

文章编号: 1001-3806(2019)02-0275-05

基于并联调制器的高倍频毫米波信号生成

洪赞扬, 王天亮*, 王金华

(上海卫星工程研究所, 上海 201109)

摘要: 为了获得更高频率的信号, 采用了一种基于并联马赫-曾德尔调制器(MZM)和半导体光纤四波混频效应的二十四倍频光生毫米波方案。本振信号被并联MZM调制后可以获得高纯度的 ± 4 阶边带, 在四波混频效应下, 又可以生成 ± 12 阶边带, 用级联的布喇格光栅滤波器滤除 ± 4 阶边带, 经光电探测器拍频便可生成二十四倍频信号。结果表明, 当输入本振信号为5GHz时, 生成的120GHz高频微波毫米波信号射频杂散抑制比为22dB, 频谱纯度很高, 且具有很好的可调谐性。该研究为高频微波毫米波信号的生成提供了更高的倍频方法。

关键词: 光通信; 微波毫米波; 二十四倍频; 马赫-曾德尔调制器; 半导体光放大器

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2019.02.023

Generation of high frequency millimeter wave signal based on parallel modulators

HONG Zanyang, WANG Tianliang, WANG Jinhua

(Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to get higher frequency signal, a 24-tupling frequency microwave millimeter-wave signal generation scheme based on parallel Mach-Zehnder modulators (MZM) and semiconductor optical amplifier (SOA) four-wave mixing effect was presented and simulated. The local oscillator signal was modulated by parallel MZM to obtain high-purity ± 4 sidebands. Under the four-wave mixing effect, the ± 12 sidebands were generated. The ± 4 sideband was filtered by cascaded Bragg grating filters. After the beat frequency of photoelectric detector, 24-tupling frequency signal was generated. The results show that, when input local oscillator signal is 5GHz, radio frequency spurious rejection ratio of the generated 120GHz high frequency microwave millimeter wave signal is 22dB. The spectrum purity is high, and the tunability is good. This study provides a high frequency doubling method for the generation of high frequency microwave and millimeter wave signal.

Key words: optical communication; microwave millimeter-wave; 24-tupling frequency; Mach-Zehnder modulator; semiconductor optical amplifier

引言

近些年来, 利用微波光子技术生成微波毫米波等高频信号的技术成为热点^[1-5], 该技术已经成功应用到了诸如医学成像、雷达、无线通信等领域, 相比于传统的电学方法生成高频信号的技术, 光生微波毫米波信号具有频率高、带宽大、频谱纯度高且不易受电磁干扰等优势。

光生微波毫米波信号有很多技术, 其中外调制技

术系统简单、稳定性高且频率调谐性好, 成为最具吸引力的方法。当前, 针对四倍频^[6-9]、六倍频^[10-12]、八倍频^[13-19]、十二倍频^[20-22]微波毫米波信号生成的方案已经进行了广泛而深入的研究, 更高倍频因子的方案也相继被提出。参考文献[23]中报道了采用级联双平行马赫-曾德尔调制器(dual-Mach-Zehnder modulator, DP-MZM)生成十六倍频光生毫米波的方案, 系统复杂。参考文献[24]中报道了基于DP-MZM和光滤波器生成十六倍频的方案, 相比于参考文献[23], 该方案更加复杂。参考文献[25]中报道了基于级联调制器的二十四倍频毫米波信号产生, 该方案使用了一个DP-MZM、一个MZM, 链路不止一个光电探测器(photo-detector, PD), 系统也很复杂。

在参考文献[20]中, SHIH等人提出了基于DP-

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(NSFC61671305)

作者简介: 洪赞扬(1992-), 男, 硕士研究生, 现主要从事运用微波光子学生成高频微波毫米波信号的研究。

* 通讯联系人。E-mail: 444381283@qq.com

收稿日期: 2018-04-19; 收到修改稿日期: 2018-06-07

MZM与半导体光放大器(semiconductor optical amplifier, SOA)结合的十二倍频方案,生成了较高频率的信号。本文中将在 SHIH 等人所提方案的基础上,提出一种基于并联 MZM 和 SOA 结合生成二十四倍频毫米波信号的方案,鉴于光纤布喇格光栅(fiber Bragg grating, FBG)体积小、插入损耗低以及与普通通信光纤良好匹配的特点,本方案用 FBG 代替 SHIH 等人所用的梳状滤波器,可以实现二十四倍频本振信号的生成。将两个 MZM 都偏置在最小传输点(minimum transmission point, MATP),通过设置其它参量以及调节调制指数生成 ±4 阶边带,利用 SOA 的四波混频(four-wave mixing, FWM)效应生成 ±12 阶边带,然后滤除 ±4 阶边带后进行拍频,从而生成二十四倍频信号。

1 原理介绍

所提出的二十四倍频方案如图 1 所示。本方案中所用到的器件有连续激光器、射频(radio frequency, RF)信号源、直流源、马赫-曾德尔调制器、偏振控制器、半导体光纤放大器、相位移相器(phase shifter, PS)、布喇格光栅滤波器、光学衰减器(optical attenuator, OA)以及光电探测器。

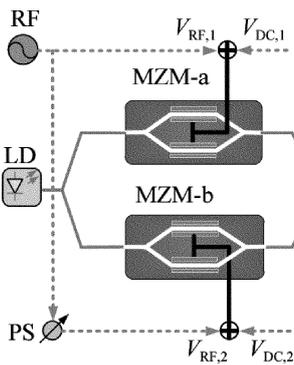


Fig. 1 Schematic diagram of microwave millimeter wave signal generation based on parallel MZM structure and SOA

设抽运激光器发出的光信号和微波源发出的电信号分别为:

$$E_{in}(t) = E_0 \exp(j\omega_0 t) \quad (1)$$

$$V(t) = V_{RF} \sin(\omega_{RF} t) \quad (2)$$

式中, E_0 是光场幅度, ω_0 是抽运光波频率, V_{RF} 是射频信号的幅度, ω_{RF} 是射频信号的角频率。

入射进两个子调制器的直流偏置电压用 $V_{DC,i}$ ($i = 1, 2$) 表示,则由直流偏置所引入的相位差 $\phi_i = \pi V_{DC,i} / V_{\pi}$ ($i = 1, 2$),其中 V_{π} 是 MZM 的半波电压。

激光器发出的光波被一个马赫-曾德尔集成调制器所调制,该集成调制器由嵌入到 MZM 上下两臂的

两个子调制器 MZM-a 和 MZM-b 构成。射入两个子调制器的射频信号相位相差 $\pi/2$,每个子调制器的上下两臂的射频信号相位差为 0。令 MZM-a 和 MZM-b 都偏置在 MATP,即 $\phi_1 = \phi_2 = 0$,则经过并联 MZM 调制后的信号可以表示为:

$$\begin{aligned} E_{out}(t) &= \frac{1}{4} E_0 \exp(j\omega_0 t) \{ \exp[jm \sin(\omega_{RF} t)] + \\ &\exp[-jm \sin(\omega_{RF} t)] \exp(-j\phi_1) + \exp[jm \sin(\omega_{RF} t + \Delta\phi)] + \exp[-jm \cos(\omega_{RF} t + \Delta\phi)] \exp(-j\phi_2) \} = \\ &\frac{1}{4} E_0 \exp(j\omega_0 t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m) \exp(jn\omega_{RF} t) \{ 1 + (-1)^n \cdot \\ &\exp(-j\phi_1) + \exp(jn\Delta\phi) + (-1)^n \exp(-j\phi_2) \cdot \\ &\exp(jn\Delta\phi) \} = \frac{1}{4} E_0 \exp(j\omega_0 t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m) \cdot \\ &\exp(jn\omega_{RF} t) \{ 1 + \exp(jn\Delta\phi) + (-1)^n \cdot \\ &[\exp(-j\phi_1) + \exp(-j\phi_2) \exp(jn\Delta\phi)] \} = \\ &\frac{1}{4} E_0 \exp(j\omega_0 t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m) \exp(jn\omega_{RF} t) \cdot \\ &\{ [1 + \exp(jn\Delta\phi)] [1 + (-1)^n] \} \quad (3) \end{aligned}$$

当 $\Delta\phi = \frac{\pi}{2}$ 时,(3)式可化为:

$$\begin{aligned} E_{out}(t) &= \frac{1}{4} E_0 \exp(j\omega_0 t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m) \cdot \\ &\exp(jn\omega_{RF} t) \{ (1 + j^n) [1 + (-1)^n] \} \quad (4) \end{aligned}$$

式中, $J_n(m)$ 为 n 阶贝塞尔函数。

由(1)式~(4)式可知:(1)当 $n = 4k + 1$ 或 $n = 4k + 3$ (k 为整数,下同)时, $1 + (-1)^n = 0$, ±1 阶和 3 阶边带信号被抑制;(2)当 $n = 4k + 2$ 时, $1 + j^n = 0$, ±2 阶边带信号被抑制;(3)当 $n = 4k$ 时, $E_{out}(t) \neq 0$,载波和 ±4 阶边带信号被保留,更高阶的信号由于功率过低,可以不用考虑。

令 $J_0(m) = 0$,可抑制载波,如图 2 所示。当 $m = 2.405$ 时, $J_0(m) = 0$ 。

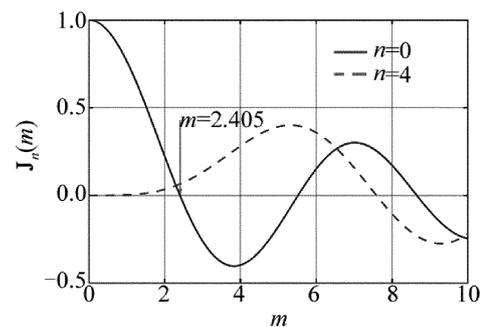


Fig. 2 Bessel function graph of the first kind of 0 order sideband and the 4th order sideband

当满足频率稳定、相位相关且偏振态相同的两个

光波信号在非线性介质中传播时,会由于非线性极化作用发生混频效应,从而产生两个新的波长,这种现象被称为 FWM。设抽运光频率为 ω_0 , 信号光频率为 ω_1 , 则经 FWM 效应后生成的两个谐波分量的频率分别为 $(2\omega_0 - \omega_1)$ 和 $(2\omega_1 - \omega_0)$, 如图 3 所示。

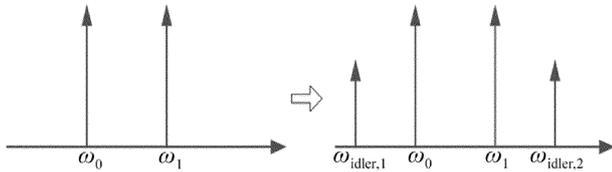


Fig. 3 Schematic diagram of FWM

诸如高非线性光纤 (high nonlinear optical fiber, HNLF) 和 SOA 等非线性器件都可以发生 FWM、交叉增益调制 (cross gain modulation, XGM)、交叉相位调制 (cross phase modulation, XPM) 等非线性效应。FWM 的产生要求各信号光的相位匹配, 当各信号光在光纤的零色散附近传输时, 材料色散对相位失配的影响很小, 因而较容易满足相位匹配条件, 容易产生四波混频效应。本方案中, 从 DP-MZM 中产生的光信号满足频率稳定、相位相关等条件, 此时, 其它的非线性效应的影响很小, 可以忽略不计。因此, 将采用 SOA 进行 FWM。

如前面所述, 生成的 ± 4 阶边带信号在经过 FWM 后将产生 ± 12 阶边带信号, 分别为 $\omega_{idler,1} = 2\omega_0 - \omega_1 = -12$ 和 $\omega_{idler,2} = 2\omega_1 - \omega_0 = +12$ 。经两级 FBG 滤除 ± 4 阶边带信号后, 只剩下 ± 12 阶边带信号, 最后经 PD 拍频便可生成纯净的二十四倍频信号。

2 仿真实验分析

针对提出的二十四倍频信号生成方案, 作者利用 OptiSystem 软件进行了仿真实验。

如图 1 所示, 连续激光器发出的光信号中心频率为 193.1THz, 功率为 0dBm, 线宽为 10MHz; 射频源信号频率为 5GHz, 初始相位为 0; MZM-a 和 MZM-b 参量设置一样, 消光比为 50dB, 半波电压为 4V, 插入损耗为 5dB, 设置射频调制电压为 6.127V, 直流偏置电压为 4V 和 0V; SOA 注入电流为 0.08A; FBG 1 中心频率为 193.12THz, 带宽为 35GHz, FBG 2 中心频率为 193.08THz, 带宽同样为 35GHz; 光学衰减器衰减量为 5dB, 光电探测器增益为 20; 响应度为 5A/W。

如图 4a 所示, 在设置消光比为 50dB 的情况下, 并联 MZM 输出的频谱图中 ± 4 阶边带信号占据主导, 而其它谐波则被极大的抑制, 虽然仍有 ± 1 阶边带信号,

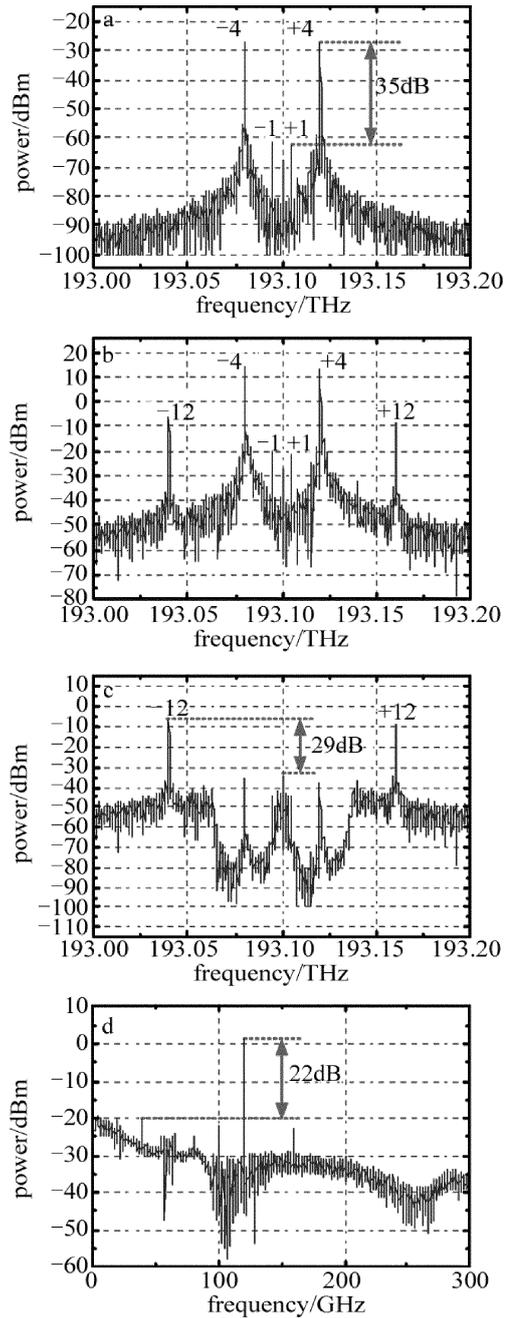


Fig. 4 a—output spectrum of parallel MZM b—output spectrum of SOA c—output spectrum of FBG 2 d—output electricity spectrum of PD

但光学边带抑制比 (optical sideband suppression ratio, OSSR) 仍然达到了 35dB。图 4b 显示了经 SOA 混频后的频谱图。可以看到, 由于 FWM 效应生成了 ± 12 阶边带信号。图 4c 显示了经两级 FBG 滤除 ± 4 阶边带后的频谱图, OSSR 为 29dB。图 4d 为 PD 输出的二十四倍频信号电谱图。由图可知, 在输入射频信号 5GHz 时, 生成了 120GHz 的微波信号, 且射频杂散抑制比 (radio frequency spurious suppression ratio, RFFSR) 为 22dB, 具有很高的纯度。

为了验证二十四倍频方案的频率可调谐性,调整射频信号的频率,观察 PD 输出的电谱图如图 5 所示。由图 5 可知,当射频信号在 4GHz~7GHz 之间调谐时,所生成的二十四倍频信号仍然具有很高的 RFFSR,说明该二十四倍频结构可以实现获得 96GHz~168GHz 的高频微波信号。

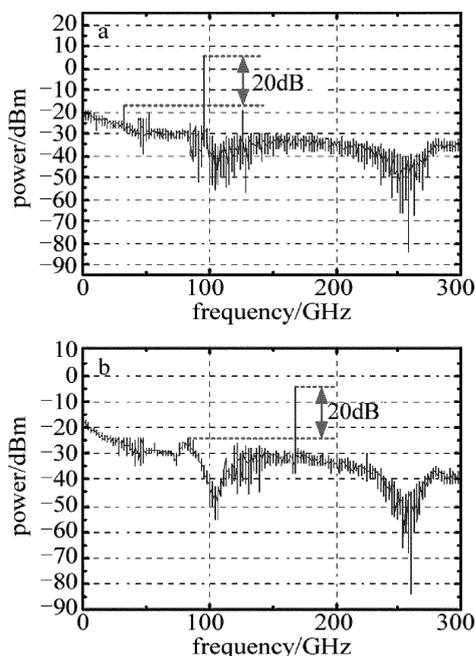


Fig. 5 a—output electricity spectrum of PD when RF is 4GHz b—output electricity spectrum of PD when RF is 7GHz

3 结论

本文中介绍了一种基于并联 MZM 和 SOA 结合实现输入信号二十四倍频的方案,在输入信号为 5GHz 时,生成了 120GHz 的高频微波信号,RFFSR 为 22dB,当输入信号频率在 4GHz~7GHz 范围内调节时,可以获得 96GHz~168GHz 的高频微波信号,频谱纯度也很高。从理论上分析验证了该方案实现二十四倍频的可行性,为高频微波毫米波信号的生成提供了更高的倍频方法。本方案虽然可以生成较高倍频数的信号,但是信号的 RFFSR 也只维持在 22dBm 的水平,相较于已有的四倍频、八倍频信号的 RFFSR 可以达到 30dBm 以上、甚至 40dBm 以上的水平,本方案还有所差距。所以,既要考虑高倍频因子,也要考虑信号的高性能,这是以后努力的方向。

参考文献

[1] XING J N, HE H X, CHI H. Advances in microwave signal frequency measurement based on photonics[J]. *Laser Technology*, 2018, 42(3): 295-299(in Chinese).
 [2] ZOU G J, ZHANG B F, TENG Y Ch. Study on microwave signal

generation and transmission of photoelectric oscillator on satellite[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(4): 582-585(in Chinese).
 [3] CHEN Y, LIU B, WANG T L, *et al.* Optical study of high performance concentrated local oscillator signal on stars[J]. *Aerospace Shanghai*, 2016, 33(6): 38-43(in Chinese).
 [4] WANG Y Q, LI P, LI J, *et al.* Millimeter-wave signal generation with tunable frequency multiplication factor by employing UFBG-based acousto-optic tunable filter[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(11): 1231-1236.
 [5] HE G, QU P F, SUN L J. Application status of microwave photon technology[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2017, 38(5): 627-632(in Chinese).
 [6] LIN C T, SHI P T, XUE W Q, *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.
 [7] XU Z W, FU H Y, CAI Zh P. Microwave frequency multiplication based on cascaded fiber ring microwave photonic filters[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, 25(1): 65-69(in Chinese).
 [8] JIANG W J, LIN C T, HUANG H S, *et al.* 60GHz photonic vector signal generation employing frequency quadrupling scheme for radio-over-fiber link [C]// *Optical Fiber Communication—Includes Post Deadline Papers*, 2009. New York, USA: IEEE, 2009:1-3.
 [9] ZHANG J, CHEN H W, WANG T L. A photonic microwave frequency quadrupler using two cascaded intensity modulators with repetitious optical carrier suppression[J]. *Photonics Technology Letters*, 2007, 19(14): 1041-1135.
 [10] WEI Zh H, WANG R, FANG T, *et al.* Sextupling tunable mm-wave signal generation based on intensity modulation and Brillouin effect [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(10): 1890-1894(in Chinese).
 [11] GAO Y Sh, WEN A J, YU Q W, *et al.* Microwave generation with photonic frequency sextupling based on cascaded modulators [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(12): 1199-1202.
 [12] SHI P M, YU S, LI Z K, *et al.* A novel frequency sextupling scheme for optical mm-wave generation utilizing an integrated dual-parallel Mach-Zehnder modulator [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(19): 3667-3672.
 [13] LIN Ch T, SHIN P T, JIANG W J, *et al.* A continuously tunable and filterless optical millimeter-wave generation via frequency octupling[J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 3692-3697.
 [14] SHANG J M, WANG D B, LIU Y J, *et al.* Research on the controllable frequency octupling technology for generation optical millimeter-wave by external modulator[J]. *Acta Optical Sinica*, 2014, 34(5): 506003(in Chinese).
 [15] ZHANG Y, PAN S. Experimental demonstration of frequency-octupled millimeter-wave signal generation based on a dual-parallel Mach-Zehnder modulator[C]// *Microwave Workshop Series on Millimeter Wave Wireless Technology and Applications*. New York, USA: IEEE, 2012:1-4.
 [16] LI W Zh, YAO J P. Microwave generation based on optical domain microwave frequency octupling[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(1): 24-26.
 [17] MA J X, XIN X J, XU J, *et al.* Optical millimeter wave generated by octupling the frequency of the local oscillator[J]. *Journal of Optical Networking*, 2008, 7(10): 837-845.

- [18] PREM A, CHAKRAPANI A. A phase modulation scheme for millimeter wave generation based on frequency octupling using LiNbO₃ Mach-Zehnder modulator[J]. International Journal of Engineering & Technology, 2017, 9(4): 3197-3202.
- [19] ZHANG W, WEN A J, GAO Y Sh, *et al.* Filterless frequency-octupling mm-wave generation by cascading sagnac loop and DPMZM [J]. Optics and Laser Technology, 2017, 97:229-233.
- [20] SHIH P T, CHEN J, LIN C T, *et al.* Optical millimeter-wave signal generation via frequency 12-tupling[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 28(1):71-78.
- [21] ZHU Z H, ZHAO Sh H, ZHENG W Z, *et al.* Filterless frequency 12-tupling optical millimeter-wave generation using two cascaded dual-parallel Mach-Zehnder modulators[J]. Applied Optics, 2015, 54(32): 9432-9440.
- [22] ZHU Z, ZHAO S, LI Y, *et al.* A novel scheme for high-quality 120GHz optical millimeter-wave generation without optical filter[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 65: 29-35.
- [23] CHEN X G, LIU Zh X, JIANG Ch, *et al.* A filterless optical millimeter-wave generation based on frequency 16-tupling [C]// Asia Communications and Photonics Conference 2013. Washington DC, USA; Optical Society of America, 2013: AF3B.4.
- [24] YING X Y, XU T F, LI J, *et al.* A 16-tupling signal generation millimeter wave technique based on cascaded dual-parallel MZM[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2017, 28(11): 1213-1217 (in Chinese).
- [25] PENG J Sh, WEN L Ch. Generation of 24-frequency millimeter-wave signal based on cascaded modulator[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(5): 758-762 (in Chinese).