

文章编号: 1672-8785(2024)05-0047-10

一种近红外光纤布里渊光谱仪 分辨率增强方法

杜 特¹ 张 洋¹ 刘晨光² 刘帝佑¹ 刘加庆^{1*} 刘志明¹

(1. 中电科思仪科技股份有限公司, 山东 青岛 266555;

2. 国网山东省电力公司肥城市供电公司, 山东 泰安 271600)

摘 要: 对于研制的基于光纤受激布里渊效应的精密光谱分析仪, 受激布里渊增益谱宽的存在限制了可用的最佳光谱分辨率, 并造成受激布里渊增益系数与功率存在关联性。这些都会影响近红外光纤布里渊光谱仪的性能。针对上述问题, 提出了一种光谱分辨率增强方法。采用两级受激布里渊过程级联, 并结合待测光和泵浦光的功率调控, 使得受激布里渊过程处于小信号、线性高增益区。结果表明, 该方法能够实现约 1.4 倍的光谱分辨率增强效果, 突破了原理理论限制, 提升了近红外光纤布里渊光谱仪的性能。

关键词: 近红外光纤布里渊光谱仪; 光谱分辨率增强; 光纤受激布里渊效应

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.05.006

A Resolution Enhancement Method of Near-Infrared Optical Fiber Brillouin Spectroscopy

DU Te¹, ZHANG Yang¹, LIU Chen-guang², LIU Di-you¹, LIU Jia-qing^{1*}, LIU Zhi-ming¹

(1. Ceyear Technologies Co., Ltd., Qingdao 266555, China;

2. Feicheng Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Taian 271600, China)

Abstract: Due to the spectrum width of stimulated Brillouin gain, the best available spectral resolution is limited for the developed precision spectral analyzer based on the optical fiber stimulated Brillouin effect. In addition, the stimulated Brillouin gain coefficient is related to the power. These factors affect the performance of the NIR fiber Brillouin spectrometer. To solve these problems, the research is conducted and a spectral resolution enhancement method is proposed. In this method, two stages of stimulated Brillouin process are cascaded, combined with the power regulation of the measured light and the pump light, so that the stimulated Brillouin process is in the small signal linear high gain region. The results show that this method can achieve about 1.4 times spectral resolution enhancement. The spectral resolution enhancement method proposed in this paper breaks through the theoretical limitations and improves the performance of NIR fiber Brillouin spectrometer.

Key words: near-infrared optical fiber Brillouin spectroscopy; spectrum resolution enhancement; optical fiber stimulated Brillouin effect

收稿日期: 2023-10-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF0705901)

作者简介: 杜特(1994-), 男, 山东烟台人, 助理工程师, 主要从事光电测量仪器研究。

*通讯作者: E-mail: nl0203@126.com

0 引言

近红外光纤光谱分析仪广泛应用于光信息系统、光电集成芯片、全光芯片、微波光子学、光量子科学、特高压输电网等领域。特别是随着以超大容量、超高传输速率、超长传输距离为主要特征的新一代光纤网络的发展,为提高光纤频谱利用效率,多载波技术以及各种光纤信号调制格式的应用使得光纤信号的信道间隔越来越小,比如光正交频分复用光纤信号的典型信道间隔为 20~100 MHz。为满足先进调试验证与优化等光网络研发测试需求,以及光收发组件、光中继器等有源和无源光纤器件研发应用的测试需求,需要具备皮米量级或更高光谱分辨能力的精密光谱分析手段。光纤布里渊光谱仪是一种基于激光相干光谱测量的全新光谱分析技术,通过受激布里渊选频放大并结合可调谐激光器波长推扫,实现了光纤信号的光谱参数测量与分析。光纤受激布里渊效应的独特优势,使得光纤布里渊光谱仪能够在光通信常用的 C、L、O 等波段实现高光谱分辨率和波长精度(皮米级)的精密光谱测量与分析^[1-3]。

本文首先介绍了研制的近红外光纤布里渊光谱仪的主要性能及工作原理;然后在受激布里渊增益谱特性理论分析的基础上,给出了一种光谱分辨率增强的原理;最后对文中提出的光谱分辨率增强方法进行了实验验证。结果表明,本文所提方法能够实现优于 1.4 倍的光谱分辨率增强。

1 近红外光纤布里渊光谱仪

研制的近红外光纤布里渊光谱仪(整机外观见图 1)包括待测光输入模块、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、电源模块等。进行光纤信号光谱特性参数测量与分析时,被测信号光经待测光输入通道传输到光学测试模块,并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,实现光谱参数等的测

量功能。在此基础上,基于获取的光纤信号光谱参数实现了光纤信号的调制格式、光谱信噪比等测试功能。研制的近红外光纤布里渊光谱分析仪能够实现 1525~1565 nm 波段、优于 0.3 pm 的超高光谱分辨率、±2 pm 波长精度、1~20 nm/s 测量速度的近红外光纤信号精密光谱参数测量与分析。



图 1 近红外光纤布里渊光谱仪外观图

2 近红外光纤布里渊光谱仪的原理

简要介绍近红外光纤布里渊光谱仪的数学模型^[4-5]。首先,光纤受激布里渊效应的基本数学公式为

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

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

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

式中, z 为介质光纤的长度坐标, λ 为光波长, I_p 、 I_s 、 I_B 分别表示泵浦光、待测光和斯托克斯光, A_{eff} 和 α 分别表示介质光纤有效面积和衰减系数, I_{esp} 表示自发布里渊散射光, Ω_B 为受激布里渊频移, Ω_B 为正时发生衰减效应, Ω_B 为负时发生放大效应, g_B 为受激布里渊增益系数。

假定待测光 I_s 从介质光纤一端的 $z=L$ 位置进入, 泵浦光 I_p 则从介质光纤另一端的 $z=$

0 位置注入介质光纤, 那么在介质光纤中相对传播的待测光和泵浦光相遇时, 就会发生受激布里渊效应, 导致待测光中波长为 λ_B 处的光谱成分被放大。在忽略介质光纤衰减的条件下, 待测光其余波长处的光谱成分则保持不变。因此, 介质光纤 $z=0$ 位置处的出射光可表示为

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

式中, $I_s(\lambda_B)$ 表示受激布里渊选频放大的待测光的光谱分量, $I_s(\lambda \neq \lambda_B)$ 表示其余的待测光分量, $I_p(0, \lambda_B)$ 表示进入介质光纤的泵浦光, L_{eff} 是介质光纤的有效长度。

泵浦光波长与待测光中被放大光谱成分的波长存在以下关系:

$$\lambda_p = \lambda_B + 2\pi/\Omega_B \quad (5)$$

当泵浦光功率为零时, 介质光纤 $z=0$ 位置处的出射光变为

$$\tilde{I}_s(0, \lambda) = I_s(L, \lambda_B) + I_s(L, \lambda \neq \lambda_B) \quad (6)$$

因此, 布里渊光谱仪的分光光谱 $S_p(\lambda)$ 可通过联立式(4)与式(6)移除待测光中的未放大分量得到:

$$S_p(\lambda) = I_s(0, \lambda) - \tilde{I}_s(0, \lambda) = I_s(L, \lambda_B) \{ \exp[g_B I_p(0, \lambda_p) L] - 1 \} \quad (7)$$

然后依次改变泵浦光波长, 就可得到待测光对应波长处的分光光谱信号。通过光谱重构算法, 得到待测光的精密光谱数据 $S_m(\lambda)$, 并以此为基础进行后续分析。整个光谱测量过程如图 2 所示。

3 光谱分辨率增强方法

相关研究表明, 光纤本征受激布里渊增益谱宽主要由材料的声子寿命定义, 而声子寿命又取决于光纤材料。布里渊光谱分析数学模型表明, 考虑到用作泵浦光的可调谐激光器的线宽通常在千赫兹量级, 因此布里渊光谱分析仪的光谱分辨率上限主要由光纤本征受激布里渊增益谱宽决定^[6]。

针对近红外光纤布里渊光谱仪的特点, 本文提出了一种光谱分辨率增强方法。首先, 在研究不同介质光纤影响的基础上, 通过采用高受激布里渊增益工作介质、优化滤波组件设计、缩短所用光纤长度来提升光谱分光性能, 并结合泵浦信号功率与待测光功率匹配、选择合适受激布里渊增益谱型等方法, 降低光纤本征受激布里渊增益谱宽, 从而改善布里渊光谱

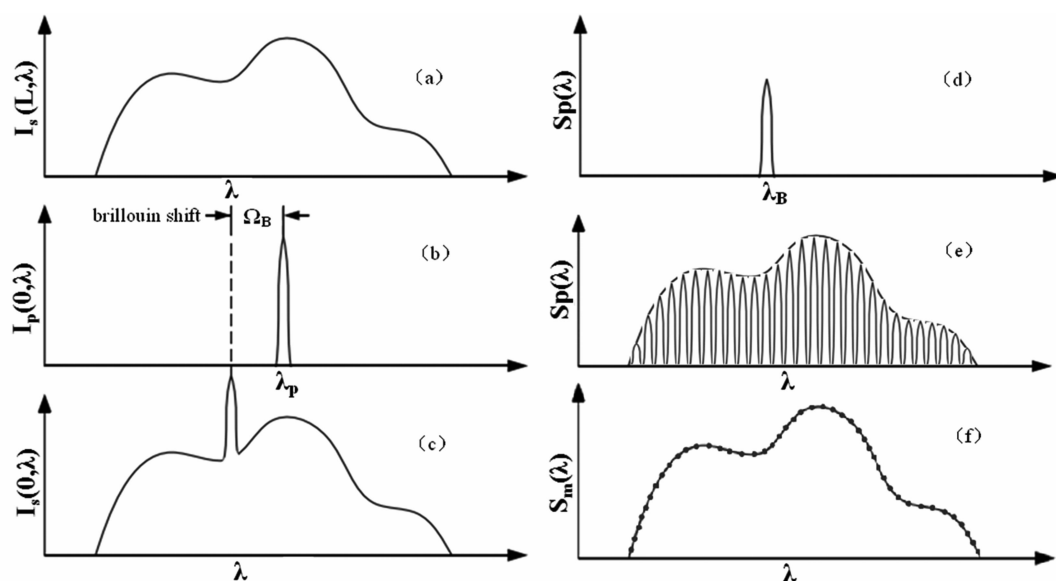


图 2 布里渊光谱测量流程: (a)待测光; (b)泵浦光; (c)选频放大后待测光的光谱; (d)分光光谱; (e)可调谐激光器推扫得到的全波段分光光谱; (f)光谱重构后的测量光谱

仪的光谱分辨率；其次，开展光谱分辨率增强方法研究，采用多级受激布里渊过程级联的受激布里渊增益谱宽压缩技术，在保证受激布里渊过程处于小信号、线性高增益区的前提下，通过分级泵浦的方式提高泵浦功率，从而提升布里渊光谱仪的光谱分辨率、动态范围、信噪比等核心指标。

3.1 受激布里渊增益谱特性分析

由光纤受激布里渊效应数学模型可知，受激布里渊增益谱线型由低增益时的洛伦兹线型演进为高增益时的高斯线型，增益中间区域则是较为复杂的谱型^[6]。针对这一情况，首先对受激布里渊增益谱进行归一化处理，然后使用 k 次拟合洛伦兹函数来表征随增益变化的受激布里渊增益谱的线型。 $k=1$ 时，为常规洛伦兹函数；而对于更高的 k 值，则趋近于高斯函数。因此， k 次拟合洛伦兹函数能够很好地表征受激布里渊增益谱线型。

$$g_B(\omega) = \left[\left(\frac{\Gamma_B}{2\sqrt{2^{1/k}-1}} \right)^2 / \left\{ \left(\frac{\Gamma_B}{2\sqrt{2^{1/k}-1}} \right)^2 + (\omega)^2 \right\} \right]^k \quad (8)$$

式中， ω 为角频率， Γ_B 为受激布里渊增益谱宽。

基于布里渊光谱数学模型，对受激布里渊后向散射信号与泵浦光功率的关系进行了仿真（结果见图 3）。可以看出，当泵浦光功率达到

阈值功率时，受激布里渊增益谱会出现饱和效应。因此，高泵浦光功率时对应的受激布里渊增益谱线型受到受激布里渊增益饱和效应以及光谱分光模块非线性等因素的影响，会导致实际获取的受激布里渊增益谱比 Preussler S 等^[6]给出的理论解析解复杂得多。也就是说，在受激布里渊效应的线性增益区外，光谱分光模块实际测量获取的是一个存在畸变的分光光谱信号。这是因为此时的增益谱线型与待测光的卷积并不满足卷积关系，而是符合以下同质条件：

$$(a \cdot f) * g = a \cdot (f * g) \quad (9)$$

式中， a 表示缩放因子， f 和 g 为未被理论描述的卷积函数。

3.2 基于级联的光谱分辨率增强

通过上述分析可知，布里渊光谱仪中泵浦光和待测光的功率对分光光谱信号质量影响很大。因此，本文采用分级泵浦方案，在确保受激布里渊过程处于小信号、线性高增益区的同时，使待测光中的选频放大信号获得足够高的增益，从而达到优化光谱分辨率、动态范围、信噪比等指标的目的，并最终突破受激布里渊效应的限制，实现光谱分辨率增强。

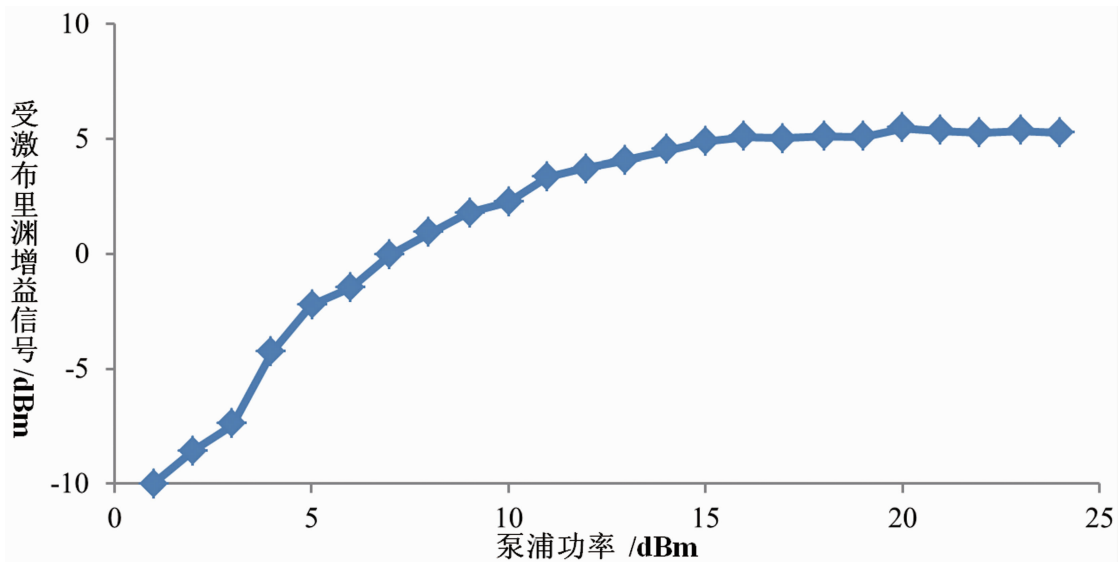


图 3 泵浦功率与受激布里渊增益信号的关系

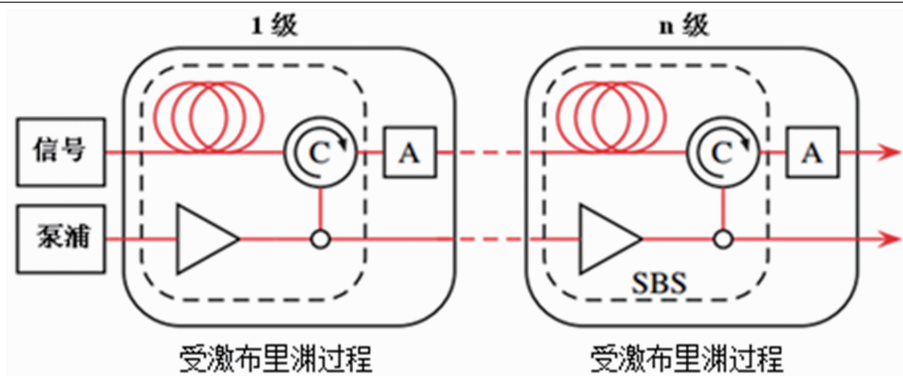


图 4 光谱分辨率增强原理框图

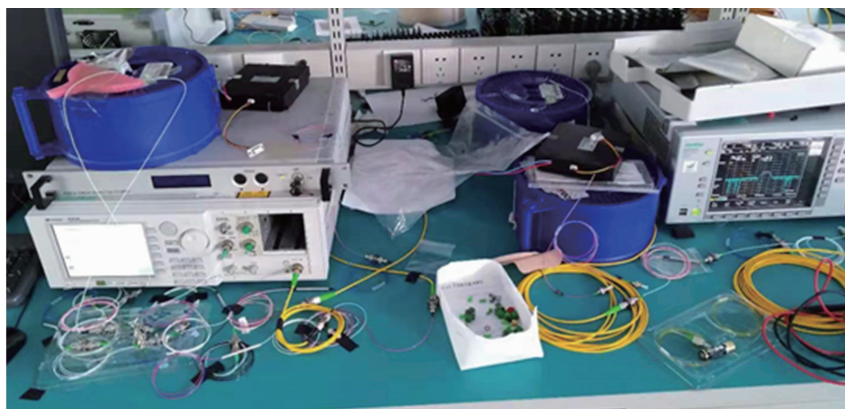


图 5 光谱分辨率增强实验装置

基于级联方法的光谱分辨率增强原理框图如图 4 所示。在多级受激布里渊过程级联的系统中, 每级结构类似, 都包含用于布里渊过程的介质光纤、将泵浦信号放大至合适功率水平的光放大器以及将泵浦光耦合到介质光纤并将后向受激布里渊散射信号耦合到下级系统的光环形器; 在每级系统中, 首先对输入光信号进行适当衰减, 以便为每级受激布里渊过程提供类似的初始条件, 并防止受激布里渊饱和效应的发生。

在多级受激布里渊过程级联的系统中, 分光光谱信号的总增益为

$$G = e^{ng - nA} = \exp \left[\frac{ng_0 \left(\frac{\Gamma_B}{2} \right)}{(\omega - \omega_0)^2 + \left(\frac{\Gamma_B}{2} \right)^2} - nA \right] \quad (10)$$

式中, n 为级联的级数, A 为每级的光衰减量, g_0 为受激布里渊效应的峰值增益, Γ_B 为受激布里渊增益谱宽, ω 为角频率, ω_0 为受激

布里渊增益峰值点对应的角频率。

对应的分光光谱信号的半高全宽为

$$\Delta\omega = \Gamma_B \sqrt{\frac{\ln 2}{ng_0 - \ln 2}} \quad (11)$$

依据上述理论公式可知, 两级级联系统在系统实现复杂性和所用资源、分辨率改善等方面具备很好的折中性。因此, 本文采用两级受激布里渊过程级联来实现光谱分辨率增强。

4 光谱分辨率增强试验及分析

本文搭建了图 5 所示的实验装置。首先通过实验分析了受激布里渊增益谱特性以及光功率等的影响, 然后验证了本文所提光谱分辨率增强方法的可行性。

4.1 受激布里渊增益特性实验

为得到接近理论情况的高质量受激布里渊增益信号, 以便分析受激布里渊增益谱的线型特性及其影响因素, 首先根据图 3 所示的泵浦功率与受激布里渊增益信号的仿真结果, 改变所用泵浦光功率, 在确保受激布里渊过程处于

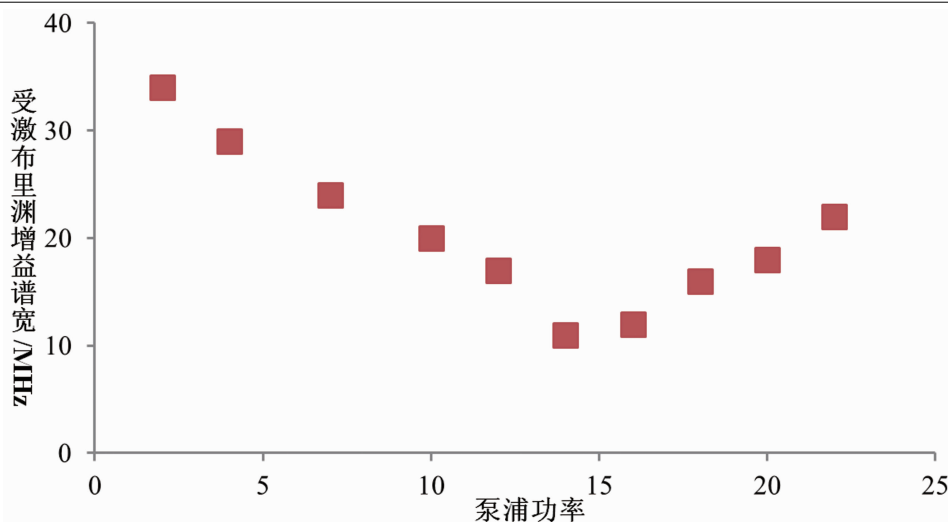


图 6 泵浦功率与受激布里渊增益谱宽的关系

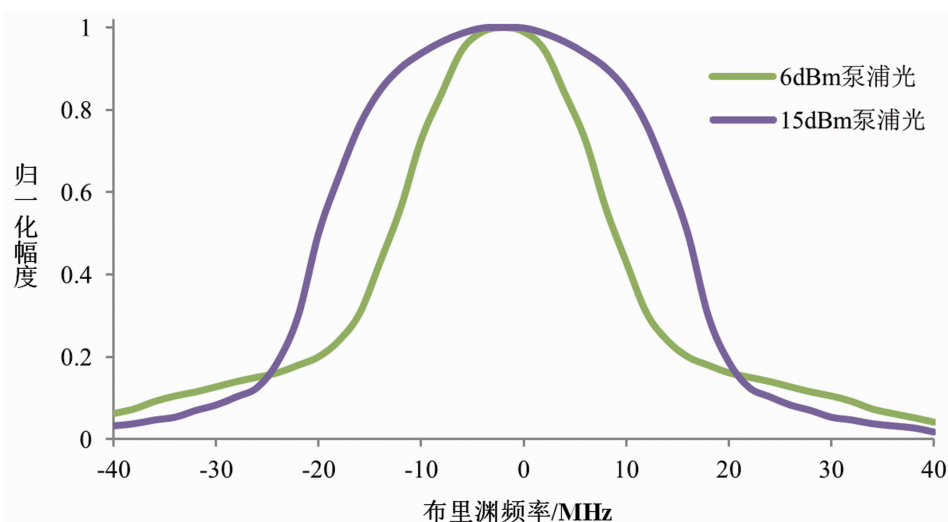


图 7 泵浦功率为 6 dBm 和 15 dBm 时直接测得的增益谱

线性增益区的条件下, 分别测量得到低增益时洛伦兹线型的增益谱数据以及高增益时高斯线型的增益谱数据, 然后对测得的两种类型的增益谱数据进行归一化等处理, 以获取增益谱与待测光的有效光谱卷积信息^[7]。

通过实验测量得到的泵浦功率与受激布里渊增益谱宽的对应关系如图 6 所示。可以看出, 当泵浦光功率没有超过阈值功率时, 受激布里渊增益谱宽随着泵浦光功率的增大而降低; 但是当泵浦光功率超过 15 dBm 时, 测得的增益谱宽会随泵浦光功率的继续提高而增大, 这是因为此时泵浦光功率达到阈值功率, 导致受激布里渊过程出现饱和效应(与图 3 的仿真结果一致)。由于饱和效应的存在, 需要

对测得的增益谱数据进行归一化校正, 才能得到真实的增益谱宽信息。

泵浦光功率为 6 dBm 和 15 dBm 时的受激布里渊增益谱如图 7 所示。可以看出, 15 dBm 时的增益谱比 6 dBm 时宽。这样也就通过实验验证了增益谱线型变化依赖于受激布里渊过程的增益系数, 即与泵浦光功率存在关联。此时就出现了一个问题: 很难像理论模型那样, 通过提高泵浦光功率直接测量得到高斯线型的受激布里渊增益谱。这是因为随着泵浦光功率超过阈值功率(出现受激布里渊增益饱和效应), 直接测得的受激布里渊后向散射信号存在畸变现象, 从而导致实际测量结果与理论模型不符。

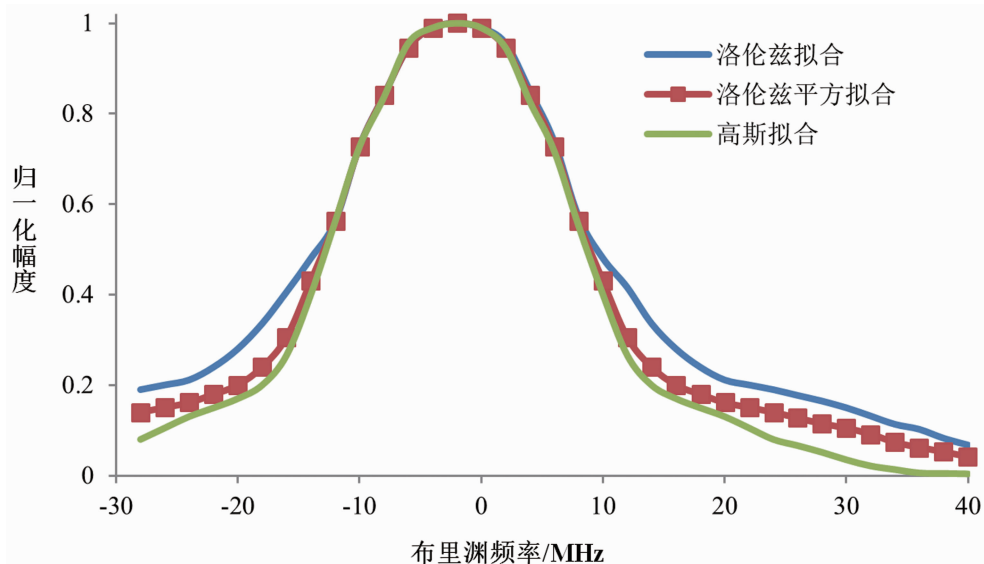


图 8 归一化受激布里渊增益谱的拟合结果

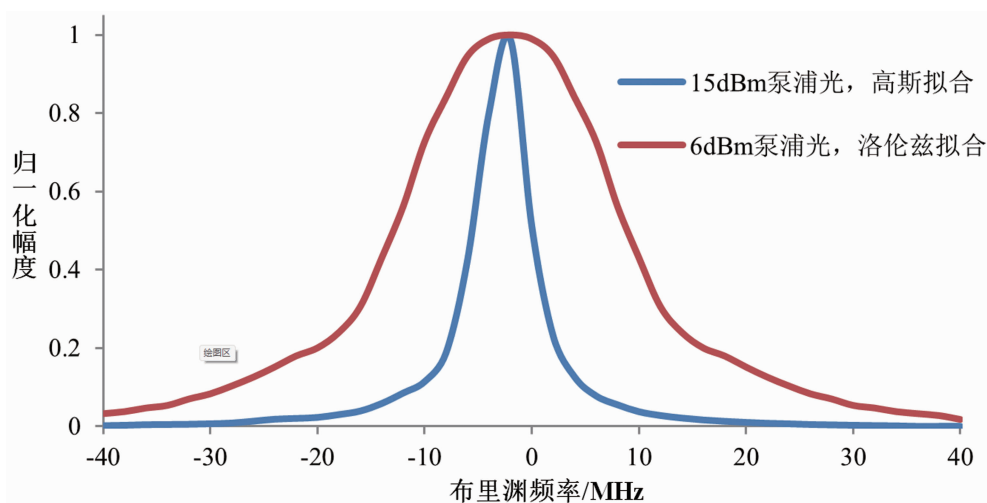


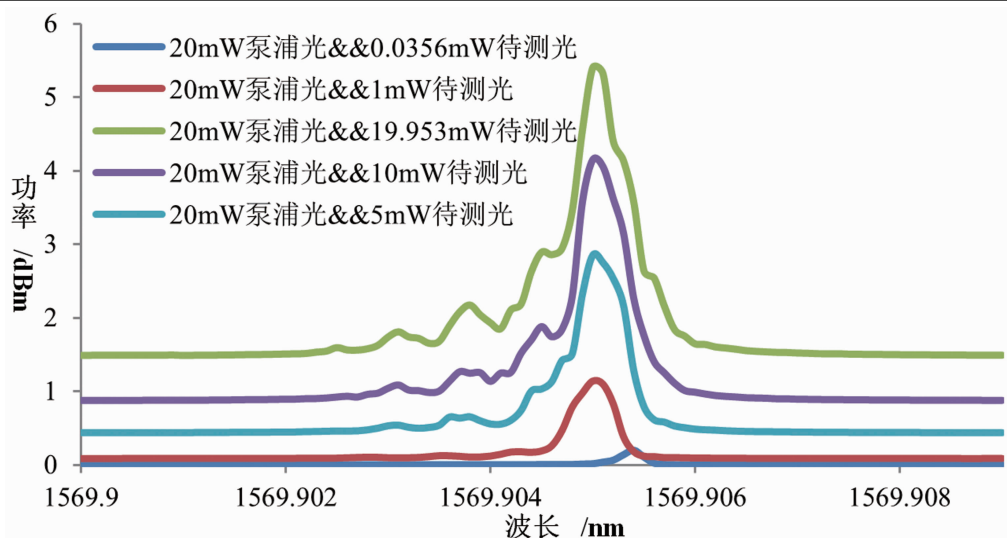
图 9 泵浦功率为 6 dBm 和 15 dBm 时经归一化校正得到的增益谱

针对这一情况,就需要对直接测得的存在畸变的增益谱数据进行归一化校正处理,从而得到接近真实的增益谱数据。经归一化处理移除畸变影响后的测量数据如图 8 所示。可以看出,此时的增益谱线型已经非常接近理论上的高斯线型了。

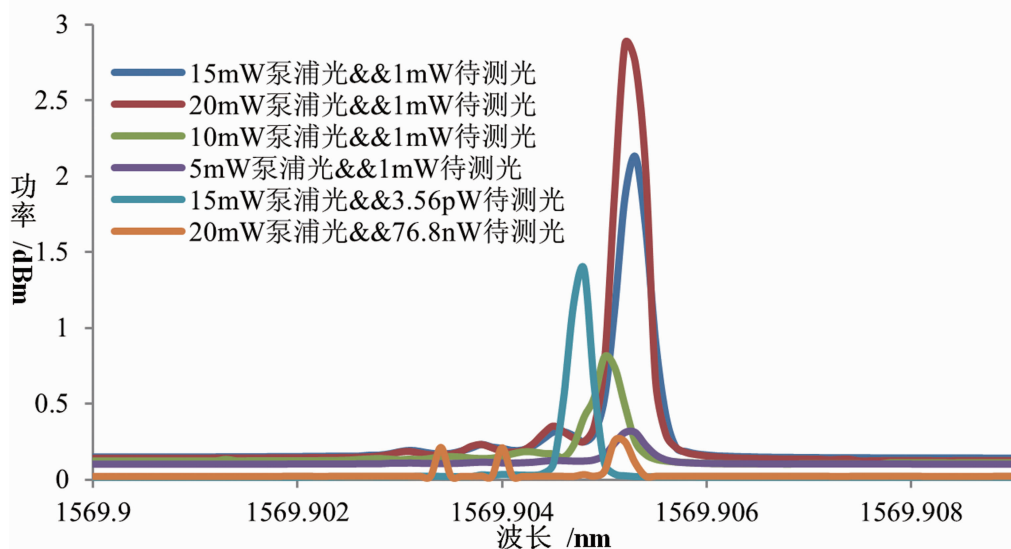
泵浦光功率为 6 dBm 和 15 dBm 时的测量数据经过归一化处理后的增益谱如图 9 所示。可以看出,经过校正处理后,得到了真实的增益谱宽。这与理论分析结果相吻合。

接着通过实验分析了泵浦光和待测光的光功率对分光光谱的影响。实验结果如图 10 所示,可见待测光及泵浦光都会直接影响分光光

谱信号的光谱分辨率、动态范围、信噪比等指标。这主要是因为当待测信号功率水平达到泵浦信号功率水平时,待测信号同样会引起光纤受激布里渊效应,产生后向散射信号,造成泵浦信号功率衰减以及光纤受激布里渊饱和效应,使得待测信号选频放大功率信号的功率降低,进而引起选频放大信号的谱宽增大,最终导致分光信号光谱分辨率随待测信号功率水平的提高而出现恶化情况。因此,为改善基于光纤受激布里渊效应的光谱分析系统的性能,需要对待测光及泵浦光的功率水平进行控制,并采用光衰减器结合补偿功率计量方法,保证待测信号的测量精度。



(a) 待测光功率对分光光谱的影响



(b) 泵浦光功率对分光光谱的影响

图 10 光功率对分光光谱信号的影响分析

4.2 基于级联的光谱分辨率增强试验

基于图 5 所示的实验装置, 首先采用包含 2 km 长度光纤的单级布里渊系统, 并仔细调整泵浦光和待测光的功率水平, 以实现分光光谱信号的最佳分辨率。此时得到的分光光谱信号如图 11(a)所示, 获取光谱信号的半高全宽为 0.422 pm。然后采用均包含 2 km 长度光纤的两级级联布里渊系统, 两者之间由衰减量可变的光衰减器连接。通过调整两级布里渊系统的泵浦光和待测光的功率水平以及两级布里渊系统间的光衰减器的衰减量, 确保第一级布里

渊系统输出的信号光不会在第二级布里渊系统中出现饱和现象, 从而获取具有最佳分辨率的分光光谱信号(见图 11(b))。此时获取的光谱信号的半高全宽为 0.3 pm。对比单级布里渊系统和两级级联布里渊系统获取的分光光谱信号后可知, 本文方法能够实现优于 1.4 倍的光谱分辨率增强。

5 结束语

本文通过研究发现光纤本征受激布里渊增益谱宽的存在是近红外布里渊光谱仪光谱分辨能力受限的主要原因。针对这一问题, 本文深

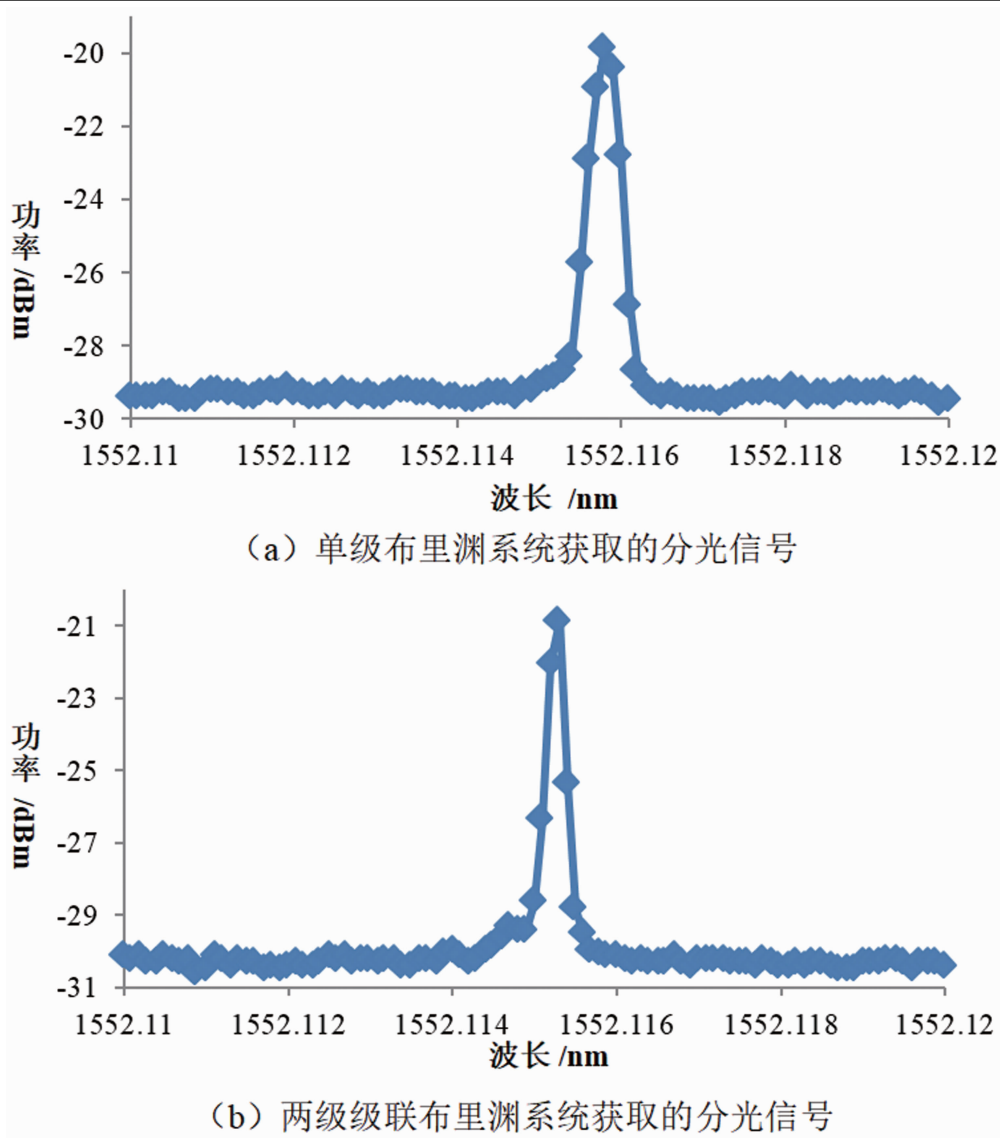


图 11 光谱分辨率增强实验结果

入研究了受激布里渊增益谱的线性特性, 并指出在工作介质确定的情况下, 影响受激布里渊增益谱宽的主要因素是相互作用光的功率水平。因此, 本项目采用两级受激布里渊过程级联方法, 确保受激布里渊过程处于小信号、线性高增益区, 实现了受激布里渊增益谱宽的压缩, 达到了增强布里渊光谱仪分辨率的目的。实验结果表明, 该方法能够带来优于 1.4 倍的光谱分辨率增强, 完全可满足 1525~1565 nm 波段、亚皮米量级光谱分辨率的光纤布里渊光谱仪的分辨率增强需求。本文的相关研究能够很好地满足高速光网络技术等对精细光谱参数测量与分析的需求。但同时也应看到, 本文方

法也存在一定的局限性, 并不能完全消除受激布里渊增益谱宽对分辨率的限制。这就限制了进一步提升布里渊光谱仪分辨率的潜力。因此, 后续需要研究其他原理的光谱分辨率增强方法, 进一步提升布里渊光谱仪的光谱分辨率等指标, 进而更好地满足光电技术的快速发展对更高光谱分辨率的精密光谱参数的分析需求。

参考文献

- [1] Cartledge J 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] 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): 5104–5118.
- [4] 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): 204–221.
- [5] Wise A, Moshe T, Zadok A. Sharp tunable optical filters based on the polarization attributes of stimulated Brillouin scattering [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(22): 21945–21955.
- [6] Preussler S, Schneider T. Stimulated Brillouin scattering gain bandwidth reduction and applications in microwave photonics and optical signal processing [J]. *Optical Engineering*, 2016, **55**(3): 311101–311108.
- [7] 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.