

文章编号:1004-9037(2014)06-0859-15

# 基于光纤布拉格光栅的微波光子信号处理

王 超

(肯特大学工程与数字艺术学院,英国,坎特伯雷,CT27NT)

**摘要:**由于有效利用了光子技术的优点,微波光子技术克服了传统微波系统中的一些瓶颈,从而提高已有系统性能,甚至开发出了全新的系统应用。很多光子器件已经被用在微波光子系统中,光纤布拉格光栅(Fiber Bragg grating, FBG)就是其中一种非常重要的全光纤器件。由于具有灵活的频谱响应特性、损耗低、质量轻、结构紧凑、以及与其他光纤器件耦合性好等独特的优势,光纤布拉格光栅已经成为了微波光子信号处理系统中的关键组件之一。本文主要介绍了近年来光纤布拉格光栅在微波光子信号处理应用中的最新进展,重点讨论的主要应用包括微波光子滤波器,微波任意波形产生,微波频谱感知以及光纤光栅传感器实时解调。最后,本文还讨论了在微波光子系统中应用光纤布拉格光栅的局限性及可能的解决方案。

**关键词:**微波光子学;光纤布拉格光栅;光学信号处理;滤波器;光纤传感

中图分类号:TN24

文献标志码:A

## Microwave Photonic Signal Processing Using Fiber Bragg Gratings

Wang Chao

(School of Engineering and Digital Arts, University of Kent, Canterbury, CT27NT, UK)

**Abstract:** Microwave photonics (MWP) is an emerging issue concerning the interaction between microwaves and optical waves. A variety of photonic technologies are investigated to enable and enhance functionalities in microwave systems which are usually very challenging when using pure electrical solutions. A fiber Bragg grating (FBG) is one of the key photonic devices in microwave photonics signal processing due to its unique features such as flexible spectral characteristics, low loss, light weight, compact footprint, and inherent compatibility with other fiber-optic devices. The recent development in FBG-based microwave photonics signal processing applications is discussed, with an emphasis on microwave photonic filters, microwave arbitrary waveform generation, microwave spectrum sensing and real-time FBG sensor interrogation. The limitations and potential solutions of FBG-based MWP system are also discussed.

**Key words:** microwave photonics; fiber Bragg grating; photonics signal processing; filter; fiber sensor

## 引 言

微波光子学(Microwave photonics, MWP)是微波技术和现代光子技术相融合的新兴学科领域,主要研究微波和光波之间的相互作用<sup>[1-4]</sup>。由于集中了微波技术和光纤技术的优点,微波光子技术已经成为信息和通信研究领域中的一个热点,在通

信、传感、生物、医学、军事和安全等领域都具有非常广泛的应用前景<sup>[5-10]</sup>。微波光子技术主要利用光子手段来对微波、毫米波甚至太赫兹频段的信号进行产生、传输、控制、处理和分析。由于光子技术具有高速、大带宽、抗电子波干扰等特点,微波光子技术克服了传统微波系统中的一些瓶颈,从而大大提高已有系统的性能。近年来微波光子技术的主要研究领域包括高频微波信号的光产生<sup>[11]</sup>、微波

**基金项目:**EU Marie-Curie Career Integration Grant (FP7-PEOPLE-2013-CIG-631883);加拿大自然科学和工程研究理事会(NSERC)资助项目;欧盟居里夫人计划(Marie-Curie CIG)资助项目。

**收稿日期:**2014-08-04;**修订日期:**2014-10-17

光子信号处理<sup>[12-16]</sup>、光子相位阵列天线<sup>[17-18]</sup>、光载无线<sup>[19-20]</sup>、微波任意波形产生<sup>[21-23]</sup>，以及光子模数转换<sup>[24-27]</sup>等。最近，集成微波光子技术发展非常迅猛<sup>[28-29]</sup>。由于采用了集成光子芯片技术，集成微波光子技术有效减小了传统基于分立器件的微波光子系统的成本和功率消耗，同时提高了系统性能和可靠性，因而被广泛应用于微波光子信号处理<sup>[30-32]</sup>。

很多光子器件如光源、光放大器、色散元件、电光调制器、滤光片和光电探测器等已经在微波光子系统中得到广泛的应用。光纤布拉格光栅(Fiber Bragg grating, FBG)是非常重要的全光纤器件<sup>[33]</sup>。由于其具有灵活的频谱响应特性<sup>[34]</sup>、损耗低、质量轻、结构紧凑以及与其他光纤器件耦合性好等优势，FBG 已经被广泛应用于光纤通信<sup>[35]</sup>及光学传感<sup>[36]</sup>等诸多领域中。近年来，研究者对 FBG 在微波光子系统中的应用已经进行了深入的研究<sup>[37-38]</sup>。总体来说，FBG 在微波光子系统中的功能主要包括色散时延线元件、窄带光学带通或带阻滤波器以及宽带光学频谱整形器。本文将主要介绍 FBG 在微波光子信号处理<sup>[39]</sup>应用中的最近进展，并重点介绍基于 FBG 的微波光子滤波器、微波任意波形产生、微波频谱感知以及光纤光栅传感器实时解调。其他基于 FBG 的微波光子信号处理应用还包括光子时延波束形成<sup>[40]</sup>、光载无线系统<sup>[41]</sup>、超宽带信号产生<sup>[42]</sup>、微波光子相移器<sup>[43]</sup>、高速光信号处理<sup>[44]</sup>、高频微波信号产生<sup>[45]</sup>以及光电振荡器等<sup>[46]</sup>。

## 1 光纤布拉格光栅

光纤布拉格光栅是一种通过紫外线激光照射来改变光纤纤芯折射率而制作的光学器件<sup>[47]</sup>。折射率的周期性扰动导致光纤纤芯中两个反向传播模式的相互耦合。严格符合耦合匹配条件的波长，也被称作布拉格波长  $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ ，会被光栅反射。布拉格波长同时取决于光纤芯层有效折射率  $n_{\text{eff}}$  以及光栅周期  $\Lambda$ 。根据耦合条件的不同，光纤布拉格光栅可以分为两大类。(1)均匀光纤布拉格光栅。由于其具有均匀光栅周期，所以支持窄带宽条件下的强模式耦合；(2)啁啾光纤布拉格光栅。由于其具有渐变的光栅周期，所以支持宽带模式耦合。

图 1 简单描述了两类光纤布拉格光栅的不同结构。啁啾 FBG 的一个重要特性是它可以作为紧

凑的色散元件。啁啾 FBG 的色散来源于光信号中的不同光谱分量从啁啾 FBG 的不同位置反射，从而经历不同的群时延。同时由于可以通过改变折射率调制函数对其宽带反射频谱响应进行控制，啁啾 FBG 还被广泛应用于宽带光频谱整形<sup>[48]</sup>。

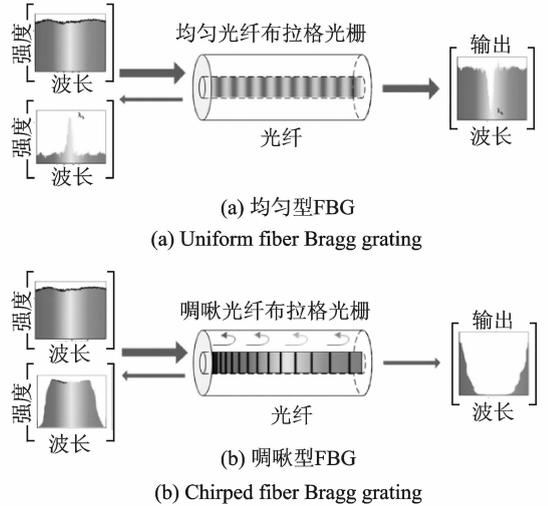


图 1 光纤布拉格光栅原理图

Fig. 1 Schematic diagram showing the principle of fiber Bragg gratings

相对于通过已知光栅结构计算反射频谱响应的正向问题<sup>[34]</sup>，从目标频谱响应出发分析合成光纤光栅结构的反向问题更具挑战性。最简单的光栅设计方法基于第一级波恩近似。一般可以近似认为在光栅反射频谱与光纤芯层折射率调制函数之间存在简单的傅里叶变换关系<sup>[49]</sup>。但是这种简单方法只适用于弱耦合光纤光栅。Feced 等提出了一种有效的光纤光栅设计算法，被称为离散剥层算法(Discrete layer peeling, DLP)<sup>[50]</sup>。该方法不仅计算效率高，而且合成结果准确，所以在光纤光栅设计中被广泛采用<sup>[51]</sup>。设计好的 FBG 通常通过紫外曝光的方法来制作<sup>[33]</sup>。周期性的光纤折射率调制可以通过由相位模板产生的干涉图案来实现<sup>[52]</sup>。折射率调制的强度可以通过调节紫外激光的强弱或激光束扫描速度的快慢来控制。

高性能、低成本的光电子器件主要集中在光纤通信波段(1 550 nm)。为了利用这一优势，大部分的基于光纤光栅的微波光子系统都工作在 1 550 nm 波段。但是 1 550 nm 波长并不适用于某些特定应用，比如生物成像系统。这是因为在 1 550 nm 波段存在非常强烈的水吸收，不利于对生物样本的高灵敏成像。同时由于较长的波长具有更差的衍射极限，对成像分辨率也产生很大影响。因此

更短波长的波段,比如 800 nm,更加适合于此类应用。在这个波段,光在生物样本中会具有更大的穿透深度,成像分辨率也更高。同时成熟的钛宝石激光器也工作在这个波段,为各种工程及科学研究应用提供光源。相应地,对 800 nm 波段的 FBG 的研究和应用也逐渐引起了科研人员的重视<sup>[53]</sup>。

## 2 FBG 在微波光子信号处理中的应用

由于具有诸多重要并独特的优点,比如灵活的频谱响应特性、全光纤结构、插入损耗低、体积小和成本低等,FBG 在微波光子信号处理中的应用已经成为了一个研究热点。本文将重点介绍近年来 FBG 在微波光子滤波器、微波任意波形产生、微波频谱感知以及光纤光栅传感器实时解调中的应用研究。

### 2.1 基于 FBG 的微波光子滤波器

微波光子技术提供了一种克服数字电子设备采样速度瓶颈,从而对高频和宽带微波信号进行处理的有效方式。用光子技术来处理微波信号还具有可调谐性和可重构性大的优势。此外,基于光子技术的信号处理器还具有抗电磁干扰(Electromagnetic interference, EMI)的特性。微波光子滤波器<sup>[16]</sup>利用光子技术来处理射频、微波和毫米波信号,是微波光子技术最重要的应用之一。微波光子滤波器的实现通常基于两种技术:一种是基于有限冲击响应(Finite impulse response, FIR)的时延线结构,另一种是基于光波与微波频谱响应的转换。在任何一种结构中,FBG 都发挥了重要的作用。

#### 2.1.1 微波光子时延线滤波器

一个完整的微波光子时延线滤波器通常包括提供光载波的光源,实现电光转换的调制器,引入时延的抽头时延线模块和完成光电转换的光电探测器。图 2(a)是一种典型的微波光子时延线滤波器结构。在忽略系统的非线性条件下,微波光子时延线滤波器可以看作一个线性时不变系统(Linear time-invariant, LTI)。其频率响应是由滤波器抽头系数  $\alpha_k$ ,和两个相邻抽头之间的固定时延差  $T$  来决定的。具有  $N$  抽头的微波光子时延线滤波器的传递函数如下所示

$$H(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k \exp(-j\omega k T) \quad (1)$$

式中: $\omega$  为微波角频率。整个频谱响应具有周期性的多通道响应特性。相邻通道之间的间隔被称为

自由频谱范围,其数值由时延差决定  $\Omega = 2\pi/T$ 。其第  $m$  个信道的中心频率为  $\omega_m = m\Omega$ 。

抽头光时延线模块是微波光子时延线滤波器中的关键器件,这个模块可以利用 FBG 来实现。图 2(b)是一种利用非相干宽带光源和均匀 FBG 阵列的微波光子时延线滤波器<sup>[54]</sup>。其中时延是由相邻 FBG 之间的距离来决定的,抽头系数则取决于均匀 FBG 的反射率  $R_k$ 。值得注意的是,这个系统中的光载波(抽头)是通过使用 FBG 阵列来对非相干宽带光源的光谱进行切割形成的。这种光谱切割的方法可以避免使用昂贵的多波长激光源,从而使得滤波器实现起来比较简单。但是,使用光谱切割光源的微波光子时延线滤波器的噪声性能被恶化了,这是因为非相干宽带光源通常都具有比较强的相位噪声。文献<sup>[55]</sup>系统地介绍了光谱切割微波光子时延线滤波器的传递函数及噪声特性。

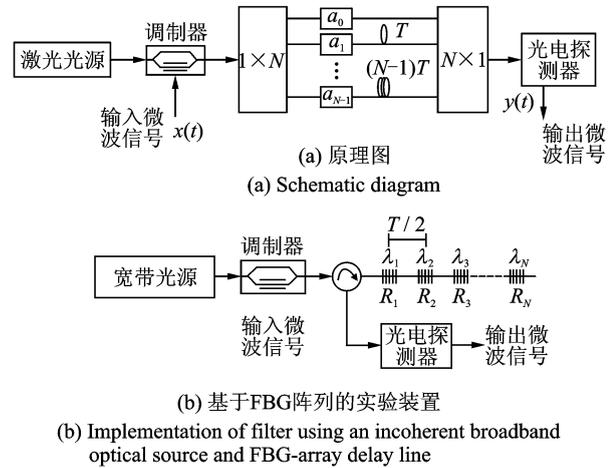
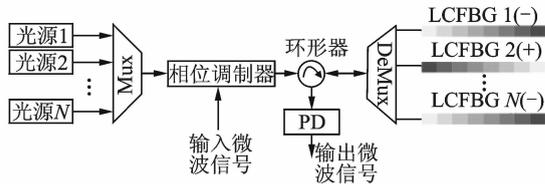
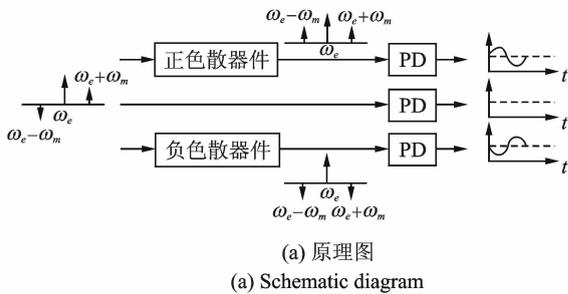


图 2 微波光子时延线滤波器

Fig. 2 Microwave photonic delay-line filter with a finite impulse response

为了消除光波干涉的影响,微波光子时延线滤波器通常是在非相干机制条件下工作的,但是其最大的问题是滤波器的抽头系数全部是正数。根据信号处理理论,全为正系数的 FIR 滤波器只能作为具有线性相位响应的低通滤波器来使用。为了实现高通或者带通频谱响应以及非线性的相位响应,微波光子时延线滤波器需要实现负的抽头系数。很多基于 FBG 的技术已经被开发出来,用来实现负系数甚至是复系数抽头的微波光子时延线滤波器<sup>[56]</sup>。例如,可以利用相位调制到强度调制(PM-IM)的转换来实现具有负系数的  $N$  抽头微波光子时延线滤波器<sup>[57]</sup>。图 3(a)表示通过相位调制-强度调制转换来实现微波相位反转的基本概念。在小信号调制条件下,经过相位调制的光

信号的频谱分量由光载波和两个恰好异相的一阶边带所组成。如果将相位调制后的信号直接送到光电探测器,除了直流信号,没有任何微波信号可以被检测到。但如果将经过相位调制的信号经过色散元件,色散会改变两个边带和光载波之间的相位关系。通过光电检测,就可以将相位调制信号转换为强度调制信号。通过相同的过程,利用相反的色散元件可以将相位调制转换为相位反转  $\pi$  的强度调制。所以,通过这种方法,可以利用正负相反的色散元件来获得正或负的抽头系数。同时,由于电光相位调制器没有偏置电压,所以消除了传统系统中马赫曾德尔调制器(Mach Zehnder modulator, MZM)的偏压漂移问题。在文献[57]中,线性啁啾光纤布拉格光栅(Linearly chirped fiber Bragg grating, LCFBG)被用作色散器件。通过选择啁啾 FBG 的入射端,正或负的色散将相位调制的光载波信号转换成相位反转的微波信号,如图 3(b)所示。



(b) 基于啁啾FBG阵列的具有正负系数的微波光子时延滤波器  
(b) N-tap microwave photonic delay-line filter with positive and negative coefficients based on PM-IM conversion in array of FBGs with positive and opposite dispersion

图 3 基于相位调制和相反色散元件的微波相位反转  
Fig. 3 Microwave phase inversion based on phase modulation to intensity modulation (PM-IM) conversion using dispersive elements with opposite dispersion

在上面基于 PM-IM 转换的微波光子时延线滤波器中,为了使两个抽头之间的相位准确地反转  $\pi$ ,PM-IM 转换中的两个啁啾 FBG 必须具有正好完全相反的啁啾特性,这使得啁啾 FBG 的制造过程更加困难。文献[58]利用超结构等效啁啾 FBG 的  $\pm 1$  阶反射谱具有两个完全相反啁啾的特性,利用一个超结构 FBG 实现了  $\pi$  相位反转的 PM-IM

转换。

很多实际应用需要用到具有任意幅度和相位响应的微波光子时延线滤波器,这通常需要滤波器具有复抽头系数。近年来,不少光子技术已经被用来实现具有复系数的微波光子时延线滤波器<sup>[59-60]</sup>。但是通常情况下这些滤波器的结构很复杂,并且对于一个滤波器来说大量抽头也是很难实现的。为了简化复系数微波光子滤波器的结构,文献[61]提出了一种基于非均匀采样的新概念。通过对一个特定的抽头引入额外的时延,相当于引入一个额外的相移,从而在微波光子时延线滤波器中产生一个等效的复系数。基于这项技术,可以针对某个特定频谱通道进行抽头时延的重构,从而实现具有任意频率响应的微波光子时延线滤波器<sup>[62]</sup>。

图 4(a)是一个基于非均匀采样的微波光子时延线滤波器,它是基于波长非均匀间隔的多波长激光光源来实现的。均匀色散将非均匀间隔的波长转变为非均匀间隔的时延。因为实际的抽头都是正系数的,所以比直接具有复系数的微波光子滤波器更容易实现。图 4(a)所示装置的最主要限制因素在于各个光载波波长必须精确控制。特别是当滤波器需要大量抽头的时候,系统的复杂程度及成本将会大大增加。一个简单的解决办法就是利用光谱切割光源来取代多波长激光光源。例如,可以利用一种空间离散啁啾光纤布拉格光栅(Spatially discrete chirped fiber Bragg grating, SD-CFBG)来产生光谱切割的宽带光源,从而实现非均匀采样的微波光子时延线滤波器<sup>[63]</sup>。这种特殊的啁啾 FBG 可以通过普通线性啁啾相位掩模技术来制作。在写制过程中,非均匀时延是在相邻子光栅之间引入轴向空间间隔来实现的。除了实现频谱切割的功能,SD-CFBG 还可以同时实现以下两个功能:(1)为滤波器抽头产生不均匀的时间间隔;(2)控制抽头系数。图 4(b)是一个基于 SD-CFBG 的具有等效复系数的微波光子时延线滤波器。这项技术使得非均匀间隔微波光子时延线滤波器变得更加容易实现,同时显著降低了系统成本。

### 2.1.2 光波与微波频谱响应转换

微波光子时延线滤波器具有有限冲击响应下的多抽头结构。抽头的数量决定了滤波器的频谱响应分辨率。为了得到高的频率分辨率,需要大量的抽头(光载波)。此外,有限冲击响应滤波器通常情况下具有一个周期性的光谱响应。然而在很多应用中,需要滤波器具有单独的带通或截止频带。这些问题可以通过光谱滤波器和微波滤波器响应

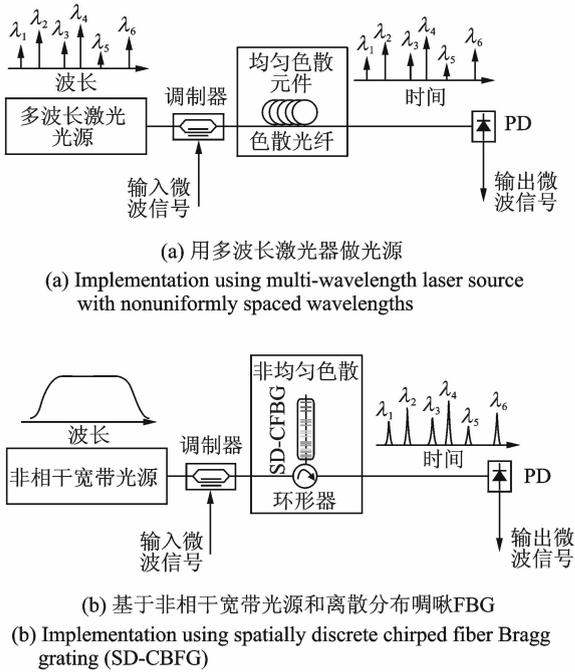


图 4 基于非均匀采样的微波光子时延线滤波器  
Fig. 4 Nonuniformly-spaced microwave photonic delay-line filter

转换这一不同的滤波器结构来解决<sup>[64]</sup>。

图 5 给出了这种微波光子滤波器的基本结构。单波长光载波在单边带调制器 (Single sideband modulator, SSBM) 中被输入微波信号调制。在小信号调制的条件下,输出信号包括光载波和一阶边带共两个频率分量,如下所示

$$E_{SSB}(t) = A_0 \exp(j\omega_0 t) + A_1 \exp[j(\omega_0 + \omega_{RF})t] \quad (2)$$

如果被调制的信号接下来由一个频谱响应为  $\rho(\omega) = |\rho(\omega)|[\exp j\theta(\omega)]$  的光谱滤波器进行滤波,则滤波器的输出光信号可以表示为

$$E_{OSF}(t) = |\rho(\omega_0)| A_0 \exp[j\omega_0 t + j\theta(\omega_0)] + |\rho(\omega_0 + \omega_{RF})| A_1 \exp[j(\omega_0 + \omega_{RF})t + j\theta(\omega_0 + \omega_{RF})] \quad (3)$$

最后,光电探测器将接收到的光信号转换为微波信号。通过比较所产生的微波信号与初始的输入微波信号,可以很容易得到该微波光子滤波器的频率响应为

$$H_{OMC}(\omega_{RF}) \propto |\rho(\omega_0)| |\rho(\omega_0 + \omega_{RF})| \times \exp[j\theta(\omega_0 + \omega_{RF}) - j\theta(\omega_0)] \quad (4)$$

如式(4)所示,通过单边带调制和高速光电探测器的外差检波,光谱滤波器的频谱响应被转换到一个微波滤波器的频谱响应。

基于这个概念,文献[64]提出了具有二阶相位响应(线性群时延响应)的微波光子滤波器。一个

均匀 FBG 被用作光谱滤波器。其线性群时延响应被转化为微波滤波器的二阶相位响应。具有二阶相位响应的微波光子滤波器可以被应用在啁啾微波脉冲的产生<sup>[65]</sup>和压缩<sup>[64]</sup>。此外,光谱滤波器与微波滤波器频谱响应转换的概念也已经成功用于微波移相器<sup>[66]</sup>。

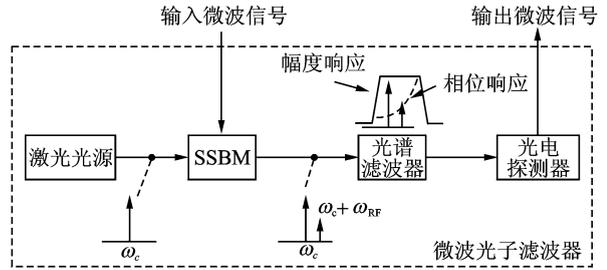


图 5 基于光谱滤波器与微波滤波器响应转换的微波光子滤波器  
Fig. 5 Microwave photonic filter implemented based on optical filter response to microwave filter response conversion

## 2.2 基于 FBG 的微波任意波形产生

任意波形微波信号被广泛地应用于雷达、无线通信、医学成像和现代仪器等系统中。由于光波相对于微波具有高速率和大带宽的优势,很多单纯利用电子技术难以实现的高频率和大带宽的微波任意波形产生可以通过应用光子技术来实现<sup>[23]</sup>。

由于 FBG 具有灵活的光谱特性,所以它在微波光子任意波形发生器中得到了广泛的应用。这里主要介绍两种利用 FBG 产生微波任意波形的技术,一种是基于光谱整形和频率-时间映射(Optical spectral shaping and frequency-time mapping, OSS-FTM),另一种是基于时域脉冲整形(Temporal pulse shaping, TPS)技术。

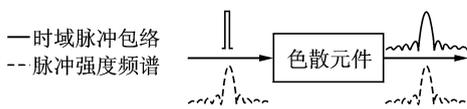
### 2.2.1 基于光谱整形和频率时间映射的微波任意波形产生

微波任意波形的产生可以通过光谱整形和色散引起的频率-时间映射来实现。图 6(a)说明了频率-时间映射过程的基本原理。如果一个时间宽度为  $\Delta t_0$  的有限变换脉冲  $g(t)$  通过色散值为  $\Phi_0$  的色散元件进行传输,则光脉冲会在时域中被展宽。如果满足时域 Fraunhofer 条件  $|\Phi_0 / \Delta t_0^2| \gg 1$ ,则被色散展宽的脉冲可以表示为<sup>[67]</sup>

$$y(t) \approx \exp\left(j \frac{t^2}{2\Phi_0}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau) \exp\left(-j \frac{t}{\Phi_0} \tau\right) d\tau \quad (5)$$

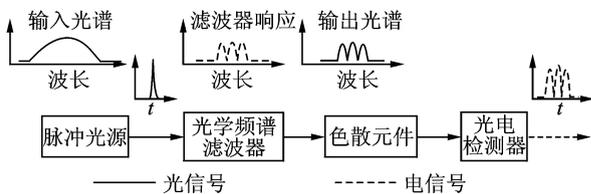
从式(5)可以看出,输出信号的强度恰好是输

入光脉冲信号包络的傅里叶转换。这说明光脉冲的频谱形状可以映射到拉伸的时域波形上,其确定的映射关系为  $\omega = t/\Phi_0$ 。因此,频率-时间映射过程也称为实时傅里叶变换<sup>[67]</sup>。图 6(b)表示的是基于光谱整形和频率时间映射的微波任意波形产生系统。这个系统由一个短脉冲光源、光谱整形器、色散元件以及光电探测器构成。光谱整形器用于对宽带光脉冲的频谱进行滤波和裁剪。经过色散元件引起的频率-时间映射过程之后,被拉伸的脉冲会在时域中展现出与裁剪过的脉冲光谱形状相同的波形。通过这种方法,微波时域波形的整形可以通过在频域的光谱滤波操作来实现。



(a) 色散引起的频率-时间映射

(a) Schematic diagram to show principle of dispersion-induced frequency-to-time mapping in dispersive device



(b) 微波任意波形产生系统

(b) Photonic microwave arbitrary waveform generation system

图 6 基于光谱整形和频率-时间映射的微波任意波形产生

Fig. 6 Photonic microwave arbitrary waveform generation based on optical spectral shaping and frequency-to-time mapping

这种方法的关键步骤是设计实现幅度频谱响应与目标微波波形相对应的光学频谱整形器。光谱整形器通常可以通过自由空间光学元件来实现,比如基于空间衍射光栅和空间光调制器(Spatial light modulator, SLM)的系统<sup>[68]</sup>。使用 SLM 来进行光谱整形从而实现微波任意波形的产生具有实时更新的明显优势<sup>[22,69]</sup>。但是,基于自由空间光学的光谱整形技术也存在难以校准以及与光纤元件耦合困难的问题。另一方面,光谱整形还可以通过全光纤器件来实现。与利用自由空间光学的解决方案相比,全光纤光谱整形器件具有低损耗、稳定性好、成本低以及与其他光纤器件无缝耦合等优势。

由于可以对 FBG 的光谱响应特性进行有效的

控制,所以它可以被用于实现全光纤光谱整形。多种基于 FBG 的光谱整形系统已经被开发出来并用于实现微波任意波形产生。例如,使用两个均匀 FBG,一个工作在透射模式,另一个工作在反射模式,可以得到一种光学频谱整形器,其光谱响应对应于超宽带(Ultrawideband, UWB) monocycle 或 doublet 波形。经过色散引入的线性频率-时间映射,可以在时域得到 UWB monocycle 或 doublet 的脉冲信号<sup>[70]</sup>。频率-时间的线性映射是通过一段光纤来实现的,因此光纤不但可以作为一个色散元件来完成映射过程,同时还可以将产生的超宽带信号传输到远程的收发端。所产生的 UWB 脉冲信号已经被广泛地应用于短距离及高速率无线通信系统中<sup>[71]</sup>。

基于 FBG 的光学频谱整形器还可以被用来产生微波啁啾脉冲。由于微波啁啾脉冲可以在接收端通过脉冲压缩来提高距离分辨率,所以已经被广泛应用于现代雷达系统<sup>[72]</sup>。为了产生微波啁啾脉冲,光学频谱整形器需要具有渐变的(啁啾)自由光谱响应,因此在线性频率-时间映射后会产生相应的微波啁啾波形。文献<sup>[73]</sup>报道了一种利用 FBG 实现一个具有啁啾自由光谱响应的光学频谱整形器。它是将两个具有不同啁啾率的啁啾 FBG 叠加写入到同一根光纤的芯层中,同时在两个 FBG 之间留有小的轴向偏移。在这个结构中,由于两个啁啾 FBG 之间的宽带反射,可以在光纤中实现分布式法布里珀罗(F-P)干涉。又因为两个作为等效谐振腔的 FBG 具有不同的啁啾率,所以谐振腔长度是光波长的函数,从而使得这种结构的光学频谱整形器具有啁啾的自由光谱响应。这项技术的另一个优点是避免了使用分立的干涉式结构,所以结构紧凑,对环境变化具有更好的免疫特性。

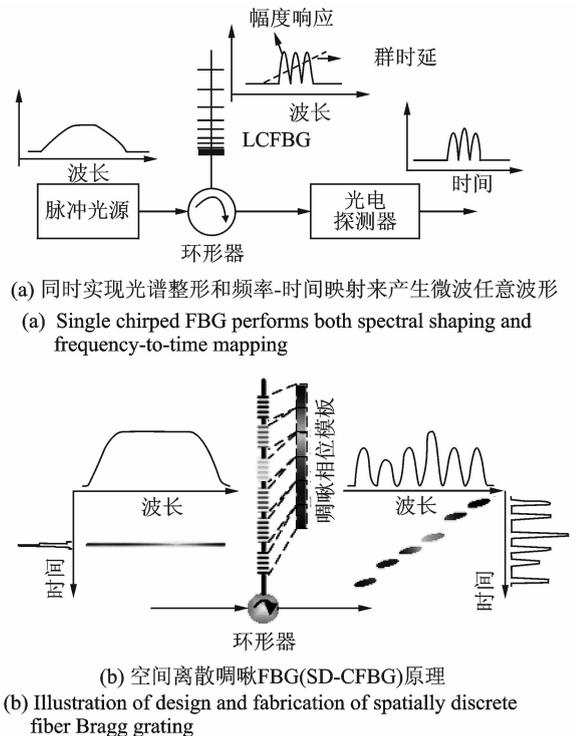
上述方法的主要局限性在于光学频谱整形器的光谱响应是固定的,因为一旦 FBG 被写制出来其光谱响应就很难调整。对于很多实际应用,微波啁啾波形的啁啾率和中心频率需要是可调的。为了解决这个问题,文献<sup>[74]</sup>提出了一种具有可调谐的啁啾自由光谱响应特性的光学频谱整形器。该方法利用了一个内部包含高反射线性啁啾 FBG 的 Sagnac 环镜结构。该环镜结构同样可以等效于一个与波长相关的分布式 F-P 谐振腔,从而产生啁啾的自由光谱响应。不同于文献<sup>[73]</sup>中需要两个具有不同啁啾率的线性啁啾 FBG,该 Sagnac 环镜只需要一个啁啾 FBG,所以制造难度和系统的复杂程度都会降低。更重要的是,通过调整光纤环镜

中的延时,这个光谱整形器的频谱响应可以实现重构,从而对生成的微波啁啾脉冲的中心频率进行调整。另外,为了能灵活调整微波啁啾脉冲的啁啾率,可以采用光学泵浦控制的方法<sup>[75]</sup>。该方法需要将啁啾 FBG 写入到铟镱共掺的特殊有源光纤中。当很强的泵浦光激励到有源光纤时,泵浦引起的热效应可以改变啁啾 FBG 的频谱响应。

值得注意的是,在上面介绍的微波啁啾波形发生器系统<sup>[73-75]</sup>中,需要用到具有啁啾自由光谱响应的光学频谱整形器。然而具有均匀自由光谱响应的光学频谱整形器显然更容易实现。文献[76]提出并实现了一种利用具有均匀自由光谱响应的光学频谱整形器来产生微波啁啾波形的新方法。在这种系统中,在色散元件中引入了高阶色散来实现非线性的频率-时间映射。这样均匀调制的光谱可以被非线性的映射转换成啁啾的微波波形。非线性啁啾布拉格光纤光栅(Nonlinearly chirped fiber Bragg grating, NL-CFBG)是一种非常理想的高阶色散元件来实现非线性频率-时间映射,从而产生啁啾的微波波形。这种特殊的 NL-CFBG 是通过普通线性啁啾 FBG 施加渐变应力来实现的。最终所生成的微波啁啾波形的频率分布可以通过对线性啁啾 FBG 施加不同的应力来控制。

在上面讨论的基于光谱整形和频率-时间映射的微波任意波形产生系统中,频谱整形与频率-时间映射通常是由两个独立的组件来完成的,FBG 在其中可以实现任何一个单一功能。另一方面,如果有一个单一的光学器件可以同时执行频谱整形和频率-时间映射这两个功能,则整个波形产生系统就可以得到大大的简化。事实上,这两个功能可以通过一种专门设计的线性啁啾 FBG 来实现。首先,啁啾 FBG 的反射光谱响应可以通过在制造过程中控制折射率调制函数来自由地控制<sup>[77]</sup>。同时,线性啁啾 FBG 的固有线性群时延响应可以用来实现线性频率-时间映射。文献[48]提出了一种利用单个线性啁啾 FBG 来同时实现以上两个功能,从而产生微波任意波形的办法。该系统的原理图如图 7(a)所示。这种“二合一”的设计大大简化了系统结构。用于实现两功能功能的啁啾 FBG 的设计是基于在强啁啾的 FBG 中精确的空间(光栅结构)到频率(光栅反射谱)的映射关系<sup>[48]</sup>。这种设计只需要对光纤折射率进行强度调制即可实现。因此,可以很容易地通过普通的 FBG 制造设备来写出。

利用线性啁啾 FBG 中的连续线性群时延响应可以很好地实现线性频率-时间映射。另一方面,如果在制造过程中将离散的群时延跳变引入到线性啁啾 FBG 中,这些离散的时间跳变将会被嵌入到频率-时间映射后产生的微波波形中。这一特性为设计微波任意波形发生器提供了额外的灵活性。这种引入了离散群时延跳变的 FBG 被称为空间离散啁啾光纤布拉格光栅。文献[78]提出了一种基于 SD-CFBG 的微波任意波形发生器。如图 7(b)所示,SD-CFBG 具有多通道反射频谱响应,同时其群时延响应具有用户定义的离散的通道间时延跳变。在微波任意波形产生系统中,SD-CFBG 可以作为多功能器件来使用,可以同时实现光谱整形、频率-时间映射和对光脉冲序列的时移。通过使用 SD-CFBG 来同时实现光谱整形和频率-时间映射的微波任意波形发生器已经成功地被用来产生具有大时间带宽积(Time-bandwidth product, TBWP)的微波波形,比如频率啁啾<sup>[78]</sup>或相位编码<sup>[79]</sup>的微波脉冲。



(a) 同时实现光谱整形和频率-时间映射来产生微波任意波形  
(a) Single chirped FBG performs both spectral shaping and frequency-to-time mapping

(b) 空间离散啁啾FBG(SD-CFBG)原理  
(b) Illustration of design and fabrication of spatially discrete fiber Bragg grating

图 7 基于单一啁啾 FBG 的微波任意波形产生系统  
Fig. 7 Photonic microwave arbitrary waveform generation based on one single chirped FBG

需要注意的是,虽然啁啾 FBG 可以作为高效的色散元件来实现频率-时间映射,并且具有插入损耗低、结构紧凑、非线性光学效应低的优点,然而其本身固有的群时延抖动(Group delay ripples,

GDR)<sup>[33]</sup>会在实现频率-时间映射过程中产生很多不需要的时域快变信号<sup>[80]</sup>,从而降低产生信号的信噪比。啁啾 FBG 的群时延抖动来源于在 FBG 边界处宽带反射造成的干涉现象。通过在 FBG 调制过程中的切趾处理,可以有效降低群时延抖动<sup>[81]</sup>。

### 2.2.2 基于时域脉冲整形的微波任意波形产生

基于傅里叶变换的脉冲整形已经被广泛地应用于超短光脉冲整形<sup>[68]</sup>。傅里叶变换脉冲整形可以在频域<sup>[82]</sup>或者时域<sup>[83]</sup>中实现,FBG 在两种结构中都发挥了重要作用。这里主要讨论通过基于 FBG 的傅里叶变换时域脉冲整形方法来实现微波任意波形的光学产生。

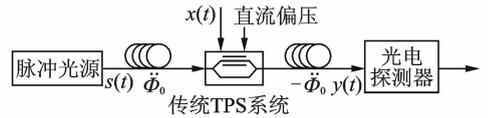
一个典型的 TPS 系统主要包括对输入脉冲进行展宽的色散元件、用于调制被拉伸光脉冲的电光调制器和用于对拉伸脉冲进行补偿压缩的第二级色散元件<sup>[83]</sup>。为了实现完整的脉冲压缩,两个色散元件需要具有完全互补的色散。图 8(a)表示的是一个利用马赫-曾德尔调制器进行时域脉冲调制的 TPS 系统。对于一个给定的输入光脉冲  $s(t)$  和输入微波调制信号  $x(t)$ ,如果满足时域 Fraunhofer 条件  $|\dot{\Phi}_0/\Delta t_0^2| \gg 1$ ,则 TPS 系统的输出光信号如下式所示<sup>[84]</sup>

$$y(t) = 2\pi |\dot{\Phi}_0| \exp\left(-j\frac{t^2}{2\dot{\Phi}_0}\right) \times \left[ s(-t) * X\left(-\frac{t}{\dot{\Phi}_0}\right) \right] \quad (6)$$

式中: \* 表示卷积运算,  $X(\omega)$  为  $x(t)$  的傅里叶变换。由式(6)可知, TPS 系统的输出光场是输入光脉冲和微波调制信号傅里叶变换的卷积。如果输入光信号为超短光脉冲,则它可以近似为单位的冲击函数。这样所产生的波形则是调制信号的简单傅里叶变换,因此这一过程也可以被称为对微波信号的实时傅里叶变换。TPS 技术的主要优势在于可以使用一个相对较慢的微波驱动信号来产生一个具有任意波形的超快光脉冲信号。

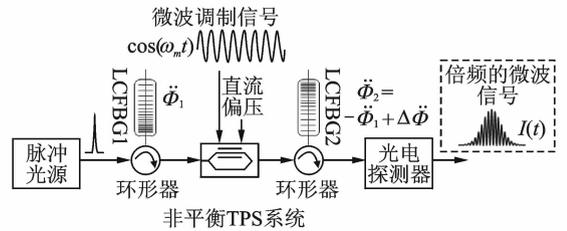
TPS 技术还可以扩展到产生高频微波信号。文献<sup>[85]</sup>提出了一种产生具有连续可调谐载波频率的微波波形的办法。该方法是通过非平衡 TPS 系统对初始微波调制信号进行倍频来实现的。图 8(b)展示了非平衡 TPS 系统的原理。系统使用了两个具有正负色散但在幅度上不不同的色散元件,比如线性啁啾 FBG。因此,该 TPS 系统在脉冲展宽和脉冲压缩中是不平衡的。整个系统可以看作

两个子系统的合成。第一个子系统具有调制器和两个互补的色散元件,因而是一个传统的均衡 TPS 系统,可以对微波调制信号进行实时傅里叶变换。第二个子系统是剩余色散元件,它的色散值是两个实际色散元件的色散差。剩余色散对整形过的光脉冲进行拉伸,从而实现第二次实时傅里叶变换。最后生成的微波波形将是对于初始微波调制信号的倍频版本。微波频率倍频因子  $M=2|\dot{\Phi}_1/\Delta\dot{\Phi}|$  是由第一阶色散  $\dot{\Phi}_1$  和剩余色散  $\Delta\dot{\Phi}$  共同决定的。此外,如果通过非线性啁啾 FBG 引入高阶色散,非平衡 TPS 系统可以用来从单频微波驱动信号产生倍频的载波频率可调的啁啾微波信号<sup>[86]</sup>。



(a) TPS 系统原理图

(a) Schematic of temporal pulse shaping (TPS) system for microwave arbitrary waveform generation



(b) 基于非平衡 TPS 系统的微波任意波形发生器

(b) Schematic of unbalanced TPS system for microwave waveform generation based on frequency multiplication

图 8 基于时域脉冲整形的微波任意波形产生

Fig. 8 Photonic microwave arbitrary waveform generation based on temporal pulse shaping (TPS) technique

除了微波任意波形产生,上面介绍的非平衡 TPS 系统还可以被用来测定超短光脉冲<sup>[87]</sup>。超短光脉冲(通常脉冲宽度在飞秒量级)的测量可以通过实时频谱干涉的方法来实现<sup>[88]</sup>。但是因为需要用到光干涉仪来产生两个相互延时的光脉冲,其测量系统变得不稳定,并容易受到周围环境扰动的影响。非平衡的 TPS 系统可以很好地解决这一问题<sup>[87]</sup>。首先,在抑制载波的调制方式下,非平衡 TPS 的第一个子系统可以产生两个相对延迟的光脉冲,对应于频域中的两个一阶调制边带。其次,剩余色散分量可以将两个光脉冲的干涉频谱映射到时域的干涉波形。通过对时域信号的高速采集和处理,可以实现对超短光脉冲的实时测量。

### 2.3 基于 FBG 的微波频谱感知

对未知微波信号的频率进行感知测量在国防及民用通信系统都是非常重要的。由于巧妙地利用了光学系统的一些特性,微波光子技术在微波频谱感知应用中具有很多传统电子技术无法比拟的优势,比如高速实时测量、大测量带宽、低损耗及抗电磁波干扰等。近年来,很多基于微波光子技术的解决方案已经被用来实现微波频谱感知。其中两种最成熟的方案分别基于直接功率监测和多通道测量。FBG 在两种方法中都起到了重要的作用。

#### 2.3.1 基于功率监测的微波频谱感知

通过监测接收微波或光信号的功率来确定未知微波信号的频率是一种简单而直接的方法。这种方法的原理如图 9(a)所示。通过电光调制器,待测微波信号首先加载到光载波上。被调制的光载波一分为二,分别被两个不同的频率(波长)相关的功率函数调制。通过合理设计频率相关功率函数,并对其输出信号进行线性处理,会最终得到一个只跟微波频率相关的功率分布。因此未知微波频率可以通过功率监测来确定。

最简单直接的频率相关的功率函数是色散引起的功率衰退函数<sup>[89]</sup>。但是因为需要用到高速的光电探测器,所以增加了系统成本。另一方面,具有不同频谱响应的两个光频谱滤波器也可以完成类似的功能<sup>[90]</sup>。因为仅仅需要检测低频的信号功率,避免了使用高速光电探测器,是一种更有效的方法。文献[91]提出了一种利用 FBG 同时实现两种不同的光谱滤波器,从而测量微波频率的方法。如图 9(b)所示,一个经过特殊设计的 FBG 的透射光谱响应和反射光谱响应可以实现两个不同的光谱滤波函数。通过监测和比较两个输出端的功率,可以推算出微波调制信号的频率。

#### 2.3.2 基于多通道测量的微波频谱感知

基于功率监测的微波频率测量方法虽然结构简单并且可以实现比较高的测量精度(通常小于几十兆赫兹),但是它不能用来测量具有多个频谱分量的微波信号。解决这一问题的方法是采用频谱多通道测量。图 10(a)是一个典型的基于频域多通道测量的微波频率感知系统。单一波长的光载波被未知微波信号调制,产生对应于不同微波频率的若干不同边带。被调制的光信号随即被多通道计在频域上进行直接采样。通过用探测器阵列来监测不同通道的输出信号,可以确定微波信号的频谱分布。在该系统中,通道总数决定了测量范围,而通道频率间隔则决定了测量的分辨率。因此设

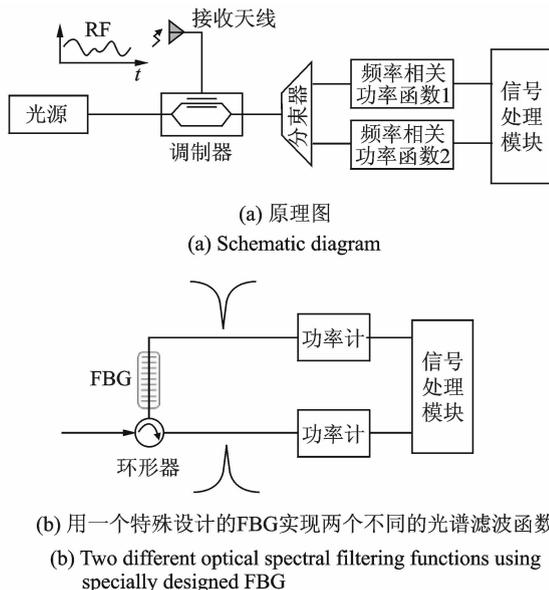


图 9 基于功率监测的微波频谱感知  
Fig. 9 Microwave spectrum sensing based on power monitoring

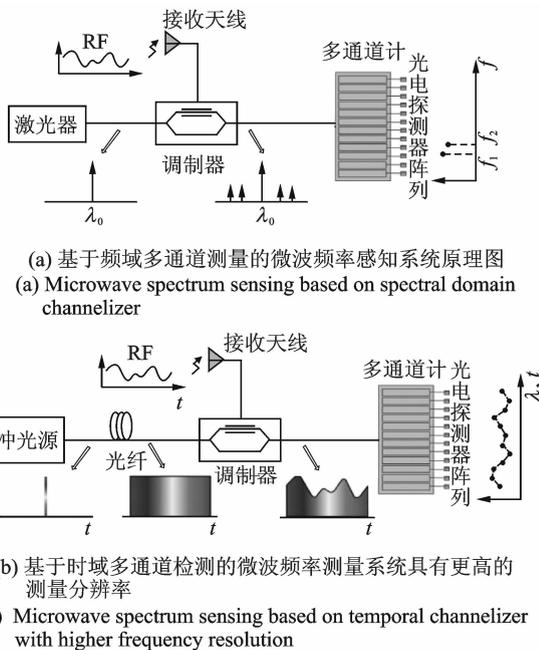


图 10 基于多通道测量的微波频谱感知  
Fig. 10 Channelizer-based microwave spectrum sensing techniques

计制作具有大量通道且通道间隔足够小的多通道计是非常关键的。研究者已经提出了很多实现光谱多通道计的方案,包括利用法布里珀罗标准具<sup>[92]</sup>和相移 FBG 阵列<sup>[93]</sup>等。但是目前光谱多通道计能实现的最小通道间隔仅为 1 GHz 左右<sup>[92]</sup>,因此大大限制了系统的测量分辨率。

充分利用短脉冲信号在色散中的频率-时间映

射关系,一种新的基于时域多通道检测的微波频率测量方法实现了比直接使用频域多通道计高 500 倍的测量分辨率<sup>[94-95]</sup>。图 10(b)是这种新方法的原理图。超短光脉冲首先被色散元件(比如色散光纤或啁啾 FBG)在时域拉伸,然后被待测微波信号调制。由于色散引起的频率-时间映射关系,被调制光脉冲的光谱形状也会与时域波形具有同样的形状。这个过程被称为时域光谱整形<sup>[96]</sup>。因为微波信号的波形被直接映射到脉冲的频谱上,多通道计在采样测量光谱的同时,实际上也等效地获得了采样的时域微波信号。通过时域光谱整形和等效采样过程,这种方法获得的微波频率测量分辨率可以大大提高。例如,使用通道间隔为 25 GHz 的多通道计,可以获得 200 MHz 的分辨率<sup>[94]</sup>。此外,通过非线性效应对光脉冲进行频谱展宽,这种方法的测量分辨率可以进一步提高到 50 MHz<sup>[95]</sup>。

## 2.4 光纤光栅传感器实时解调

不同类型的 FBG 已经在微波光子信号处理系统中发挥了重要的作用。同时,微波光子信号处理技术也可以被用来对 FBG 本身进行测量,比如对 FBG 传感器进行实时解调<sup>[97-100]</sup>。绝大多数的 FBG 传感器都基于波长调制<sup>[36]</sup>,测量到的外部信息(温度、应力、折射率等)会反映到 FBG 反射波长的变化。因此对 FBG 传感器的解调本质上是对其 FBG 频谱的测量。

对 FBG 传感器的解调技术已经很成熟<sup>[101]</sup>,但是其解调速度一直受限于频谱测量的刷新频率。另一方面,在很多实际应用中,例如对高速运转发动机的监测,需要对 FBG 传感器进行高速实时解调。传统的 FBG 解调技术往往难以满足要求。为了解决这个问题,利用前面讨论过的频率-时间映射关系,可以将 FBG 传感器的波长改变转换到时域波形的时延<sup>[97]</sup>。由于对时域信息的处理具有更高的分辨率,这种方法可以提供更高的解调精度。更重要的是,可以对 FBG 传感器进行高速的实时解调,刷新速度通常可以达到 100 MHz。此外,通过对映射的时域波形进行压缩,可以显著提高解调分辨率和信噪比<sup>[98-99]</sup>。为了实现有效的时域波形压缩,输入的光脉冲在被 FBG 传感器滤波之前,首先对其光谱进行啁啾化整形。这样在经过色散元件之后,可以得到一个啁啾的微波波形,其时间刻度对应于要解调的 FBG 波长。在接收端通过利用匹配滤波可以对啁啾信号进行有效的脉冲压缩。

在上述方法中,FBG 传感器的波长变化被转

换到时域波形的时延,因此解调分辨率最终会受到接收器(比如高速示波器)的时域分辨率的限制。虽然更大的色散值可以将固定的波长变化映射到更大的波形时延,但是它同时也限制了系统的刷新频率。这是因为更大的色散会将光脉冲拉伸得更多,从而可能导致相邻脉冲之间的叠加。因此在解调速度和解调分辨率之间存在着本质的矛盾。为了解决这一问题,文献<sup>[100]</sup>提出了一种可以同时实现高速和高分辨率 FBG 传感器解调的新方法。该方法同样基于色散引起的频率-时间映射,其原理图如图 11 所示。跟原有系统不同的是,一个参考 FBG 被用来产生一个在时域中的参考脉冲。这样 FBG 传感器的波长变化就被转化到两个时域脉冲的相对时延变化,进而光谱干涉图样的变化。两个脉冲在色散元件中实现频率-时间映射后,得到的微波脉冲的载波频率直接决定于 FBG 传感器的波长变化。通过这种方法,可以将光波长变化的测量转化为更低频的微波频率变化的测量,因而可以实现更高的解调分辨率。同时,因为测量分辨率不取决于色散值,因此系统还可以同时保持高速的更新频率,从而从根本上解决了速度和分辨率之间的矛盾。

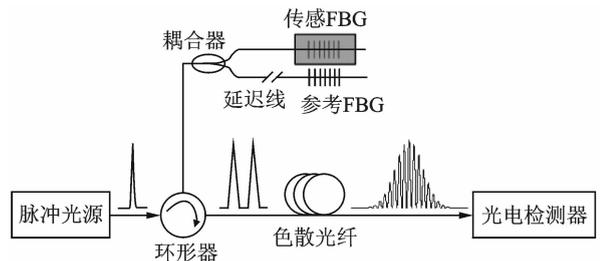


图 11 基于时域频谱干涉的 FBG 传感器解调系统

Fig. 11 High-speed FBG sensor interrogation system based on real-time spectral interferometry

## 3 结束语

本文讨论了光纤布拉格光栅的基本原理及其在微波光子信号处理中的应用。总体来说,FBG 在微波光子信号处理系统中可以被用作不同的功能器件:(1)时延装置;(2)窄带光滤波器;(3)色散元件;(4)宽带光谱整形器件。由于它具有体积小、损耗低、成本低以及与其他成熟光纤设备兼容性好的优势,FBG 已经在微波光子系统中被广泛应用。

与基于自由空间光学的微波光子系统相比,由于 FBG 本身的响应在制作后很难改变,所以基于 FBG 的系统具有可重构性差的限制。FBG 的调谐

技术主要是基于低速的机械<sup>[102]</sup>和热调节<sup>[103]</sup>。通过使用压电装置<sup>[104]</sup>或分立薄膜加热器<sup>[105]</sup>可以改进调谐的速度。此外还可以通过电气特性<sup>[106]</sup>或磁质特性<sup>[107]</sup>来进一步改善 FBG 的调节速度。

另一方面,虽然 FBG 器件本身成本很低,但是由于同时使用了分立光学器件,如高速电光调制器和光电探测器等,所以目前基于光纤器件的微波光子系统仍然很昂贵。基于光子集成电路技术的集成微波光子系统<sup>[28]</sup>可以有效降低整体系统成本、质量、占地空间和功耗等,因而成为了微波光子领域的一个新的研究热点。集成光子芯片已经被成功应用于微波光子信号处理中<sup>[31]</sup>。同时,通过在光子芯片上写制波导布拉格光栅,FBG 的相应功能可以移植到集成微波光子信号处理系统中<sup>[30]</sup>。例如,可以利用写制在硅绝缘体脊形波导中的集成布拉格光栅来制作可调光子延时线<sup>[108]</sup>,它的响应可以通过利用电特性<sup>[109]</sup>或热特性<sup>[108]</sup>进行调谐。此外,波导布拉格光栅在集成微波光子信号处理中的应用还包括实现超快全光时域微分器<sup>[110]</sup>等。

**致谢** 哈尔滨工程大学的闵锐同学对本文的写作提供了帮助,在此表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] Seeds A J. Microwave photonics[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002,50(3):877-887.
- [2] Seeds A J, Williams K J. Microwave photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4628-4641.
- [3] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photonics, 2007,1(6): 319-330.
- [4] Yao J P. Microwave Photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009,27(1/4):314-335.
- [5] Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, et al. A fully photonics-based coherent radar system [J]. Nature, 2014,507(7492):341-345.
- [6] Manka M E. Microwave photonics for electronic warfare applications[C]//IEEE Topical Meeting on Microwave Photonics. [S. l.]: IEEE, 2008:275-278.
- [7] Mjeku M, Gomes N J. Performance analysis of 802.11e transmission bursting in fiberfed networks[C]//IEEE Radio and Wireless Symposium. [S. l.]: IEEE, 2008:133-136.
- [8] Wireless future drives microwave photonics[J]. Nature Photonics, 2011,5(12):724-724.
- [9] Sotom M, Benazet B, Le Kernec A, et al. Microwave photonic technologies for flexible satellite telecom payloads[C]//35th European Conference on Optical Communication, Vienna, Austria: IEEE, 2009: 1063.
- [10] Isogawa T, Kumashiro T, Ho-Jin S, et al. Tomographic imaging using photonically generated low-coherence terahertz noise sources[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2012,2(5):485-492.
- [11] Qi G H, Yao J P, Seregelyi J, et al. Generation and distribution of a wide-band continuously tunable millimeter-wave signal with an optical external modulation technique[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005,53(10):3090-3097.
- [12] Minasian R A, Chan E H W, Yi X. Microwave photonic signal processing[J]. Optics Express, 2013,21(19):22918-22936.
- [13] Capmany J, Mora J, Gasulla I, et al. Microwave photonic signal processing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013,31(4):571-586.
- [14] Minasian R A. Photonic signal processing of microwave signals[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006,54(2):832-846.
- [15] Capmany J, Ortega B, Pastor D, et al. Discrete-time optical processing of microwave signals[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005,23(2):702-723.
- [16] Capmany J, Ortega B, Pastor D. A tutorial on microwave photonic filters [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006,24(1):201-209.
- [17] Frigyes I, Seeds A J. Optically generated true-time delay in phased-array antennas[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1995,43(9):2378-2386.
- [18] Ortega B, Cruz J L, Capmany J, et al. Variable delay line for phased-array antenna based on a chirped fiber grating[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000,48(8):1352-1360.
- [19] Wake D, Nkansah A, Gomes N J. Radio over fiber link design for next generation wireless systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(16): 2456-2464.
- [20] Koonen A M, Larrodé M G, Ng'oma A, et al. Perspectives of radio-over-fiber technologies[C]//Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference. San Diego, CA, USA: IEEE, 2008.
- [21] McKinney J D, Leaird D E, Weiner A M. Millimeter-wave arbitrary waveform generation with a direct space-to-time pulse shaper[J]. Optics Letters, 2002,

- 27(15):1345-1347.
- [22] Chou J, Han Y, Jalali B. Adaptive RF-photonics arbitrary waveform generator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003,15(4):581-583.
- [23] Yao J P. Photonic generation of microwave arbitrary waveforms[J]. *Optics Communications*, 2011,284(15):3723-3736.
- [24] Taylor H F. An optical analog-to-digital converter - design and analysis[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1979,15(4):210-216.
- [25] Valley G C. Photonic analog-to-digital converters[J]. *Optics Express*, 2007,15(5):1955-1982.
- [26] Han Y, Jalali B. Photonic time-stretched analog-to-digital converter: fundamental concepts and practical considerations[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003,21(12):3085-3103.
- [27] Yang S N, Wang C, Chi H, et al. Photonic analog-to-digital converter using Mach-Zehnder modulators having identical half-wave voltages with improved bit resolution[J]. *Applied Optics*, 2009,48(22):4458-4467.
- [28] Marpaung D, Roeloffzen C, Heideman R, et al. Integrated microwave photonics[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013,7(4):506-538.
- [29] Coldren L A. Photonic integrated circuits for microwave photonics[C]//*IEEE Topical Meeting on Microwave Photonics*. [S.l.]: IEEE, 2010.
- [30] Burla M, Cortés L R, Li M, et al. Integrated waveguide Bragg gratings for microwave photonics signal processing[J]. *Optics Express*, 2013,21(21):25120-25147.
- [31] Pant R, Marpaung D, Kabakova I V, et al. On-chip stimulated Brillouin scattering for microwave signal processing and generation[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014,8(5):653-666.
- [32] Burla M, Marpaung D, Zhuang L M, et al. On-chip CMOS compatible reconfigurable optical delay line with separate carrier tuning for microwave photonic signal processing[J]. *Optics Express*, 2011,19(22):21475-21484.
- [33] Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings*[M]. San Diego: Academic Press, 1999.
- [34] Erdogan T. Fiber grating spectra [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997,15(8):1277-1294.
- [35] Giles C R. Lightwave applications of fiber Bragg gratings [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997,15(8):1391-1404.
- [36] Rao Y J. In-fibre Bragg grating sensors[J]. *Measurement Science & Technology*, 1997,8(4):355-375.
- [37] Capmany J, Pastor D, Ortega B, et al. Applications of fiber Bragg gratings to microwave photonics[J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2000,19(4):483-494.
- [38] Wang C, Yao J P. Fiber Bragg gratings for microwave photonics subsystems [J]. *Optics Express*, 2013,21(19):22868-22884.
- [39] Minasian R A. Photonic signal processing of high-speed signals using fiber gratings[J]. *Optical Fiber Technology*, 2000,6(2):91-108.
- [40] Blais S, Yao J P. Photonic true-time delay beamforming based on superstructured fiber Bragg gratings with linearly increasing equivalent chirps [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009,27(9):1147-1154.
- [41] Blais S, Yao J P. Optical single sideband modulation using an ultranarrow dual-transmission-band fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006,18(21/24):2230-2232.
- [42] Yao J P, Zeng F, Wang Q. Photonic generation of ultrawideband signals [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007,25(11):3219-3235.
- [43] Li W, Zhang W, Yao J P. A wideband 360 degrees photonic-assisted microwave phase shifter using a polarization modulator and a polarization-maintaining fiber Bragg grating [J]. *Optics Express*, 2012,20(28):29838-29843.
- [44] Asghari M H, Wang C, Yao J P, et al. High-order passive photonic temporal integrators [J]. *Optics Letters*, 2010,35(8):1191-1193.
- [45] Li W, Yao J P. Investigation of photonic assisted microwave frequency multiplication based on external modulation [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010,58(11):3259-3268.
- [46] Li W, Yao J P. Optically tunable frequency-multiplying optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012,24(10):812-814.
- [47] Hill K O, Malo B, Bilodeau F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. *Applied Physics Letters*, 1993,62(10):1035-1037.
- [48] Wang C, Yao J P. Simultaneous optical spectral shaping and wavelength-to-time mapping for photonic microwave arbitrary waveform generation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009,21(9/12):793-795.
- [49] Winick K A, Roman J E. Design of corrugated waveguide filters by Fourier-transform techniques [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1990,26

- (11);1918-1929.
- [50] Feced R, Zervas M N, Muriel M A. An efficient inverse scattering algorithm for the design of nonuniform fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999,35(8):1105-1115.
- [51] Skaar J, Wang L, Erdogan T. Synthesis of thick optical thin-film filters with a layer-peeling inverse-scattering algorithm[J]. *Applied Optics*, 2001,40(13):2183-2189.
- [52] Morey W W, Meltz G, Glenn W H. Holographically generated gratings in optical fibers[J]. *Optics Photonics News*, 1990,1(7):14-16.
- [53] Wang C, Goda K, Ibsen M, et al. Dispersive Fourier transformation in the 800 nm spectral range[C]// *Conference on Lasers and Electro-Optics*. San Jose, California United States: OSA, 2012:ATu2G.2.
- [54] Hunter D B, Minasian R A. Microwave optical filters using in-fiber Bragg grating arrays[J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1996,6(2):103-105.
- [55] Yi X K, Minasian R A. Noise mitigation in spectrum sliced microwave photonic signal processors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24 (12):4959-4965.
- [56] Mora J, Andres M V, Cruz J L, et al. Tunable all-optical negative multitap microwave filters based on uniform fiber Bragg gratings [J]. *Optics Letters*, 2003,28(15):1308-1310.
- [57] Zeng F, Wang J, Yao J P. All-optical microwave bandpass filter with negative coefficients based on a phase modulator and linearly chirped fiber Bragg gratings[J]. *Optics Letters*, 2005, 30 (17):2203-2205.
- [58] Blals S, Yao J P. Tunable photonic microwave filter using a superstructured FBG with two reflection bands having complementary chirps[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008,20(1-4):199-201.
- [59] Loayssa A, Capmany J, Sagues M, et al. Demonstration of incoherent microwave photonic filters with all-optical complex coefficients[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006,18(16):1744-1746.
- [60] Yan Y, Yao J P. A tunable photonic microwave filter with a complex coefficient using an optical RF phase shifter [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007,19(17/20):1472-1474.
- [61] Dai Y, Yao J P. Nonuniformly-spaced photonic microwave delay-line filter[J]. *Optics Express*, 2008, 16(7):4713-4718.
- [62] Dai Y, Yao J P. Nonuniformly spaced photonic microwave delay-line filters and applications[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010,58(11):3279-3289.
- [63] Wang C, Yao J P. A nonuniformly spaced microwave photonic filter using a spatially discrete chirped FBG [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013,25 (19):1889-1892.
- [64] Wang C, Yao J P. Chirped microwave pulse compression using a photonic microwave filter with a nonlinear phase response[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, 57 (2):496-504.
- [65] Dai Y, Yao J P. Chirped microwave pulse generation using a photonic microwave delay-line filter with a quadratic phase response[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009,21(9/12):569-571.
- [66] Shahoei H, Yao J P. Tunable microwave photonic phase shifter based on slow and fast light effects in a tilted fiber Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2012, 20(13):14009-14014.
- [67] Muriel M A, Azana J, Carballar A. Real-time Fourier transformer based on fiber gratings[J]. *Optics Letters*, 1999,24(1):1-3.
- [68] Weiner A M. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000,71(5):1929-1960.
- [69] Lin I S, McKinney J D, Weiner A M. Photonic synthesis of broadband microwave arbitrary waveforms applicable to ultra-wideband communication [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2005,15(4):226-228.
- [70] Wang C, Zeng F, Yao J P. All-fiber ultrawideband pulse generation based on spectral-shaping and dispersion-induced frequency-to-time conversion [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007,19(2/4):137-139.
- [71] Yao J P. Photonics for ultrawideband communications[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2009,10(4):82-95.
- [72] Zmuda H, Toughlian E N, Photonic aspects of modern radar [M]. Norwood, MA, USA: Artech House, 1994:.
- [73] Wang C, Yao J P. Photonic generation of chirped microwave pulses using superimposed chirped fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008,20(9/12):882-884.
- [74] Wang C, Yao J P. Chirped microwave pulse generation based on optical spectral shaping and wavelength-to-time mapping using a Sagnac loop mirror incorporating a chirped fiber Bragg grating[J]. *Jour-*

- nal of Lightwave Technology, 2009, 27(16): 3336-3341.
- [75] Li M, Yao J P. Photonic generation of continuously tunable chirped microwave waveforms based on a temporal interferometer incorporating an optically pumped linearly chirped fiber Bragg grating [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(12): 3531-3537.
- [76] Wang C, Yao J P. Photonic generation of chirped millimeter-wave pulses based on nonlinear frequency-to-time mapping in a nonlinearly chirped fiber bragg grating[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(2): 542-553.
- [77] Azana J, Chen L R. Synthesis of temporal optical waveforms by fiber Bragg gratings: a new approach based on space-to-frequency-to-time mapping [J]. Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics, 2002, 19(11): 2758-2769.
- [78] Wang C, Yao J P. Large time-bandwidth product microwave arbitrary waveform generation using a spatially discrete chirped fiber Bragg grating[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(11): 1652-1660.
- [79] Wang C, Yao J P. Phase-coded millimeter-wave waveform generation using a spatially discrete chirped fiber Bragg grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(17): 1493-1495.
- [80] Chi H, Yao J. Chirped RF pulse generation based on optical spectral shaping and wavelength-to-time mapping using a nonlinearly chirped fiber Bragg grating [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(10): 1282-1287.
- [81] Kashyap R, de Lacerda Rocha M. On the group delay characteristics of chirped fibre Bragg gratings[J]. Optics Communications, 1998, 153(1/3): 19-22.
- [82] Wang C, Yao J P. Fourier transform ultrashort optical pulse shaping using a single chirped fiber Bragg grating [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(19): 1375-1377.
- [83] Heritage J P, Weiner A M. Optical systems and methods based upon temporal stretching, modulation and recompression of ultrashort pulses [P]. US4928316A, 1990-5-22.
- [84] Chi H, Yao J P. Symmetrical waveform generation based on temporal pulse shaping using amplitude-only modulator[J]. Electronics Letters, 2007, 43(7): 415-417.
- [85] Wang C, Li M, Yao J P. Continuously tunable photonic microwave frequency multiplication by use of an unbalanced temporal pulse shaping system[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(17): 1285-1287.
- [86] Li M, Wang C, Li W, et al. An unbalanced temporal pulse-shaping system for chirped microwave waveform generation[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(11): 2968-2975.
- [87] Wang C, Yao J P. Complete characterization of an optical pulse based on temporal interferometry using an unbalanced temporal pulse shaping system [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(5): 789-800.
- [88] Berger N K, Levit B, Smulakovsky V, et al. Complete characterization of optical pulses by real-time spectral interferometry[J]. Applied Optics, 2005, 44(36): 7862-7866.
- [89] Nguyen L V T, Hunter D B. A photonic technique for microwave frequency measurement [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(10): 1188-1190.
- [90] Chi H, Zou X, Yao J P. An approach to the measurement of microwave frequency based on optical power monitoring [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(13/16): 1249-1251.
- [91] Li Z, Wang C, Li M, et al. Instantaneous microwave frequency measurement using a special fiber Bragg grating[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2011, 21(1): 52-54.
- [92] Wang W, Davis R L, Jung T J, et al. Characterization of a coherent optical RF channelizer based on a diffraction grating[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(10): 1996-2001.
- [93] Hunter D B, Edvell L G, Englund M A. Wideband microwave photonic channelised receiver[C]//IEEE Topical Meeting on Microwave Photonics. [S. l.]: IEEE, 2005: 249-252.
- [94] Wang C, Yao J P. High-resolution microwave frequency measurement based on temporal channelization using a mode-locked laser[C]//IEEE International Microwave Symposium Digest (MTT). [S. l.]: IEEE, 2012.
- [95] Wang C, Yao J P. Ultrahigh-resolution photonic-assisted microwave frequency identification based on temporal channelization [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(12): 4275-4282.
- [96] Chou P C, Haus H A, Brennan Iii J F. Reconfigurable time-domain spectral shaping of an optical pulse

- stretched by a fiber Bragg grating[J]. *Optics Letters*, 2000,25(8):524-526.
- [97] Xia H, Wang C, Blais S, et al. Ultrafast and precise interrogation of fiber Bragg grating sensor based on wavelength-to-time mapping incorporating higher order dispersion[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010,28(3):254-261.
- [98] Yao J P, Wang C. Superimposed oppositely chirped FBGs for ultrafast FBG sensor interrogation with significantly improved resolution[C]//Advanced Photonics & Renewable Energy. Karlsruhe, Germany; OSA, 2010: BThB6.
- [99] Liu W, Li M, Wang C, et al. Real-time interrogation of a linearly chirped fiber Bragg grating sensor based on chirped pulse compression with improved resolution and signal-to-noise ratio[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011,29(9):1239-1247.
- [100] Wang C, Yao J P. Ultrafast and ultrahigh-resolution interrogation of a fiber Bragg grating sensor based on interferometric temporal spectroscopy[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(19): 2927-2933.
- [101] Tan Z, Wang C, Goda K, et al. All-optical passive periodic sawtooth filter and its application to fast interrogation of fiber Bragg grating sensor array[C]//Optical Fiber Communication Conference. Los Angeles California, United States; OSA, 2012; OTu1C.3.
- [102] Liu Y Q, Yang J L, Yao J P. Continuous true-time-delay beamforming for phased array antenna using a tunable chirped fiber grating delay line[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(8): 1172-1174.
- [103] Shahoei H, Li M, Yao J P. Continuously tunable time delay using an optically pumped linear chirped fiber Bragg grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011,29(10):1465-1472.
- [104] Feng K M, Chai J X, Grubsky V, et al. Dynamic dispersion compensation in a 10-Gb/s optical system using a novel voltage tuned nonlinearly chirped fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999,11(3):373-375.
- [105] Matsumoto S, Takabayashi M, Yoshiara K, et al. Tunable dispersion slope compensator with a chirped fiber grating and a divided thin-film heater for 160-Gb/s RZ transmissions[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004,16(4):1095-1097.
- [106] Rugeland P, Yu Z, Sterner C, et al. Photonic scanning receiver using an electrically tuned fiber Bragg grating[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(24): 3794-3796.
- [107] Adams L E, Mavoori H, Jin S, et al. Dynamic measurements of magnetically-strain tuned FBG for fast reconfigurable add/drop [C]//Optical Fiber Communication Conference. San Diego, CA, USA; IEEE, 1999:143-145.
- [108] Giuntoni I, Stolarek D, Kroushkov D I, et al. Continuously tunable delay line based on SOI tapered Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2012,20(10): 11241-11246.
- [109] Khan S, Baghban M A, Fathpour S. Electronically tunable silicon photonic delay lines[J]. *Optics Express*, 2011,19(12):11780-11785.
- [110] Rutkowska K A, Duchesne D, Strain M J, et al. Ultrafast all-optical temporal differentiators based on CMOS-compatible integrated-waveguide Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2011,19(20):19514-19522.

**作者简介:**王超(1979-),男,博士,助理教授,研究方向:微波光子信号处理,高速光学成像,E-mail:C. wang@kent.ac.uk。

