Precision spectral analyzers have wide applications in high-speed optical communication, optical fiber sensing, optoelectronic device, laser radar, etc. The developments of precision spectral analysis in recent years are reviewed. At first, the principle and characteristics of Brillouin spectral analyzer based on stimulated Brillouin scattering is focused on, and then, the wavelength and optical power calibration method of Brillouin spectral analyzer is proposed. At last, the precision spectral analysis development in the future is forecasted.

Key words: stimulated Brillouin scattering; precision spectral analysis; pm spectral resolution; precision wavelength accuracy

光谱分析是诸如光信息系统、光子集成、分子光谱学及微波生成等光学应用中的关键诊断工具。例如,在光通信网络中,通过获取光纤通信系统中传输的超高速率光信号的光谱参数,是一种重要的诊断和监视手段。随着三超光网络的发展,多载波技术、先进调制格式等的应用,以及光梳光源等新型光器件的应用,使得光网络相关的光谱分析需要皮米(pm)量级或更高的光谱分辨率及波长精度^[1-3]。在激光技术研究及应用过程中,边模、光谱纯度、激光模式和频率啁啾等激光物理效应分析,也需要超高分辨率的精密光谱测量手段^[4-6]。

光谱分析技术中常规的三种分光体制为色散光栅、迈克尔逊干涉仪以及可调谐法珀罗光学滤波器。其中色散光栅原理是光网络测试应用中最常用的技术路线,它具有宽光谱范围和高扫描速度等优点。虽然通过引入多通和双滤波原理来改善动态范围和光谱分辨率,但通常其最好的光谱分辨率被限制在千兆赫兹(GHz)量级^[7-8]。目前日本的横河和安利、美国的 VIAVI 以及加拿大的 EXFO 等公司均有基于色散光栅原理的光谱分析仪产品。基于迈克尔逊干涉仪原理的光谱分析仪,具备高波长选择精度和良好的光谱分辨率等优点,但由于其光谱

分辨率与动镜运动距离正相关,分辨率不能无限制的提高,能达到的最高分辨率为皮米(pm)量级,并且由于动镜的存在,容易受环境影响。后来出现的静态傅里叶光谱分析技术,虽然解决了动镜易受环境干扰的弊端,但分辨率只能达到纳米(nm)级别。并且该原理光谱仪的动态范围也是个问题^[9],最好动态范围在 50 dB 上下,典型产品有美国 Thorlabs 公司的 OSA 系列。基于可调谐法珀罗光学滤波器原理的光谱分析仪,需要在分辨率、自由光谱范围和光学动态范围等指标间平衡。虽然可以采用多腔体滤波器、级联滤波器及多次滤波等方式改善光谱分辨率和动态范围,但是波长测量范围和光谱分辨率相互制约,限制了它的应用场合,多用于光谱解调应用^[10],典型厂商包括新西兰的 IS-instruments 公司和美国 Coherent-solutions 公司。

针对以上不足,目前相关研究机构、公司提出了多种超高光谱分析的技术路线。其中,较早出现的是基于迈克尔逊干涉原理和法珀罗滤波器原理的超高光谱分析技术,能提供数十皮米(pm)量级的光谱分辨率能力,但在实际应用中仍面临不少问题。法国 Joseph Fourier University 于 2009 年提出的 SWIFTS(光驻波原理)是一种新型的、与迈克尔逊干涉仪类似的傅里叶光谱仪^[11],采用先进 MEMS 技术,具有全静态、微型以及高分辨率等优点。目前由 2001 年成立的 Resolution Spectra System 基于该专利技术开展商业化,可用光谱波段为 630~1 070 nm, Resolution Spectra System 公司拥有该类光谱分析技术的所有相关专利,且该技术仍处于逐步成熟阶段,目前尚不能满足近红外波段的光通信等的光谱测试需求。基于激光相干光谱分析的外差、受激布里渊等原理的光谱分析技术的出现,为光通信波段的精密光谱分析提供了切实可行的解决方案。基于光外差原理的超高光谱分析技术具备超高光谱分辨率、大动态范围等优点^[12],法国 APEX Technologies 于 2011 年率先推出基于外差原理的超高光谱分析仪,最高分辨率在 1 550 nm 处可达 0.04 pm,主要面向光通信、激光等相关应用。随后,Finisar、VI-AVI 等也推出了类似的光谱分析仪。基于光纤受激布里渊效应的超高光谱分析技术具有光谱分辨率高、小型化、无需复杂昂贵光学器件且便于与光纤系统融合等优点^[13]。自从发现光纤受激布里渊效应后,相关人员就开始从事该方面的探索, Aragon Pho-

tonics 于 2013 年推出了基于该原理的光谱分析仪。

文中首先对于现用的超高分辨率光谱分析技术进行了总结对比,然后重点介绍了基于光纤受激布里渊效应的精密光谱分析技术以及研制的布里渊光谱分析仪,并展望了精密光谱分析技术的发展趋势。

1 精密光谱分析仪的研究进展

目前已实现工程应用的精密光谱分析技术路线的产品主要包括激光相干原理的外差光谱分析仪、布里渊光谱仪以及光驻波原理的光谱分析仪。目前光驻波原理的光谱分析仪只能覆盖 630~1 070 nm 波段,无法实现常用光通信波段的光谱参数测量。只有外差光谱分析仪和布里渊光谱仪可同时实现优于 0.1 pm 光谱分辨率和优于 70 dB 动态范围,覆盖光通信常用的 O、C、L 波段的精密光谱参数测量与分析。外差光谱分析仪的优势在于易于集成化、小型化且具备更好的光谱分辨能力,劣势在于对光的偏振态和相位存在高度依赖,系统实现较为复杂,所使用本振旁瓣和射频滤波器缺陷等的存在,限制了可用的无杂散动态范围。布里渊光谱仪的优势在于采用纯光学测量原理,能够实现极大的无杂散动态测量范围,极大改善了近峰测量动态范围,缺点在于需要使用特种光纤作为工作介质以实现最佳性能。

1.1 光驻波原理的精密光谱分析仪

基于光驻波原理的精密光谱分析仪是一种类似傅里叶变换光谱仪的、基于光电集成芯片的微型光谱分析仪,采用先进 MEMS 技术,具有全静态、微型和高分辨率等优点。通过探测待测光产生的光学驻波或多色光时的驻波,经 Lippmann 变换结合光学定标获得待测光的精密光谱数据。该原理的光谱分析仪无需任何扫描或运动部件,它的核心分光探测单元为光电集成波导,有两种结构:一种是一端为光输入的单端口结构波导,另一端为反射镜,待测光从光输入进入后经反射镜反射产生驻波,与迈克尔逊干涉仪干涉图不同的是, Lippmann 干涉图是镜面开始的光程差不敏感的条纹。因此,获取单边条纹包络,即可反演出待测光的光谱信息。第二种是双端口结构波导,待测光

从两个端口同时进入形成驻波,此时获取干涉图为典型对称傅里叶干涉图,它对光程差敏感。上述两种结构波导的光谱仪,均采用相同的近场探测原理实现光驻波的探测。该原理光谱仪的可用光谱范围受采样间隔和波导中单模光谱范围限制,满足乃奎斯特定理时,1 550 nm 非对称波导的典型光谱范围是 400 ~ 500 nm^[14-15]。法国 Joseph Fourier University 的科学家于 2011 年成立的 Resolution Spectra System 基于该专利技术提供商业化产品,典型产品为 Zoom Spectra 系列,光谱分辨率为 5 pm,具备高达 30 kHz 的高速测量能力,但目前可用的光谱范围是 630~1 070 nm,尚不能满足近红外波段的光通信等的光谱测试需求。图 1 为光驻波原理的集成光电芯片。

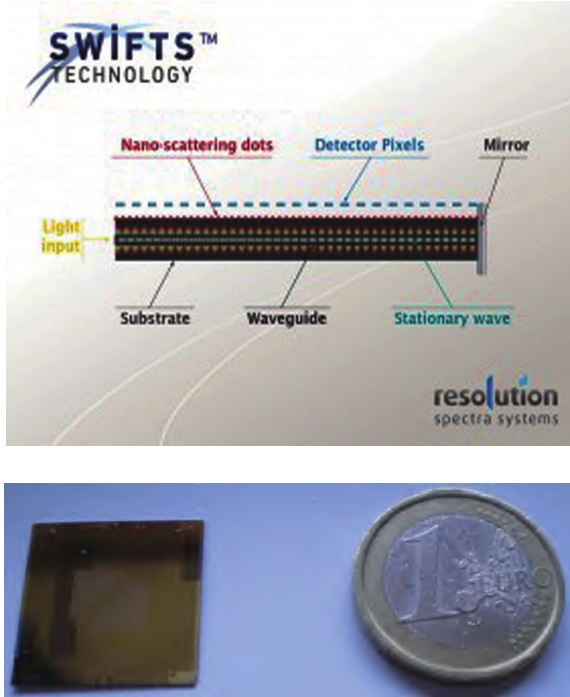


图1 光驻波原理的集成光电芯片

图2为外差光谱分析原理框图。

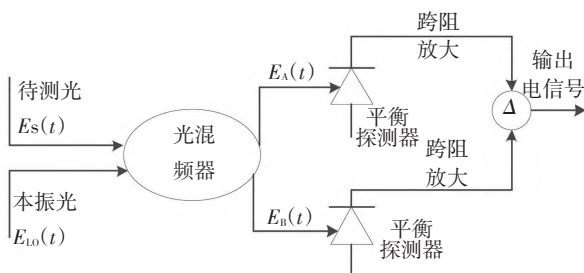


图2 外差光谱分析原理框图

1.2 外差原理的精密光谱分析仪

基于外差原理的精密光谱分析仪的基本原理是,使用窄线宽的可调谐激光器作为本振光源,本振光与待测信号通过混频得到同相直流探测信号和反相混频信号,通过平衡探测技术减去直流成分,得到待测信号的光谱强度相关信息,从而实现了光谱测量^[16]。

外差原理光谱分析模型的数学描述如下。

$$E_s(t) \text{ 与 本振光 } E_{Lo}(t) \text{ 的光场分别表示为} \quad (1)$$

$$E_s = a_s \exp(j\varphi_s) \quad (1)$$

$$E_{Lo} = a_{Lo} \exp(j\varphi_{Lo}) \quad (2)$$

其中,相位 $\varphi_s = 2\pi\nu_s t$, $\varphi_{Lo} = 2\pi \int (v_{Lo} + \gamma t) dt$; ν_s 为待测信号光频率; v_{Lo} 为本振光源的初始扫描频率; γ 是可调谐激光器的扫描速率。

那么,光电探测器检测到的信号强度为 $|E_s + E_{Lo}|^2$ 。为了便于简化计算,假设 $a_s = a_{Lo} = 1/\sqrt{2}$, 该假设并不会对最终结果造成影响。因此得到外差信号为

$$x(t) = \cos(\pi\gamma t^2 + \psi) \quad (3)$$

其中, ψ 表示当本振光源频率和信号光频率相等时两者之间的相位差。

将 $x(t)$ 进行傅里叶变换得到的频域表达式为

$$X(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\gamma}} \cos\left(-\frac{\omega^2}{4\pi\gamma} + \psi + \frac{\pi}{4}\right) \quad (4)$$

低通滤波器可用高斯函数表示为

$$H(\omega) = \exp\left(\frac{-\omega^2}{\Delta\omega^2}\right) \quad (5)$$

其中, $\Delta\omega$ 表示滤波器带宽。

根据 Parseval 定理,探测到的信号能量可表示为

$$E_g = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |X(\omega)|^2 |H(\omega)|^2 d\omega \quad (6)$$

考虑到 $|H(\omega)|$ 的表达式, E_g 可以分解成两项,其中一项是表示待测信号能量的常量,另一项表示有限带宽导致的待测信号能量的不确定度。因此, E_g 可进一步表示为

$$E_g = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\Delta\omega}{4\sqrt{2\pi\gamma}} + \frac{\Delta\omega}{2\sqrt{2\gamma}[\Delta\omega^4 + (4\pi\gamma)^2]^{1/4}} \sin(\psi') \right] \quad (7)$$

其中, ψ' 主要由初始相位差 ψ 、低通滤波器带宽 $\Delta\omega$ 以及扫描速率 γ 决定。

将积分后的不确定项代入常数项,可得被测功率相对准确度的表达式为

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\sqrt{4\pi\gamma}}{[\Delta\omega^4 + (4\pi\gamma)^2]^{1/4}} \quad (8)$$

其中, P 表示信号功率; ΔP 表示偏离信号功率的峰值。若当低通滤波器带宽足够大, 即 $\Delta\omega^2 \gg 4\pi\gamma$, 则上式可简化为

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\sqrt{\gamma}}{\sqrt{\pi} \Delta f} \quad (9)$$

式中, 频差 $\Delta f = \Delta\omega/(2\pi)$ 。

上式给出了外差原理的光谱测量过程, 可见, 功率不确定性与低通滤波器带宽及可调谐光源的扫描速率存在关联关系。

(1) 当低通滤波器带宽一定时, 扫描速率越快, 功率不确定性就越大;

(2) 当扫描速率一定时, 低通滤波器带宽越窄, 功率不确定性就越大。

1998年, DERICKSON D 等人提出了利用固定波长的激光器作为本振光源, 利用外差探测和频谱

仪相结合的方法测量信号光谱^[17]。2002年美国 Agilent 实验室的 BANEY M 等人改进了外差原理的光谱测量方法, 使用波长连续扫描激光器作为本振光源, 利用平衡探测技术提取超高分辨率光谱信息^[18]。之后, 法国 APEX 公司推出了基于外差原理的 AP20X 系列光谱分析仪, 波段覆盖光通信常用的 C、L、O 波段, 最高光谱分辨率达到 5 MHz。并在此基础上, 推出了具备光谱相位二维参数测量功能的 AP268X 系列光复谱分析仪。随后, 美国 Finisar、VI-AVI 以及德国 ID Photonics 也推出了基于外差原理的精密光谱分析仪。

1.3 受激布里渊原理的精密光谱分析仪

基于受激布里渊原理的精密光谱分析仪如图3所示。

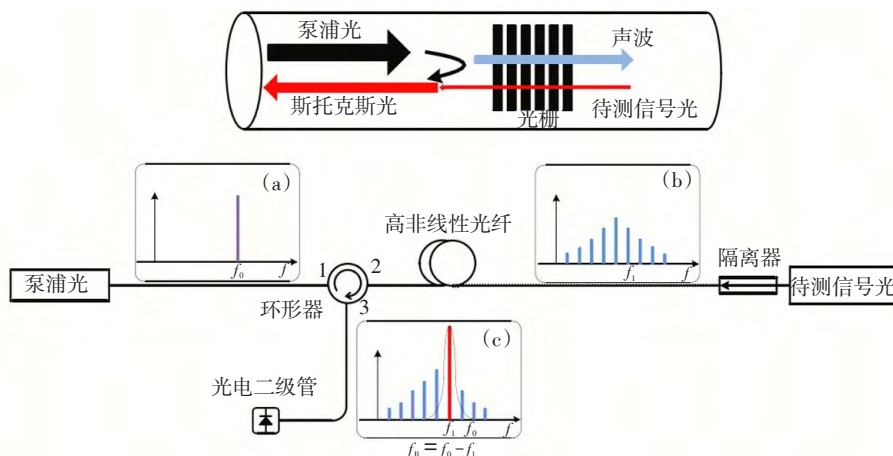


图3 布里渊光谱分析原理框图

待测光和泵浦光在高非线性光纤中相对向传播, 当泵浦光波长为 λ_p 时, 待测光中波长为 $\lambda_p - \Delta\lambda_B$ 的光谱分量会被选频放大, 而其他光谱成分则保持不变, 其中 $\Delta\lambda_B$ 为斯托克斯频率间隔, 也称为受激布里渊频移。因此, 通过逐次改变泵浦光波长, 待测光中对应波长的光谱成分被依次选频放大, 从而得到了待测光的光谱特性信息^[19]。

2005年, DOMINGO J S 等人首次报道了基于受激布里渊原理的精密光谱分析方法, 并在实验室得到 0.08 pm 的波长分辨率、80 dB 动态范围等性能的光谱数据^[20]。2008年, VILLAFRANCA A 等人首次实现了基于受激布里渊原理的光学频谱相位测量, 获得了 10 Gbit/s 调制光纤信号的复数谱, 并通过反

傅里叶变换重构出待测光的时域参数^[21]。之后, 西班牙 Aragon Photonics Inc 公司推出了基于受激布里渊原理的 BOSA 系列光谱分析仪, 波段覆盖光通信常用的 C、L、O 波段, 最高光谱分辨率达到 10 MHz, 还具备光谱相位二维参数测量及偏振光谱分析等附加选配功能。

2 基于光纤受激布里渊效应的精密光谱分析

2.1 布里渊光谱分析的数学模型

根据 BOYD 等提出的分布波动源模型^[22], 光纤中的受激布里渊效应是光纤中空间分布的波动噪声源引起的。因此, 光纤中受激布里渊过程数学描述如下

$$\frac{dI_p(z, \lambda)}{dz} = -\alpha I_p(z, \lambda) - \frac{g_B}{A_{\text{eff}}} I_s(z, \lambda) I_p(z, \lambda) - I_{\text{esp}}(z, \lambda) \quad (10)$$

$$\frac{dI_s(z, \lambda)}{dz} = \alpha I_s(z, \lambda) - \frac{g_B}{A_{\text{eff}}} I_s(z, \lambda) I_p(z, \lambda) - I_{\text{esp}}(z, \lambda) \quad (11)$$

$$\frac{dI_B(z, \lambda)}{dz} = \frac{g_B(\lambda - \frac{2\pi}{\Omega_B})}{A_{\text{eff}}} I_p(z, \lambda) I_s(z, \frac{2\pi}{\Omega_B}) \quad (12)$$

式中, I_p 、 I_s 、 I_B 分别为泵浦光、待测光以及斯托克斯后向散射光; A_{eff} 为单模光纤的有效面积; α 为单

模光纤衰减系数; I_{esp} 为由热波动引起的分布自发布里渊散射的贡献; Ω_B 为受激布里渊频移; g_B 为受激布里渊增益谱, 它与增益有关, 低增益时类似洛伦兹线型, 高增益时为高斯线型。

受激布里渊频移 Ω_B 可由下式给出

$$\Omega_B = \frac{4\pi n v_a}{\lambda_p} \quad (13)$$

式中, v_a 为光纤中的声速, 即受激布里渊效应产生的动态布拉格光栅在光纤中的移动速度; n 为光纤折射系数; λ_p 为泵浦光波长。

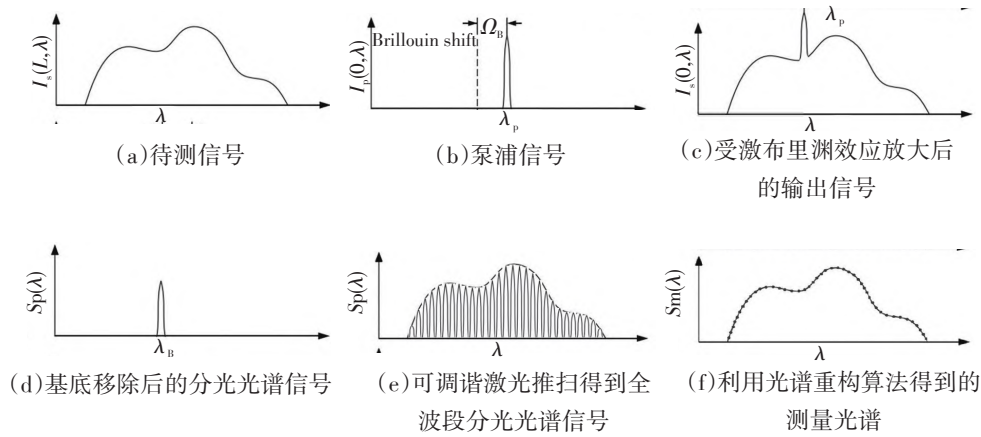


图4 布里渊光谱仪的光谱测量流程

图4所示为布里渊光谱仪的光谱测量流程。

在光纤受激布里渊效应数学模型的基础上, 基于光纤受激布里渊效应的精密光谱分析模型^[23]描述如下。

连续窄带泵浦光 $I_p(0, \lambda_p)$ 从 $z=0$ 位置注入长度为 L 的介质光纤, 待测光 $I_s(L, \lambda)$ 从另一端 $z=L$ 的位置注入长度为 L 的介质光纤。在光纤中相对传播的泵浦光和待测光发生受激布里渊效应, 使得待测光中符合斯托克斯波长 $\lambda_B = \lambda_p - \Delta\lambda_B$ 处的光谱成分被放大, 放大光谱成分的谱宽主要由受激布里渊增益谱宽决定。为简化分析, 从 $z=L$ 位置注入的待测光, 可根据是否被选频放大, 分为两部分

$$I_s(L, \lambda) = I_s(L, \lambda_B) + I_s(L, \lambda \neq \lambda_B) \quad (14)$$

式中, $\Delta\lambda_B = 2\pi/\Omega_B$ 。

因此, 经受激布里渊效应选频放大后, 由 $z=L$ 位置注入的待测光, 在介质光纤 $z=0$ 处对应的输出信号为

$$I_s(0, \lambda) = I_s(0, \lambda_B) + I_s(0, \lambda \neq \lambda_B) = I_s(L, \lambda_B) \exp[g_B I_p(0, \lambda_p) L_{\text{eff}}] + I_s(L, \lambda \neq \lambda_B) \quad (15)$$

式中, $I_s(0, \lambda_B)$ 表示待测光中经受激布里渊效应放大的光谱成分; $I_s(0, \lambda \neq \lambda_B)$ 表示待测光中未被放大的带外光谱成分; L_{eff} 表示介质光纤有效长度, 可由下式给出。

$$L_{\text{eff}} = \int_0^L e^{-\alpha z} dz = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \quad (16)$$

当介质光纤 $z=0$ 处无泵浦光注入时, 在 $z=0$ 处测量得到的输出光为

$$\tilde{I}_s(0, \lambda) = I_s(L, \lambda_B) + I_s(L, \lambda \neq \lambda_B) \quad (17)$$

因此, 通过移除介质光纤 $z=0$ 处获取信号中, 待测光中未被放大的带外光谱成分, 即联立式(15)和式(17), 可得到待测信号中波长 λ_B 处, 经受激布里渊效应选频放大得到的光谱数据为

$$Sp_s(\lambda_B) = I_s(0, \lambda) - \tilde{I}_s(0, \lambda) = I_s(L, \lambda_B) \cdot (\exp[g_B I_p(0, \lambda_p) L] - 1) \quad (18)$$

通过依次改变泵浦光波长, 利用光纤受激布里渊效应, 可以得到待测光中各波长处的选频放大光谱信息, 进而通过光谱重构算法, 获取待测光的精密光谱数据。

2.2 布里渊光谱线型特性分析

根据分布波动源理论构建的受激布里渊模型,低增益时的受激布里渊增益谱线型为洛伦兹函数,有

$$g_B(\delta v') = g_0 \frac{(\Delta v_B/2)^2}{(\delta v')^2 + (\Delta v_B/2)^2} \quad (19)$$

随着受激布里渊增益系数的提升,受激布里渊增益谱线型逐步过渡到高斯函数,有下式

$$g_B(\delta v') = g_0 \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{\delta v'}{(\Delta v_B/2)^2}\right)\right] \quad (20)$$

对于增益中间区域较为复杂的线型,可以用 k 次洛伦兹函数表示,以描述受激布里渊增益谱型的演进过程,特别是中间增益区域的受激布里渊增益谱型。可见,当 $k=1$ 时,表示低增益时的洛伦兹函数,对于更高 k 值,则趋向于高斯函数^[24]。有下式

$$g_B(\delta v') = \lim_{k \rightarrow \infty} \left[\left(\frac{\Delta v_B}{2\sqrt{2^{1/k}-1}} \right)^2 / \left\{ \left(\frac{\Delta v_B}{2\sqrt{2^{1/k}-1}} \right)^2 + (\delta v')^2 \right\} \right]^k \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{\delta v'}{(\Delta v_B/2)^2} \right)\right] \quad (21)$$

由光谱分析相关理论可知,布里渊光谱仪的测量光谱实际是受激布里渊增益谱与待测光的卷积,并且测量光谱波长存在布里渊频移,考虑到用作泵浦光的可调谐激光器的线宽通常在千赫兹(kHz)量级,因而,布里渊光谱仪的光谱分辨率主要由所用介质光纤的本征受激布里渊增益谱宽决定。

因此,受激布里渊增益谱特性对于布里渊光谱仪的性能影响大。通过实验测量得泵浦功率,受激布里渊增益谱峰值和谱宽的关联关系如图5和图6所示。

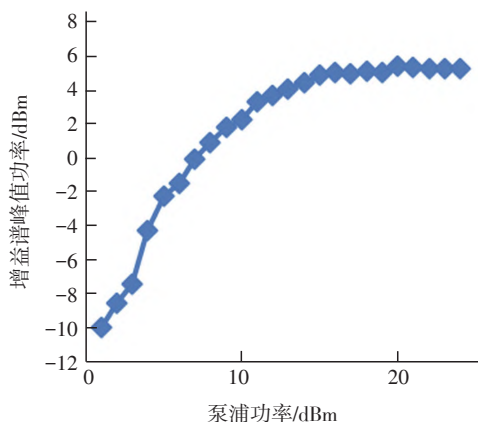


图5 受激布里渊增益谱峰值与泵浦功率的关系

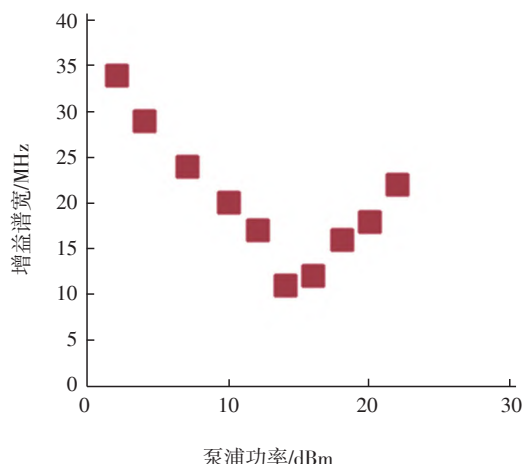


图6 受激布里渊增益谱宽与泵浦功率的关系

当泵浦功率超过阈值功率时,受激布里渊增益谱会出现饱和效应,并且会导致增益谱宽的展宽。因此,在布里渊光谱仪中,需要对泵浦功率进行适当调试,以使得受激布里渊增益过程处于小信号、线性高增益区,从而获取最佳的光谱分光性能。

2.3 布里渊光谱仪

在上述研究工作的基础上,基于光纤受激布里渊原理研制了6366A型精密光谱分析仪,结合自行攻克的光谱分辨率增强、测量动态范围提升、波长与功率校正等技术,实现了1 525~1 605 nm波段、优于0.2 pm超高光谱分辨率、±1 pm波长精度、±0.5 dB功率测量精度、1~20 nm/s不同测量速度的近红外光纤信号精密光谱参数测量与分析。研制的6366A精密光谱分析仪如图7所示,主要包含待测光输入模块、精细泵浦光生成模块、光学测试模块、探测与数据获取模块、定标模块、嵌入式系统模块和电源模块等。

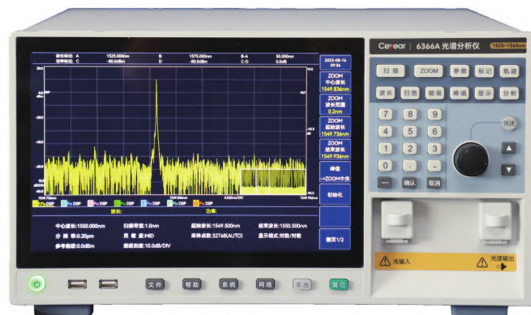


图7 6366A精密光谱分析仪

6366A 精密光谱分析仪的工作流程为:进行精密光谱参数测量时,待测光纤信号光经待测光输入模块,将待测光纤信号光导入光学测试模块,结合精细泵浦光生成模块提供的波长连续变化的精细泵浦光,利用光纤受激布里渊效应实现光谱分光,然后通过光谱重构算法获取精密光谱信息,实现光谱波长等光谱参数的测量功能。然后,基于获取的精密光谱参数,实现光纤信号的调制格式、光谱信噪比及边模抑制比等的分析功能。

2.4 布里渊光谱仪的波长与功率校准

布里渊光谱仪具备皮米(pm)量级的超高光谱分辨率和波长精度,常规的单频激光器、卤素灯及气室等波长校准方法,难以满足波长校准需求^[25]。针对研制的6366A精密光谱分析仪,通过采用协同融合波长校准方法,实现了高精度的波长校准。通过采用基于最小二乘拟合的功率校准方法,实现了功率校准^[26-27]。

2.4.1 协同融合波长校准方法

协同融合波长校准方法(见图8)的基本原理如下:针对泵浦光的波长漂移是导致测量光谱波长偏移和不确定的主要来源这一问题,首先利用法珀罗标准具在宽波长范围上,对测量光谱数据进行相对波长校准。然后,利用气室的特征吸收谱线,对测量光谱数据进行绝对波长校准。最后,基于布里渊光谱分析数学模型,对于受激布里渊效应引入的布里渊频移进行校准,给出测量光谱数据的波长值。

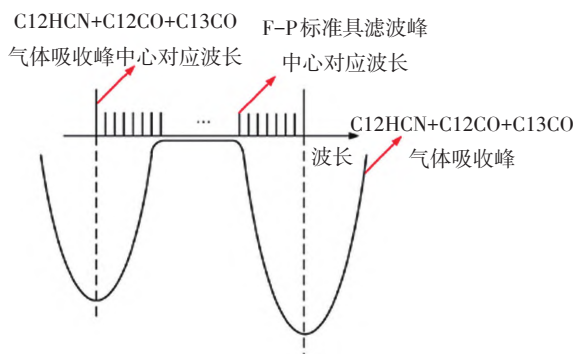


图8 协同融合波长校准方法

(1) 基于法珀罗标准具的相对波长校准

泵浦光的理论波长值 λ_{th} ,与法珀罗标准具的通道中心波长 λ_{FP} ,存在如下关系

$$\lambda_{FP} = a_n \lambda_{th}^n + a_{n-1} \lambda_{th}^{n-1} + \dots + a_0 \quad (22)$$

式中,系数 a_n, a_{n-1}, a_0 等,即为相对波长校准系数,可由最小二乘拟合给出。在获取泵浦光经过法珀罗标准具的透射谱后,对测量波长值与法珀罗标准具的标称值进行拟合,得到相对波长校准系数,然后通过对测量光谱数据波长利用式(22)进行校准,即可完成相对波长校准。

进行相对波长校准时,使用的是 ± 2 pm 通道中心波长精度、100 GHz 自由光谱范围的热稳定法珀罗标准具。获取的法珀罗标准具透射谱、相对定标波长拟合误差如图9和图10所示。考虑到法珀罗标准具的波长精度,完成相对波长校准后的波长不确定度在 ± 3.5 pm 以内。

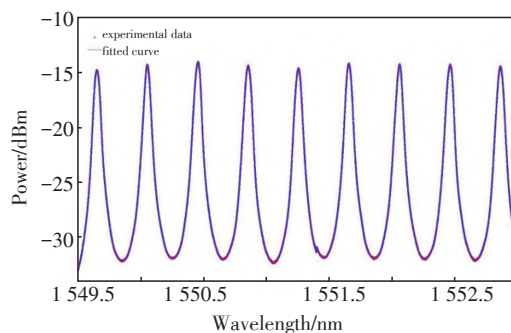


图9 法珀罗标准具透射谱

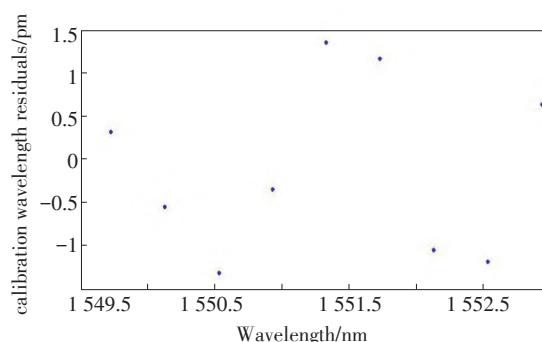


图10 相对定标波长拟合误差

(2) 基于气室的绝对波长校准

6366A 精密光谱分析仪完成相对波长校准后,利用气室的特征吸收谱线进行绝对波长校准。相对波长校准完成后的测量光谱波长 λ_{rt} ,与气室特征吸收谱线 λ_{gas} ,存在如下关系

$$\lambda_{gas} = b_n \lambda_{rt}^n + b_{n-1} \lambda_{rt}^{n-1} + \dots + b_0 \quad (23)$$

式中,系数 b_n, b_{n-1}, b_0 等,即为绝对波长校准系数,可由最小二乘拟合给出。在获取泵浦光经过气室的

吸收谱后,对测量波长值与气室特征谱线的标称值进行拟合,得到绝对波长校准系数,然后,通过对测量光谱数据波长利用式(23)进行校准,即可完成绝对波长校准。

进行绝对波长校准时,使用的是C12HCN+C12CO+C13CO混合气体、特征谱线波长不确定度小于0.1 pm的标准气室。获取的气室特征吸收谱、绝对定标波长拟合误差如图11和图12所示。考虑到气室特征谱线的波长精度,完成绝对波长校准后的波长不确定度在 ± 0.1 pm以内。

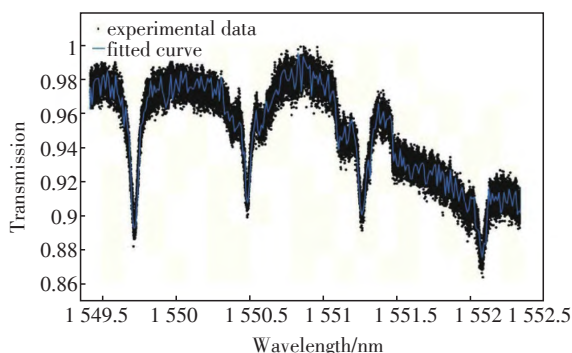


图11 气室特征吸收谱

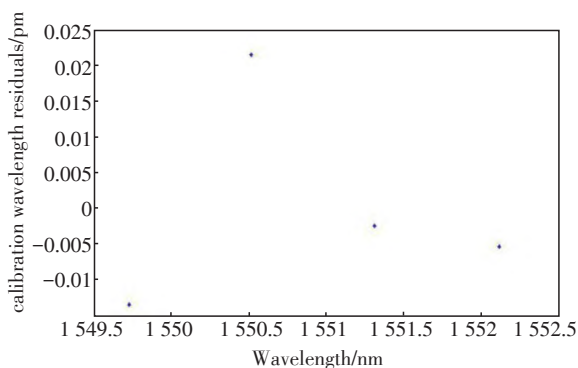


图12 绝对定标波长拟合误差

(3) 基于布里渊光谱分析数学模型计算波长值

在完成相对和绝对波长校准后,利用布里渊光谱分析数学模型,对受激布里渊效应引入的布里渊频移校准,受激布里渊增益谱型近似为高斯线型,测量光谱数据的波长,可由泵浦光波长和布里渊频移给出。有

$$\lambda_B = \lambda_p - 2\pi/\Omega_B = \lambda_p - \frac{\lambda_p}{2nV_a} \quad (24)$$

式中, n 为光纤折射率, V_a 为光纤中的声速。根据所用介质光纤的相关参数,利用上式给出布里渊频移。

考虑用作泵浦光种子源的可调谐激光器的波长稳定度在 ± 1 pm,因此,完成波长校准后的布里渊光谱仪的波长精度为 ± 1 pm。

2.4.2 布里渊光谱仪的功率校准方法

在完成布里渊光谱仪的波长校准后,需要进行功率校准,以建立起布里渊光谱仪获取的原始模数转换码值与光功率之间的对应关系,给出测量光谱数据的准确光功率值。

考虑到布里渊光谱仪探测与数据获取模块中运算放大器存在的零点偏置电压,这会导致即使无待测光输入时,布里渊光谱仪仍会获取大于零的原始模数转换码值,从而导致探测与数据获取模块出现非线性响应。因此,首先对获取的原始模数转换码值进行零点移除,然后采用最小二乘拟合算法,给出输入的标准光功率 $P_{w_{std}}$ 与零点移除后的原始模数转换码值 DN_{zm} 的对应关系。有下式

$$\Delta_{min} = P_{w_{std}} - \left(\sum_{i=1}^n c_i DN_{zm}^{i-1} \right) \quad (25)$$

式中,系数 c_n, c_{n-1}, c_0 等,即为光功率校准系数。

进行功率校准时,零点移除后的原始模数转换码值与光功率之间,不同阶次的拟合误差如图13所示。可见一次线性拟合即可满足布里渊光谱仪的功率校准需求,功率校准拟合结果如图14所示。

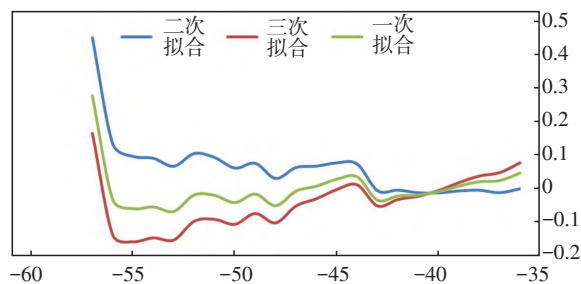


图13 不同阶次的功率校准拟合误差

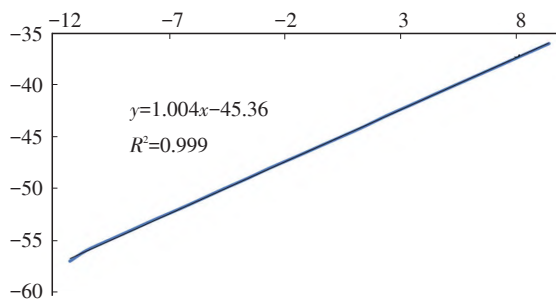


图14 功率校准拟合结果

6366A 精密光谱分析仪完成波长与功率校准后,获取了不同光源的精密光谱数据如图 15、图 16 和图 17 所示。

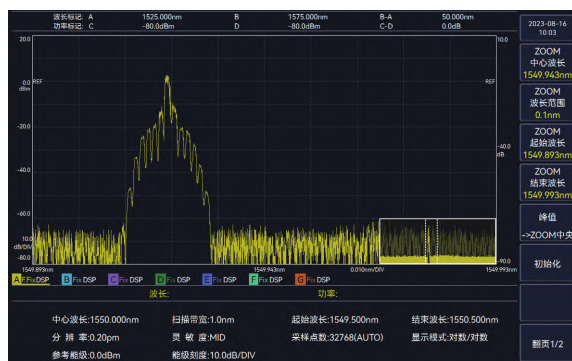


图 15 高稳定激光器的测量光谱数据

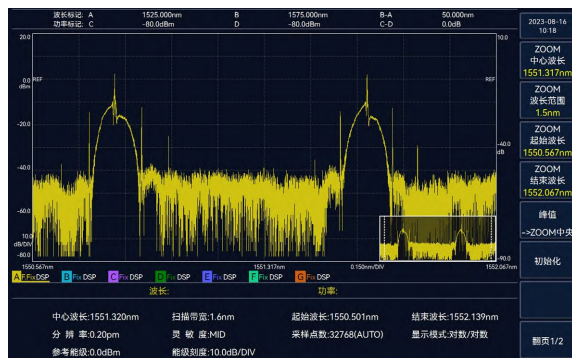


图 16 光纤调制信号的测量光谱数据

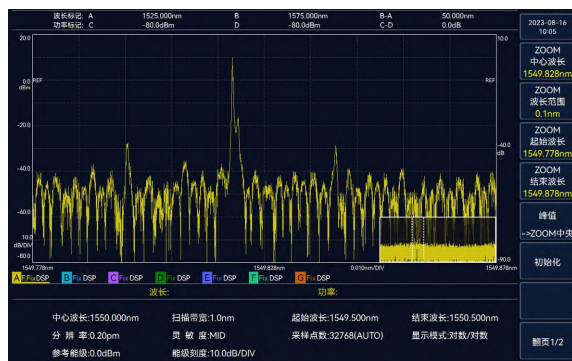


图 17 可调谐激光器的测量光谱数据

3 结论

精密光谱分析技术经过十多年的发展,已实现了亚皮米(pm)量级的光谱分辨率、皮米(pm)量级的波长精度、优于 70 dB 的测量动态范围、波长覆盖光通信常用的 O 波段、C 波段、L 波段等性能指标。文中首先简要概括了近年来出现的精密光谱技术

路线及其优缺点:其中外差原理和受激布里渊原理因具备极高的光谱分辨能力和波长精度,以及极大的动态范围,是目前精密光谱分析的主流和前沿技术路线,并且具备光谱、偏振、相位等多维参数测试能力。然后重点介绍了布里渊光谱仪的原理及特点,最后介绍了研制的基于受激布里渊原理的 6366A 精密光谱分析仪及其波长和功率校准方法。

精密光谱分析技术目前正朝着更高光谱分辨能力、融合波长计功能、更高动态范围、更高灵敏度、多维参数测量、时域分析等混合域测量、光网络参数反演与分析等方向深入发展,光频率梳光谱仪、量子点光谱仪等新原理新方法不断涌现。未来,新原理新方法材料与器件技术的进步,仍然是驱动精密光谱分析技术发展的两个主要推动力:(1)更宽波长扫描范围的泵浦光源、更窄的主动调谐滤波器,仍然是驱动激光相干光谱仪提升波长测量范围、光谱分辨率与波长精度的关键与瓶颈所在。光梳、量子点等先进光电器件的不断发展与成熟,是催生相关光谱分析技术实现实用化的关键。(2)新的光谱分析原理与方法的出现,仍将会是光谱分析仪实现光谱分辨率等核心指标突破性提升的关键所在,也是精密光谱分析仪实现易用性、低成本的关键所在。

参考文献

- [1] CARTLEDGY K, JOHN C. Performance of coherent optical fiber transmission systems[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2018, 11(2): 128-133.
- [2] FENG K, CUI J, DANG H, et al. An optoelectronic equivalent narrowband filter for high resolution optical spectrum analysis[J]. Sensors, 2017, 17(2): 348-359.
- [3] 盛立文,张爱国,乔山,等. 外腔调谐源的无跳模纵向允许误差研究(特邀)[J]. 光电技术应用, 2021, 36(5): 66-73.
- [4] 李鹏,盛立文,黄琳,等. 窄线宽可调谐半导体激光器研究进展(特邀)[J]. 光电技术应用, 2022, 37(4): 83-92.
- [5] MAHER R, SHI K, BARRY L, et al. Implementation of a cost-effective optical comb source in a WDM-PON with 10.7 Gb/s data to each ONU and 50 km reach[J]. Optics Express, 2010, 15(18): 15672-15681.
- [6] ANANDARAJAH P, MAHER R, XU Y, et al. Generation of coherent multi-carrier signals by gain switching of discrete mode lasers[J]. IEEE Photonic Journal,

- 2011, 1(3): 112-122.
- [7] 盛立文, 葛崇琳, 曹乾涛, 等. 宽范围无跳模外腔可调谐半导体激光器[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(8): 20230374.
- [8] BANEY D, SORIN W. Fiber optic test and measurement[M]. D Derickson, Ed Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2016: ch5.
- [9] 程向. 半导体激光器波长校准系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [10] CONSTABLE J, WHITE I. Laser linewidth measurement using a mach-zehnder interferometer and an optical amplifier[J]. Electronics Letters, 2014, 30(4): 140-142.
- [11] VELASCO A, CHEBEN P, BOCK P, et al. High-resolution Fourier-transform spectrometer chip with microphotonic silicon spiral waveguides[J]. Optics Letters, 2013, 5(38): 706-708.
- [12] BANEY D, SZAFRANIEC B, MOTAMED A. Coherent optical spectrum analyzer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 3(14): 355-357.
- [13] DOMINGO J, PELAYO J, VILLUENDAS F, et al. Very high resolution optical spectrometry by stimulated Brillouin scattering[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 9(17): 855-857.
- [14] COARER E, SCHMITT B, GUERINEAU N, et al. Swifts and swifts-LA: two concepts for high special resolution static micro- imaging spectrometers[C]//European Planetary Science Congress, Cascais Portugal: Europlanet Society, 2014: 439.
- [15] COARER E, VENANCIO L, KEM P, et al. Swifts: on-chip very high spectral resolution spectrometer[C]//International Conference on Space Optics, Rhodes Greece: SPIE, 2010: 2010.
- [16] SZAFRANIEC B, LAW J, BANEY D. Frequency resolution and amplitude accuracy of the coherent optical spectrum analyzer with a swept local oscillator[J]. Optics Letters, 2002, 12(27): 1896-1898.
- [17] HERAS C, SUBIAS J, PELAYO J, et al. Direct measurement of frequency and polarization dependences of cross-phase modulation in fibers from high-resolution optical spectra[J]. Optics Letters, 2006, 31(1): 14-16.
- [18] SZAFRANIEC B, LAW J, BANEY D. Frequency resolution and amplitude accuracy of the coherent optical spectrum analyzer with a swept local oscillator[J]. Optics Letters, 2005, 6(27): 1896-1898.
- [19] XING C, KE C, ZHANG K, et al. Polarization and wavelength-independent SBS-based filters for high resolution optical spectrum measurement[J]. Optics Express, 2017, 18(25): 20969-20982.
- [20] DOMINGO J, PELAYO J, VILLUENDAS F, et al. Very high resolution optical spectrometry by stimulated Brillouin scattering[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(4): 855-857.
- [21] VILLAFRANCA A, LASOBRAS J, ALONSO R, et al. Complex spectrum analysis of modulated optical signals using stimulated Brillouin scattering[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(23): 1938-1940.
- [22] BOYD R, RZAZEWSKI K, NARUM P. Noise initiation of stimulated Brillouin scattering[J]. Physics Review A: General Physics, 1990, 9(42): 5514-5520.
- [23] TKACHENKO A, LOBACH I, KABLUKOV S. All-fiber Brillouin optical spectrum analyzer based on self-sweeping fiber laser[J]. Optics Express, 2017, 15(25): 17600-17605.
- [24] VILLAFRANCA A, LAZARO J. Stimulated Brillouin scattering gain profile characterization by interaction between two narrow- linewidth optical sources[J]. Optics Express, 2005, 19(13): 7336-7341.
- [25] PARKER T, FARHADIROUSHAN M. Femtometer resolution optical wavelength meter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 4(13): 347-349.
- [26] 刘加庆, 刘磊, 刘雷, 等. 布里渊光谱仪的高精度波长标定方法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 20300011-20300012.
- [27] 刘加庆, 韩顺利, 刘磊, 等. 光纤受激布里渊增益谱线型特性分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(6): 2307-2312.