

doi:10.3788/gzxb20184710.1023001

# 基于全数控光频梳的可编程微波光子滤波器

王家琦, 邹喜华, 李沛轩

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 611756)

**摘要:**借助全数控光频梳生成技术,提出了一种基于受激布里渊散射效应的可编程微波光子滤波方案.对该方案的原理和结构进行分析并建立了可编程滤波模型,通过实验进行验证,获得了滤波带宽 0.1~1 GHz 范围内可调、顶部通带响应相对平坦、可重构、中心频率可在 4~24 GHz 大范围内连续调谐的微波光子滤波器.该滤波方案与已有的模拟控制的微波光子滤波方案相比,具有全数控可编程的优良特性.

**关键词:**微波光子滤波器;光学频率梳;受激布里渊效应;微波光子学;相位调制

中图分类号:TN713.5

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)10-1023001-6

## Programmable Microwave Photonic Filter Based on Fully Digital Optical Frequency Comb

WANG Jia-qi, ZOU Xi-hua, LI Pei-xuan

(The School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** In this paper, using a fully digital programmable optical frequency comb, a new kind of programmable microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering is proposed. The principle and experiments scheme are described according to the filtering model established. In experiments, a reconfigurable microwave photonic filter is achieved, showing a tunable range of 0.1~1 GHz, flat top of passband responses and tunable central frequency in a large range of 4~24 GHz. Compared with the microwave photonic filters based on analog signal control, this microwave photonic filter scheme is fully digitally controlled and programmable.

**Key words:** Microwave photonic filter; Optical frequency comb; Stimulated Brillouin scattering; Microwave photonic; Phase modulation

**OCIS Codes:** 230.7408; 120.2440; 290.5900; 060.5060

## 0 引言

微波光子学融合了微波通信技术和光纤通信技术的优点,利用光子学的方法产生、控制、处理微波信号,可以实现大容量、低损耗、抗干扰的信息传输,具有巨大的优势和发展潜力<sup>[1]</sup>.作为一门新兴的交叉学科,微波光子学涵盖了:光载无线技术<sup>[2-3]</sup>、相控阵雷达技术<sup>[4]</sup>、微波信号探测技术<sup>[5-6]</sup>、全光信号处理技术<sup>[7]</sup>、光纤传感技术<sup>[8]</sup>、微波光子集成技术<sup>[9]</sup>等多个研究方向和领域.

微波光子滤波器是微波光子学的研究热点,基于光频梳的微波光子滤波器具有易重构、可调谐、可控制等优势,对此,国内外研究人员开展了一系列研究:2010年,HAMIDI E等基于光频梳和光延时结构设计了一种可调谐、可编程的多抽头微波光子滤波方案,该方案通过改变光频梳的形状对滤波器通带响应进行调节

**基金项目:**国家高技术研究发展计划(No.2015AA016903),国家自然科学基金(No.61378008)和四川省国际科技合作重大项目(No.2018HH0002)资助

**第一作者:**王家琦(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为微波光子学. Email:470245660@qq.com

**导师(通讯作者):**邹喜华(1981-),男,教授,博士,主要研究方向为微波光子学、光纤通信技术. Email:zouxihua@swjtu.edu.cn

**收稿日期:**2018-05-28; **录用日期:**2018-07-03

<http://www.photon.ac.cn>

控制,最终实现了带外抑制 35 dB、3 dB 带宽数百 MHz 的微波光子滤波器<sup>[10]</sup>.2011 年,SONG M 等利用光学频率梳,提出了一种可调谐、可重构、滤波器顶部通带平坦的微波光子滤波方案,实现了 2.5 GHz 的 3 dB 带宽和 30 dB 左右的带外抑制比<sup>[11]</sup>.2012 年,SUPRADEEPA V 基于光频梳整形和光延时系统,同时通过级联四波混频效应,提出了一种可快速调谐、具有高带外抑制比的微波光子滤波方案<sup>[12]</sup>.2016,上海交通大学的 YI L 等基于电频梳调制生成光频梳的方法,并以生成的光学频率梳为泵浦光,提出了一种基于 SBS 效应、偏振控制和反馈调节的矩形响应微波光子滤波器,实现了滤波带宽 2.1 GHz 范围内可调,且具有高平坦度的矩形滤波响应,同时带外抑制比达到 57 dB<sup>[13]</sup>.2018 年,基于光子集成技术,MOSS J 等通过光子集成芯片生成光频梳将其应用于微波光子滤波器设计,实现了带通型微波光子滤波器<sup>[14]</sup>.

本文借助一种全数控光频梳生成技术,提出了一种基于受激布里渊散射的新型可编程微波光子滤波方案.对该方案的原理和结构进行分析并建立了可编程滤波模型,然后进行实验验证,实现了滤波带宽 0.1~1 GHz 范围内可调,顶部通带响应相对平坦、可重构、中心频率可在 4~24 GHz 大范围内连续调谐的微波光子滤波器.它具有调节方便、结构相对简单、全数控可编程等优良特性.

## 1 基于全数控光频梳的微波光子滤波原理

### 1.1 基于 SBS 增益谱叠加的微波光子滤波原理

受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)效应在 1964 年在光纤中被首次发现<sup>[15]</sup>,其主要特点表现为入射泵浦光在介质中发生电致伸缩效应,形成对介质折射率的周期性调制,即声波场,并产生频率下移的反向斯托克斯光.SBS 过程中,反向斯托克斯光相对于泵浦的频率下移被称作布里渊频移,由多普勒效应产生,频移量大小与声波场在非线形介质中移动的速度有关,因此布里渊频移取决于非线形介质,一般在 10 GHz 左右, SBS 效应对频率下移布里渊频移处的反向光具有选择性放大作用,可以用 SBS 增益谱描述为<sup>[16]</sup>

$$g_s(\omega) = \frac{g_B I_p}{1 + 4\delta\omega^2 / \Gamma_B^2} \quad (1)$$

由式(1)可知对于单频泵浦光,会产生洛伦兹型的增益谱.那么当泵浦光为光频梳时,由于光频梳的每一根谱线都代表一个频率分量,则每一根谱线可以看作一束单频泵浦光,产生相应的 SBS 增益;从整体来看,各谱线产生的 SBS 增益谱互相叠加,可以得到平坦的通带响应,由此基于泵浦光频梳,每一根谱线增益谱叠加的原理,可以设计微波光子滤波器.具体过程如图 1 所示,其中  $f_c$  是泵浦光频梳中心谱线的频率,  $f_B$  是布里渊频移,则  $f_c - f_B$  为滤波通带响应的中心频率.

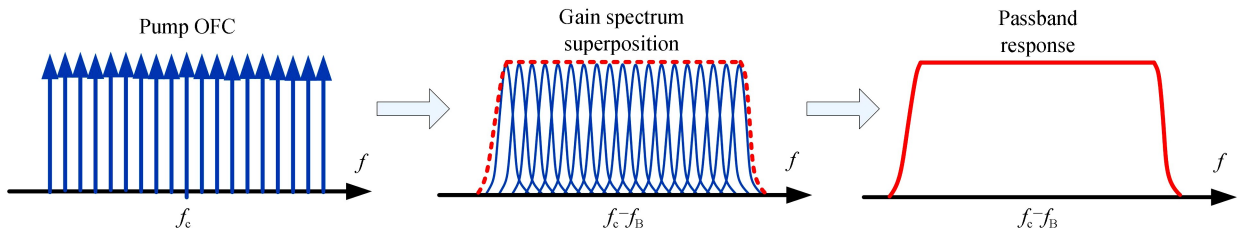


图 1 泵浦光频梳 SBS 增益谱叠加的原理示意图

Fig.1 Principle of the superposed pump OFC's SBS gain spectrum

### 1.2 全数控光频梳的生成原理

当采用光频梳作为 SBS 泵浦光时,通过每根谱线增益谱的叠加,可以实现滤波器响应.因此,产生精确可控的泵浦光频梳是实现新型可编程微波光子滤波器的关键.对此,本课题组给出了一种光频梳生成方案,具有全数控、结构简单、控制精确等优点<sup>[17]</sup>.该方案的基本原理是:基于傅里叶变换,时域上非周期的矩形脉冲序列,对其做傅里叶变换,其频谱是连续的,而周期为  $T$  的矩形脉冲序列,对其做傅里叶变换,在频域上对应的是频率间隔为  $f_s = 1/T$  的梳状谱线.通过设计该矩形脉冲信号的码型,基于数学算法,可以使得频域上的梳状谱线具有很高的平坦度.

设  $x_n$  为设计得到的周期比特序列的其中一个周期内的序列,那么在该方案中,可以通过调节  $x_n$  序列,

控制生成光频梳的平坦度和光频梳的谱线根数;通过调节数字比特信号的周期,调节生成光频梳的谱线频率间隔;通过调节激光器输出种子光的频率,调节生成光频梳的中心频率。

### 1.3 基于 SBS 增益谱叠加的微波光子滤波原理

基于全数控光频梳和 SBS 的微波光子滤波方案如图 2 所示,连续光源(Laser Diode, LD)光载波经由 50 : 50 耦合器分为上下两路,上支路用来产生泵浦光,光信号依次通过偏振控制器(Polarization Controller, PC)、相位调制器(Phase Modulator, PM)和掺铒光纤放大器(Erbium-doped Fiber Amplifier, EDFA),在可编程脉冲发生器(Programmable Pulse Generator, PPG)的控制下产生泵浦光频梳,泵浦光频梳输入到高非线性光纤(Highly Non-linear Fiber, HNLF)后,首先产生 SBS 效应,参照 1.1 节中的工作原理,各谱线的增益谱相互叠加,从而形成平坦的通带响应;下支路用来产生信号光,光信号首先经过由马赫曾德尔调制器(Mach-zehnder Modulator, MZM)和光滤波器(Filter)组成的载波抑制单边带调制模块,再经过相位调制器被矢量网络分析仪(Vector Network Analyzer, VNA)产生的扫频信号调制产生信号光,再进入隔离器(Isolator, ISO)。两支路形成的光信号都注入到 HNLF 中,发生 SBS 效应,再由环形器(circulator)输出,经光电探测器(Photodetector, PD)拍频并在 VNA 进行观测。

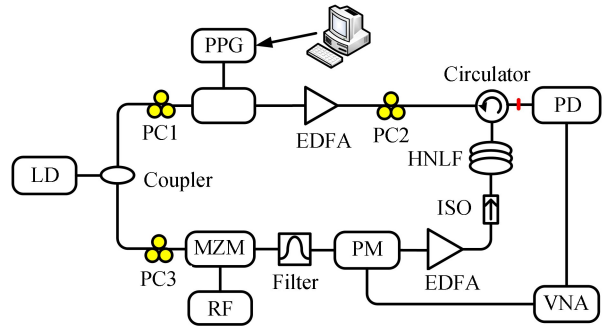


图 2 基于全数控光频梳和 SBS 的微波光子滤波方案  
Fig.2 The experiment scheme using fully digital OFC and SBS

在该实验方案中,滤波器的带宽取决于以下几个参数:光频梳梳子间隔、梳子个数、光频梳功率效率;在调节带宽时,需要配合这三个参数进行调节。

本方案中滤波器的响应实际上是通过泵浦光频梳各频率分量的 SBS 增益谱叠加得到的,因此当泵浦光频梳谱线之间的间隔增加时,形成的通带响应也会相应展宽.同理,在增加泵浦光频梳的梳子个数时,形成的通带响应也会相应展宽.泵浦光频梳的功率效率是指生成的目标泵浦光频梳的功率占泵浦光信号整体功率的比例,由于方案中采取的光频梳生成方案,产生泵浦光频梳的同时会产生其他频率分量,这些频率分量会导致起泵浦光频梳的功率效率降低.转变点数是指设计得到的比特序列  $x_n$  的高低电平跳变点数,一般来说,在同一谱线间隔和梳子个数的条件下,转变点数越多,有效泵浦光频梳的功率效率会越低,这是由于当转变点数较多时,时域波形较转变点数较少时更窄,因此对应到频域会使得频域波形展宽,从而降低功率效率,这一过程具有随机性,但总体规律满足以上描述.通过控制上位机软件的转变点数参数,可以调节光频梳的功率效率,进一步可以实现滤波带宽的调节.总体而言,影响滤波带宽的主要因素还是光频梳的谱线间隔和梳子个数。

滤波器的调谐主要通过调节加载到 MZM 上的微波信号实现,具体的过程如图 3.其中  $f_{shift}$  为加载到 MZM 上的微波信号频率,即由载波抑制单边带调制对光载波产生的频移量,  $f_{sweep}$  为 VNA 加载到 PM 上的扫频信号的频率。

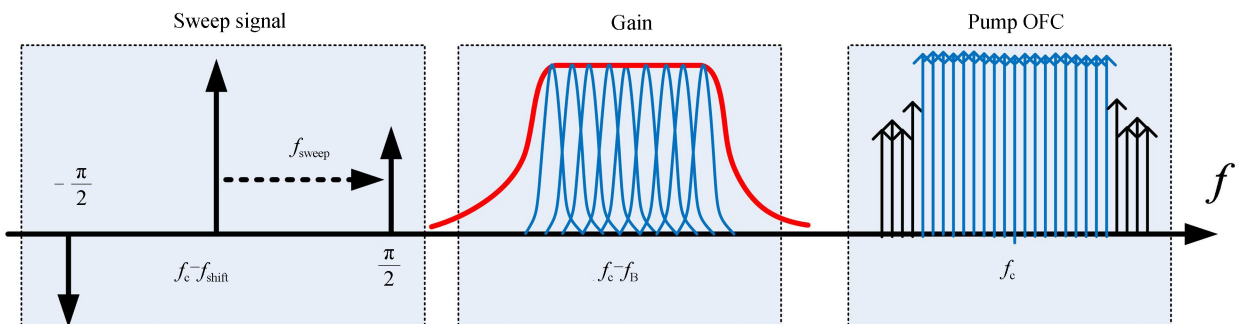


图 3 滤波器调谐原理示意图

Fig.3 The tunable principle of the designed microwave photonic filter

由图 3 可知,调节加载到 MZM 的微波信号,即使得  $f_{\text{shift}} > f_B$ ,则当扫频信号光的上边带落入增益区时,即可探测到中心频率为  $f_{\text{shift}} - f_B$  的滤波器通带响应,由于  $f_B$  为系统的布里渊频移,由光纤的物理特性决定,在一个系统中一般被认为是恒定值,故而可以调节加载到 MZM 上的频移信号的频率  $f_{\text{shift}}$ ,来实现滤波器中心频率的调谐。

## 2 实验结果和讨论

实验中首先测量了该系统下单频泵浦光的 SBS 增益谱,由图 4 的测量结果可知基于该光纤介质的 SBS 增益谱的 3 dB 带宽约为 94 MHz,中心频率即布里渊频移为 9.071 GHz,相比于一般几十 MHz 的 SBS 增益谱 3 dB 带宽,该介质下的 SBS 增益谱较宽,原因可能是该高非线性光纤长度较短(约 900 m),使得 SBS 增益谱相对展宽.生成光频梳的结果可以参照文献[17],本文中不再作详细说明。

### 2.1 滤波器带宽调节

针对本方案滤波器的带宽可调特性进行了测量,以下的测量结果均在  $f_s = 21$  GHz 的条件下实现,对应滤波器的中心频率为 11.929 GHz。

对滤波器带宽的一些典型值进行了测量,当滤波器 3 dB 带宽为 100、200、400、600、800、1 000 MHz 时,得到了如图 5 的实验结果,其中各个带宽对应的光频梳参数如表 1 所示。

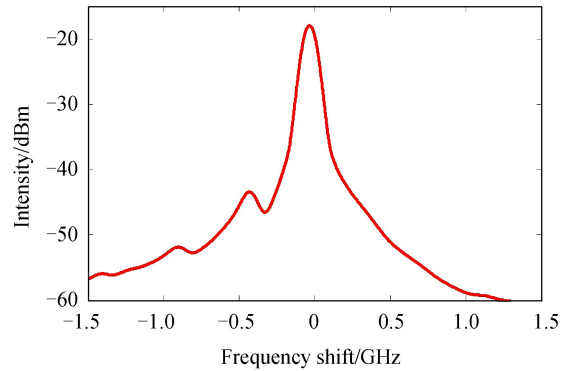


图 4 SBS 增益谱测量结果

Fig.4 The measured SBS gain spectrum

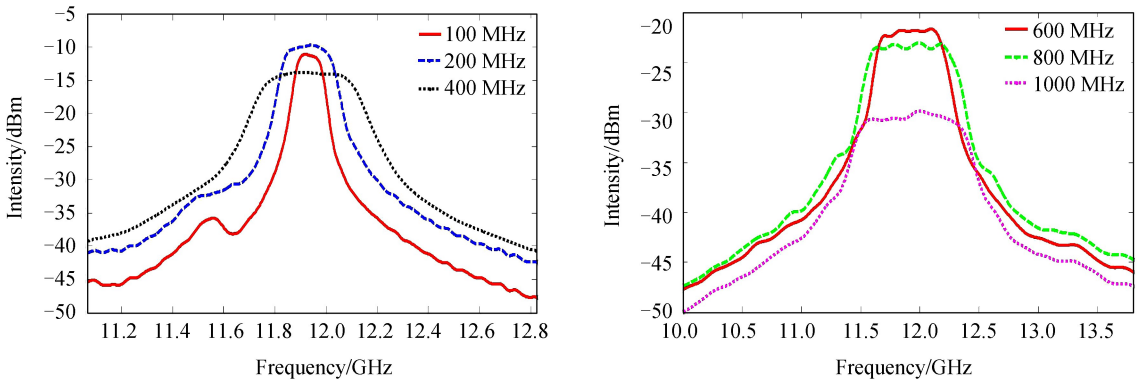


图 5 不同带宽下的滤波器通带响应测量结果

Fig.5 Measured passband response of the filter at different bandwidths

表 1 各带宽测量结果对应的光频梳参数

Table 1 OFC feature parameters at corresponding bandwidths

Bandwidth	Comb number	Space between lines	Transition points
100 MHz	51	2 MHz	130
200 MHz	101	2 MHz	100
400 MHz	101	3.3 MHz	100
600 MHz	131	4 MHz	60
800 MHz	151	5.55 MHz	100
1 000 MHz	171	5.55 MHz	140

由表 1 的泵浦光频梳参数设置,结合图 5 的实验结果可以看到:滤波器 3 dB 带宽在 100~1 000 MHz 范围内的幅频响应平坦度较好,通带响应顶部波动小于 1 dB,但平坦度会随着滤波器带宽的增加而逐渐变差;带外抑制比最高可以达到 20 dB 左右,但会随着滤波器带宽的增加而逐渐降低;波响应的带宽可以通过控制梳子个数、光频梳梳子间隔、转变点数三个关键参数进行调节,每一条滤波响应曲线对应的泵浦光频梳参数设置与实验方案原理分析一致。

造成滤波器顶部通带响应平坦度随带宽增加而出现明显波动的原因有如下几点:1)在滤波器带宽较大时,光频梳谱线间隔较大,造成每根光频梳谱线形成的增益谱相互叠加后强度不完全均匀;2)随着滤波器带宽的不断增加,谱线根数越来越多,导致以四波混频为代表的非线性效应增强,从而影响通带平坦度.造成滤波器通带响应带外抑制比随带宽增加而出现明显降低的主要原因在于:随着光频梳梳子个数的逐渐增加,光频梳每根梳子的峰值功率明显降低,从而导致SBS效应的增益明显降低,使得滤波抑制比出现明显下降.可以通过对泵浦光频梳进行高功率放大的方法,实现滤波带外抑制比的提升.

## 2.2 滤波器中心频率调谐实验结果

针对滤波器中心频率的可调谐特性,通过调节微波源输出的微波信号频率,即扫频信号光的载波频率,可以实现如图6所示的调谐测量.由图6的实验结果可知,基于本方案的微波光子滤波器,具有可重构性和较大的调谐范围,可以实现4~24 GHz的连续调谐,具有良好的调谐特性.实际上,由于该滤波器的调谐实际上是通过载波抑制单边带调制来实现的;而电光外调制显然可以实现更高频的调制,因此基于该方案理论上也可以实现30 GHz以上的更高频调谐,但当微波信号频率很高时,线缆、接头等器件的损耗会极大增加,严重影响系统的性能.

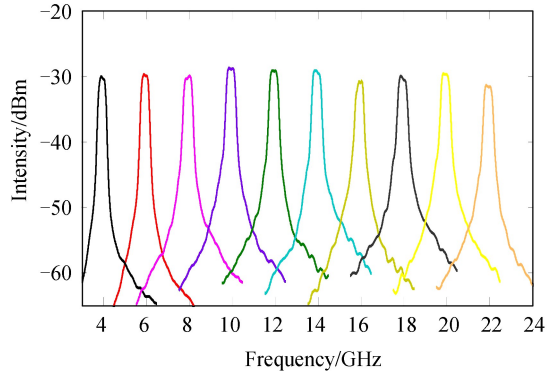


图6 滤波器中心频率调谐测量结果  
Fig.6 The tunable central frequency of the filter measured in experiments

## 3 结论

本文设计了一种基于全数控光频梳的可编程微波光子滤波器,对该方案的原理进行了分析讨论,然后进行了实验验证.实现了带宽0.1~1GHz内可调、顶部通带响应相对平坦、可重构、中心频率可在4~24 GHz大范围内连续调谐的微波光子滤波器.基于该方案的微波光子滤波器的带宽通过数字信号编程控制,结构简单,调节方便.

## 参考文献

- [1] CAPMANY J, NOVAK D. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(6): 319-330.
- [2] AL-RAWESHIDY H, KOMAKI S. Radio over fiber technologies for mobile communications networks[M]. Artech House, 2002.
- [3] ZENG Guan-jun, CHEN Lin, YU Jian-jun, *et al.* 60 GHz OFDM-RoF system based on RS code concatenated with ptem technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 983-988.  
曾冠军, 陈林, 余建军, 等. 基于RS码及网格编码调制技术的60 GHz OFDM-RoF系统[J]. *光子学报*, 2011, **40**(7): 983-988.
- [4] NG W, WALSTON A A, TANGONAN G L, *et al.* The first demonstration of an optically steered microwave phased array antenna using true-time-delay[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, **9**(9): 1124-1131.
- [5] ZOU Xi-hua, LU Bing, PAN Wei, *et al.* Photonics for microwave measurements[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, **10**(5): 711-734.
- [6] LU Bing, ZOU Xi-hua, PAN Wei, *et al.* Investigation on instantaneous frequency measurement based on an optical filter array with multiplied FSRs[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, **23**(1): 126-129.  
卢冰, 邹喜华, 潘炜, 等. 基于倍增FSR式光梳状滤波器阵列的瞬时频率测量研究[J]. *光电子·激光*, 2012, **23**(1): 126-129.
- [7] WILLNER A E, KHALEGHI S, CHITGARHA M R, *et al.* All-optical signal processing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(4): 660-680.
- [8] LI Yong-qian, WANG Hu, LI Huan, *et al.* Theoretical model and experimental study of electro-optic modulator in Rayleigh BOTDA system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11): 1286-1291.  
李永倩, 王虎, 李欢, 等. 瑞利布里渊光时域分析系统中电光调制器的理论模型与实验研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(11): 1286-1291.
- [9] SANSONI L, SCIARRINO F, VALLONE G, *et al.* Two-particle bosonic-fermionic quantum walk via integrated photonics[J]. *Physical Review Letters*, 2012, **108**(1): 010502.
- [10] HAMIDI E, LEAIRD D E, WEINER A M. Tunable programmable microwave photonic filters based on an optical frequency comb[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, **58**(11): 3269-3278.

- [11] SONG M, LONG C M, WU R, *et al.* Reconfigurable and tunable flat-top microwave photonic filters utilizing optical frequency combs[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(21): 1618-1620.
- [12] SUPRADEEPA V R, LONG C M, WU R, *et al.* Comb-based radiofrequency photonic filters with rapid tunability and high selectivity[J]. *Nature Photonics*, 2012, **6**(3): 186-194.
- [13] YI Li-lin, WEI Wei, JAOUËN Y, *et al.* Polarization-independent rectangular microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(2): 669-675.
- [14] XU Xing-yuan, WU Jia-yang, CHU S T, *et al.* Integrated Kerr micro-comb sources for photonic microwave applications[C]. *Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XX*, International Society for Optics and Photonics, 2018, 10518: 105180B.
- [15] CHIAO R Y, TOWNES C H, STOICHEFF B P. Stimulated Brillouin scattering and coherent generation of intense hypersonic waves[J]. *Physical Review Letters*, 1964, **12**(21): 592-595.
- [16] BOYD R W. *Nonlinear optics*[M]. Academic Press, 2003
- [17] YAN Xiang-lei, ZOU Xi-hua, PAN Wei, *et al.* Fully digital programmable optical frequency comb generation and application[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(2):283-286.

**Foundation item:** The National High Technology Research and Development Program of China (No. 2015AA016903), the National Natural Science Foundation of China (No. 61378008), the Key Program of the International Science and Technology Cooperation Program of Sichuan Province (No. 2018HH0002)

引用格式: WANG Jia-qi, ZOU Xi-hua, LI Pei-xuan. Programmable Microwave Photonic Filter Based on Fully Digital Optical Frequency Comb[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(10): 1023001

王家琦, 邹喜华, 李沛轩. 基于全数控光频梳的可编程微波光子滤波器[J]. *光子学报*, 2018, **47**(10):1023001