

文章编号:1004-9037(2014)06-0901-09

基于受激布里渊散射效应的高精度可编程光滤波器

义理林 魏 伟 胡卫生

(上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室,上海,200240)

摘要:高速光通信系统、微波光子系统以及高精度光学计算等前沿应用领域都需要对光信号进行高精度处理,其核心是对光波频谱、微波频谱以及时域脉冲进行高精度调控。高精度可编程光滤波器是实现上述功能的上佳选择;通过对光谱的可编程滤波可直接实现光波频谱的调控,通过将微波信号加载到光波再对光谱进行可编程滤波可实现对微波频谱的调控,通过频谱调控结合时频变换可实现对时域脉冲的调控,从而实现大多数的光信号处理功能。因此,高精度可编程光滤波器是光学信息处理相关领域的核心仪器设备。本文介绍了可编程光滤波器的几种实现方案,着重介绍基于受激布里渊散射效应的高精度可编程滤波器的相关研究进展及关键技术。

关键词:高精度光信号处理;可编程光滤波;谱型控制;受激布里渊散射

中图分类号:TN29

文献标志码:A

High-resolution Programmable Optical Filter Based on Stimulated Brillouin Scattering Effect

Yi Lilin, Wei Wei, Hu Weisheng

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract: High-resolution optical signal processing is highly required in various Frontier fields such as high-speed optical communication systems, microwave photonics systems and high-resolution optical computing. The fundamental functions are high-resolution control on optical spectrum, microwave spectrum and time-domain waveforms. High-resolution programmable optical filter is the best choice to realize the above functions, because it can directly control the optical spectrum by programmable optical filtering, control the microwave spectrum by flexibly filtering the microwave modulated optical spectrum, and control the waveform shape by frequency-manipulating combined with time-frequency mapping. Therefore, high-resolution programmable optical filter is the key instrument in optical signal processing fields. In this article, we review the implementation methods of different programmable optical filters, and specially introduce the research progress and key technologies of stimulated Brillouin scattering based high-resolution programmable optical filter.

Key words: high resolution optical signal processing; programmable optical filter; spectral shape control; stimulated Brillouin scattering

引 言

高分辨率可编程光滤波器的主流方案是光栅衍射结合硅基液晶阵列(Liquid crystal on silicon, LCOS),由美国 Finisar 公司产业化,并且几乎壑

断此市场,被全世界绝大多数光通信科研机构采用。但基于 LCOS 的方案,其处理分辨率在 GHz 量级,无法对 10 GHz 带宽以下的信号进行高精度处理。

随着微波光子系统和高速光通信系统的快速发展,对 10 GHz 以下带宽能实现任意形状可编程

的窄带光滤波器提出了新的需求。前者需要对 10 GHz 以下带宽信号进行矩形滤波以抑制相邻通带串扰,并且进行高分辨率任意形状滤波实现信号的时域整形;后者由于高谱效率正交频分复用(Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)等新型调制码型的兴起需要矩形窄带滤波实现子通道的灵活切换,进一步提高系统的谱效率以及网络的灵活性。此外,微分积分等光学计算以及在工程和科学领域都需要的高阶偏微分方程的求解,都需要产生可高精度配置的滤波响应曲线。而截至目前,还没有较好的方案能实现在 10 GHz 带宽以下以兆赫兹量级分辨率进行滤波形状的任意配置。

本文介绍一种新型的超高分辨率可编程光处理方案,能够在 10 GHz 带宽以下以 MHz 量级分辨率进行任意配置的光学处理器,满足高速光通信系统、微波光子系统以及高精度光学计算等领域对信号精确调控的发展需求,促进相关学科的发展。

1 高分辨率可编程光滤波器

由于高分辨率可编程光滤波器(High-resolution programmable optical filter, HR-POF)在高速光通信系统、微波光子系统、高精度信号整形及光学计算领域都有广泛的应用,因此 HR-POF 获得了来自工业界和学术界的共同关注。

获得高分辨率可编程光滤的主要方案包括基于光栅衍射结合液晶阵列(或硅基液晶)以及硅基微环(或 FP 腔)级联的方式。前者基于光衍射,后者基于光干涉。

基于光栅衍射结合液晶阵列的可编程光滤波器原理如图 1 所示。输入宽带信号光经一系列透镜入射到光栅上,光栅将信号光衍射发散到 LCOS 上,LCOS 上的不同晶元对应不同频率的光信号,通过控制每个液晶阵元的电压可改变相应频率光的幅度和相位,经过幅度和相位控制后的光再通过一系列透镜组合输出。该方案可以通过控制 LCOS 产生任意形状的光滤波,带宽可到几十纳米。但受限于衍射光栅的分辨率、聚焦光斑以及每个液晶晶元的大小等限制,该方案的滤波配置分辨率在几个吉赫兹量级。目前美国的 Finsar 公司,法国的 Yenista 公司以及日本的 Alnair 公司已经将该方案产业化。其中法国 Yenista 公司和日本 Alnair 公司的产品仅能实现中心波长和带宽的灵活调整,还是传统意义上的可调光滤波器,其特点仅在于带宽大于 20 GHz 后可实现矩形滤波。而

美国的 Finisar 公司产品的性能最好,是真正意义上的可编程滤波器,除了在带宽大于 20 GHz 后可实现矩形滤波外,还可根据用户需求编辑产生任意形状的滤波,占据最大的市场份额,目前全世界绝大部分的光通信科研机构都使用 Finisar 的可编程滤波器进行科研,其应用包括多频带 OFDM 系统中的频带切换^[1],光 OFDM 单频带内部分信号的提取、转换、重组^[2],光分组交换中的标记和载荷分离^[3],光 OFDM 信号放大噪声的滤除^[4],超密集 WDM 信道的滤波^[5],光 OFDM 带内信号的整形^[6]等。

在国内,由武汉邮电科学研究院牵头,集合国内优势单位联合开发基于液晶阵列的可编程任意形状光滤波器,目前已经成功研制分辨率为 6 GHz 的可编程光滤波器,打破了国外在此领域的垄断。但受限于光栅衍射分辨率,无论是美国的 Finisar 还是国内开发的可编程光滤波器,在带宽为 10 GHz 以下时,仅能实现高斯型滤波。所以,基于现有的衍射方案,精度无法做到 10 MHz 量级,滚降程度停留在吉赫兹以上,只能用于实现宽信号子频带之间的交换等功能。如果有更细的滤波要求,该技术则无法满足。

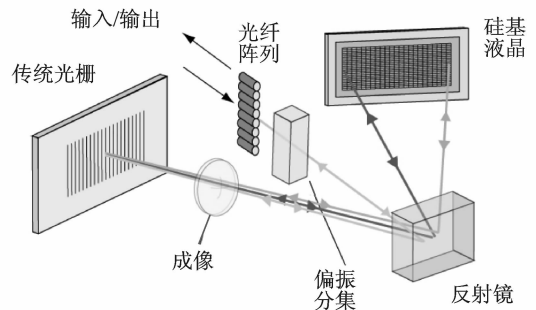


图 1 基于光栅衍射结合液晶阵列的可编程光滤波器结构原理图^[7]

Fig. 1 Programmable optical filter based on grating diffraction and liquid crystal on silicon^[7]

采用硅基微环或 FP 腔级联方式也可实现可编程滤波的功能。每一个微环或 FP 腔都是一个由光场干涉产生的谐振腔,会产生一个周期性的窄带滤波效果。将多个微环或者 FP 腔级联,通过控制每个谐振腔的温度对谐振峰的位置进行微调,可将多个谐振腔的谐振峰进行组合实现可编程滤波。每个谐振峰的带宽即 Q 值决定了滤波分辨率,谐振腔级联个数决定了整个滤波带宽。通常微环的 Q 值为 10^5 量级,微环直径在 20 μm 左右,对应的谐振峰带宽在吉赫兹量级。减少微环直径,可增加

Q 值,获得更窄的带宽。但基于硅基微环的加工工艺,在微环尺寸上很难有量级的改变。通过采用光子晶体微腔,可将每个微腔的直径减小到几个微米量级,可将 Q 值提高一个量级到 10^6 ,对应带宽在百兆赫兹量级。而此时腔直径已经接近波长尺度,将达到干涉极限,产生量子效应,Q 值难以进一步提高。

采用光子晶体微腔级联的方式,IBM 实现了最多 200 个微腔的级联,实现了大延迟带宽积的信号延迟^[8]。但在如此小的尺度对每个微腔独立控制以实现可编程滤波,在工艺上异常困难。目前多微腔级联基本上都是设计好就定型,无法对滤波形状进行配置,而可编程滤波需要对每个微环或微腔

加电极进行温度控制和调谐。美国普渡大学实现了 8 个独立温度控制微环的级联,并利用此级联微环实现了射频任意波形生成^[9],如图 2 所示。国内中科院半导体所、中科院苏州微纳研究所以及华中科技大学都具有硅基微环的加工能力,华中科技大学以及上海交通大学都利用级联微环实现了信号的偏微分方程求解^[10-11]。基于微环级联的可编程滤波器的分辨率在吉赫兹量级,无法实现高精度可编程滤波。而基于微腔级联的滤波器分辨率在百兆赫兹量级,但难以实现可编程滤波。此外,基于级联微环或微腔的滤波器还存在封装困难、一致性差以及损耗较大等问题,离实用化还有一定距离。

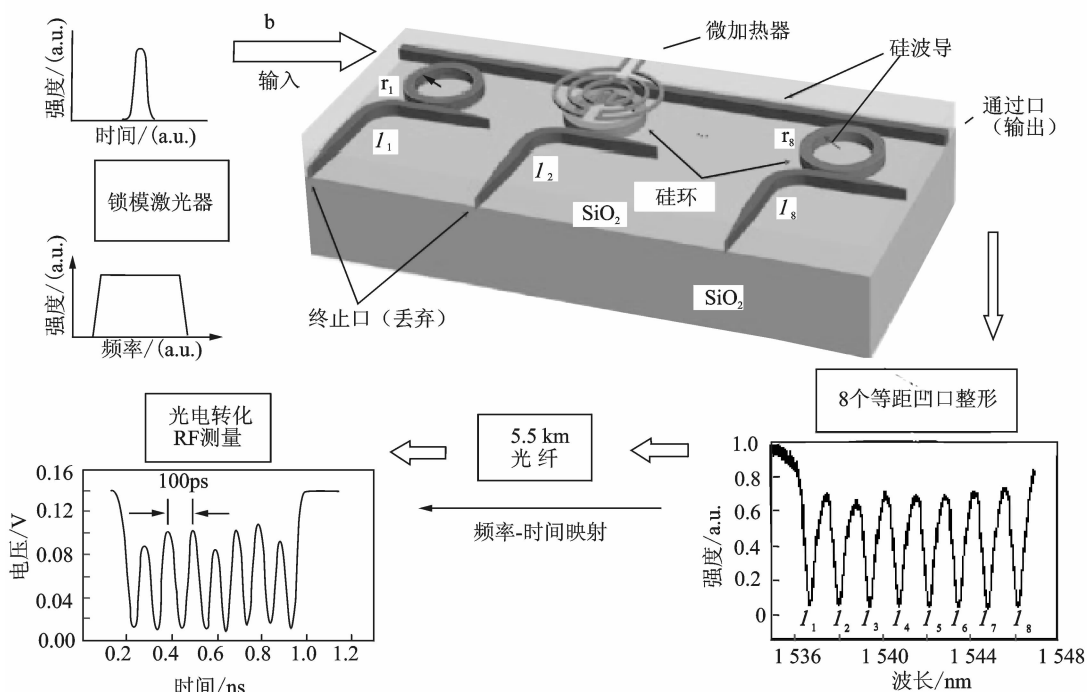


图 2 基于级联微环可编程滤波器产生任意波形^[8]

Fig. 2 Arbitrary waveform generation based on programmable cascaded micro-ring^[8]

相比基于微环或微腔级联的可编程滤波器,基于 FP 腔级联的可编程滤波器在封装和损耗方面都具有优势,目前由美国的 Finisar 公司实现了产业化,通过 3 个 FP 腔级联,产生一个相对带宽而言下降沿较陡的带通滤波器,用于 10 Gb/s 直调激光器之后滤除直调激光器啁啾,抑制色散延长传输距离,即啁啾管理激光器(Chirp managed laser, CML)。FP 腔级联需要采用光胶的方式将每个 FP 腔键合起来,对 FP 腔表面的光滑度、两个腔的平行度有极高的工艺要求。腔的个数越多,实际获得的滤波形状和计算的形状误差越大。基于目前的加工工艺,仅能做到个位数的 FP 腔级联,因此

离可编程滤波器的要求还有较大的差距。

从上述分析可知,在 10 GHz 带宽以下,能以兆赫兹量级为分辨率进行任意形状配置的高精度可编程滤波器,无论是在国际上还是国内,都处于一个技术真空。该技术的开发将有利于光通信系统向更高的谱效应、更密集通道间隔发展;并且对微波光子系统以及高精度信号整形和光学计算都有巨大的应用。

2 基于受激布里渊散射的光滤波器关键技术

受限于光衍射和光干涉的极限,以上的传统无

源滤波方案都无法突破百兆赫兹的分辨率水平。而除了无源方式滤波外,还可通过选择放大或吸收部分信号光频率的方式实现对信号的有源滤波。基于受激布里渊散射效应(Stimulated Brillouin scattering, SBS)的光纤放大器放大带宽在10 MHz量级,因此是实现高分辨率可编程滤波的极佳选择。

SBS是光与物质相互作用后产生的一种非线性现象。当强光作用在物质上时,由光波产生的电磁伸缩效应在物质内激起超声波,入射光受该超声波的散射即产生受激布里渊散射。当一束频率为 ν_0 的强泵浦光输入光纤后,会在反向产生一束受激布里渊散射光,该散射光与输入光的频率间隔称为布里渊频移 ν_B ,该频移由光纤的种类即物质的特性决定。在 $\nu_0 - \nu_B$ 处产生SBS增益峰, $\nu_0 + \nu_B$ 处产生SBS吸收峰,如图3所示。增益和吸收峰的带宽也由光纤的性质决定。石英光纤的布里渊散射带宽通常仅为10~20 MHz,由光学晶格常数决定,不同类型的光纤对应的布里渊带宽略有不同,但其谱形都呈洛伦兹型。因此基于SBS的放大或吸收可看作是带宽为10~20 MHz的洛伦兹型滤波器,分辨率大大优于基于衍射和干涉的方案。

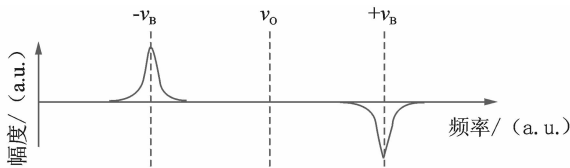


图 3 SBS 增益和吸收示意图

Fig. 3 Schematic diagram of SBS gain and loss

而要基于带宽仅为10 MHz的SBS滤波器实现在10 MHz~10 GHz之间滤波形状任意配置的可编程滤波器,前提条件是能对SBS增益或吸收谱形进行灵活控制。前期研究表明,布里渊增益/吸收谱的带宽等于布里渊泵浦带宽和布里渊内在线宽的卷积,当泵浦带宽远大于布里渊内在线宽时,布里渊增益/吸收带宽近似等于布里渊泵浦带宽^[12]。因此可以通过控制泵浦的带宽及谱形来控制布里渊增益/吸收谱的带宽及谱形,其原理如图4所示。

在带宽展宽方面,泵浦激光器的线宽展宽可以通过内调制或外调制的方式实现。2006年,瑞士联邦理工学院的Herraez M G使用伪随机数据序列(Pseudo-random binary sequence, PRBS)内调制激光器,调制电流的变化导致激光器频率的快速

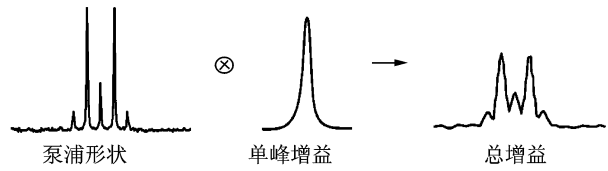


图 4 控制 SBS 增益谱形原理示意图^[17]

Fig. 4 Principle of the SBS gain shape control^[17]

变化,产生频率啁啾展宽泵浦,将布里渊增益带宽展宽至300 MHz^[12]。2006年杜克大学的Zhu Z通过白噪声直接调制光源,将布里渊带宽展宽至10 GHz^[13]。通过使用双泵浦结构,可进一步将带宽展宽至25 GHz^[14]。2006年,通过相位外调制布里渊泵浦将布里渊带宽展宽至1.6 GHz^[15]。进一步利用相位外调制布里渊泵浦可将带宽展宽至10 GHz^[16]。以上方法虽可以将SBS带宽展宽,但其增益谱形都是高斯型,如图5所示,还无法对其形状进行任意控制。而要获得可编程滤波的效果,还需对SBS谱形进行灵活控制。

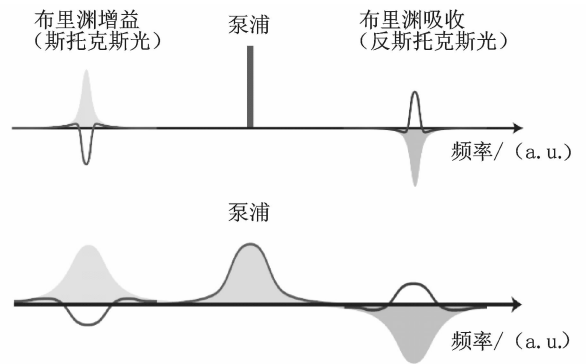


图 5 高斯型 SBS 增益/吸收谱示意图^[17]

Fig. 5 Gaussian SBS gain/ loss^[17]

在谱形控制方面,同样可通过控制泵浦的谱形来实现。早期控制SBS增益谱形的工作主要受到慢光研究的激发,旨在控制SBS谱形来获得大的延迟带宽积,通常是需接近超高斯型的增益谱^[17]。早在2002年,东京大学的Tanemura T等人在泵浦相位调制结构中,通过改变PRBS数据的0,1反转概率来控制泵浦谱形,从而达到控制布里渊谱形的目的,可分别差生中心突起、中心平坦以及中心凹陷的布里渊增益谱^[18],其目的就是利用SBS的谱形可控特性获得形状可控的窄带滤波器,谱形控制效果如图6所示。2007年,上海交通大学Yi L等人通过控制布里渊泵浦内调制白噪声的放大倍数,可控制噪声的分布模型,分别产生高斯型和超高斯型的SBS增益谱^[19],如图7所示。

2011 年,杜克大学将本方案进一步延伸,通过控制布里渊泵浦调制电流的分布概率,获得类似超高斯型的 SBS 增益谱^[20],如图 8 所示。此外,通过对泵浦进行单频级联相位调制,可产生光梳状的泵浦,只要梳齿间距小于 SBS 增益带宽,不同梳齿产生的 SBS 增益叠加可产生宽带的 SBS 增益谱,控制梳齿的形状即可控制相应的 SBS 增益谱形^[21],如图 9 所示。以上工作在一定程度上可以灵活控制 SBS 增益的谱形,具备可编程滤波器的部分功能,但离高分辨率任意形状可编程滤波还有较大的差距。其中最后一种基于光梳泵浦的方案,可以改变光梳之间的间隔来控制 SBS 增益形状,但每根梳齿的幅度无法独立控制,此外梳齿间隔仅为 10 MHz 情况下,最终的 SBS 带宽难以超过 1 GHz。而截止目前,基于光梳泵浦产生的超高斯型 SBS 增益谱,最大带宽仅为 200 MHz^[21]。

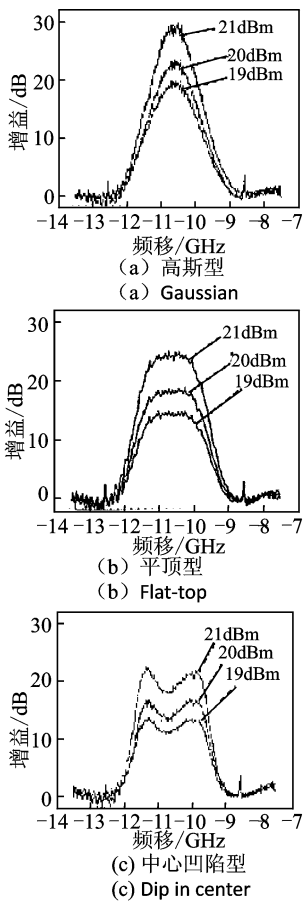


图 6 通过控制泵浦调制 PRBS 数据的 0,1 反转概率来控制 SBS 增益谱形^[18]
 Fig. 6 Controlling SBS gain shape using different driven PRBS data^[18]

在高分辨率谱形控制方面,涉及高分辨率可编程滤波器的核心技术。采用间隔为 10 MHz 的数

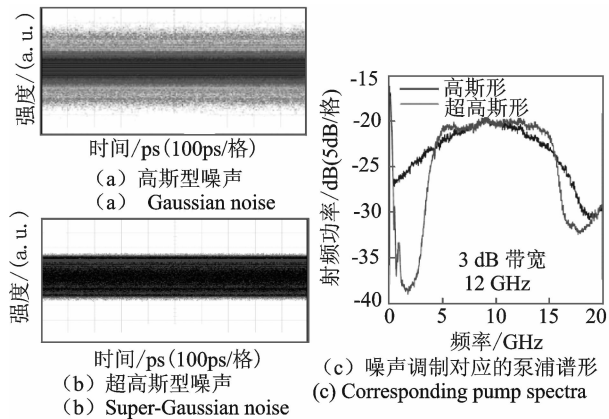


图 7 通过控制泵浦调制噪声的概率分布来控制 SBS 增益谱形^[19]
 Fig. 7 Controlling SBS gain shape by controlling probability distribution of modulation noise^[19]

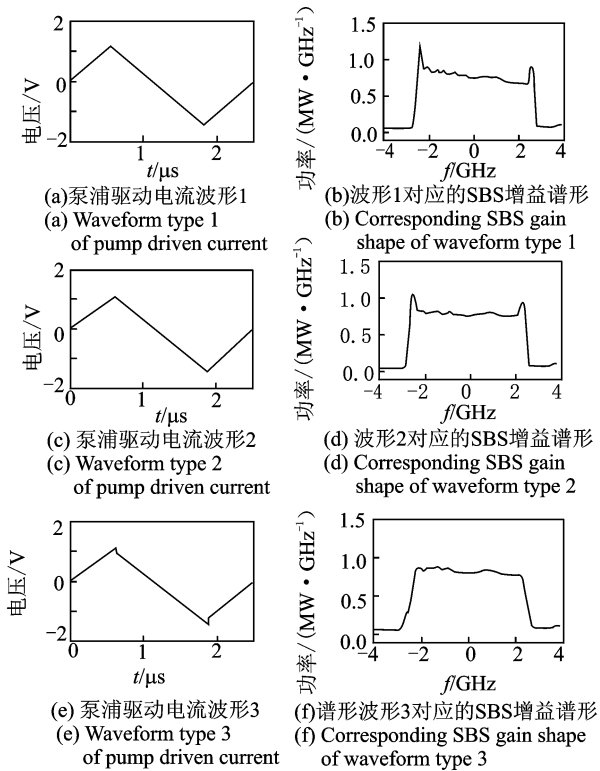


图 8 通过控制泵浦驱动电流的时域分布来控制 SBS 增益谱形^[20]
 Fig. 8 Controlling SBS gain shape by controlling the driven current of pump^[20]

字化电频梳外调制泵浦产生光梳,由于梳齿的间隔、每个梳齿的幅度以及梳齿的根数都可数字化控制,通过对 SBS 增益谱形进行测量,利用测量值和理想值之间的差值对电频梳进行反馈控制。基于此方法上海交通大学实现了在 10 MHz~1 GHz 之间以 10 MHz 为分辨率对滤波器的谱形进行任意

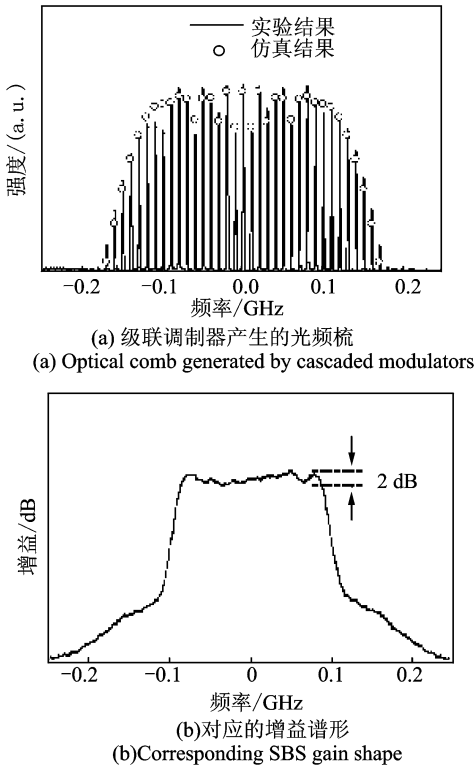


图9 通过光频梳泵浦谱形来控制SBS增益谱形^[21]
Fig. 9 Controlling SBS gain shape by optical-comb based pump^[21]

控制^[22]。图10演示了滤波器带宽从10 MHz到1 GHz幅度和相位谱形,当带宽为1 GHz时,其15 dB形状因子(Shape factor, SF)为1.167。

由图10可以看出,随着滤波器带宽的增加,需要的频梳个数越多,在相同泵浦功率情况下,每个频梳的功率变小,获得SBS增益值也减小。因此在大带宽情况下,需要更大的泵浦功率来获得和单频泵浦功率相当的SBS增益。由于泵浦是由多根频梳产生,增加泵浦功率将增加每根频梳的功率,从而增大频梳间四波混频的效率。四波混频导致带内某些频率成分功率大大增强,从而产生极大的SBS增益峰值,由于这些增益峰值和对应泵浦频率的功率不再是线性关系,因此反馈补偿算法失效,导致带内平坦度变差。此外,四波混频会产生带外频率成分,从而产生带外SBS增益,会降低增益滤波效应的滤波抑制比。四波混频导致的带内平坦度变差和带外增益如图10(i)所示。

采用泵浦频率非等间隔方法可使四波混频产生的频率分量不发生重叠,因此四波频率分量位于泵浦频率之间,由于其功率远小于泵浦频率功率,因此其低于SBS阈值,对带内SBS增益不产生影响。此外,带外SBS增益值也有效降低。将泵浦

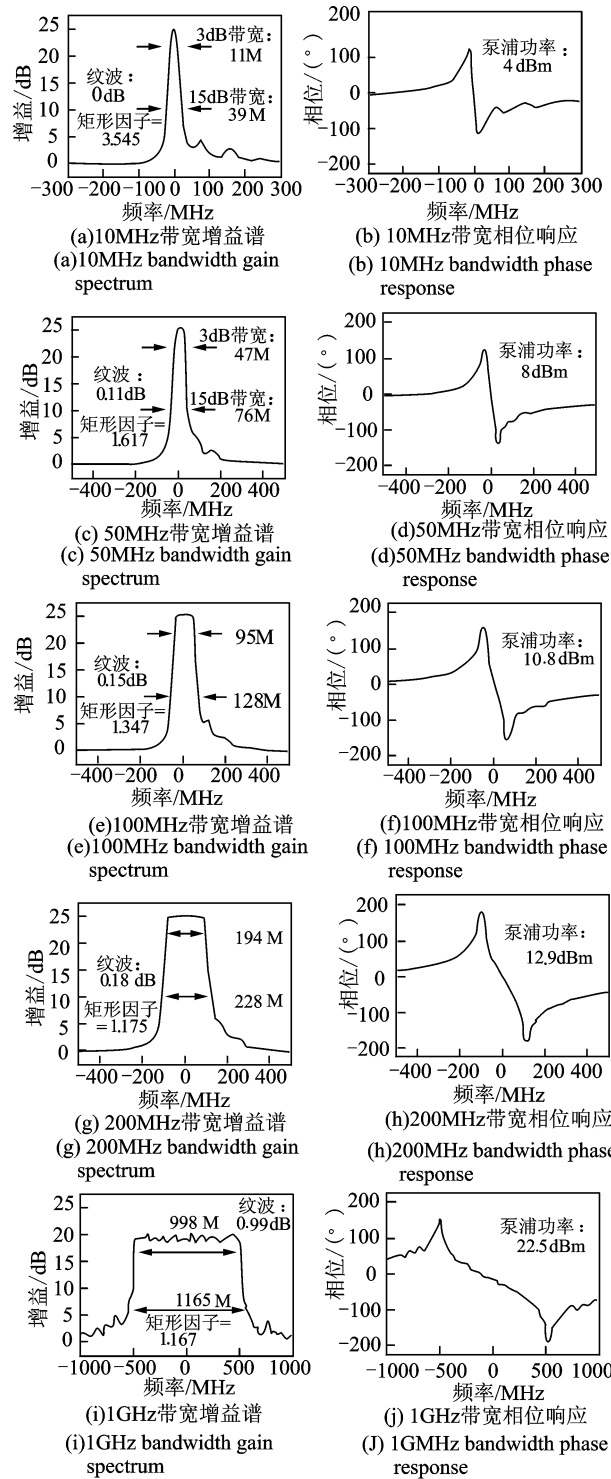


图10 采用数字化电频梳调制泵浦对SBS增益谱进行高分辨率谱形控制^[22]

Fig. 10 Precisely controlling SBS gain shape by using digital electrical comb based pump^[22]

频率间隔在14, 15, 16 MHz之间随机分配,可有效避免四波混频产生的频率分量重叠,其对应的1 GHz的SBS增益谱如图11所示,其15dB形状因子为1.075^[23-24],非常接近理想的矩形,为目前最

好的窄带矩形光滤波器。

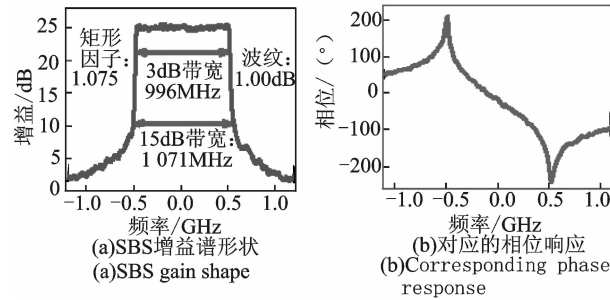


图 11 采用泵浦频率非等间隔分布的方式提高 SBS 滤波器的矩形因子^[23]

Fig. 11 Shape factor improvement by using unequal interval pump^[23]

除了泵浦功率外, SBS 增益值还与光纤的增益效率和长度相关。采用普通单模光纤,需要长度为公里量级,泵浦功率约为 300 mW 来获得增益值为 20 dB,带宽为 1 GHz 的 SBS 增益谱。因此要降低泵浦功率以及光纤长度,必须采用 SBS 增益效率很高的光纤。

在提高增益效率方面,要提高 SBS 的增益效率来降低泵浦功率和光纤长度的要求,须使用特殊材料的光纤。英国 Southampton 大学的研究者使用具有很低布里渊阈值的掺铋光纤来代替标准单模光纤,在 2 m 长的掺铋光纤中,获得 20 dB 的增益仅仅需要 400 mW 的泵浦功率^[25],而同样在 2m 长的硅基单模光纤中,获得 20 dB 增益需要将近 10 W 的泵浦功率^[26]。考虑到进一步展宽带宽需要提高泵浦功率,选择具有更低布里渊阈值的光纤是必要的。As₂Se₃ 硫化物光纤是一个很好的选择,在 5m 长的 As₂Se₃ 硫化物光纤中实现 43 dB 的布里渊增益仅仅需要 60 mW 的泵浦功率^[27]。进一步的研究表明,As₂S₃ 硫化物光纤相比 As₂Se₃ 硫化物光纤具有更小的损耗及有效模面积,因此可以获得更大的 SBS 增益效率^[28]。而采用高掺杂的硫化物波导,可在仅仅 7 cm 长的波导中获得 16 dB 的 SBS 增益^[29]。进一步设计波导结构,可在硅基微盘中产生非常强的 SBS 效应^[30]。如能在硫化物波导结构中设计微盘结构,可进一步增强 SBS 增益效率。

3 基于受激布里渊散射效应的高分辨光滤波器关键技术

基于 SBS 效应获得高分辨率的光滤波器,首

先需要掌握 SBS 滤波器形状的精确测量和控制技术;其次要获得平坦的滤波形状,需要对 SBS 过程中的电光非线性效应进行管理;再次,要获得高性能的滤波效应,需要提高滤波器的抑制比。

(1) SBS 滤波器形状的精确测量和控制: 要实现 SBS 增益谱形的高精度控制,前提是对 SBS 增益谱形进行高精度测量。由于光谱仪的分辨率有限,无法获得精确的 SBS 增益谱形。采用网络分析仪以微波扫频的方式测量 SBS 增益谱形,可获得千赫兹量级的测量分辨率。实测获得精确的 SBS 增益谱形后,通过与目标谱形进行比对获得误差函数对数字化电频梳进行循环反馈校正,最终精确获得目标滤波函数。谱形控制分辨率由 SBS 在增益介质中的带宽决定。

(2) 电光非线性效应管理: 通过循环反馈校正的方法可以消除系统中电器件不平坦频响带来的实测 SBS 谱形和目标 SBS 谱形的差异,但非线性效应,如电放大器和电光调制器的三阶非线性交调和光纤中的四波混频效应无法通过线性的反馈校正消除,因此难以获得理想的目标谱形,需要对以上存在的电光非线性效应进行管理。可通过采用特殊电器件或光纤降低非线性效应以及通过控制频梳频率间隔抑制非线性效应影响等方法来获得理想的目标谱形。

(3) SBS 滤波抑制比提高: 滤波器的旁带抑制比通常要求在 30 dB 以上,单频泵浦 SBS 增益可达 30 dB 以上,但要获得 30 dB 以上的宽带 SBS 增益,需要较大的泵浦功率。可采用 SBS 增益效率高的特种光纤以及非线性增强的特殊波导结构来降低泵浦功率的要求。此外,电光非线性效应会在带外产生闲频成分,这些闲频光经放大后部分也可达到 SBS 阈值产生 SBS 增益,从而降低 SBS 滤波的抑制比。除了上述方法降低泵浦功率从而降低非线性效应的方法外,还可采用偏振滤波以及提高增益损耗比的方法来提高 SBS 滤波抑制比。

4 结束语

综上所述,高分辨率可编程滤波器是可服务于我国重大工程应用和科学研究的先进设备,要将以上关键技术仪器化,获得以 10 MHz 为分辨率,带宽在 10 MHz~10 GHz 间可任意配置的可编程滤波器,还需进一步深入研究,解决宽带数字化电频梳生成、单边带调制自动偏置控制、抑制电光器件

的不平坦频响以及非线性效应对SBS谱形光滑度的影响、提高滤波器抑制比等关键技术问题。

基于受激布里渊散射效应的HR-POF具有显著的创新性,实现了以往技术无法实现的功能,无论HR-POF本身还是其核心技术均具有广阔的应用前景和实用价值。该设备的产业化,可提升我国在新型光通信系统、微波光子系统、高精度脉冲整形和光学计算等方面的仪器水平,促进相关重大科学问题的研究进展。

参考文献:

- [1] Yang Q. Experimental demonstration of Tb/s optical transport network based on CO-OFDM superchannel with heterogeneous ROADMs supporting single-fiber bidirectional communications [C] // 37th Optical Fiber Communication Conference. Los Angeles:[s. n.],2012: JTh2A .
- [2] You S, Li C, Yang Q, et al. Seamless sub-band wavelength conversion of Tb/s-class CO-OFDM superchannels[J]. IEEE Photon Tech Lett,2014, 1: 801-804.
- [3] BenM'Sallem Y, Park C, LaRochelle S. Efficient, widely-tunable wavelength conversion for packets with in-band labels[J]. IEEE Photon Tech Lett, 2013, 25: 2470-2473.
- [4] Zheng Z N, Ding R, Zhang F, et al. 1.76Tb/s Nyquist PDM 16QAM signal transmission over 714km SSMF with the modified SCFDE technique [J]. Opt Express,2013, 21:17505-17511.
- [5] Reis J D, Shahpari A, Ferreira R, et al. Terabit + (192 x 10 Gb/s) nyquist shaped uDWDM coherent PON with upstream and downstream over a 12.8 nm band[J]. J Lightwave Technol ,2014, 32:729-735 .
- [6] Schroder J, Du L, Carpenter J, et al. All-optical OFDM with cyclic prefix insertion using flexible wavelength selective switch optical processing [J]. J Lightwave Technol,2014, 32:752-759.
- [7] Waveshaper Users Manual, Revision G/2013, http://www.finisar.com/sites/default/files/pdf/Waveshaper_User_Manual_VersionG.pdf,2013-9-1
- [8] Notomi M, Kuramochi E, Tanabe T. Large-scale arrays of ultrahigh-Q coupled nanocavities[J]. Nature Photonics, 2008, 2:741-747.
- [9] Khan M H, Shen H, Xuan Y, et al. Ultrabroadband arbitrary radio frequency waveform generation with a silicon photonic chip-based spectral shaper[J]. Nature Photonics, 2010,4:117-130.
- [10] Tan S S, Xiang L, Zou J H, et al. High-order all-optical differential equation solver based on microring resonators[J]. Opt Letters, 2013, 38:3735-3738.
- [11] Lu L, Wu J, Wang T, et al. Compact all-optical differential-equation solver based on silicon microring resonators [J]. Frontiers of Optoelectronics, 2013, 38:99-106.
- [12] Thevenaz L. Slow and fast light in optical fibres [J]. Nature Photonics, 2008, 2:474-481.
- [13] Zhu Z M, Dawes A, Gauthier D J, et al. Broadband SBS slow light in an optical fiber[J]. J Lightwave Technol, 2007, 25:201-206.
- [14] Song K Y, Hotate K. 25 GHz bandwidth Brillouin slow light in optical fibers[J]. Opt Letters, 2007, 32:217-219.
- [15] Yi L L, Zhan L, Hu W S. Delay of broadband signals using slow light in stimulated Brillouin scattering with phase-modulated pump [J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2007, 19:619-621.
- [16] Cabrera-Granado E, Calderon O G, Melle S, et al. Observation of large 10 Gb/s SBS slow light delay with low distortion using an optimized gain profile [J]. Opt Express, 2008, 16:16032-16042.
- [17] Herraes M G, Song K Y, Thevenaz L. Arbitrary-bandwidth Brillouin slow light in optical fibers [J]. Opt Express 2006, 14:1395-1400.
- [18] Tanemura T, Takushima Y, Kikuchi K. Narrow-band optical filter with a variable transmission spectrum using stimulated Brillouin scattering in optical fiber[J]. Opt Letters, 2002, 27: 1552-1554.
- [19] Yi L, Jaouen Y, Hu W, et al. Improved slow-light performance of 10 Gb/s NRZ, PSBT and DPSK signals in fiber broadband SBS[J]. Opt Express, 2007, 15:16972-16979.
- [20] Zhu Y H, Lee M, Neifeld M A, et al. High-fidelity, broadband stimulated-Brillouin-scattering-based slow light using fast noise modulation [J]. Opt Express, 2011, 19: 687-697.
- [21] Sakamoto T, Yamamoto T, Shiraki K, et al. Low distortion slow light in flat Brillouin gain spectrum by using optical frequency comb [J]. Opt Express, 2008, 16:8026-8032.
- [22] Wei W, Yi L, Zhang Y, et al. A bandwidth-tunable narrowband rectangular optical filter based on stimulated Brillouin scattering[J]. OFC/NFOEC, 2014, W4F.5.
- [23] Wei W, Yi L, Jaouen Y, et al. An ultra-flat rectan-

- gular optical filter based on stimulated Brillouin scattering in fibre [C] // 40th European Conference on Optical Communications. Cannes; [s. n.], 2014: P. 1. 7.
- [24] Wei W, Yi L, Jaouen Y, et al. Bandwidth-tunable narrowband rectangular optical filter based on stimulated Brillouin scattering in optical fiber [J]. *Optics Express*, 2014, 22:23249-23260.
- [25] Jauregui C, Ono H, Petropoulos P, et al. Four-fold reduction in the speed of light at practical power levels using Brillouin scattering in a 2-m bismuth-oxide fiber [C] // 31th Optical Fiber Communication Conference. Araheim; [s. n.], 2006: PDP2 .
- [26] Gonzalez-Herraez M, Song K Y, Thevenaz L. Optically controlled slow and fast light in optical fibers using stimulated Brillouin scattering [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87:081113.
- [27] Song K Y, Abedin K S, Hotate K. Highly efficient Brillouin slow and fast light using As₂Se₃ chalcogenide fiber [J]. *Opt Express*, 2014, 14:5860-5865 .
- [28] Florea C, Bashkansky M, Dutton Z. Stimulated Brillouin scattering in single-mode As₂S₃ and As₂Se₃ chalcogenide fibers [J]. *Opt Express*, 2006, 14:12063-12070.
- [29] Pant R, Poulton C, Choi D et al. On-chip stimulated Brillouin scattering [J]. *Optics Express*, 2011, 19: 8285-8290.
- [30] Li J, Lee H, Vahala K J. Microwave synthesizer using an on-chip Brillouin oscillator [J]. *Nature Communications*, 2013, 2097:4.

作者简介: 义理林(1981-),男,副教授,研究方向:光信号处理、光接入网, E-mail: lilinyi@sjtu.edu.cn; 魏伟(1989-),男,硕士研究生,研究方向:光信号处理; 胡卫生(1964-),男,教授,研究方向:光网络。

