

doi:10.13756/j.gtxyj.2023.01.007

光电器件研究与应用

郭丽君,谭中伟.基于受激布里渊散射效应的光谱分析[J].光通信研究,2023(1):58-62

GUO L J, TAN Z W. Spectral Analysis based on Stimulated Brillouin Scattering Effect[J]. Study on Optical Communications, 2023(1):58-62

基于受激布里渊散射效应的光谱分析

郭丽君,谭中伟

(北京交通大学 光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室,北京 100044)

摘要:光学滤波器应用广泛,在许多应用中至关重要,包括光通信、光谱学、电子学和光学传感器等领域。而基于受激布里渊散射(SBS)效应的微波光子滤波器(MPF)不仅具有低阈值和高增益等优点,而且还具有可重构和可调谐的特性。文章将其应用在光谱分析中,利用该滤波器的可调谐性,使其扫描整个待测信号的光谱,就能对待检测光谱的不同频率成份进行分时提取检测。通过设置该滤波器泵浦支路中扫频激光器的中心频率,在泵浦激发产生SBS效应后,用光谱分析仪测出滤波器每次的输出功率,从而分析得出待测信号的光谱。研究表明,随着泵浦功率的增加,滤波器的增益和带外抑制比(OOBR)先逐渐增高,然后降低,拐点在泵浦功率为5 dBm左右,且滤波器的动态范围为-35~-20 dBm。

关键词:光谱分析;微波光子滤波器;受激布里渊散射;可调谐滤波器

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2023)01-0058-05

Spectral Analysis based on Stimulated Brillouin Scattering Effect

GUO Li-jun, TAN Zhong-wei

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Optical filters are widely used in many applications, including optical communication, spectroscopy, electronics and optical sensors. The Microwave Photonic Filter (MPF) based on Stimulated Brillouin Scattering (SBS) effect not only has the advantages of low threshold and high gain, but also has the characteristics of reconfiguration and tunability. In this paper, we apply MPF to spectral analysis. Using the tunability of the filter, the spectrum of the whole signal can be measured. And the different frequency components of the signal can be extracted by time-sharing. By setting the center frequency of the swept laser in the pump branch of the filter, the output power of the filter is measured by the optical spectrum analyzer after SBS effect generating by the pump excitation, so as to analyze the spectrum of the signal light. The results show that with the increase of pump power, the filter gain and Out of Band Rejection Ratio (OOBR) first increase and then decrease. The inflection point is about 5 dBm and the dynamic range of the filter is from -35 to -20 dBm.

Key words: spectral analysis; MPF; SBS; tunable filter

0 引言

光谱是电磁辐射(光波)按照波长的有序排列,当光与物质相互作用时,这种有序排列中蕴含的信息会发生变化,通过光谱分析可以对其进行解析。区别于其他测量方法,光谱分析提供了一种从频域角度解析光与物质间相互作用的方式。

已有很多光谱分析方案^[1-3]被提出,主要有干涉调制型^[4-5]、色散型^[6-7]和滤波型^[8]等。干涉调制型光谱分析方案是利用光程差可调的干涉仪记录待检信号光的相位与幅度,并主要通过傅里叶变换的反调制手段复原其光谱,但其受干涉仪光程差调制能力的限制,而且测试速度较慢。色散型光谱分析可

分为棱镜色散光谱分析、衍射光栅光谱分析和法布里·珀罗多光束干涉色散光谱分析,这种方案是利用色散元件将待检信号光中的不同频率分量分散到空间域上的光谱分析方法,但其光谱分辨率一般不小于0.01 nm,无法对光谱进行精细检测。

滤波型光谱分析方案可以克服上述缺点,其利用中心频率不同的光学滤波器对待检信号光中的不同频率成分进行抽取,进而复原其光谱。但是,早期以滤光片为光学滤波器时,其中心波长是确定的,所以仅能提取少数分立的频率分量,无法实现测量范围内所有光谱信息的连续提取。由于受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)效应的带宽仅有30~50 MHz,远小于普通光学滤波器,因

收稿日期:2022-04-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61875008);鸿鹄创新中心开放基金资助项目

作者简介:郭丽君(1995-),女,河北张家口人。硕士,主要研究方向为微波光子学。

通信作者:谭中伟,教授。E-mail: zhwtan@bjtu.edu.cn

此,有望获得分辨率非常高的光谱检测方法。基于SBS效应的微波光子滤波器(Microwave Photonic Filter, MPF)不仅具有低阈值和高增益等优点,而且还具有可重构和可调谐的特性。

因此,本文研究基于SBS效应^[9-12]的滤波型光谱分析方法,通过调谐滤波器的中心波长以遍历整个待测信号的光谱,经过测量该滤波器的输出功率,从而得到待测信号的光谱。

1 设计方案

1.1 单级结构基于SBS效应的MPF

单级结构基于SBS效应的MPF的结构如图1所示。在上支路中,将激光器(Laser Diode, LD)输出的光信号经过相位调制器(Phase Modulator, PM)得到的调制信号作为信号光,经过光隔离器(Optical Isolator, ISO)和光衰减器(Optical Attenuator, OA)正向进入到单模光纤(Single-mode Fiber, SMF)中;在下支路中,LD输出的光经过掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)放大到足够的功率后得到泵浦光,然后通过偏振控制器(Polarization Controller, PC)。信号光和泵浦光在SMF中相遇时会发生SBS效应,产生布里渊增益谱(或损耗谱),使落入其中的信号被放大(或缩小)。然后通过光环行器(Optical Circulator, OC)进入到光电探测器(Photodetector, PD)中,拍频产生所需要的射频(Radio Frequency, RF)信号。

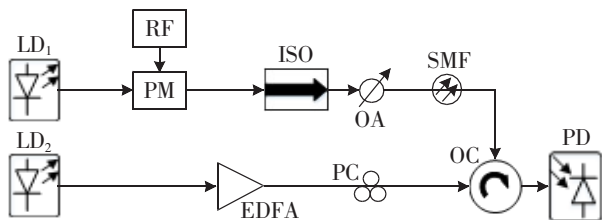


图1 单级结构基于SBS效应的MPF结构图

Figure 1 Structure diagram of MPF based on SBS effect with unipolar structure

表1所示为在常规单级结构基于SBS效应的MPF中,当泵浦光的功率分别在5和8 dBm的情况下,激发SBS效应时所获得的增益水平。由表可知,从这3个信号光布里渊增益的增加量来看,大信号的布里渊增益增加的效果并不明显。这是因为,当信号光功率过高时,会出现信号增益发生饱和效应的现象,这个时候会出现非常强烈的受激拉曼散射,泵浦光的功率也会被极大地消耗,对于增益的提升来说是非常有限的。

表1 单级结构基于SBS效应的MPF获得的增益水平

Table 1 Gain level of MPF based on SBS effect with single-stage structure

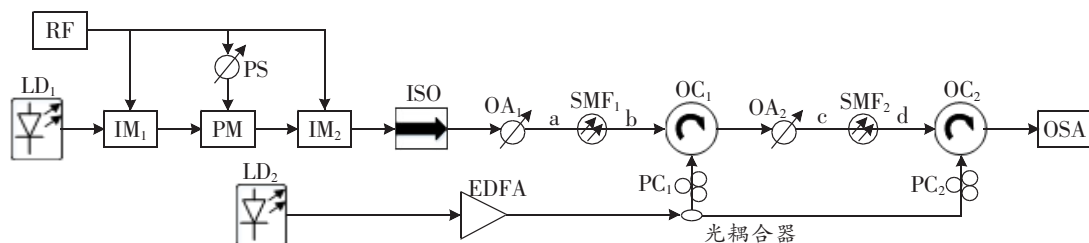
泵浦功率/dBm	信号功率/dBm	增益/dBm
5	-60	-48
	-40	-32
	-20	-5
8	-60	-38
	-40	-14
	-20	0

1.2 系统结构

为了避免泵浦光功率过高而造成上述问题,我们设计了一种把泵浦分段的双级结构来提升基于SBS效应的MPF的频响特性,用此结构来进行频谱分析,其结构如图2所示。整个系统由上下两部分组成,分别是信号光支路和泵浦光支路。在上支路中,将LD₁输出的光信号经过级联的两个强度调制器(Intensity Modulator, IM)和PM调制得到的光频率梳作为待检测的信号光,经过ISO和OA正向进入到级联的两段SMF中;在下支路中,LD₂输出的光经EDFA放大到足够的功率后得到泵浦光,泵浦光被光耦合器一分为二,分别通过各自支路的PC和OC后,反向进入级联的两段SMF中,发生SBS效应,会产生布里渊增益谱,使落入其中的信号被放大,实现滤波器的功能。调谐滤波器的中心波长,重复上述操作,直到遍历整个待测信号的频率,最后根据频率与功率的关系即可得到待测信号的光谱形状。两段光纤中间OA的作用是控制进入第2段光纤的信号功率,避免输入信号在第2级放大时功率过高导致增益饱和。

单级结构的高功率泵浦光在这里等效为被分成两个功率较低的泵浦光,然后分别进入到两级光纤中,在每一级放大过程中都不会因为泵浦光功率过高而造成信号光增益的饱和;并且在两级之间加入了OA,通过设置适当的衰减值,使得每一级需要被放大的信号光功率也不会过高,从而也不会过度消耗泵浦光的功率。其次,当泵浦光功率降低后,不再满足受激拉曼散射的阈值,也就不会发生受激拉曼散射,所以就避免了拉曼散射的泵浦光功率和布里渊散射的泵浦光功率出现竞争问题。

图2所对应的信号波形示意图如图3所示,图3(a)所示的正向传输的待测信号与反向传输的泵浦光进入第1段光纤后,会产生布里渊增益区,使落入该区的待测信号被放大,被放大后的信号如图3(b)



注:PS为移相器;OSA为光谱分析仪;a、b、c和d分别对应图3中的分图(a)、(b)、(c)和(d)。

图2 基于SBS效应的滤波型光谱分析

Figure 2 Filtered spectral analysis based on SBS effect

所示。接下来,为了降低第1级放大的信号光功率,避免过度消耗泵浦光的功率,需要对信号光进行衰减,衰减后的信号如图3(c)所示。最后,衰减后正向传输的信号光与反向传输的泵浦光进入到第2段光纤,对落入该区的信号进行第2次放大,经过两次放大后的信号光如图3(d)所示,由图可知,增益区内的信号与增益区外的信号相比,功率提高的很明显。

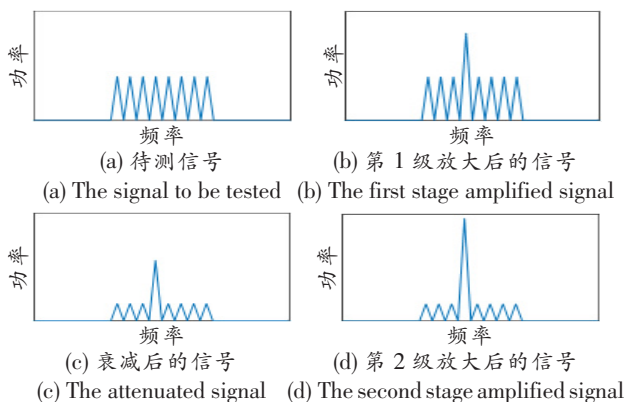


图3 对应的信号波形示意图

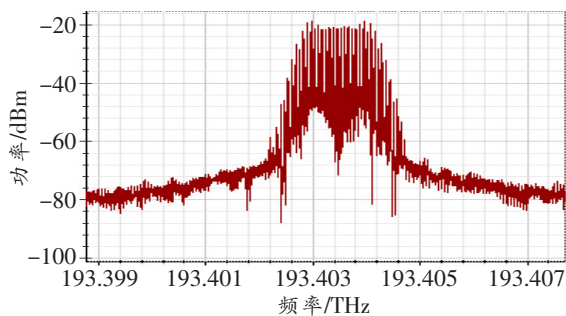
Figure 3 Corresponding signal waveform diagram

2 系统仿真与结果分析

2.1 系统仿真

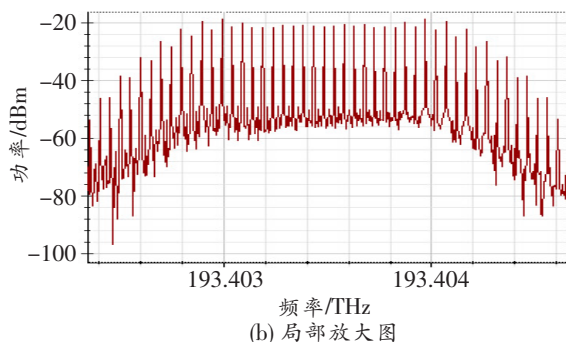
为了验证方案的可行性,我们利用 Optisystem 光学仿真软件进行了数值仿真。在上支路中,LD₁的频率设置为 193.403 48 THz,功率默认为 0 dBm,RF 采用的是频率为 50 MHz 的正弦信号,经过级联的两个 IM 和 PM 后可以得到频率间隔为 50 MHz 的光频梳,其光谱图及局部放大图如图 4 所示。

将 OA₁ 的衰减值设置为 20 dBm。下支路中,LD₂ 选用的是中心频率范围从 193.413 48 THz 递增到 193.415 48 THz 的扫频 LD,布里渊增益谱的自然线宽设置为 50 MHz。为了使滤波器的中心波长可以遍历整个待测信号的光谱,这里扫频 LD 的



(a) 总图

(a) General drawing



(b) 局部放大图

(b) Partial enlarged drawing

图4 PM信号的光谱图

Figure 4 Spectrum of PM signal

中心频率间隔也设置为 50 MHz。两级泵浦的功率都设置为 5 dBm,并且布里渊频移量设置为 11 GHz。两级泵浦光和信号光在光纤中相遇时会发生 SBS 效应,产生布里渊增益谱,使落入其中的信号被相应地放大,然后可以检测出每次增益谱内信号被放大的功率,得到如图 5 所示增益区内信号频率与输出功率的关系图,即待测信号的光谱图。

将图 5 与图 4(b)作比较可知,两个图的光谱形状几乎相同。这就验证了方案的可行性。

2.2 泵浦功率对光谱分析的影响

不同泵浦功率产生的布里渊增益不同,为了更好地实现光谱检测的目标,我们对泵浦功率的影响进行了分析。为了便于观察,将泵浦支路 LD₂ 的频率设置为 193.414 53 THz,使光频梳中频率为 193.403 53 THz 的梳齿正好落入布里渊增益区,使

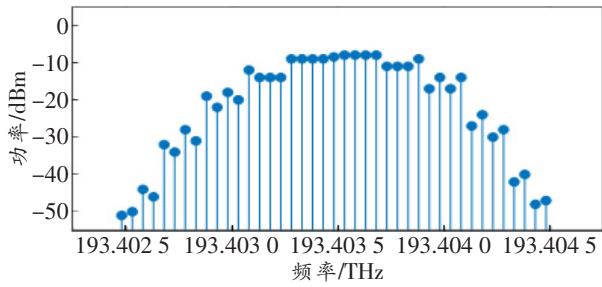


图5 信号的频率与输出功率的关系图

Figure 5 Relationship between signal frequency and output power

之被放大,其余的参数设置不变。然后改变泵浦光功率,这里将泵浦功率分别设置为2、3、4、5和6 dBm,观察5次滤波器的频谱图,如图6所示。由图可知,随着泵浦光功率的变化,滤波器的增益和带外抑制比(Out of Band Rejection Ratio, OOBRR)也随之变化。

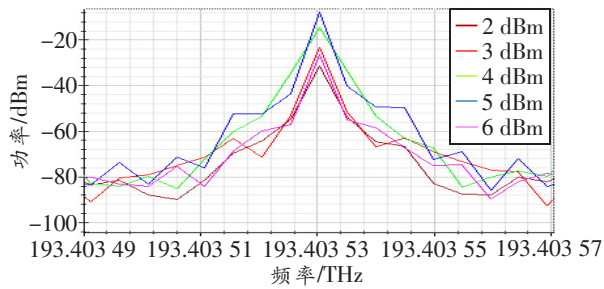


图6 不同泵浦功率下的频谱图

Figure 6 Spectrum under different pump power

为了更清晰地观察这两个量的变化,分别绘制滤波器的增益与泵浦功率的关系图和OOBRR与泵浦功率的关系图,如图7和图8所示。由图7可知,

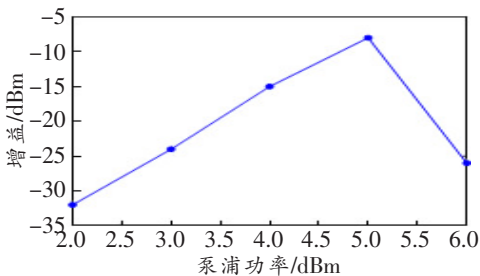


图7 滤波器增益与泵浦功率的关系

Figure 7 Relationship between filter gain and pump power
随着泵浦光功率的增大,滤波器的增益先逐渐增大,然后减小,拐点在泵浦功率为5 dBm时。由图8可知,随着泵浦光功率的增大,滤波器的OOBRR也先逐渐增大,然后减小。在泵浦功率由2 dBm增大到5 dBm的过程中,OOBRR相应地从48 dB增大到63 dB,这样的增大对整个系统来说是有利的。但是

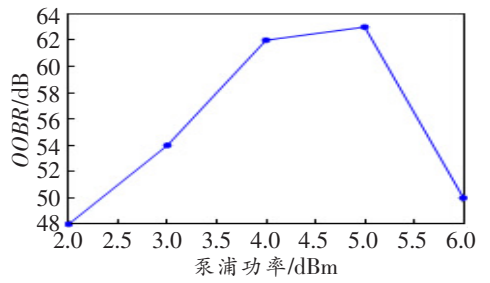


图8 OOBRR与泵浦功率的关系

Figure 8 Relationship between OOBRR and pump power

随着泵浦光功率的继续增大,会出现四波混频等其他非线性效应,反而会消耗泵浦光功率,导致滤波器的增益和OOBRR也会相应地降低。当泵浦功率为5 dBm时,滤波器的增益最大为-8 dBm,OOBRR最大为63 dB。

2.3 对滤波器动态范围的分析

为了能够对不同光谱进行检测,需要知道不同输入功率下的情况。因此,我们还对滤波器的动态范围进行了仿真。图9所示为不同泵浦功率下,滤波器输入信号功率和输出信号功率的变化规律曲线。为了便于观察,这里泵浦支路LD的频率仍然设置为193.414 53 THz,使光频梳中频率为193.403 53 THz的梳齿正好落入布里渊增益区,使

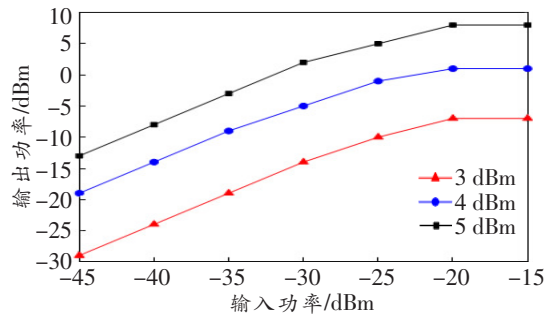


图9 不同泵浦功率下,滤波器的输出与输入信号功率的关系曲线

Figure 9 Relation curve between output and input signal power of filter under different pump power

之被放大,其余的参数设置不变。由图可知,滤波器输入信号功率在-45 ~ -15 dBm范围内,当泵浦功率分别为3(三角线)、4(圆点线)和5 dBm(方块线)时,随着输入信号功率的增大,滤波器的输出信号功率先逐渐增大,然后趋于平稳。当输入信号的功率低于-45 dBm时,系统中存在的噪声会淹没信号,系统在-35 dBm以上工作状态较好;当输入信号的功率高于-20 dBm时,信号接近饱和状态。因此,用该方法进行光谱检测时对输入信号的光功率

是有比较严格的要求的。但得益于受激布里渊散射的窄带特性,它的优点在于检测精度较高。

3 结束语

本文研究了基于 SBS 效应的 MPF 在光谱分析中的应用。通过在 Optisystem 软件中进行仿真,可以得到如下结论:与单级结构 MPF 相比,双级结构不易造成信号的增益饱和;每次改变泵浦频率时,通过测量两级放大后滤波器输出功率的值与待测信号频率之间的关系,可以分析得到待测信号的光谱;随着泵浦功率的增大,滤波器的增益和 OOB 先逐渐增大,然后减小,拐点在泵浦功率为 5 dBm 左右;滤波器的动态范围为 $-35 \sim -20$ dBm。

参考文献:

[1] 张素文. 基于光纤布里渊散射的相干光谱分析研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
Zhang S W. Coherent Spectral Analysis based on Brillouin Scattering of Optical Fibers[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.

[2] 党竑. 基于光纤瑞利散射的高分辨力光谱分析方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
Dang H. Research on High Resolution Spectral Analysis Method based on Fiber Rayleigh Scattering [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[3] Feng K, Cui J, Dang H, et al. An Optoelectronic Equivalent Narrowband Filter for High Resolution Optical Spectrum Analysis[J]. Sensors, 2017, 17(2): s17020348.

[4] Huang C Y, Wang W C. Birefringent Prism based Fourier Transform Spectrometer [J]. Optics Letters, 2012, 37(9):1559-1561.

[5] Akca B I. Design of a Compact and Ultrahigh-resolution Fourier-transform Spectrometer[J]. Optics Express, 2017, 25(2):1487-1494.

[6] 王贤俊,龙亚雪,郑海燕,等. 超高分辨力微型光谱仪的光学系统设计[J]. 光电工程,2018,45(10):170734-170742.
Wang X J, Long Y X, Zheng H Y, et al. Optical System Design of Ultra-high Resolution Micro Spectrometer [J]. Photoelectric Engineering, 2018, 45 (10): 170734-170742.

[7] Kazakov V I, Moskaletz O D, Paraskun A S. Spectrum Forming and Detection in the System of Monitoring, based on a Diffraction Grating[C]//2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. Moscow, Russia: IEEE, 2020: 9078634.

[8] 张震伟. 基于光纤中受激布里渊散射的超高精度光谱仪的研究[D]. 杭州:中国计量学院,2014.
Zhang Z W. Research on Ultra-high Precision Spectrometer based on Stimulated Brillouin Scattering in Optical Fiber[D]. Hangzhou: China Institute of Metrology, 2014.

[9] 纪颖. 基于 SBS 的可调谐带通微波光子滤波器的研究[D]. 天津:天津理工大学,2017.
Ji Y. Research on Tunable Band-pass Microwave Photonic Filter based on SBS[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2017.

[10] Choudhary A, Aryanfar I, Shahnia S, et al. Tailoring of the Brillouin Gain for On-chip Widely Tunable and Reconfigurable Broadband Microwave Photonic Filters [J]. Optics Letters, 2016, 41(3):436-440.

[11] Zhang W, Minasian R A. Switchable and Tunable Microwave Photonic Brillouin-based Filter[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(5):1443-1455.

[12] Hu S L, Li L W, Yi X K, et al. Tunable Dual-pass-band Microwave Photonic Filter based on Stimulated Brillouin Scattering [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(3):330-333.