

基于级联光纤环微波光子滤波器的微波倍频技术

徐作为, 付宏燕*, 蔡志平

(厦门大学 信息科学与技术学院 电子工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 为了得到高倍频的微波信号, 实现获得了一种基于外调制技术与级联光纤环微波光子滤波器(FRMPF, fiber ring microwave photonic filters)的新型倍频微波信号光学产生技术。利用外调制的方法, 采用大功率信号驱动马赫曾德尔调制器(MZM)得到了高阶谐波信号, 再利用级联的FRMPF进行选频。理论计算与实验测试了FRMPF的滤波特性。通过调节每个FRMPF的环长, 利用第1个FRMPF将基频信号与三阶谐波滤除, 再通过第2个FRMPF将二阶谐波滤除, 最终得到四倍频信号。研究结果表明, 利用频率为2.0183 GHz的信号驱动MZM, 得到了频率为8.0732 GHz的四倍频信号, 信噪比(SNR)大于13 dB。

关键词: 微波倍频技术; 微波光子滤波器; 光纤环; 外调制

中图分类号: TN925 文献标识码: A 文章编号: 1005-0086(2014)01-0065-05

Microwave frequency multiplication based on cascaded fiber ring microwave photonic filters

XU Zuo-wei, FU Hong-yan*, CAI Zhi-ping

(Department of Electronic Engineering, School of Information Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In this paper, a novel approach of microwave frequency multiplication by using a Mach-Zehnder modulator(MZM) and cascaded fiber ring microwave photonic filters (FRMPFs) was proposed and experimentally demonstrated. High order harmonics are generated through external modulation with large microwave signal, and cascaded FRMPFs can be utilized to filter out the low frequency harmonics. The performance of the FRMPF is theoretically analyzed, optimized and experimentally measured. By carefully adjusting the length of each FRMPF through tuning the optical delay line and optimizing the coupling ratio of the optical couplers in the FRMPFs, the desirable harmonic can be selected. In our experiment, two cascaded FRMPFs are used, and by using the first one, the first and third harmonics are filtered out while the second harmonic is filtered out by the second FRMPF, with only the fourth harmonic left after beating on the photodiode with proper bandwidth. The experimental results show that by modulating a driving signal with frequency of 2.0183 GHz, a signal with frequency of 8.0732 GHz, which is four times of the driving frequency, is generated and the signal to noise ratio (SNR) is more than 13 dB.

Key words: microwave frequency multiplication; microwave photonic filter; fiber ring; external modulation

1 引言

与传统的基于电学的微波产生技术相比, 基于光学方法生成的微波具有频率高、不受电磁干

扰和易于在通信系统中处理射频信号等优点^[1,2]。基于外调制方法的微波倍频技术相比其他光学产生方法, 由于具有很好的可调谐性和信号相位噪声特性, 因而成为微波信号的光学产生技术的重要

* E-mail: fuhongyan@xmu.edu.cn

收稿日期: 2013-05-22 修订日期: 2013-07-25

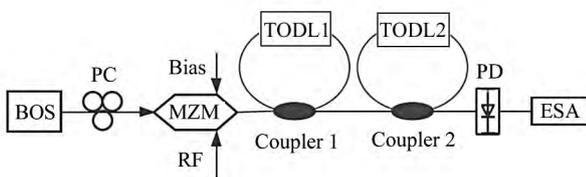
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61205059)、教育部博士点基金(201201211120037)和中央高校基本科研业务费(2010121059)资助项目

要方法之一^[3~8]。微波信号的倍频技术主要是基于谐波生成技术而提出的,而其中利用马赫-曾德调制器(MZM)的非线性产生高频谐波是一种常用的结构简单的方法^[9~15]。

为了得到一定频率的微波信号,通常需要对所得的高阶谐波信号进行滤波。微波光子滤波器是一种新型的微波滤波器,由于其频率高、损耗低和可调谐性、可重构性好的特点,近年得到了广泛的研究^[16~18]。作为微波光子滤波器中的一种,光纤环微波光子滤波器(FRMPF)是一种成本低、结构简单的无限冲激响应滤波器^[19]。本文提出了基于级联FRMPF实现微波倍频的方法。在实验中,通过MZM产生高阶谐波,采用两个级联的FRMPF滤除低频信号,得到了四倍频的高频微波信号,从而实现了利用光学方法产生可调谐微波倍频信号。

2 原理与实验装置

基于外调制产生高频微波信号并利用级联FRMPF滤除低频微波信号的原理如图1所示。其中,FRMPF由简单的2×2耦合器将一个输入端与输出端相连构成,在其中接入可调延时线(TODL)就可以构成了可调FRMPF。从宽带光源(BOS, QPHOTONICS QSDM-1550-15)发出的光通过MZM(JDSU, 10 GHz)被射频(RF)信号调制后,产生高阶谐波信号。该信号经过级联的FRMPF滤波后的信号在光电探测器(PD)上拍频得到倍频信号,并连接到频谱仪(ESA, HP8593E, 9k-20 GHz)上进行检测。



BOS: broadband optical source; PC: polarization controller; MZM: Mach-Zehnder modulator; TODL: tunable optical delay line; Coupler: optical coupler; PD: photodiode

图1 级联FRMPF微波倍频技术实验方案示意图

Fig. 1 Experimental setup of microwave frequency multiplication based on cascaded FRMPFs

2.1 基于外调制方法产生高阶谐波的原理

MZM的调制特性是非线性的,进行模拟调制时会产一系列的高阶谐波。通过控制MZM的偏压和调制信号的强度,可以在光载波上得到一阶,

二阶甚至更高次的边带。这些边带通过在PD上进行拍频,就可以得到二倍频、三倍频、四倍频及更高阶的微波信号。由于这些边带都是由同一光源产生的,彼此之间是相干的,因此可以得到频率稳定的高频信号。

对于输入光信号,可以表示为

$$E_{in}(t) = E_o \cos(\omega_o t) \tag{1}$$

输出光场可以表示为^[6]

$$E_{out1}(t) = E_o \cos(\frac{\phi_o}{2}) J_o(\beta) \cos(\omega_o t) + E_o \cos(\frac{\phi_o}{2}) \times \{ \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\beta) [\cos(\omega_o t - 2n\omega_c t + n\pi) + \cos(\omega_o t + 2n\omega_c t - n\pi)] \} - E_o \sin(\frac{\phi_o}{2}) \times \{ \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\beta) [\sin(\omega_o t - (2n-1)\omega_c t + n\pi - \frac{\pi}{2}) - \sin(\omega_o t + (2n-1)\omega_c t - n\pi + \frac{\pi}{2})] \} \tag{2}$$

其中; E_o 表示的是输入光场的光强度; ω_o 和 ω_c 分别表示的是光载波和驱动射频信号的角频率; J_n 表示的是n阶第一类贝塞尔函数; $\beta = \pi V_c / 2V_\pi$ 表示的是调制深度, V_c 表示的是驱动信号的电压, V_π 表示的是调制器的半波电压; ϕ_o 是由调制器的恒定偏压引起的相移。

从式(2)中可以看出,当驱动信号的强度足够大时,光载波功率会分布在一阶、二阶、三阶、四阶甚至更高阶的边带上,如图2所示。这些边带之间的相对强度受MZM偏压和调制信号强度的影响。当这些边带在PD上响应后,就产生了频率为驱动信号频率整数倍的谐波信号。可以通过载波信号的幅度和MZM的偏置进行优化得到特定的高阶边带^[12]。

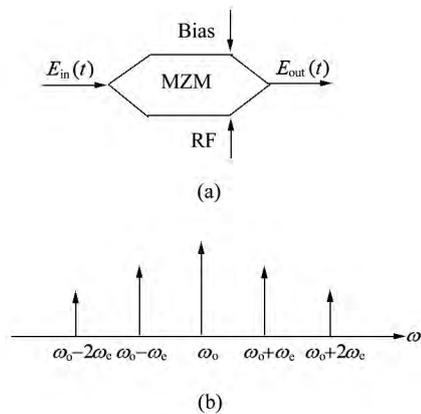


图2 基于MZM外调制产生高阶谐波的示意图
Fig. 2 Schematic diagram of high order harmonics generation based on external modulation of MZM

但是 MZM 的偏压控制比较困难,也可以通过光纤光栅滤除载波得到高频的谐波信号^[13],但这样增加了系统的复杂程度。在本文中,通过适当调节调制信号的强度和 MZM 的偏压得到高阶谐波信号。直接利用 FRMPF 滤除低频信号,得到高倍频的微波信号。

2.2 FRMPF 的滤波原理

FRMPF 器是一种制作成本低、结构简单的微波光子滤波器。图 3(a)所示的为实验中使用的一个简单的可调 FRMPF。其中,网络分析仪(VNA, TRANSCOM T5230A)用来测量 FRMPF 的频率响应曲线。

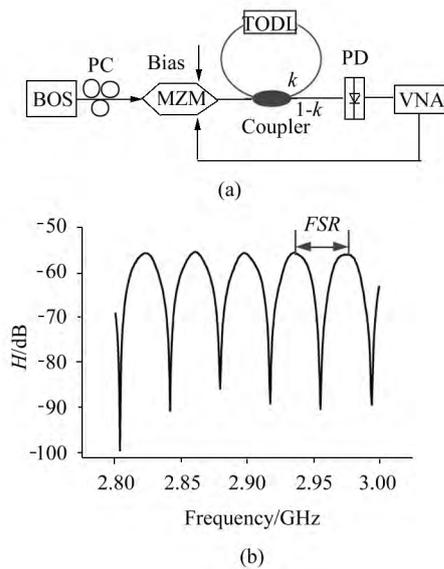


图 3 (a) 可调 FRMPF 示意图;
(b) FRMPF 的响应曲线

Fig. 3 (a) Schematic diagram of the tunable FRMPFs;
(b) Frequency response of the FRMPFs

经过调制后的光信号在经过光纤环时,一部分光通过耦合器进入光纤环,在光纤环中传输后与其它各路信号光进行合波,再在 PD 上响应,实现电信号的输出。这样,就实现了对微波信号的采样、延时与叠加。从 FRMPF 的滤波原理可以得出,FRMPF 为 IIR 滤波器。在不考虑损耗的理想条件下,其频率响应函数可以表示为^[19]

$$H(\Omega) = \frac{1 - k + (2k - 1) \cdot e^{-j2\pi\Omega L/c}}{1 - k \cdot e^{-j2\pi\Omega L/c}} \quad (3)$$

其中: k 为耦合器的耦合系数; n 为光纤的折射率; L 为光纤环的长度,通过调节 TODL 可以调节光纤环的长度; c 为光速; Ω 为微波信号的频率。滤波器的

自由频谱范围(FSR)可以表示为

$$FSR = c/nL \quad (4)$$

根据式(4)可知,通过改变 TODL 的长度可以改变 FRMPF 的 FSR。图 3(b)为实验中测得的 FRMPF 的频率响应曲线。实验中,采用的耦合器的耦合比为 30 : 70,以得到较高的抑制比^[19]。

根据 FRMPF 的频率响应曲线可以得出,其为周期性滤波器。可以利用其滤除外调制方法产生倍频信号中的低频谐波信号。当频率为 f 的驱动信号对应于光纤环滤波器的带陷点时,即满足 $f = (n + 0.5) FSR_1$ 时(其中 n 为正整数, FSR_1 为第 1 个 FRMPF 的 FSR),则有 $2f = (2n + 1) FSR_1$, $3f = (3n + 1 + 0.5) FSR_1$, $4f = (2n + 2) FSR_1$ 。即基频与三倍频信号处于滤波器的带陷点,二倍频与四倍频信号处于滤波器通带的最高点。经过第 1 个 FRMPF 滤波后,基频和三倍频信号被滤除。当采用两个 FRMPF 级联时,设第 2 个 FRMPF 的 FSR 为 FSR_2 ,调节 TODL,使得二倍频信号处于第 2 个 FRMPF 的带陷点,即满足时 $2f = (m + 0.5) FSR_2$,则有 $4f = (2m + 1) FSR_2$,即二倍频信号处于第 2 个 FRMPF 的阻带最低点时,四倍频信号刚好处于第 2 个 FRMPF 通带的最高点。这样,通过两个 FRMPF 的级联就可以将基频、二倍频、三倍频信号滤除,最终得到四倍频信号输出。

3 实验结果和讨论

本实验中,采用驱动信号的频率为 2.018 3 GHz,正好对应于第 1 个 FRMPF 的带陷点。在未加入 FRMPF 时,得到的各个倍频信号的频谱如图 4 所示。

加入 1 个 FRMPF 进行滤波后得到的信号频谱如图 5 所示,可以看到,基频信号和三阶谐波均得到了明显的抑制。

为了将二倍频信号滤除,接入第 2 个 FRMPF。通过调节 TODL 的长度,使得二倍频信号刚好处于第 2 个 FRMPF 的带陷点,这样便将二倍频信号滤除。从图 6 可以看出,经过两个级联 FRMPF 的滤波,基频、二倍频和三倍频信号被滤除,得到了四倍频信号,其信噪比(SNR)大于 13 dB。

4 结 论

提出了一种基于级联 FRMPF 的微波信号倍频技术。在大功率微波信号调制下,通过 MZM 的非线性效应得到高阶谐波,通过级联的 FRMPF 滤掉基频

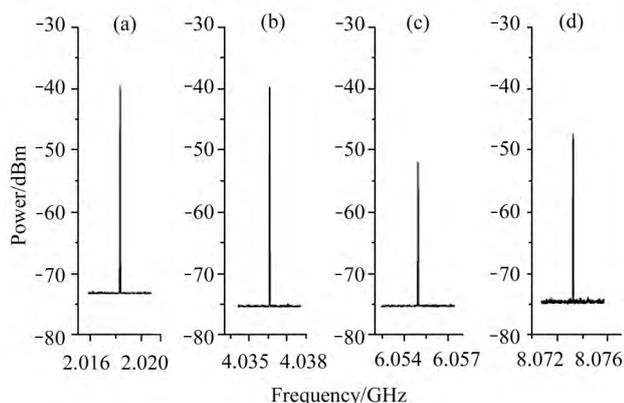


图4 未加FRMPF时的谐波信号频谱图：
(a) 基频；(b) 二阶谐波；(c) 三阶谐波；(d) 四阶谐波

Fig. 4 Spectra of four harmonics without FRMPFs: (a) Base band; (b) Second harmonic; (c) Third harmonic; (d) Fourth harmonic

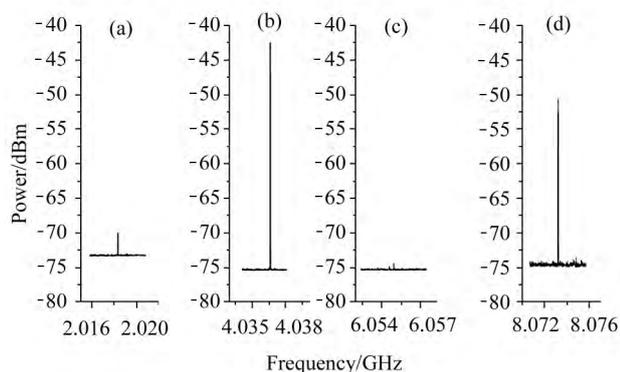


图5 加入1个FRMPF时的谐波信号频谱图：
(a) 基频；(b) 二阶谐波；(c) 三阶谐波；(d) 四阶谐波

Fig. 5 Spectra of four harmonics with one FRMPFs: (a) Base band; (b) Second harmonic; (c) Third harmonic; (d) Fourth harmonic

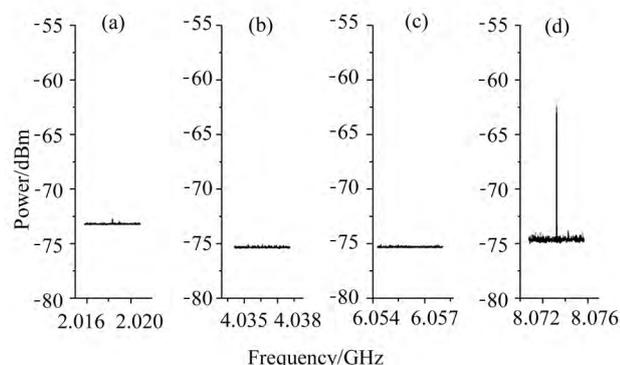


图6 加入两个FRMPF时的谐波信号频谱图：
(a) 基频；(b) 二阶谐波；(c) 三阶谐波；(d) 四阶谐波

Fig. 6 Spectra of four harmonics with two FRMPFs: (a) Base band; (b) Second harmonic; (c) Third harmonic; (d) Fourth harmonic

与低频的微波信号,最后得到倍频的微波信号。在实验中,当调制的驱动信号频率为 2.0183 GHz 时,通过两个级联的FRMPF实现了四倍频的频率为 8.0732 GHz 的微波信号,SNR 高于 13 dB。通过调节驱动信号频率和光纤环的长度,可以实现倍频信号的连续可调。本文技术具有结构简单、可调谐性好以及可产生高频高质量微波信号的优点,在未来光纤无线系统中具有很好的应用价值。

参考文献:

- [1] Jose Capmany, Dalma Novak. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319-30.
- [2] YAO Jian-ping. Microwave photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.
- [3] Shih, Po-Tsung, Lin Chun-ting, Jiang Wen-Jr. et al. WDM up-conversion employing frequency quadrupling in optical modulator[J]. Optical Express, 2009, 17: 1726-1733.
- [4] JIA Zhen-sheng, YU Jian-jun, Ellinas G, et al. Key enabling technologies for optical wireless networks: optical millimeter-wave generation, wavelength reuse, and architecture[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 24: 3452-3471.
- [5] CHEN Lin, PIN Ya-zhi, WEN Hong, et al. All-optical mm-wave generation by using direct-modulation DFB laser and external modulator[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2007, 49(6): 1265-1267.
- [6] LI Wang-zhe, YAO Jian-ping. Investigation of photonic ally assisted microwave frequency multiplication based on external modulation[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(11): 3259-3268.
- [7] WEI Zhi-hu, WANG Rong, FANG Tao, et al. Sextupling tunable mm-wave signal generation based on intensity modulation and Brillouin effect[J]. Journal Optoelectronics • Laser, 2012, 23(10): 1890-1894.
魏志虎, 王荣, 方涛, 等. 基于强度调制和布里渊效应的六倍频可调毫米波信号产生[J]. 光电子·激光, 2012, 23(10): 1890-1894.
- [8] WANG De-shuang, ZHUANG Bao-fu, LU Lin, et al. Tunable millimeter-wave signal generation based on CW light injection locking of direct modulation DFB-LD[J]. Optoelectronics • Laser, 2012, 7(14): 1291-1295.
郭精忠, 于晋龙, 王文睿, 等. 基于直流光注入直调 DFB-LD 的可调光毫米波信号产生技术[J]. 光电子·激光, 2012, 7(14): 1291-1295.
- [9] ZHAO Ying, ZHENG Xiao-ping, WEN He, et al. Simplified optical millimeter-wave generation configuration by fre-

- quency quadrupling using two cascaded Mach-Zehnder modulators[J]. *Optical Letters*, 2009, **34**: 3250-3252.
- [10] JIA Zhen-sheng, YU Jian-jun, Hsueh Yu-Ting, et al. Multi-band signal generation and dispersion-tolerant transmission based on photonic frequency tripling technology for 60-GHz radio-over-fiber systems [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**: 1470-1472.
- [11] Mohamed Mohmoud, ZHANG Xiu-pu, Hraimel Bouchaib, et al. Analysis of frequency quadrupling using a single Mach-Zehnder modulator for millimeter-wave generation and distribution over fiber systems [J]. *Optical Express*, 2008, **16**: 10786-10802.
- [12] LIN Chun-ting, Shih Po-Tsung, Jason (Jyehong) Chen, et al. Optical millimeter-wave signal generation using frequency quadrupling technique and no optical filtering[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(12): 1027-1029.
- [13] MA Jian-xin, YU Jian-jun, YU Chong-xiu, et al. Transmission performance of the optical mm-wave generated by double-sideband intensity modulation[J]. *Optics Communications*, 2007, **280**(2): 317-326.
- [14] QI Guo-hua, Yao Jian-ping, Seregelyi Joe, 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.
- [15] ZHU Zi-hang, ZHAO Shang-hong, YAO Zhou-shi, et al. Nonlinearity modeling of an on-board microwave photonics system based on Mach-Zehnder modulator[J]. *Optoelectronics Letters*, 2012, **8**: 41-444.
- [16] Jose Capmany, Jose Mora, Ivana Gasulla, et al. Microwave photonic signal processing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**: 571-586.
- [17] XU En-ming, WANG Fei, LI Pei-li. A high-Q microwave photonic filter by using an SOA-based active mode-locked fiber ring laser [J]. *Optoelectronics Letters*, 2013, **9**: 97-100.
- [18] WEI Zhi-hu, WANG Rong, FANG Tao, et al. A tunable incoherent photonic microwave filter based on electro-absorption modulator[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, **24**(6): 1086-1089.
- 魏志虎, 王荣, 方涛, 等. 基于电吸收调制器的非相干可调谐微波光子滤波器[J]. *光电子 • 激光*, 2013, **24**(6): 1086-1089.
- [19] QI Chun-hui, Pei Li, NING Ti-gang, et al. Key factors in getting high Q values for finite- and infinite-impulse-response microwave photonic filters[J]. *Optical Engineering*, 2010, **49**(6): 065007-065007.

作者简介:

付宏燕 (1982-), 女, 山西太原人, 助理教授, 主要从事微波光子学和光纤通信传感器件研究。