

基于外调制器的可控八倍频光载毫米波生成技术研究

商建明 王道斌* 刘延君 元丽华 雷景丽 李晓晓 侯尚林

(兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要 采用了二加一的结构,提出了一种基于三并联集成马赫-曾德尔调制器(MZM)、可应用于毫米波光载无线通信(RoF)系统的新型高质量八倍频光载毫米波信号生成方案。该方案通过利用两个子马赫-曾德尔调制器(sub-MZMs)间射频(RF)驱动信号的电相位差为 90° 来很好地消除两种冗余边带,再使用第三个子马赫-曾德尔调制器(sub-MZM)的偏压调整来获取最佳信号。仿真结果表明在不采用任何光或电滤波器的情况下,常规消光比(30 dB)时,射频杂散抑制比(RFSSR)可以达到 38.3315 dB。而在理想消光比(100 dB)时,光边带抑制比(OSSR)最高可达 61.22878 dB。该方案在理想和常规消光比下均能得到高质量的毫米波信号。

关键词 光通信;八倍频;光边带抑制比;射频杂散抑制比

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0506003

Research on the Controllable Frequency Octupling Technology for Generating Optical Millimeter-Wave by External Modulator

Shang Jianming Wang Daobin Liu Yanjun Yuan Lihua Lei Jingli
Li Xiaoxiao Hou Shanglin

(School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract A novel scheme is proposed for generating high quality frequency octupling signal, which can be used in millimeter-wave radio-over-fiber (RoF) system. It's based on an integrated structure of triple-parallel Mach-Zehnder modulator (MZM) by using two adding one structure. Two kinds of redundant sidebands are well eliminated by adopting 90° of the electric phase-difference between two sub Mach-Zehnder modulators (sub-MZMs), driven by radio frequency (RF) signal. Moreover, bias of the third sub Mach-Zehnder modulator (sub-MZM) is tailored to get the best signal. The simulation results show that the radio frequency spurious suppression ratio (RFSSR) is as high as 38.3315 dB under the condition of conventional extinction ratio (30 dB) without any optical or electrical filter. Furthermore, optical sideband suppression ratio (OSSR) can reach as high as 61.22878 dB at ideal extinction ratio (100 dB). For not only conventional condition but also the ideal case, the scheme can get high quality millimeter-wave signal.

Key words optical communications; frequency octupling; optical sideband suppression ratio; radio frequency spurious suppression ratio

OCIS codes 060.2330; 060.4080; 060.4510

1 引言

目前全球的信息化建设正在飞速发展,由于其便携性、无线化、数据化和宽带化^[1],当前的毫米波光载无线通信(RoF)已经成为无线通信行业发展的

大趋势。毫米波的光学产生是简化基站、降低系统造价的关键技术^[2]。毫米波通信^[3-8]也是当前学术界研究的热点之一,这在未来的通信、军事等领域都有重要的应用价值。基于马赫-曾德尔调制器

收稿日期: 2013-11-14; **收到修改稿日期**: 2013-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(61367007,61167005)、甘肃省自然科学基金(1112RJZA017,1112RJZA018)、兰州理工大学博士科研启动基金

作者简介: 商建明(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤无线通信系统方面的研究。E-mail: shangujv@126.com

导师简介: 刘延君(1967—),女,副教授,主要从事光纤通信、太赫兹通信方面的研究。E-mail: liuyanerjun@163.com

* **通信联系人**。E-mail: cougarlz@gmail.com

(MZM)非线性产生毫米波信号的方案^[9-17]有着很广泛的应用。关于此方案,人们进行了广泛地研究并提出了若干毫米波解决方案。

在现有方案中,主要分采用光或电滤波器^[16]和不采用光或电滤波器^[13-15]两种情况,而不采用滤波器的方案已经成为主导。目前的方案依然存在着冗余边带抑制效率不高^[13]、系统复杂度高^[14-15]、成本高^[14]等问题。如文献[13]利用单个由两个子马赫-曾德尔调制器(sub-MZMs)构成的集成 MZM 产生八倍频毫米波方案,在非理想消光比(ER)下,光边带抑制比(OSSR)严重下降,并且在无滤波器的情况下产生的毫米波信号很难达到较好的射频杂散抑制比(RFSSR)。文献[14-15]分别用了 6 个和 4 个 sub-MZMs 而且方案较为复杂。

本文提出了一种不采用光电滤波器而产生高质量八倍频毫米波信号的方案。该方案中的集成 MZM 采用二加一的新型结构,仅包含 3 个 sub-MZMs。其中,两个 sub-MZMs 由射频(RF)信号驱动,另一个 sub-MZM 由偏压驱动。通过调整 RF 驱动电压和偏压生成高质量八倍频信号,可应用于毫米波无线通信系统。与以前的方案相比,该方案优化了倍频方法,并且可在常规 ER 条件下得到较高的 RFSSR,具有较好的应用前景。

2 原理分析

本文提出的方案的系统结构如图 1 所示。光从

连续(CW)激光器中发出注入集成 MZM 后经过掺铒光纤放大器(EDFA),在光电探测器(PD)处接收得到的光信号转换成电信号。其中,集成 MZM 由本地射频振荡器(RFLO)产生的 RF 信号和偏压驱动组成。在系统中,PS1 为电相位转换器,PS2 为光相位转换器。

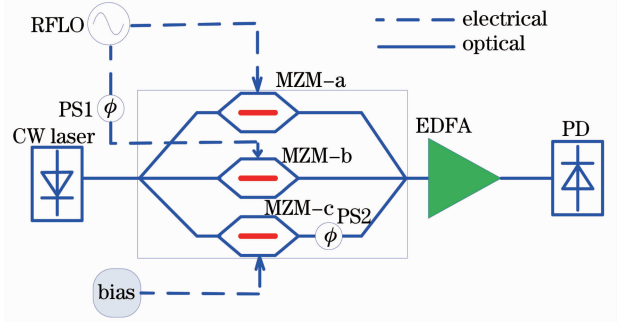


图 1 八倍频毫米波信号生成原理图
Fig.1 Scheme for the frequency octupling millimeter-wave signal

集成的 MZM 是由三个相互平行的 sub-MZMs 以及 PS2 组成的。其中 MZM-a 和 MZM-b 处于最大偏置点,调整 MZM-c 的偏压配合 PS2 来消除零阶光边带的影响。

假设激光器产生的光信号为

$$E_m(t) = E_0 \exp(j\omega_0 t), \quad (1)$$

式中 E_0 和 ω_0 是光波的幅度和相位。

MZM-a 和 MZM-b 偏置在最大输出点,所以它们的输出表达式分别为

$$E_{out-a}(t) = \frac{1}{3} E_0 \exp(j\omega_0 t) \cos[m \sin(\omega_{RF} t + \varphi_0)], \quad (2)$$

$$E_{out-b}(t) = \frac{1}{3} E_0 \exp(j\omega_0 t) \cos[m \sin(\omega_{RF} t + \varphi_0 + \Delta\varphi)], \quad (3)$$

式中 $m = \pi V_{RF} / 2V_{\pi 1}$ 为调制深度, $V_{\pi 1}$ 是 MZM-a 和 MZM-b 的半波电压, V_{RF} 和 ω_{RF} 分别为 RF 信号的幅度和相位, φ_0 和 $\varphi_0 + \Delta\varphi$ 分别为 MZM-a 和 MZM-b 的初始相位。

MZM-c 没有 RF 驱动电压,其输出的光信号可以表示为

$$E_{out-c}(t) = \frac{1}{3} E_0 \exp(j\omega_0 t) \cos \varphi_c, \quad (4)$$

式中 $\varphi_c = \pi V_{bias-c} / (2V_{\pi c})$, V_{bias-c} 和 $V_{\pi c}$ 分别为 MZM-c 的偏压和半波电压。

集成 MZM 的输出能够用 Bessel 函数表示为

$$E_{out}(t) = \frac{1}{3} E_0 \exp(j\omega_0 t) \left\{ \cos \varphi_c \exp(j\varphi) + \sum_{-\infty}^{+\infty} J_{2n}(m) \exp[j(2n)\omega_{RF} t] \exp[j(2n)\varphi_0] \times \{1 + \exp[j(2n)\Delta\varphi]\} \right\}, \quad (5)$$

式中 $J_{2n}(m)$ 为第一类 Bessel 函数的 $2n$ 阶, φ 为 MZM-c 的输出臂上的光相位变换器。

为了获得高的 RFSSR,两个四阶光边带应当被保留下来而且其幅度应为最大,同时应该很好地抑

制其他冗余的光边带。在这些冗余的光边带中，二阶和六阶光边带具有较大的幅度，对 RFSSR 会有明显的影响。如果二阶和六阶光边带得不到很好地抑制，将会极大地降低产生毫米波信号的质量。因此为了产生高质量的八倍频毫米波信号，消除二阶和六阶光边带是非常关键的。从(5)式可以看出，当满足 $1 + \exp(2j\Delta\varphi) = 0$ 和 $1 + \exp(6j\Delta\varphi) = 0$ 的时候可以很好地抑制冗余的二阶与六阶光边带，然而，零阶光边带，可以通过 MZM-c 抑制到需要的程度。

由 $1 + \exp(2j\Delta\varphi) = 0$ 可得

$$\Delta\varphi = \pi/2, \quad (6)$$

由 $1 + \exp(6j\Delta\varphi) = 0$ 可得

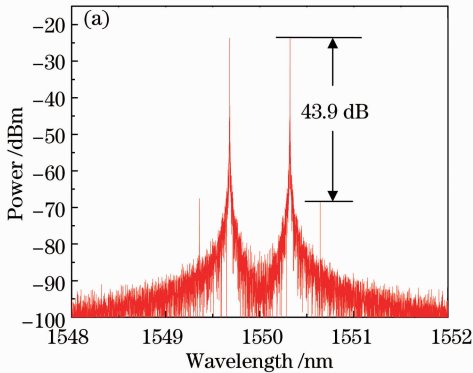
$$\Delta\varphi = \pi/6 \text{ or } \pi/2 \text{ or } 5\pi/6, \quad (7)$$

即 $\Delta\varphi = \pi/2$ 时，可以同时很好地抑制冗余的二阶和六阶光边带。

取 $m = 3.3379$ 时， $J_4(8.5)/J_8(8.5) \approx 165.0281$ ，此时四阶 Bessel 函数远大于八阶 Bessel 函数的值，所以八阶以上的边带可以忽略。

因此，输出的光信号可以近似表示为

$$E_{\text{out}}(t) \approx \frac{2}{3} E_0 \exp(j\omega_0 t) [J_4(m) \exp(4j\omega_{\text{RF}} t) \times \exp(4j\varphi_0)]. \quad (8)$$



此时，冗余光边带得到了很好的抑制。设 PD 的响应的灵敏度为 R ，则 PD 输出可以表示为

$$i(t) = R |E_{\text{out}}(t)|^2, \quad (9)$$

所以产生的八倍频信号可以近似表示为

$$P_{8\text{th}} \propto R^2 \cdot E_0^4 \cdot J_4(m)^4. \quad (10)$$

3 仿真分析

3.1 八倍频毫米波信号产生

仿真系统采用背靠背方式，如图 1 所示。激光器中心波长为 1550 nm，线宽为 10 MHz，功率为 0 dBm。MZM-a 和 MZM-b 上的 RF 驱动信号的频率为 10 GHz，外部的电相位变换器采用的相角为 $\pi/2$ ，MZM-a 和 MZM-b 的半波电压 $V_{\pi 1} = 4$ V，ER 采用常规状态 30 dB 及理想状态 100 dB。EDFA 的噪声指数为 4 dB。PD 的响应灵敏度为 $R = 0.6$ A/W。

在理想 ER(100 dB) 状态下，得到的光谱图和输出 RF 信号图，分别如图 2(a)、(b) 所示。从图 2(a) 中可以看出，冗余的边带得到了很好地抑制，光边带抑制比高达 43.901372 dB。对于产生的 RF 频谱，可以很明显看出 80 GHz 以外的信号得到了很好地抑制，抑制比达到了 38.3292 dB，如图 2(b) 所示。

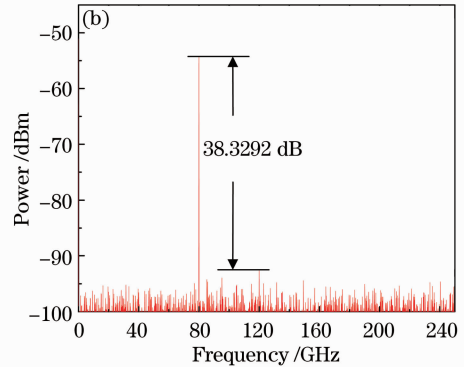


图 2 ER 为 100 dB 时 80 GHz 毫米波信号仿真。(a) 集成 MZM 输出的光谱图；(b) 产生的八倍频信号频谱图

Fig. 2 Simulated 80 GHz millimeter-wave signal generation when ER is 100 dB. (a) Output optical spectrum of the integrated MZM; (b) generated RF spectrum

在常规 ER(30 dB) 状态下，得到的光谱图和输出 RF 信号图，分别如图 3(a)、(b) 所示。从图 3(a) 中可以看出，冗余边带得到了很好地抑制，光边带抑制比达到了 23.887 dB。对于产生的 RF 频谱，可以很明显看出 80 GHz 以外的信号得到了很好地抑制，抑制比高达 38.3315 dB，如图 3(b) 所示。由此可以看出，该方案在常规 ER 下仍然可以得到很好的毫米波信号。

3.2 信号输出分析

八倍频信号最佳状态分析主要看过程中的

OSSR 和最终得到电信号的 RFSSR。调整 MZM-c 偏压一直为动态最佳值，OSSR 和 RFSSR 随着调制深度变化关系，分别如图 4(a)、(b) 所示。因为有噪声影响的时候，存在最低功率值不能低于噪声功率值问题，所以在此处不考虑系统噪声的影响。从图 4 中可以看出，在理想状态下 OSSR 有着较高的理想值，在 30 dB 情况下 OSSR 明显低于理想情况。然而，两种情况下的 RFSSR 基本重合，可以看出在此处最终输出 RF 信号基本没有受到 ER 的影响。

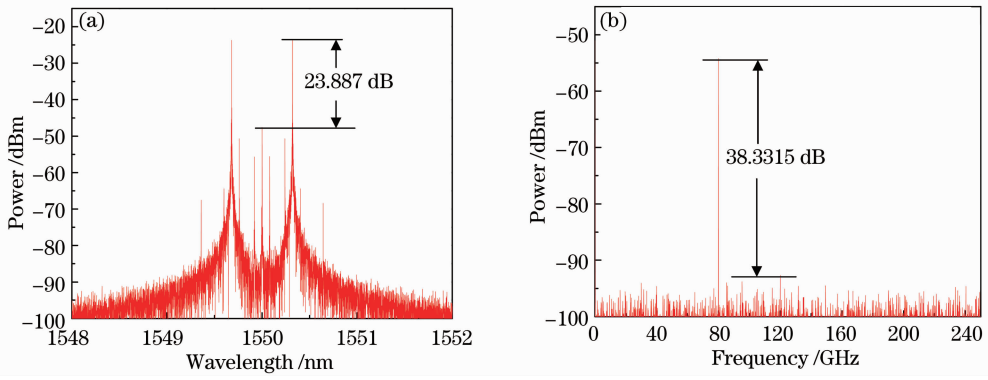


图 3 ER 为 30 dB 时 80 GHz 毫米波信号仿真。(a)集成 MZM 输出的光谱图;(b)产生的八倍频信号频谱图
Fig. 3 Simulated 80 GHz millimeter-wave signal generation for ER is 30 dB. (a) Output optical spectrum of the integrated MZM; (b) generated RF spectrum

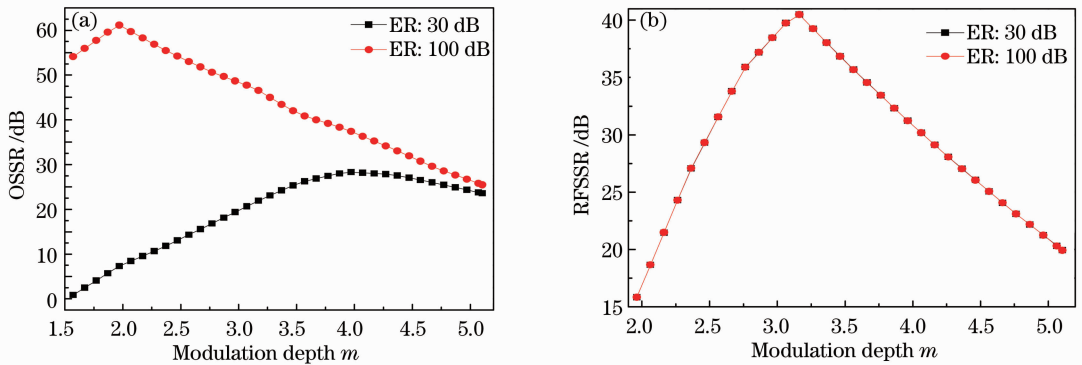


图 4 (a) OSSR 随着调制深度变化关系图;(b) RFSSR 随着调制深度变化关系图

Fig. 4 (a) OSSR against different modulation depths m ; (b) RFSSR against different modulation depths m

MZM-c 偏压动态最佳值随着调制深度的变化关系如图 5 所示。该曲线为抛物型,偏压最佳值变化趋势为先由大到小然后由小到大。

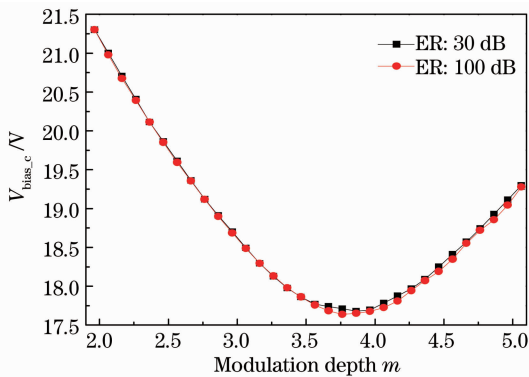


图 5 MZM-c 偏压动态最佳值随着调制深度变化关系图
Fig. 5 Best V_{bias_c} of MZM-c versus different modulation depths m

调制深度固定时,非理想 MZM-c 偏压值对 OSSR 和 RFSSR 的影响关系图,如图 6(a)、(b)所示。此处,取 $m=3.3379$ 。同样,在此处不考虑系统噪声的影响。从图 6 中可以看出,OSSR 和 RFSSR

在偏压值为 18 V 左右的时候有最大值。此处明显可以看出理想状态比常规状态下在 18 V 左右的 OSSR 占很大优势,而两者的 RFSSR 基本重合,可以看出在此处最终输出 RF 信号基本没有受到 ER 的影响。

3.3 非理想 RF 驱动电压和相位差对生成信号的影响

前面的分析指出,消除二阶和六阶边带可以通过设置集成 MZM 的驱动电压 V_{RF} 确定相应的调制深度 m 和 MZM-a 与 MZM-b 间 RF 驱动信号的相位差为 90° 来实现。如果 RF 驱动电压和相位差偏离预置值,得到的信号质量将会随之发生改变。因此,非理想因素的考虑对调整参数得到高质量的八倍频毫米波信号有着重要的意义。

非理想 RF 驱动电压对 OSSR 和 RFSSR 的影响,如图 7(a)、(b)所示。从图 7 中可以看出,在中心附近,OSSR 和 RFSSR 很大,而随着 RF 驱动电压偏离量的增加 OSSR 和 RFSSR 均有明显减小,这是由于偏离程度越大信号质量下降得越明显。对于 OSSR 在中心处 ER 为 100 dB 比 ER 为 30 dB

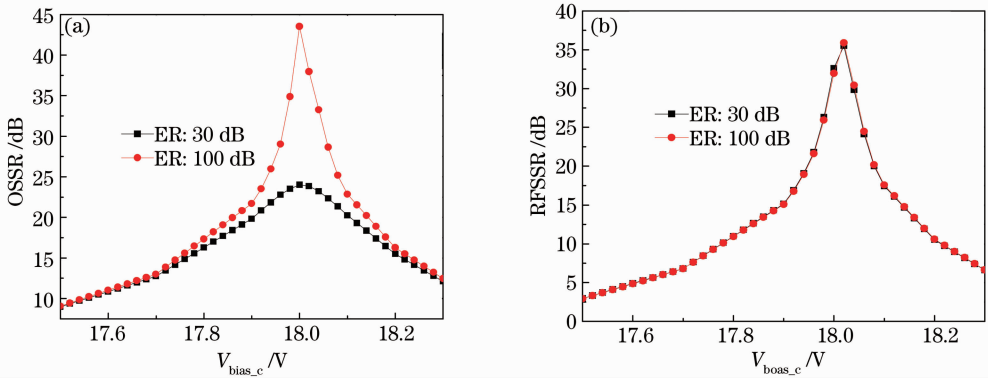


图 6 调制深度 m 为 3.3379 时,非理想 MZM-c 偏压值对 OSSR 和 RFSSR 的影响。(a) MZM-c 偏压值偏离对应的 OSSR 关系图; (b) MZM-c 偏压值偏离对应的 RFSSR 关系图

Fig. 6 Impact of nonideal V_{bias_c} of MZM-c on OSSR and RFSSR with the modulation depths $m=3.3379$.

(a) OSSR against the V_{bias_c} of MZM-c; (b) RFSSR against the best V_{bias_c} of MZM-c

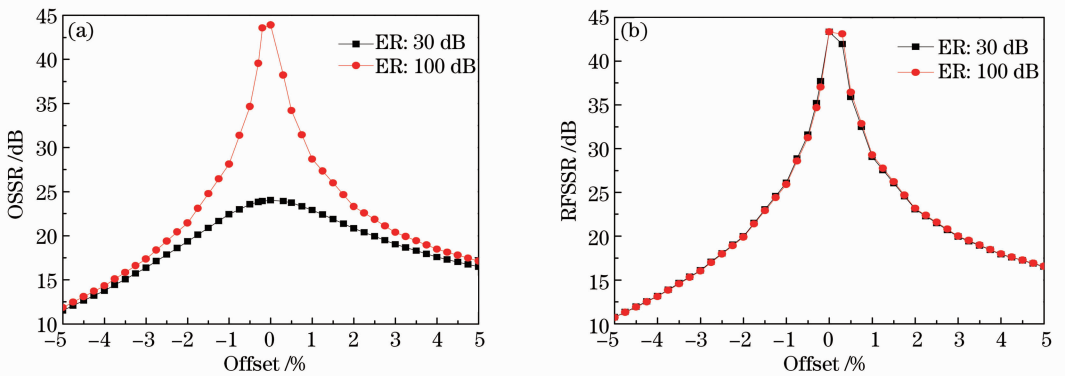


图 7 非理想 RF 驱动电压对 OSSR 和 RFSSR 的影响。(a) RF 驱动电压偏离对应的 OSSR 关系图; (b) RF 驱动电压偏离对应的 RFSSR 关系图

Fig. 7 Impact of nonideal RF driven voltage on OSSR and RFSSR. (a) OSSR against RF driven voltage deviation; (b) RFSSR against RF drive voltage deviation

时要高,随着偏离量的增加慢慢开始重合,因为随着偏离量的增大 ER 对 OSSR 的影响在减小。而 RFSSR 在 ER 为 100 dB 和 ER 为 30 dB 时基本重合,由于该方案的 ER 对 RFSSR 的影响不占主导地位,

在 RF 驱动电压偏离量小于 3% 的范围时, OSSR 总大于 15 dB;然而,在 RF 驱动电压偏离量小于 2% 的范围时,RFSSR 总大于 15 dB。相比之下,RFSSR 更容易受到非理想驱动电压的影响。这

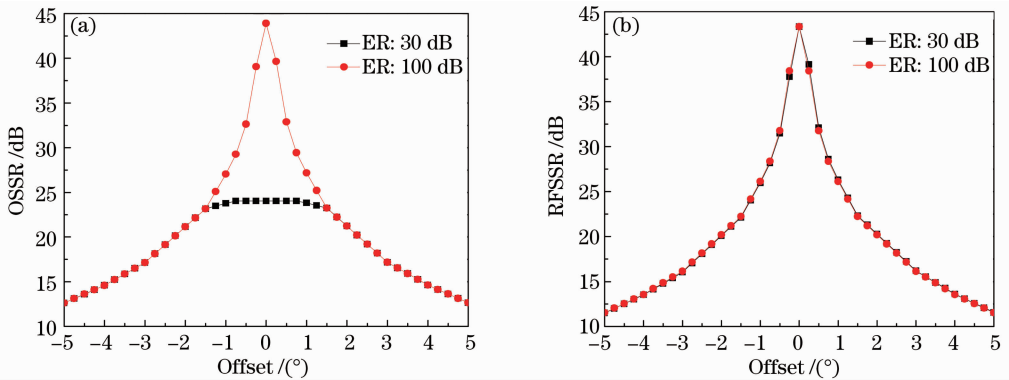


图 8 非理想相位差对 OSSR 和 RFSSR 的影响。(a)相位差偏离对应的 OSSR 关系图; (b)相位差偏离对应的 RFSSR 关系图

Fig. 8 Impact of nonideal phase difference on OSSR and RFSSR. (a) OSSR against phase difference deviation; (b) RFSSR against phase difference deviation

是因为 OSSR 只和光边带的幅度有关,而 RFSSR 不仅与参与拍频的光边带的幅度有关,还与参与拍频的光边带间相位关系有关。因此,为了获得高质量的毫米波信号,应对 RF 驱动电压进行合理的设置和控制。

两个 sub-MZMs 间 RF 驱动信号的非理想相位差对 OSSR 和 RFSSR 的影响,如图 8(a)、(b)所示。从图 8 中可以看出,在相位差偏离范围小于 3.5° 时, OSSR 总大于 15 dB;然而在相位差偏离量小于 2° 的范围时,RFSSR 总大于 15 dB。同样地,相对 OSSR 而言,非理想相位差对 RFSSR 的影响更明显。这是因为非理想相位差不仅影响光边带的幅度,同时也影响光边带的相位。

因此,为了获得高质量的毫米波信号,应对 RF 驱动电压和相位差进行合理的设置和控制。

4 结 论

提出了一个无光电滤波器、基于新结构的集成 MZM 八倍频毫米波产生技术方案,并进行了理论分析和仿真验证。结果表明,在没有光电滤波器的情况下,该方案产生了高质量的八倍频毫米波信号。与以前的方案相比,该方案优化了倍频方法的同时提高 RFSSR 到 38.3315 dB,为更好地进行光无线通信有着积极意义。为了获得高质量的八倍频毫米波信号,适当调整 RF 驱动电压和偏压尤为关键,同时也表明了该方案在高质量八倍频毫米波信号的产生方面具有可控性。在实际应用中可采取反馈方式动态地调整来控制 RF 驱动电压和偏压,为较高频段毫米波通信的实用化奠定了良好的基础。

参 考 文 献

- Zhihu Wei, Rong Wang, Tao Pu, *et al.*. A wideband tunable phase shifter based on orthogonal optical single-sideband [J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(s2): S20601.
- Fang Zhuojie, Ye Qing, Liu Feng, *et al.*. Progress of millimeter wave subcarrier optical fiber communication technologies [J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(4): 481-488.
方祖捷, 叶青, 刘峰, 等. 毫米波副载波光通信技术研究进展[J]. *中国激光*, 2006, 33(4): 481-488.
- Jianxin Ma, Yu Zhan, Min Zhou, *et al.*. Full-duplex radio over fiber with a centralized optical source for a 60 GHz millimeter-wave system with a 10 Gb/s 16-QAM downstream signal based on frequency quadrupling [J]. *J Opt Commun Netw*, 2012, 4(7): 557-564.
- Liu Limin, Dong Ze, Pi Yazhi, *et al.*. Radio-over-fiber system

- for frequency-quadrupled millimeter-wave generation by external modulator [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(1): 148-153.
刘丽敏, 董泽, 皮雅稚, 等. 采用外调制器产生四倍频的光载毫米波光通信系统[J]. *中国激光*, 2009, 36(1): 148-153.
- Zhiwei Zhen, Ying Li, Jiangnan Xiao, *et al.*. A radio-over-fiber system with a novel scheme for optical local oscillator and mm-wave distribution [J]. *Inform Technol J*, 2013, 12(1): 229-233.
- Zhishan Gong, Kun Xu, Xuejun Meng, *et al.*. Effect of optical losses on the transmission performance of a radio-over-fiber distributed antenna system [J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(2): 020603.
- Wang Yanjin, Shao Yufeng, Chi Nan, *et al.*. Application of peak-to-average ratio reduction algorithm using precoding technique in 60 GHz orthogonal frequency-division multiplexing radio-over-fiber system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706018.
王燕瑾, 邵宇丰, 迟楠, 等. 预编码峰均比抑制算法在 60 GHz 正交频分复用光载无线通信系统中的应用[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706018.
- Shen Da, Hu Zongfu, Wu Jiaqing, *et al.*. Design and realization of a radio-over-fiber system based on self-homodyned 60 GHz receiver [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0506005.
沈达, 胡宗福, 吴佳青, 等. 基于自差 60 GHz 接收机的光载无线通信系统设计与实现[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0506005.
- Peiming Shi, Song Yu, Zekun Li, *et al.*. A novel frequency sextupling scheme for optical mm-wave generation utilizing an integrated dual-parallel Mach-Zehnder modulator [J]. *Opt Commun*, 2010, 283(19): 3667-3672.
- Peiming Shi, Song Yu, Zekun Li, *et al.*. A frequency sextupling scheme for high-quality optical millimeter-wave signal generation without optical filter [J]. *Opt Fiber Technol*, 2011, 17(3): 236-241.
- Biagio Masella, Xiupu Zhang, *et al.*. Linearized optical single-sideband Mach-Zehnder modulator for radio-over-fiber systems [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(24): 2024-2026.
- Jianxin Ma, Xiangjun Xin, J Yu, *et al.*. Transmission of a 40 GHz optical millimeter wave generated by quadrupling a 10 GHz local oscillator via a Mach-Zehnder modulator [J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2009, 11(6): 065406.
- Jianxin Ma, Xiangjun Xin, J Yu, *et al.*. Optical millimeter wave generated by octupling the frequency of the local oscillator [J]. *J Opt Netw*, 2008, 7(10): 837-845.
- Chun-Ting Lin, Po-Tsung Shih, Wen-Jr Jiang, *et al.*. A continuously tunable and filterless optical millimeter-wave generation via frequency octupling [J]. *Opt Express*, 2009, 17(22): 19749-19756.
- Lei Shang, Aijun Wen, Bo Li, *et al.*. A filterless optical millimeter-wave generation based on frequency octupling [J]. *Optik*, 2012, 123(13): 1183-1186.
- Wangzhe Li, Jianping Yao. Microwave generation based on optical domain microwave frequency octupling [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 22(1): 24-26.
- Xu Lili, Ning Tigang, Li Jing, *et al.*. Improved 60 GHz millimeter-wave generator based on feed-forward modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0206002.
许丽丽, 宁提纲, 李晶, 等. 一种改进的基于前向调制技术生成 60 GHz 毫米波方案[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0206002.