

相位调制到强度调制转换技术的研究动态

魏朝林 胡姝玲 王鑫龙 邵洪峰

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要 针对广泛应用于微波光子系统中的相位调制到强度调制(PM-IM)转换进行了原理和方法特点的分析,总结了PM-IM转换的分类。根据PM-IM转换在微波光子滤波器、超宽带(UWB)系统、全光微波产生、光子微波频率变换和微波频率瞬时监测等领域中的重要应用做了详细的跟踪研究,阐述了PM-IM转换技术的优势。最后,指出PM-IM转换的发展趋势是提高转换速度和精度、减少插入损耗和提高系统的可靠性。

关键词 光纤光学; 微波光子学; 相位调制; 相位调制到强度调制转换; 微波信号处理

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.110003

Development of Research on Phase Modulation to Intensity Modulation Conversion

Wei Zhaolin Hu Shuling Wang Xinlong Shao Hongfeng

(School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract The principle and technique characteristics of phase-modulation to intensity-modulation conversion (PM-IM), which is widely used in microwave photonic system, are analyzed. Categories of PM-IM are summarized. The applications of microwave photonic filter, ultra-wideband (UWB) system, all-optical microwave generation, microwave frequency conversion and instantaneous microwave frequency measurement are introduced in detail, and the advantages of PM-IM are discussed. At last, it is pointed out that the research directions of PM-IM are improving rate and precision, reducing insert loss and improving system reliability.

Key words fiber optics; microwave photonics; phase-modulation; phase-modulation to intensity-modulation conversion; microwave signal processing

OCIS codes 060.5060; 350.4010; 070.1170

1 引言

20世纪末,微波与光子技术相结合,形成了一门新兴的交叉学科——微波光子学^[1]。微波光子系统具有损耗低、质量轻、带宽大、抗电磁干扰能力强等优点。其中,电光调制器作为微波光子系统的一种重要器件,性能好坏直接决定着整个系统的性能。

电光相位调制器作为最简单的电光调制结构,与常用的马赫-曾德尔(M-Z)强度调制器相比,具有结构简单、插入损耗低、无偏置漂移等优点。但是,相位调制(PM)后的信号不能像强度调制(IM)后的信号一样可以直接被光电探测器(PD)探测,为充分利用相位调制和强度调制的优点,研究人员进行了大量相位调制到强度调制(PM-IM)转换的研究。

本文从PM-IM转换的基本原理出发,对微波光子滤波器、超宽带(UWB)系统、全光微波产生、光子微波频率变换和微波频率瞬时监测等领域PM-IM转换的应用进行了归纳总结,明确指出PM-IM转换发展趋势是提高转换速度和精度、减少插入损耗和提高系统的可靠性。

收稿日期: 2013-06-19; **收到修改稿日期**: 2013-07-17; **网络出版日期**: 2013-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(61074158)

作者简介: 魏朝林(1990—),男,硕士研究生,主要从事微波光子学方面的研究。E-mail: weizlbuaa@126.com

导师简介: 胡姝玲(1971—),女,博士,副教授,主要从事光纤激光器和微波光子学方面的研究。

E-mail: hulx@hotmail.com(通信联系人)

2 PM-IM 转换的基本原理

相位调制后光载波的归一化电场可以写为

$$E(t) = \cos[\omega_0 t + \Delta\varphi(t)], \quad (1)$$

式中 ω_0 为光载波的角频率; $\Delta\varphi(t)$ 为调制信号引起光载波的相位变化, 一般可以表示为

$$\Delta\varphi(t) = \beta_{\text{PM}} \times f(t), \quad (2)$$

式中 β_{PM} 为相位调制系数, 定义为施加单位电压引起光载波的相位变化; $f(t)$ 为电调制信号。若 $f(t)$ 是具有零初始相位的单频正弦信号, 则 $f(t)$ 可以写为 $f(t) = V_e \cos(\omega_m t)$, V_e 和 ω_m 分别为调制信号的幅度和角频率, 可将(1)式展开成如下贝塞尔函数形式^[2]:

$$E(t) = \cos[\omega_0 t + \beta_{\text{PM}} \times V_e \cos(\omega_m t)] = \sum_{-\infty}^{+\infty} J_n(\beta_{\text{PM}} V_e) \cos\left[(\omega_0 + n\omega_m)t + \frac{1}{2}n\pi\right]. \quad (3)$$

由贝塞尔函数性质可知, 当 n 为奇数时有, $J_n = -J_n$; 为方便起见, 省略掉参数 $\beta_{\text{PM}} V_e$, 直接用 J_n 表示, 则(3)式可以写为

$$E(t) = J_0 \cos(\omega_0 t) + J_1 \cos\left[(\omega_0 + \omega_m)t + \frac{\pi}{2}\right] - J_1 \cos\left[(\omega_0 - \omega_m)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2 \cos\left[(\omega_0 + 2\omega_m)t + 2 \times \frac{\pi}{2}\right] + J_2 \cos\left[(\omega_0 - 2\omega_m)t - 2 \times \frac{\pi}{2}\right] + \dots \quad (4)$$

从(4)式中可以看到, 相位调制的过程产生了一系列的边带, 如图 1 所示。尽管相位调制后信号的各边带和载波相互拍频, 但是在 PD 上不能产生拍频信号, 这是由于每个拍频信号总是存在一个与之等大反相的信号, 它们之间相互抵消。为了恢复载波上携带的信息, 需要将相位调制的信号转换为强度调制的信号。要想实现 PM-IM 转换, 就必须打破相位调制产生的各边带和载波之间相位或幅度的平衡关系, 这是 PM-IM 转换的基本理论。

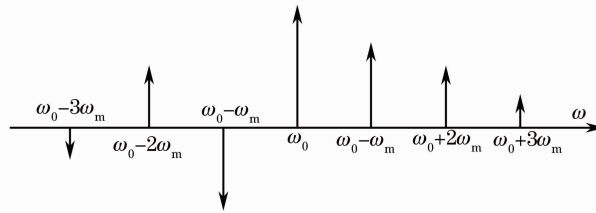


图 1 相位调制信号的光谱图

Fig. 1 Spectrum of phase-modulated signal

实现 PM-IM 转换要从打破相位或幅度的平衡着手。近 30 年来, 研究人员提出许多方案^[3-8], 其中典型方案如表 1、表 2 所示。

表 1 通过打破相位平衡来实现 PM-IM 的进展

Stable 1 Progress of PM-IM based on breaking the phase balance

Reseachers	Method	Time	Appliction
Chrapyyv <i>et al.</i> [3]	Single mode fiber	1986	
Walker <i>et al.</i> [4]	Single mode fiber	1992	Milimeter waves
Marti <i>et al.</i> [5]	Fiber Bragg gating	1999	Frequency upconversion
Li <i>et al.</i> [6]	Brillouin scattering	2011	Radio-over-fiber (ROF) systems

表 2 通过打破幅度平衡来实现 PM-IM 进展

Stable 2 Progress of PM-IM based on breaking the amplitude balance

Reseachers	Method	Time	Application
Yao ^[7]	Brillouin selection amplifier	1998	Frequency multiplication
Zeng <i>et al.</i> [8]	Optical frequency discriminator	2005	UWB systems

在小信号输入条件下, 仅考虑一阶上下边带, 高阶分量可以忽略, 则(4)式可以写为

$$E(t) = J_0 \cos(\omega_0 t) + J_1 \cos\left[(\omega_0 + \omega_m)t + \frac{\pi}{2}\right] - J_1 \cos\left[(\omega_0 - \omega_m)t - \frac{\pi}{2}\right]. \quad (5)$$

对于表 1 中的方法,通过打破载波和边带之间的相位平衡来实现 PM-IM 转换。从数学表达式上来看,采用相应的技术后(5)式可以表示为^[2]

$$E(t) = J_0 \cos(\omega_0 t + \theta_0) + J_1 \cos\left[(\omega_0 + \omega_m)t + \frac{\pi}{2} + \theta_{+1}\right] - J_1 \cos\left[(\omega_0 - \omega_m)t - \frac{\pi}{2} + \theta_{-1}\right], \quad (6)$$

式中 $\theta_0, \theta_{+1}, \theta_{-1}$ 分别是光载波、上边带、下边带经过色散器件后的相位变化。在图 2 所示基于色散元器件的 PM-IM 转换中,相位调制后的信号经过色散器件后载波和边带都产生了一个相位延迟,从而打破了相位之间的平衡状态,拍频信号可以在 PD 上探测到。

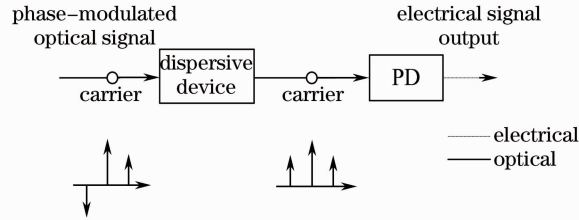


图 2 基于色散元器件的 PM-IM 转换

Fig. 2 Chromatic-dispersion-based PM-IM conversion

对于表 2 中的方法,通过打破载波和边带之间的幅度平衡来实现 PM-IM 转换。从数学表达式上来看,采用相应的技术后(5)式可以表示为^[9]

$$E(t) = J_0 \cos(\omega_0 t) + A \cdot J_1 \cos\left[(\omega_0 + \omega_m)t + \frac{\pi}{2}\right] - B \cdot J_1 \cos\left[(\omega_0 - \omega_m)t - \frac{\pi}{2}\right], \quad (7)$$

式中 A 和 B 表示边带幅度的增益且 $A \neq B$ 。图 5 所示为理想光滤波器的频率响应,它有两个线性的斜边,若使相位调制后的载波信号位于滤波器频率响应的斜边上边带,则幅度将发生改变,即可实现 PM-IM 的转换。

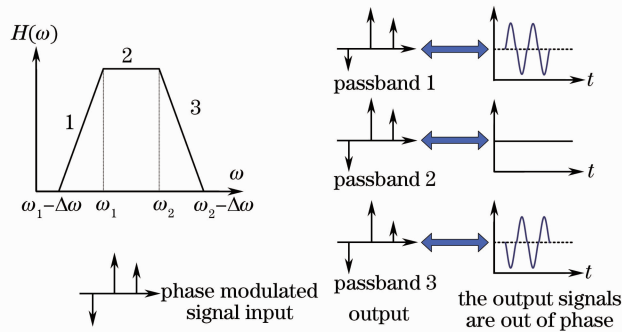


图 3 理想带通光滤波器的频率响应

Fig. 3 Ideal frequency response of an optical filter with two linear slopes and a flat top

3 PM-IM 转换在各领域的应用

在微波光子滤波器、UWB 系统、全光微波产生、光子微波频率变换和微波频率瞬时监测等领域中,为了满足新的要求,例如损耗低、带宽高、抗干扰性强等特点,对全光域方法提出了新的要求。这些应用在全光域内实现,相位调制器起到十分重要的作用,相位调制后的信号在经过各种色散器件后,实现了 PM-IM 转换,解决了使用强度调制器时存在的偏置漂移问题,同时也利用了强度调制信号可以被直接探测的优势。因此 PM-IM 转换在微波光子系统中扮演着重要的角色。

3.1 微波光子滤波器

微波光子滤波器是在射频链路中执行与普通的微波滤波器同样功能的光子学系统,并具有光子技术的低损耗、高带宽、抗电磁干扰、易调谐等优点^[10]。近年来研究人员对微波光子滤波器进行了深入的研究^[11-23],使滤波器的性能有了很大的提高。微波光子滤波器存在正抽头和负抽头两种形式。

正抽头滤波器存在两个明显的缺点:首先,正抽头滤波器实现的传递函数的形状有限;其次,正抽头滤波器的传递函数在基带处总是有一个通带,即所谓的低通效应。为克服以上缺点,研究人员为实现负抽头提出

了许多方案:1) 在电域内可以实现负抽头^[10-11],但是成本比较高;2) 采用半导体光放大器(SOA)交叉增益和交叉相位调制来实现负抽头^[14],但滤波器的带宽要受到 SOA 带宽的限制;3) 使用光纤光栅切割宽带光源的方法实现负抽头^[15],由于光平均功率为正值,所以在基带处仍存在一个通带;4) 通过 M-Z 调制器偏置在具有相反斜率的传输曲线位置来实现正负抽头^[16-17],但也存在着偏置漂移的局限。

通过对以往方案的不断改进,2005 年加拿大的 Zeng 等^[18]提出了一种基于相位调制器和线性啁啾光纤光栅的负抽头微波光子滤波器的方案,其原理如图 4 所示。在调制深度较低时,相位调制的结果产生一个载波和两个等幅反相的一阶边带。经过色散器件,则两个一阶边带的反相关系将会被改变。当色散器件的色散系数 $D>0$,左边的边带将经历更多的相移,最终载波和两个边带将可能变得同相,如果 $D<0$,右边的边带将经历更多的相移,载波和两边带将可能变得反相。最后 PM-IM 转换后得到的两个微波信号将会有有一个 180° 的相位差,其中一个作为正抽头,另一个为负抽头。同年,渥太华大学的研究小组提出了另外一种基于相位调制器和 PM-IM 转换的负抽头微波光子滤波器方案^[17]。与前面通过改变边带的相位来实现 PM-IM 转换不同,他们把相位调制光信号放到光滤波器的斜边上反射来打破上下边带的幅度平衡来实现 PM-IM 的转换,并且可以选择滤波器具有不同斜率的斜边来获得正抽头和负抽头。

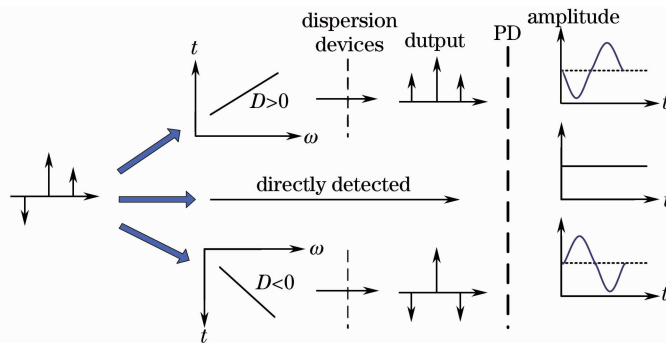


图 4 基于相位调制器和线性啁啾光纤光栅产生正负抽头的原理图

Fig. 4 Generation of positive and negative coefficients based on phase modulation and linearly chirped fiber Bragg grating

基于 PM-IM 转换的微波光子滤波器在负抽头的产生和正负抽头同时产生,以及在此基础上进行连续可调微波光子滤波器的研究方面^[24-25],与以前的方法相比都具有很大的优势,不仅损耗低、带宽高、抗电磁干扰,而且不存在偏置漂移,极大地提高了系统的稳定性。

3.2 UWB 系统

UWB 无线通信系统具有传输速率高、功耗低、抗干扰性强和免授权等优点。在电域内产生 UWB 信号比较困难且成本较高,在光域却有很多合适的方法来产生 UWB 通信所需的高斯一阶或二阶脉冲。因此,UWB 信号的光子学产生已经成为微波光子学研究的一个热点分支。

产生 UWB 信号的光子学技术主要有两类:一类是光电混合的方法^[22-24],基本原理是系统输入一个原始的高斯脉冲电信号,通过光域处理技术,得到适合 UWB 通信的高斯脉冲的一阶微分或二阶微分形式;一类是全光处理的方法^[26-34],无需输入任何电域的信号就能直接在光电转换之后产生适合 UWB 通信的电脉冲。研究人员近几年提出了一些基于相位调制器产生 UWB 信号的方法,可以利用 PM-IM 转换的带通效应来产生 UWB 信号。

2006 年加拿大的 Zeng 等^[35-36]利用相位调制器和 PM-IM 转换效应实现了 UWB 脉冲信号的产生。一段 25 km 的单模光纤被用来打破上下边带的反相关系,实现 PM-IM 转换。这种色散引入的 PM-IM 转换是频率依赖的,得到的频率响应相当于一个微波带通滤波器。原始高斯脉冲通过这样一个系统后,在低频段的频谱将会被滤除,最终得到一个近似于高斯脉冲二阶微分形式的功率谱^[35];一段光纤光栅被用来实现 PM-IM 的转换,当把相位调制后的信号投射到光纤光栅反射谱的斜边上反射之后,上下边带之间幅度的平衡被打破。如果光纤光栅反射谱的斜边满足一次或二次方斜率,那么这时光纤光栅起到了一次或二次鉴频器的作用,最后对应到电域就相当于对信号进行了一次或二次微分运算,这样就可以从原始高斯脉冲得到适合 UWB 通信的高斯一阶和二阶脉冲^[36]。还可以通过改变光载波的位置得到形状不同或者极性相反的 UWB

脉冲,实现 UWB 信号的脉冲形状调制或脉冲极性调制。如图 5 所示,A,B,C,D 四点对应光栅不同的位置,当光载波位于不同的位置时可以分别得到四种不同的 UWB 脉冲信号,分别如图 5(a)~(d)部分所示。

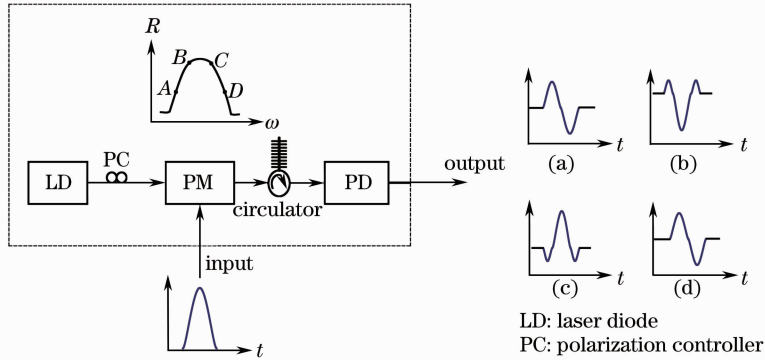


图 5 基于相位调制器和光纤光栅鉴频器的 UWB 信号产生

Fig. 5 Generation of UWB signals based on phase modulation and fiber grating frequency discriminator

UWB 信号的产生中,无论是使用长距离色散光纤,还是光纤光栅,系统传输的过程都将存在 PM-IM 转换的响应。基于相位调制器调制的信号与强度调制器的信号相比较,在偏置漂移上,相位调制器不需要偏置电流,因此不存在漂移。并且这一过程中 PM-IM 转换同样实现了带通滤波的频率响应。

3.3 全光微波信号产生

传统上微波/毫米波信号的产生是通过倍频电路来实现的,当微波信号频率超过 26 GHz 时,使用电子电路的方法就比较复杂且成本较高。在光域,两个相干度较好的光信号拍频可以实现频率高达太赫兹 (THz) 的微波信号。所以,通过光子学技术来产生微波/毫米波信号是十分令人关注的。

1999 年西班牙研究人员提出利用啁啾光纤光栅来实现 PM-IM 转换,产生高频毫米波谐波信号^[5]。2005 年加拿大的 Qi 等^[37]提出使用相位调制器和固定波长的陷波器来产生连续可调谐的毫米波信号。一个可调谐的激光源通过一个偏振控制器输入到相位调制器作为载波,微波信号通过相位调制器去调制光载波。调制后的信号直接投射到 PD 上只能产生一个直流信号,让其通过一个陷波点对准光载波的陷波器,把载波滤除,这样在 PD 上拍频产生两倍频或四倍频的微波/毫米波信号。当输入 18.8~25 GHz 的连续可调微波信号时,可以产生并传输 37.6~25 GHz 和 75.2~100 GHz 两个频段的可调谐信号。2007 年文鸿等^[38]提出一种基于相位调制器产生毫米波信号的全双工无线通信系统,实现了重复频率为 40 GHz 的载波抑制双边带毫米波。

使用光纤光栅和相位调制器也可以产生可调谐微波信号^[39],这里需要用一个幅度和相位响应都关于中心波长对称的光纤光栅,该光纤光栅的作用有两个:1) 打破相位调制后信号相位和幅度的平衡来实现 PM-IM 转换;2) 滤除高阶边带。

3.4 光子微波频率变换

在传统的微波/射频电路中,微波的上变频和下变频是通过使用二极管混频器和有源晶体管混频器来实现的,但是对于动态范围较宽的变频,就需要很高功率的器件。由于光子技术处理微波信号有其与生俱来的优点,所以运用光子学为实现微波频率变换提供了新的选择。

法国的 Maury 等^[40]提出使用两路微波信号直接调制一个半导体激光器,然后用一个 M-Z 干涉仪实现频率调制到强度调制的转换,最后得到上变频的信号。这种直接调制的优点是系统结构简单,成本低,缺点是调制微波信号的频率有限,一般输入的射频(RF)信号不能超过 10 GHz。而外部调制的引入可以解决直接调制激光器带宽较小的问题^[41]。考虑直接调制和外部调制相结合的混频方案^[42],研究人员提出使用直接调制的激光和一个相位调制器来实现微波频率的上变频,系统原理如图 6 所示。一个中频信号经直接调制激光器后作为光载波,与一个高频的本振信号通过一个相位调制器混频。相位调制后的信号通过一段 25 km 的单模光纤实现 PM-IM,输入 3 GHz 的中频信号和 8.5 GHz 的本振信号,最终得到了 11.5 GHz 的上变频信号。

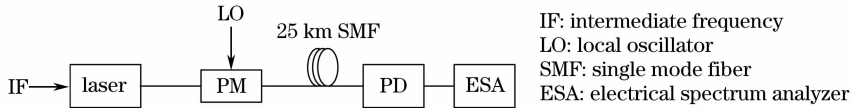


图 6 基于相位调制器和一段单模光纤来实现微波上变频

Fig. 6 Frequency up-conversion using a phase modulator and a length of SMF

在通常的频率变换系统中,采用强度调制器调制信号频率的大小受到一定的限制,基于相位调制器调制的方案大大地改善了频率的限制,PM-IM 转换在实现频率变换上起到使用相位调制器代替强度调制器的作用。

3.5 微波频率瞬时监测

在雷达及其他电子对抗应用中,要求微波接收器能从一系列宽带信号中准确无误地监测到未知信号。与传统的瞬时微波频率监测技术相比,光子技术在微波信号处理上具有宽带宽、低损耗、抗电磁干扰等优点,受到了人们的广泛关注。

十几年来研究人员提出了许多在光域实现瞬时微波频率监测的方法^[43-48]。其中,2009 年 Zhang 等^[49]提出了一种新颖的微波频率实时监测的方法,系统原理如图 7 所示。来自 LD 的不同波长的光波进入多路复用器(MUX)后被送入相位调制器,并且未知的 RF 信号被送入 PM。调制后的信号通过一段色散光纤产生 PM-IM 转换后进入多路分配器,在两个 PD 上转换成两个电信号。由于调制器两个载波的色散系数不同,所以两个通道上探测到的 RF 信号功率也不同,由此可以辨别未知的 RF 信号。当 RF 信号在 11~15 GHz 时,测试的分辨率可以达到 ± 0.1 GHz,并且系统采用的是相位调制器而不是 M-Z 强度调制器,所以不存在偏置漂移问题,使整个系统的稳定性得到了很大的提高。

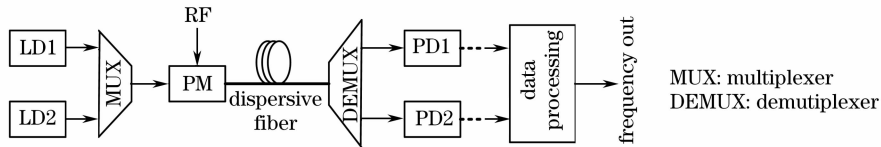


图 7 微波频率实时监测原理框图

Fig. 7 Schematic of the approach for instantaneous microwave frequency measurement

微波检测系统充分利用了微波光子技术的优点,在防御系统中发挥着重要的作用,要求监测系统监测带宽大、体积小、损耗低、抗电磁干扰,实现更为精准、实时的瞬时捕获^[50]。

4 结束语

PM-IM 转换不仅具有较多的应用领域,而且其应用功能还在进一步的开发中。由于微波光子系统具有传输带宽大、损耗低和抗电磁干扰能力强等特点,其优势是其他系统所不能比拟的。随着科学技术的进步和发展,PM-IM 转换技术在微波光子系统中必将得到快速发展和广泛应用。因此,关于 PM-IM 转换技术的深度研究具有十分重要的意义。其深度研究可以归纳为进一步提高 PM-IM 转换的速率和精度、增大转换的带宽、改进转换的工艺,使微波光子系统更加稳定、有效。

参 考 文 献

- 1 J Seed. Microwave photonics[J]. IEEE Trans Microwave Theory Technol, 2002, 50(3): 877-887.
- 2 J P Yao, Z Fei, Q Wang. Photonic generation of ultrawideband signals[J]. J Lightwave Technol, 2007, 25(11): 3219-3235.
- 3 A R Chrapyvy, R W Tkach, L L Buhl, *et al.*. Phase modulation to amplitude modulation conversion of CW laser light in optical fibers[J]. Electron Lett, 1986, 22(8): 409-410.
- 4 N G Walker, D Wake, I C Smith. Efficient millimeter-wave signal generation through FM-IM conversion in dispersive optical fiber links[J]. Electron Lett, 1992, 28(21): 2027-2028.
- 5 J Marti, F Ramos, V Polo, *et al.*. Millimeter-wave generation and harmonic upconversion through PM-IM conversion in chirped fiber gratings[J]. Electron Lett, 1999, 35(15): 1265-1266.
- 6 W Li, N H Zhu, L X Wang, *et al.*. Broadband phase-to-intensity modulation conversion for microwave photonics processing using Brillouin-assisted carrier phase shift[J]. J Lightw Technol, 2011, 29(24): 3616-3621.

- 7 X S Yao. Phase-to-amplitude modulation conversion using Brillouin selective sideband amplification[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1998, 10(2): 264–266.
- 8 F Zeng, J P Yao. Frequency domain analysis of fiber Bragg grating based phase modulation to intensity modulation conversion[C]. SPIE, 2005, 5971: 594–601.
- 9 J Capmany, B Ortega, D Pastor. A tutorial on microwave photonic filters[J]. J Lightw Technol, 2006, 24(1): 201–209.
- 10 F Zeng, J Yao. Investigation of phase-modulator-based all-optical bandpass microwave filter[J]. J Lightwave Technol, 2005, 23(4): 1721–1728.
- 11 S Sales, J Capmany, J Marti, *et al.*. Experiment demonstration of fiber-optic delay line filters with negative coefficients[J]. Electron Lett, 1995, 31(13): 1095–1096.
- 12 T Yost, P Herczfeld, A Rosen *et al.*. Hybrid transversal filter utilizing MMIC and optical fiber delay lines[J]. IEEE Microw Guided Wave Lett, 1995, 5(9): 287–289.
- 13 F Coppinger, S Yegnanarayanan, P D Trinh, *et al.*. All-optical RF filter using amplitude inversion in a SOA[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1997, 45(8): 1473–1477.
- 14 J Mora, B Ortege, M V Andrés, *et al.*. Tunable all-optical negative multi-tap microwave filters based on uniform fiber Bragg gratings[J]. Opt Lett, 2003, 28(15): 1308–1310.
- 15 J Capmany, D Pastor, A Martinez, *et al.*. Microwave photonic filters with negative coefficients based on phase inversion in an electro-optic modulator[J]. Opt Lett, 2003, 28(16): 1415–1417.
- 16 B Vidal, J L Corral, J Marti. All-optical WDM microwave filter With negative coefficients[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2005, 17(3): 666–668.
- 17 F Zeng, J Wang, J P Yao. All-optical microwave bandpass filter with negative coefficients based on a phase modulator and linearly chirped fiber Bragg gratings[J]. Opt Lett, 2005, 30(17): 2203–2205.
- 18 J Wang, F Zeng, J P Yao. All-optical microwave bandpass filter with negative coefficients based on PM-IM conversion[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2005, 17(10): 2176–2178.
- 19 J Mora, J Capmany, A Loayssa, *et al.*. Novel technique for implementing incoherent microwave photonic filters with negative coefficients using phase modulator and single sideband selection[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2006, 18(18): 1943–1944.
- 20 T Y Kim, C K Oh, S J Kim, *et al.*. Tunable photonic microwave notch filter with negative coefficient based on polarization modulation[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(12): 907–909.
- 21 T Tanemura, Y Takushima, K Kikuchi. Narrowband optical filter with a variable transmission spectrum using stimulated Brillouin scattering in optical fiber[J]. Opt Lett, 2002, 27(17): 1552–1554.
- 22 B Vidal, M A Piqueras, J Marti. Tunable and reconfigurable photonic microwave filter based on stimulated Brillouin scattering[J]. Opt Lett, 2007, 32(1): 23–25.
- 23 Zhu Hailing, Pan Wei, Chen Jixin, *et al.*. Frequency multiplied microwave signal generation based on single passband microwave photonic filtering[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0105003.
朱海玲, 潘 炜, 陈吉欣, 等. 基于单通带微波光子滤波器的多倍频微波信号产生[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0105003.
- 24 Han Bingchen, Yu Jinlong, Wang Wenrui, *et al.*. Experimental study of continuously tunable photonic microwave frequency multiplication based on distributed feedback injection locking[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1205004.
韩丙辰, 于晋龙, 王文睿, 等. 基于分布反馈注入锁定的连续可调光子微波倍频实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1205004.
- 25 Q Wang, F Zeng, S Blais, *et al.*. Optical UWB monocycle pulse generation based on cross-gain modulation in semiconductor optical amplifier[J]. Opt Lett, 2006, 31(21): 3083–3085.
- 26 J Dong, X Zhang, J Xu, *et al.*. Ultrawideband monocycle generation using cross-gain modulation in semiconductor optical amplifier[J]. Opt Lett, 2007, 32(10): 1223–1225.
- 27 J Dong, X Zhang, J Xu, *et al.*. All-optical ultrawideband monocycle generation utilizing gain saturation of a dark return-to-zero signal in a semiconductor optical amplifier[J]. Opt Lett, 2007, 32(15): 2158–2160.
- 28 M Muriel, J Azana, A Carballar. Real-time Fourier transformer based on fiber gratings[J]. Opt Lett, 1999, 24(1): 1–3.
- 29 J Chou, Y Han, Babram Jalali. Adaptive RF-photonic arbitrary waveform generator[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2003, 15(4): 581–583.
- 30 L S Lin, J D Mekinney, A M Weiner. Photonic synthesis of broadband microwave arbitrary waveforms applicable to ultrawideband communication[J]. IEEE Microw Wireless Compon Lett, 2005, 15(4): 226–228.
- 31 C Wang, F Zeng, J P Yao. All-fiber ultrawideband pulse generation based on spectral shaping and dispersion-induced frequency-to-time conversion[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(3): 137–139.
- 32 M Abtahi, M Mirshafiei, J Magne, *et al.*. Ultra-wideband waveform generator based on optical pulse-shaping and FBG tuning[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(2): 135–137.
- 33 Guo Jingzhong, Yu Jinlong, Liu Yi, *et al.*. Ultrawideband signal generation based on injection locking of Fabry-Perot laser diode[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0605006.
郭精忠, 于晋龙, 刘 毅, 等. 基于注入锁定法布里-珀罗型激光二极管的超宽带信号产生技术[J]. 中国激光, 2012, 39

- (6): 0605006.
- 34 F Zeng, J P Yao. An approach to ultrawideband pulse generation and distribution over optical fiber[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2006, 18(7): 823–825.
- 35 F Zeng, J P Yao. Ultrawideband signal generation using a high-speed electrooptic phase modulator and a fiber-Bragg-grating-based frequency discriminator[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2006, 18(19): 2062–2064.
- 36 G Qi, J P Yao, J Seregelyi, *et al.*. Optical generation and distribution of continuously tunable millimeter-wave signals using an optical phase modulator[J]. J Lightwave Technol, 2005, 23(9): 2687–2695.
- 37 Wen Hong, Chen Lin, Pi Yazhi, *et al.*. Full-duplex radio-over-fiber system with optical millimeter-wave generation utilizing optical phase modulator[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(7): 935–939.
文 鸿, 陈 林, 皮雅稚, 等. 基于相位调制器产生光毫米波的全双工光纤无线通信系统[J]. 中国激光, 2007, 34(7): 935–939.
- 38 H Ou, B Chen, H Fu, K Zhu, *et al.*. Microwave-photonic frequency doubling utilizing phase modulator and fiber Bragg gratings[J]. Electron Lett, 2008, 44(2): 131–132.
- 39 G Maury, A Hilt, T Berceci, *et al.*. Microwave-frequency conversion methods by optical interferometer and photodiode[J]. IEEE Trans Microw Tech, 1997, 45(8): 1481–1485.
- 40 D Uttamchandani, H S Al-Raweshidy. Integrated optical mixer for RF applications[J]. Electron Lett, 1991, 27(1): 70–71.
- 41 J P Yao, G Maury, Y L Guennec, *et al.*. All-optical subcarrier frequency conversion using an electrooptic phase modulator [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2005, 17(11): 2427–2429.
- 42 L V T Nguyen, D B Hunter. A photonic technique for microwave frequency measurement[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2006, 18(5): 1188–1190.
- 43 X Zou, J P Yao. An optical approach to microwave frequency measurement with adjustable measurement range and resolution[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(12): 1989–1991.
- 44 H Chi, X Zou, J P Yao. An approach to the measurement of microwave frequency based on optical power monitoring[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(7): 1249–1251.
- 45 X Zou, H Chi, J P Yao. Microwave frequency measurement based on optical power monitoring using a complementary optical filter pair[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2009, 57(2): 505–511.
- 46 N Sarkhosh, H Emami, L Bui, *et al.*. Reduced cost photonic instantaneous frequency measurement system[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(7): 1521–1523.
- 47 H Emami, N Sarkhosh, L Bui, *et al.*. Amplitude independent RF instantaneous frequency measurement system using photonic Hilbert transform[J]. Opt Express, 16(18): 13707–13712.
- 48 X Zhang, H Chi, S Zheng, *et al.*. Instantaneous microwave frequency measurement using an optical phase modulator[J]. IEEE Microw Compon Lett, 2009, 19(6): 422–424.
- 49 Wang Huan, Wu Xiangnong, Zhang Jing, *et al.*. Simulation of phase modulated instantaneous frequency measurement on Optisystem[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 011202.
王 欢, 武向农, 张 静, 等. 相位调制的瞬时微波频率测量的 Optisystem 仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 011202.