

# 基于单通带微波光子滤波的多倍频微波信号产生

朱海玲<sup>1,2</sup> 潘 炜<sup>1</sup> 陈吉欣<sup>2</sup> 鄢 勃<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>西南交通大学信息科学与技术学院, 信息光子与通信研究中心, 四川 成都 610031)  
<sup>2</sup>西南电子设备研究所电子信息控制重点实验室, 四川 成都 610036)

**摘要** 理论分析和实验验证了一种多倍频微波信号的光学产生方法。基于大信号相位调制和单模光纤的色散效应产生多个多倍频谐波,通过引入一个中心频率连续可调的单通带微波光子滤波器,实现了对单个倍频微波信号的提取。调节宽带光源的谱分割间隔可实现倍频微波信号调谐输出。在理论分析的基础上搭建了实验系统,利用 5 GHz 低频驱动信号得到了 10 GHz 和 15 GHz 的微波信号,其 10 dB 线宽为几十赫兹,功率波动为 1 dB~2 dB。

**关键词** 光电子学;微波信号产生;微波光子滤波器;马赫-曾德尔干涉仪;相位调制

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0105003

## Frequency Multiplied Microwave Signal Generation Based on Single Passband Microwave Photonic Filtering

Zhu Hailing<sup>1,2</sup> Pan Wei<sup>1</sup> Chen Jixin<sup>2</sup> Yan Bo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Center for Information Photonics and Communications, School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China

<sup>2</sup>Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu, Sichuan 610036, China

**Abstract** An approach to generate a microwave signal with multiplication frequency is studied and verified theoretically and experimentally. Based on big signal phase modulation and the dispersion of a single-mode fiber, the high order of microwave harmonic signal is generated. A tunable single passband microwave photonic filter is used to select a specific harmonic signal by tuning the sliced space of broadband optical source. Based on the theoretic analysis, an experimental system is established, and the harmonic signals at 10 GHz and 15 GHz are produced by applying a low-frequency signal at 5 GHz. It can be seen the 10 dB bandwidth of the signal is a few tens hertz, and the power fluctuation is 1 dB~2 dB.

**Key words** optoelectronics; microwave signal generation; microwave photonic filter; Mach-Zehnder interferometer; phase modulation

**OCIS codes** 060.2330; 140.5960; 140.3520

### 1 引言

微波信号源作为各种电子设备的核心部件,广泛应用于雷达、通信和导航等领域。随着各种电子设备性能的不不断提高,对微波信号源的性能提出了更高的要求,如工作频率、频谱纯度和可调谐性等。

光生微波信号与传统的电域微波产生方法相比,具有大带宽、低损耗、易调谐和抗电磁干扰能力强等优点,能有效解决传统电生微波信号所面临的难题,因此成为国内外的研究热点<sup>[1,2]</sup>。

目前,光生微波信号方法主要有直接调制法、外

收稿日期: 2012-08-13; 收到修改稿日期: 2012-09-25

基金项目: 博士学科点专项科研基金-优先发展领域(20110184130003、20100184120007)、中国电子科技集团探索项目(JJ0908)和霍英东教育基金-高等院校青年教师基金(132033)资助课题。

作者简介: 朱海玲(1986—),女,硕士研究生,主要从事微波光子方面的研究。E-mail: zhl20062159@126.com

导师简介: 潘 炜(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事半导体光电器件、光通信、微波光子学和量子与混沌保密通信等方面的研究。E-mail: weipan80@sina.com

部调制法<sup>[3~8]</sup>和光外差法<sup>[9~13]</sup>等。倍频微波信号的产生主要是基于谐波生成技术而提出的<sup>[14~16]</sup>,可采用外调制法,如利用马赫-曾德尔调制器(MZM)的非线性传输特性实现<sup>[3~6]</sup>,此类方法调制简单、可调谐性好,但是需要使用光陷波滤波器滤除载波或对系统相位控制要求较高。而相位调制器(PM)能直接调制信号相位,相位控制精度高,且不需要直流偏置控制,实现结构简单,产生的信号稳定可靠<sup>[7]</sup>。为避免可调光或电滤波器的使用,Qasymeh等<sup>[8]</sup>利用多个独立的光源产生时延的光学频率梳,实现可调的微波信号。其实际上是在信号产生结构中引入微波光子滤波器进行频率选择,且产生的滤波响应呈周期性,滤波性能与光源个数有关,对谐波抑制不完全。

本文利用一种基于宽带光源频谱分割的单带通微波光子滤波器,对含有多次谐波的微波信号进行单一频率提取,产生多倍频微波信号。使用单个放大自发辐射(ASE)宽带光源,经光谱分割形成多波长光源,避免多个独立激光器的使用,使得系统简单易控,并且结合相位调制器(PM)和色散介质可实现单通带滤波器,改变光谱分割间隔使通带中心频率连续可调,从而实现对调制产生的任意倍频微波信号的提取。此信号产生结构中无需额外光或电的可调滤波器,且采用PM无需偏置控制电路。实验结果表明,系统产生的微波信号线宽窄,且很好地抑制了其他谐波。

## 2 基本原理分析

系统结构如图1所示,主要由ASE宽带光源、马赫-曾德尔干涉仪(MZI)、PM和一段25 km的单模光纤(SMF)构成,其中OSA和ESA分别为光谱仪和电谱分析仪,EDFA为掺铒光纤放大器。ASE宽带光源经MZI进行频谱分割,作为一个波长间隔可调的多波长光源,送入PM进行光调制。此MZI由两个3 dB的光耦合器组成,它们组成了两条光路,其中一路上放置偏振控制器(PC),控制信号偏振态,实现干涉的最大消光比输出,另外一路上放置可调光延迟线(OVDL),控制两路光程差。MZI光强传输函数为<sup>[15]</sup>

$$T = \frac{1}{4}[1 + \gamma^2 + 2\gamma\cos(2\pi n\Delta L/\lambda)], \quad (1)$$

式中 $\Delta L$ 为上下两臂的长度差, $n$ 为光纤的有效折射率, $\gamma$ 为MZI两臂的损耗比, $\lambda$ 为入射波长。由(1)式可知,MZI的传输谱呈周期性,且相邻两个传输峰之间的波长间隔

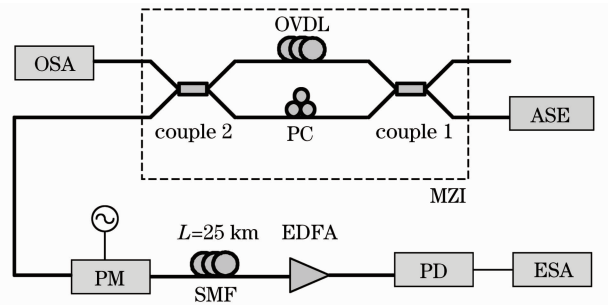


图1 基于单通带滤波的多倍频微波信号产生系统图  
Fig.1 Structure for frequency multiplied microwave signal generation based on single passband filter

$$\Delta\lambda = \lambda^2/(n\Delta L). \quad (2)$$

由(2)式可知,MZI对光谱分割的波长间隔与两臂光程差有关,通过调节两臂光程差可有效改变波长间隔。将此光载波送入PM,在大信号调制下,将产生一系列的光边带。对于单个光载波,信号经PM调制后,其归一化光域表达式为

$$E(t) = \exp\{j[\omega_c t + m_p V \cos(\omega_m t)]\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m_p V) \exp\left\{j\left[(\omega_c + n\omega_m)t + \frac{1}{2}n\pi\right]\right\}, \quad (3)$$

式中 $\omega_c$ 和 $\omega_m$ 分别为载波和调制信号角频率, $m_p = \Delta\varphi_{\max}/V = \pi/V_\pi$ 为相位调制深度, $V$ 为调制信号幅度, $J_n$ 表示第一类 $n$ 阶贝塞尔函数。此时若直接探测,将只有直流信号产生,但是,当调相后的信号经过一个色散介质(如SMF),各阶边带和载波的相位将受到色散介质的影响,从而实现相位调制到强度调制的转换,使得调制信号的多阶倍频信号在探测器上检测出来。色散介质传输函数为 $H(\omega) = |H(\omega)| \exp[-j\varphi(\omega)]$ ,相位项为

$$\varphi(\omega) = \varphi_0(\omega_c) + \tau(\omega_c)(\omega - \omega_c) + \frac{1}{2}\beta L(\omega - \omega_c)^2 + \frac{1}{3}\chi L(\omega - \omega_c)^3, \quad (4)$$

频率为 $\omega_c$ 的群延时为 $\tau(\omega_c) = nL/c$ , $\beta = D\lambda^2/(2\pi c)$ 和 $\chi$ 是分别为长度为 $L$ 的光纤二阶色散和色散斜率。调制信号经色散光纤后的光场可表示为

$$E(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m_p V) \exp\left\{j\left[(\omega_c + n\omega_m)t + \frac{1}{2}n\pi + \varphi(\omega_c + n\omega_m)\right]\right\}. \quad (5)$$

由(5)式可知,当多个光载波参与调制时,每个光载波经探测将产生相同频率的微波谐波信号分量,只是对应相位不同。这些相同频率的谐波分量由于相位关系将出现叠加加强或相消,可通过宽带光源谱分割间隔或色散介质长度控制。由此单一倍频的微波信号就产生了。

实际上,当多个光源参与调制后,此结构同时具有单通带滤波特性<sup>[15]</sup>,这主要是由于宽带光源经过MZI后形成的多光源光谱呈余弦型,从而引起采样的连续分布进而使得该滤波器的自由频谱范围(FSR)无限大造成的。与强度调制器不同,此结构不仅拥有和强度调制器一样的单通带特性,并且利用PM还能消除强度调制器中出现的基带响应。此滤波器的传输函数为<sup>[15]</sup>

$$H_{RF}(f) = \int T(\omega) [H^*(\omega)H(\omega + 2\pi f) - H(\omega)H^*(\omega - 2\pi f)] d\omega, \quad (6)$$

式中 $T(\omega)$ 为(1)式MZI光强传递函数 $T$ 的频域表达, $H^*(\omega)$ 和 $H^*(\omega - 2\pi f)$ 分别为 $H(\omega)$ 和 $H(\omega - 2\pi f)$ 的共轭,滤波器的通带中心频率 $f_0$ 由多波长光源在光纤中基本传输延迟时间差 $\Delta T = DL\Delta\lambda$ 决定,即

$$f_0 = 1/\Delta T = 1/(DL\Delta\lambda), \quad (7)$$

式中 $D$ 、 $L$ 、 $\Delta\lambda$ 分别为光纤色散系数、长度和多波长光源间隔,调节光波长间隔可改变通带中心频率。当 $f_0 = nf_m$ 且滤波器的通带3 dB带宽小于谐波频率间隔时,即可得到通带内的任意倍频信号输出,实现单一倍频信号的提取。

### 3 实验及结果

根据图1搭建实验系统,采用的宽带ASE光源输出功率为13.8 dBm,3 dB带宽为41 nm,可调光延迟线(OVDL, VDL-001)为手动可调,精度可达0.05 mm,可调范围为0~50 mm。色散介质采用

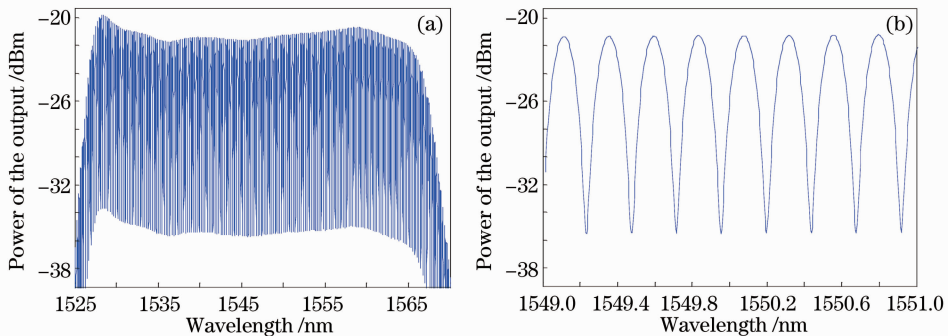


图3 宽带ASE光源经MZI后谱分割图。(a)范围为45 nm;(b)范围为2 nm

Fig. 3 Sliced spectra of ASE optical source after MZI. (a) Span is 45 nm; (b) span is 2 nm

由(7)式计算可知,此时单通带微波光子滤波器的中心频率为10 GHz。如图4(a)所示,采用ASE光源进行频谱分割后,仿真得到的整个频谱范围内仅有一个通带,呈现良好的单通带特性。另外,由于使用了PM,所以在图中未观测到基带滤波响应,这

25 km的单模光纤。在系统中,25 km的光纤不仅作为色散介质实现微波光子滤波的功能,而且可以作为传输介质实现射频信号的远程传输。EDFA放大增益为17 dB,用于补偿链路中的损耗。

为对比研究,观测了单个激光光源经PM及SMF后产生的多个谐波分量。实验中,光源输出功率为8.4 dBm,加载到PM的射频信号频率为5 GHz,功率为15 dBm,经25 km SMF传输后探测得到频谱如图2所示,谐波频率间隔为5 GHz。

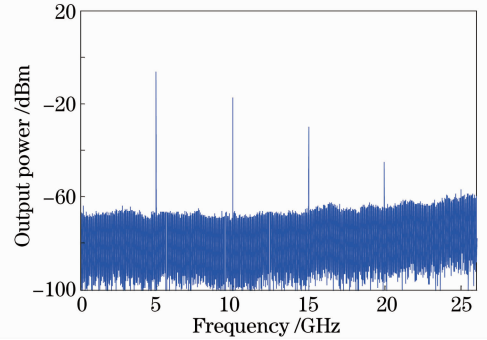


图2 单个窄带光源经相位调制及探测后的微波信号频谱图

Fig. 2 Detected microwave signal when one optical carrier is on

当用ASE经MZI分割后形成的多波长光源代替单个窄带光源时,此结构同时具有单通带滤波特性。为得到10 GHz的微波信号最大功率输出,调节滤波器的通带中心频率为10 GHz,此时只需调节OVDL。利用OSA观测分割后的多波长光谱如图3所示,从图3(b)可知,光谱分割间隔为0.24 nm,消光比约为14 dB。

与使用强度调制器产生的滤波响应不同。图4(b)为0~26 GHz范围内的实验和仿真得到的归一化滤波响应曲线对比图。实验得到的滤波器通带中心频率为10 GHz,3 dB带宽约为1 GHz,小于倍频信号间隔,可以单独滤出二阶倍频信号,与仿真

结果基本吻合。

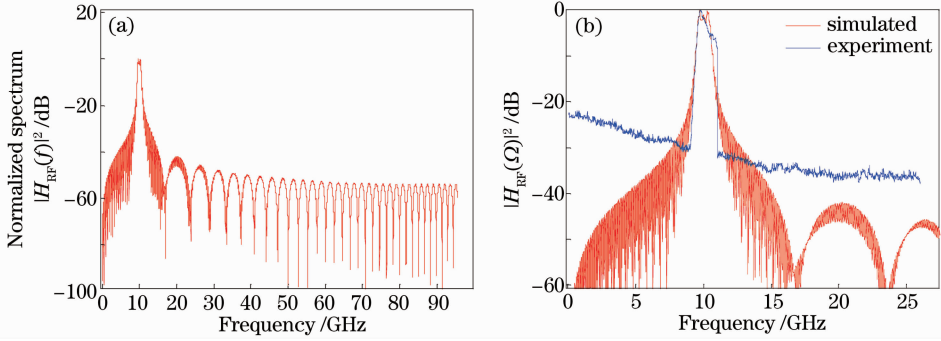


图 4 微波光子滤波器的频率响应。(a)仿真图;(b)实验与理论对比图( $\Delta\lambda=0.24$  nm,  $f_0=10$  GHz)

Fig. 4 Frequency response of the associated photonic microwave filter. (a) Simulation; (b) comparison between experiment and simulation ( $\Delta\lambda=0.24$  nm,  $f_0=10$  GHz)

同时,由图 4(b)可知实验得到的滤波特性在基带处响应与理论仿真有所不同,这是由于实验所得的滤波响应是采用扫频信号源与频谱仪的 Maxhold 功能测得的,而其中包含了电缆、PM 及 PD 的频率响应,因而基带处响应有所不同,而链路噪声的影响,使得实验测得的滤波响应噪底也略高于理论仿真,但对实验结果影响不大,两者滤波中心频率与通带带宽基本吻合。

图 5 为多个光源经此结构产生的单频微波信号频谱图。由图 5(a)可以看出,在 26 GHz 的频谱观测范围内,仅有 10 GHz 微波信号产生,其他倍频的谐波分量均得到明显抑制。设置频谱仪的中心频率

为 10 GHz,频率范围为 1 kHz,分辨率带宽(RBW)为 9.1 Hz,得到如图 5(b)所示的 10 GHz 信号的频谱细节图。因此,产生的信号线宽较窄,利用频谱仪测量得其 10 dB 线宽约为 16 Hz,得到高频谱纯度的微波信号。通过理论分析可得,调节宽谱光源分割间隔,可改变此结构中滤波响应的中心频率,实现倍频信号调谐输出。因此,当产生三倍频(15 GHz)的微波信号时,根据理论计算,调节 OVDL 改变 MZI 两臂光程差,使得宽谱光源谱分割间隔约为 0.16 nm,得到中心频率为 15 GHz 的带通滤波器,从而滤出三倍频(15 GHz)的微波信号,得到与图 5 对应结果如图 6 所示。

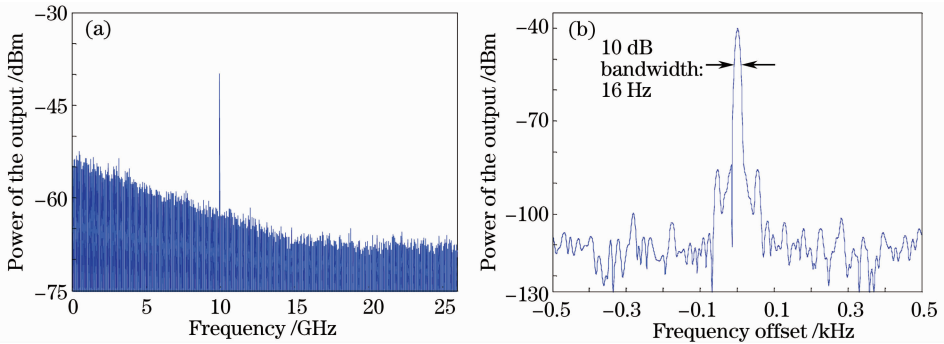


图 5 宽带光源结构下测得的二倍频信号频谱图。(a)范围为 26 GHz, RBW 为 100 kHz;(b)范围为 1 kHz, RBW 为 9.1 Hz ( $\Delta\lambda=0.24$  nm,  $f_0=10$  GHz)

Fig. 5 Detected the second harmonic signal when sliced ASE optical source is on. (a) Span is 26 GHz, RBW is 100 kHz; (b) span is 1 kHz, RBW is 9.1 Hz ( $\Delta\lambda=0.24$  nm,  $f_0=10$  GHz)

正如理论分析所示,此时仅有三次谐波被滤出,其他谐波得到明显抑制。另外,由于实验器件带宽限制,本实验中未能观测更高频的倍频信号,但理论上,在一定调制深度下,调节射频(RF)信号频率及宽带光源谱分割间隔,可以得到更高频的微波信号调谐输出。

实验中,对信号线宽及稳定性也做了相应的测

量及分析。如图 5(b)和图 6(b)可知,信号线宽较窄,利用频谱仪测量其峰值功率下降 10 dB 时信号线宽小于 20 Hz,下降 20 dB 时线宽小于 50 Hz,与文献[6]相比,信号线宽进一步降低,这与驱动信号 RF 的质量有关。实验中在一定时间内观测到信号的频率波动约为几百千赫兹,功率波动为 1 dB~2 dB。这是由于实验采用的光源没有进行温度控制,

在工作中由于发热引起激光器的功率和波长微小波动,从而引起产生的微波信号频率和功率的波动。

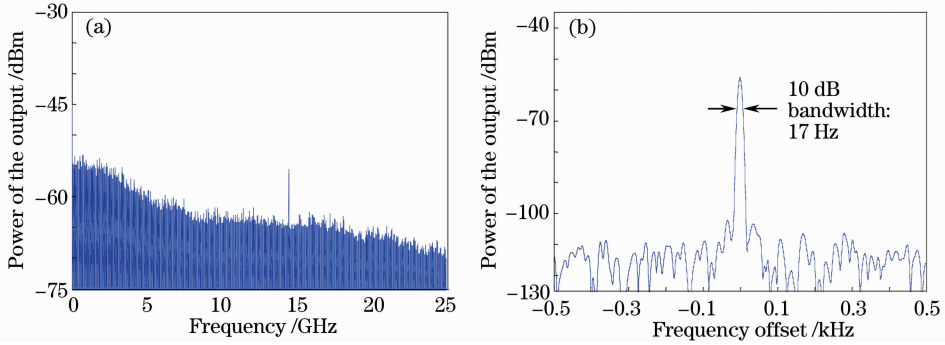


图 6 宽带光源结构下测得的三倍频信号频谱图。(a)范围为 26 GHz, RBW 为 100 kHz; (b)范围为 1 kHz, RBW 为 9.1 Hz ( $\Delta\lambda=0.16$  nm,  $f_0=15$  GHz)

Fig. 6 Detected the third harmonic signal when sliced ASE optical source is on. (a) Span is 26 GHz, RBW is 100 kHz; (b) span is 1 kHz, RBW is 9.1 Hz ( $\Delta\lambda=0.16$  nm,  $f_0=15$  GHz)

## 4 结 论

理论分析和实验验证了一种多倍频微波信号的产生方法。此方法采用 PM, 避免强度调制中的直流偏置控制, 简化系统配置, 同时无需额外的光或电的滤波器, 只需调节 OVDL 实现宽带光源谱分割间隔, 即可实现调制产生的倍频信号调谐输出。实验中, 当使用 5 GHz 调制信号时, 调节波长间隔至 0.24 nm, 产生二倍频(10 GHz)微波倍频信号; 调节波长间隔至 0.16 nm, 产生三倍频(15 GHz)微波信号。此外, 方案采用单个宽谱光源实现单通带微波光子滤波器, 避免多个独立激光器的使用, 不仅降低了系统成本, 且简单易控, 对谐波抑制彻底。实验结果表明, 本方案产生的单个倍频信号线宽窄, 易调谐、频谱纯度高、谐波抑制效果好, 并可通过 SMF 实现微波信号远程传输。

## 参 考 文 献

- 1 J. P. Yao. Microwave photonics[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(3): 314~335
- 2 X. K. Liu, W. Pan, X. H. Zou *et al.*. A reconfigurable optoelectronic oscillator based on cascaded coherence-controllable recirculating delay lines [J]. *Opt. Express*, 2012, **20** (12): 13296~13301
- 3 K. Wang, X. P. Zheng, H. Y. Zhang *et al.*. A radio-over-fiber downstream link employing carrier-suppressed modulation scheme to regenerate and transmit vector signals [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(18): 1365~1367
- 4 W. Z. Li, J. P. Yao. Investigation of photonically assisted microwave frequency multiplication based on external modulation [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory & Technol.*, 2010, **58**(11): 3259~3267
- 5 J. Zhang, H. W. Chen, M. H. Chen *et al.*. A photonic microwave frequency quadrupler using two cascaded intensity modulators with repetitious optical carrier suppression[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(14): 1057~1059
- 6 Yuan Yan, Qin Yi. Frequency sextupling technique using two cascaded dual-electrode Mach-Zehnder modulators[J]. *Chinese J.*

- Lasers*, 2011, **38**(10): 1005004
- 袁 燕, 秦 毅. 基于串联双电极马赫-曾德尔调制器的六倍频技术[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1005004
- 7 Wen Hong, Chen Lin, Yu Jianjun *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, 余建军等. 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
- 8 M. Qasymeh, W. Z. Li, J. P. Yao. Frequency-tunable microwave generation based on time-delayed optical combs[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory & Technol.*, 2011, **59**(11): 2987~2993
- 9 H. G. Zhang, N. H. Zhu, J. W. Man *et al.*. Narrow-linewidth microwave generation using a self-injected DBR laser diode[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(15): 1045~1047
- 10 N. Satyan, J. Sendowski, A. Vasilyev *et al.*. Phase noise reduction of a semiconductor laser in a composite optical phase-locked loop ring[J]. *Opt. Engng.*, 2010, **49**(12): 124301
- 11 L. Zhao, J. Q. Sun. Theoretical and experimental demonstration of phase locking technology by utilizing cubic susceptibility medium[C]. *SPIE*, 2010, **7658**: 765801
- 12 B. O. Guan, Y. Zhang, L. W. Zhang *et al.*. Electrically tunable microwave generation using compact dual-polarization fiber laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(11): 727~729
- 13 T. L. Wang, H. W. Chen, M. H. Chen *et al.*. High-spectral-purity millimeter-wave signal optical generation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(12): 2044~2052
- 14 Wu Bo, Yu Jinlong, Liu Yi *et al.*. Generation of 40 GHz and 60 GHz millimeter wave signals by injecting low-frequency phase-modulated optical signal into a DFB-LD with the frequency-multiplication factor ranging from 4 to 6[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1105002
- 吴 波, 于晋龙, 刘 毅等. 基于低速光调相信号注入DFB-LD产生4~6倍频的40 GHz和60 GHz毫米波信号[J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1105002
- 15 H. Y. Fu, K. Zhu, H. Y. Ou *et al.*. A tunable single-passband microwave photonic filter with positive and negative taps using a fiber Mach-Zehnder interferometer and phase modulation[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2010, **42**(1): 81~84
- 16 Li Jing, Ning Tigang, Qi Chunhui *et al.*. Design of bi-directional radio over fiber transmission system based on optical frequency multiplication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 607~613
- 李 晶, 宁提纲, 祁春慧等. 基于光学乘法产生毫米波的全双工毫米波光纤传输系统设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 607~613