

DOI:10.16136/j.joel.2023.12.0512

一种基于并级联 MZM 的 20 倍频光生毫米波方案

苏 醒, 刘小磊*

(河南理工大学 物理与电子信息学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 为进一步提高光载无线通信 (radio over fiber, ROF) 系统中光生毫米波的倍频系数, 提出了一种基于 4 个马赫-曾德尔调制器 (Mach-Zehnder modulator, MZM) 共同作用的 20 倍频毫米波信号产生方案。推导了理想情况下倍频方案的产生机理, 在仿真实验中, 分别分析了非理想因素下调制器直流偏置电压漂移、调制指数、消光比等对系统性能的影响, 结果显示, 当合理设置各参数的取值范围, 其光边带抑制比 (optical sideband suppression ratio, OSSR) 和射频杂散抑制比 (radio frequency spurious sideband suppression ratio, RFSSR) 的饱和值高达 33.20 dB 和 27.21 dB; 针对基于此倍频方案的 ROF 系统, 对比分析了 2.5 Gbit/s 数据信号的单双边带调制两种不同传输方式, 仿真结果表明, 当光纤距离为 40 km 时, 单边带依旧可达无差错传输, 降低了传输过程中码间走离效应的影响, 增加了系统的传输距离, 更适合远距离传输, 为微波光子学的发展提供了一种理论依据。

关键词: 光载无线通信 (ROF); 马赫-曾德尔调制器 (MZM); 20 倍频; 毫米波; 无滤波

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)12-1233-08

A scheme of frequency 20-tupling millimeter-wave generation based on dual-cascaded MZM

SU Xing, LIU Xiaolei*

(School of Physics and Electronic Information, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henna 454003, China)

Abstract: In order to further improve the frequency multiplication coefficient of photogenerated millimeter-wave in the radio over fiber (ROF) system, a scheme for generating frequency 20-tupling millimeter-wave signals based on the interaction of four Mach-Zehnder modulators (MZM) is proposed. The generation mechanism of frequency doubling scheme under ideal conditions is deduced. In the simulation experiment, the influences of DC bias voltage drift, modulation index and extinction ratio on the system performance under non-ideal factors are analyzed respectively. The results show that the saturation values of the optical sideband suppression ratio (OSSR) and the radio frequency spurious sideband suppression ratio (RFSSR) can reach 33.20 dB and 27.21 dB when the range of each parameter is set properly. For the ROF system based on this frequency doubling scheme, two different transmission modes of 2.5 Gbit/s data signal with single tone and dual tone modulation formats are compared and analyzed. The simulation results show that when the optical fiber distance is 40 km, the single sideband can still achieve error-free transmission, which reduces the influence of inter-code walk-off effect in the transmission process, increases the transmission distance of the system, and is more suitable for long-distance transmission. It provides a theoretical basis for the development of microwave photonics.

Key words: radio over fiber (ROF); Mach-Zehnder modulator (MZM); 20-tupling; millimeter wave; filterless

0 引 言

在第四次工业革命到来的今天, 云计算、大数

据、人工智能等前沿技术正席卷全球, 信息的爆炸式增长使得低时延、高速率、大容量、易接入的稳定通信成为发展趋势, 而现有的中低频段的频谱

* E-mail: liuxiaolei@hpu.edu.cn

收稿日期: 2022-07-10 修订日期: 2022-12-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (12074102) 和河南理工大学基本科研业务费专项项目 (自科类) (NSFRF180404) 资助项目

资源即将被分配殆尽,毫米波波段甚至太赫兹波段成为了当前研究的重点^[1]。此外,由于电子器件发展瓶颈的限制,基于电域产生高频毫米波异常困难且损耗严重^[2],光学技术的发展为毫米波产生提供了一种新的解决途径,拥有无线性和宽带性的光载无线通信(radio over fiber, ROF)为目前的海量接入和无线传输提供了巨大便利,成为了未来主流的无线接入方式,而高质量毫米波的产生是目前研究的热点之一^[3,4]。

基于光子技术的毫米波生成技术有:光外差、光学锁相环、马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder modulator, MZM)、双平行马赫-曾德尔调制器(dual-parallel Mach-Zehnder modulator, DPMZM)、四波混频(four-wave mixing, FWM)及受激布里渊散射(stimulated Brillouin scattering, SBS)的非线性效应等^[5-7],由于光外调制器具有较高的调制速率与十分稳定的工作性能,所以目前外调制技术成为了一种主流的调制技术;采用单个 MZM 或 DPMZM 可实现微波本振信号 4、8、12 倍频^[8-10];基于级联 DPMZM 可获得一种 4 倍频以及 12 倍频的毫米波信号^[11],但以上方案倍频因子普遍处于较低水平难以满足高频率毫米波信号的需求。

为了进一步提高光生毫米波信号的倍频因子,文献[12]提出一种级联三平行 MZM 和单 MZM 结构的 16 倍频光生毫米波方案,但受限于实际制造工艺的限制,调制器消光比难以达到理论仿真设置的要求,对系统的使用存在一定制约;文献[13]仿真研究了并联两个 DPMZM 的 16 倍频方案,但其中两 DPMZM 的下臂子调制器仅仅用作对光载波功率的中和,确实是对资源的一种浪费,且多个 DPMZM 的使用增加了系统结构的复杂度;文献[14]提出了一种基于 MZM 与半导体光放大器(semiconductor optical amplifier, SOA)的 18 倍频毫米波生成方案,成功将 5 GHz 信号倍频至 90 GHz,但 SOA 作为有源器件会增加系统的实验成本且其 FWM 效应应有较大的自发辐射噪声,在高性能的毫米波通信系统中应用受限;文献[15]提出了 24 倍频毫米波信号的生成方案,但由于内部光延迟器和 SOA 的使用,增加了系统的实现成本,且目前所呈现的倍频方案大部分仅对产生原理进行分析,并未对系统信号的传输特性进行分析,难以为实际实现提供理论依据,增加了系统的不确定性。

本文提出了一种基于并级联 MZM 的无滤波器高倍频光生毫米波方案,通过设置调制器的调制指数、工作状态、射频相位,可实现上下支路 2 阶边带的抑制,合路后再实现 6 阶边带的抑制,保

留所需的 10 阶边带,后经光电探测器(photo detector, PD)拍频可将 7.5 GHz 射频驱动信号成功倍频为 150 GHz 的电毫米波信号。为验证毫米波信号的传输性能,搭建基于此倍频方案的 ROF 系统,并分别采用单双边带两种不同的数据调制方式,经光纤传输后,单边带有更好的传输性能。仿真结果表明,本设计方案可以成功产生高倍频毫米波信号,且生成的信号频率可调性强、倍频因子高、频谱纯度好,为 ROF 高倍频毫米波的生成提供了一种新的选择方向。

1 基本原理

本文所提出的基于并级联 MZM 的无光滤波器 20 倍频光生毫米波的系统原理图以及各点的光谱图如图 1 所示。

连续波激光器(continuous wave laser diode, CWLD)发出的连续波信号为:

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

式中, E_0 和 ω_0 为其输出光信号的幅度和角频率。

经过正弦波发生器产生的射频信号为:

$$E_{Rf}(t) = V_{Rf} \cos(\omega_{Rf} t), \quad (2)$$

式中, V_{Rf} 和 ω_{Rf} 为射频信号的幅度和角频率。

假设经过光功率分束器(optical power splitter, OPS)的理想分配比为 1 : 1,则在上支路中经过 MZM-1 的光信号表达式为:

$$E_{MZM-1}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{E_{in}(t)}{10^{\frac{IL}{20}}} \left[\gamma \exp\left(j\pi \frac{V_2(t)}{V_{\pi RF}} + j\pi \frac{V_{bias2}}{V_{\pi DC}}\right) + (1 - \gamma) \exp\left(j\pi \frac{V_1(t)}{V_{\pi RF}} + j\pi \frac{V_{bias1}}{V_{\pi DC}}\right) \right]. \quad (3)$$

MZM-1 工作在最小偏置点,则有直流偏置电压 $V_{bias2} = V_{\pi DC}$, $V_{bias1} = 0$ V,且调制器上下两臂所加电压反向,也即:

$$V_1(t) = E_{Rf}(t) = -V_2(t). \quad (4)$$

IL 和 γ 分别为 MZM 的插入损耗和上下两臂的分光比, $V_{\pi RF} = V_{\pi DC} = V_{\pi}$ 为调制器的半波电压,设调制器工作在理想情况下($\gamma = (1 - 10^{-ExtRatio/20})/2$,消光比 ER 设为 100 dB), $\gamma = 1/2$,且令 $\lambda = 10^{-(IL/20)}$,则式(3)可简化为:

$$E_{MZM-1}(t) = \frac{\sqrt{2}}{4} \lambda E_{in}(t) \left[\exp\left(j\pi \frac{E_{Rf}(t)}{V_{\pi}} + j\pi\right) + \exp\left(j\pi \frac{E_{Rf}(t)}{V_{\pi}}\right) \right], \quad (5)$$

采用贝塞尔函数进一步化简可得:

$$E_{MZM-1}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \lambda E_{in}(t) j \sin[m \cos(\omega_{Rf} t)] =$$

$$\sqrt{2}\lambda E_{\text{in}}(t)j \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n J_{2n+1}(m) \cos[(2n+1)\omega_{\text{Rf}}t], \quad (6)$$

式中, $m = \frac{\pi V_{\text{Rf}}}{V_{\pi}}$, 且可见经 MZM-1 后成功实现了中心载波及偶数阶边带的抑制, 只余下奇数阶边带。

经过电移相器 1 (electrical phase shift, EPS) 相位偏转后输入第二个 MZM 的射频信号为:

$$E_{\text{Rf2}}(t) = V_{\text{Rf}} \cos\left(\omega_{\text{Rf}}t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (7)$$

同 MZM-1, 则经过 MZM-2 输出的光信号表达式为:

$$E_{\text{MZM-2}}(t) = -\lambda E_{\text{MZM-1}}(t)j \sin[m \sin(\omega_{\text{Rf}}t)] = -2\lambda E_{\text{MZM-1}}(t)j \sum_{n=0}^{+\infty} J_{2n+1}(m) \sin[(2n+1)\omega_{\text{Rf}}t], \quad (8)$$

将式(1)、(6)代入式(8)中, 则有:

$$E_{\text{MZM-2}}(t) = \sqrt{2}\lambda^2 E_0 \sum_{n=2,6,10,14,\dots}^{+\infty} J_n(\sqrt{2}m) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{4}\right) \sin\left(n\omega_{\text{Rf}}t + \frac{n\pi}{2}\right) \exp(j\omega_0 t). \quad (9)$$

由式(9)可看出, A 点输出的光信号实现了奇数边带及 $n=4k(k=0,1,2,\dots)$ 阶边带的抑制, 只余下 n

$=2k(k=1,3,5,7,\dots)$ 阶边带。

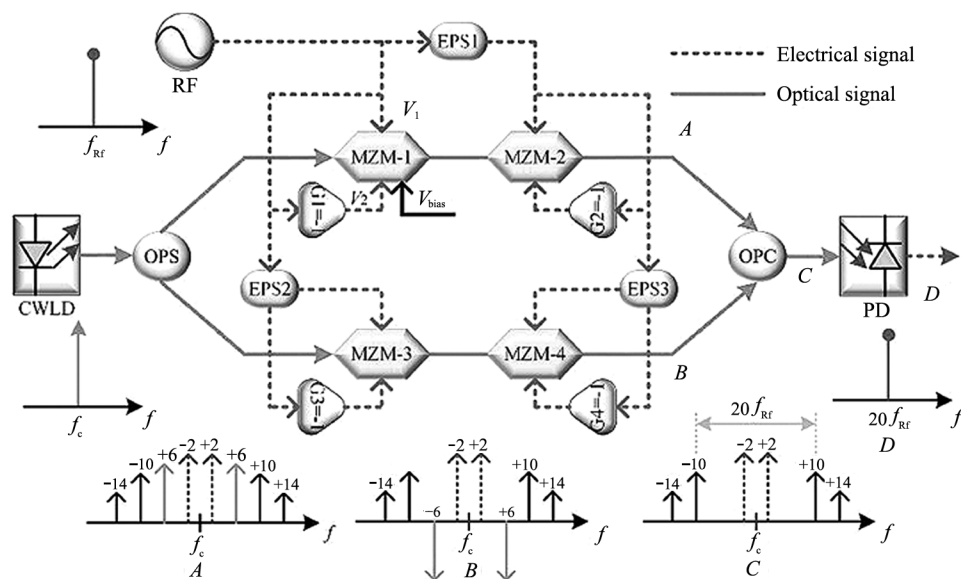
为进一步实现 MZM-2 与 MZM-4 边带信号相位的反向, 对于下支路, 设置 EPS 的角度为 30° , 保持同上支路调制器的参数设置, 则 MZM-4 输出端光信号的表达式为:

$$E_{\text{MZM-4}} = \sqrt{2}\lambda^2 E_0 \sum_{n=2,6,10,14,\dots}^{+\infty} J_n(\sqrt{2}m) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{4}\right) \sin\left(n\omega_{\text{Rf}}t + \frac{2n\pi}{3}\right) \exp(j\omega_0 t). \quad (10)$$

故最终在 C 点处得到的输出光信号表达式为:

$$E_{\text{out}}(t) = E_{\text{MZM-2}}(t) + E_{\text{MZM-4}}(t) = \sqrt{2}\lambda^2 E_0 \sum_{n=2,10,14,\dots}^{+\infty} J_n(\sqrt{2}m) \sin\left(\frac{n\pi}{4}\right) \cdot \left[\sin\left(n\omega_{\text{Rf}}t + \frac{n\pi}{2}\right) + \sin\left(n\omega_{\text{Rf}}t + \frac{2n\pi}{3}\right)\right] \exp(j\omega_0 t). \quad (11)$$

由式(11)可知, 当上下两边带合路时, 进一步实现了 $n=6k(k=1,3,5,\dots)$ 的抑制。由第一类贝塞尔曲线可知, 当取 $\beta = \sqrt{2}m = 8.4168$ 时可实现 2 阶边带的抑制, 此时有 $J_{10}(\beta) > J_{14}(\beta) \gg J_2(\beta) = 0$ 。所以经分析可知, 输出的频谱中只含有 10 阶和 14 阶边带, 且 10 阶边带占据主导地位, 继而经过 PD 拍频可以生成以 20 倍频为主的射频电信号。



CWLD: continuous wave laser diode; OPS: optical power splitter; RF: radio frequency; MZM: Mach-Zehnder modulator; EPS: electrical phase shift; OPC: optical power combiner; PD: photo detector

图1 20 倍频光生毫米波原理框图

Fig. 1 Principle diagram of frequency 20-tupling photogenerated millimeter-wave

2 实验仿真结果与分析

为了验证图 1 倍频毫米波方案的有效性, 运用 Optisystem 软件平台进行仿真验证。方案中的具体

参数设置如下所示: CWLD 输出的光载频为 193.1 THz, 功率为 20 dBm, 线宽为 50 MHz, 4 个 MZM 的半波电压均设置为 4 V, IL 为 5 dB, 调制器均工作在 MITP, 射频本振驱动信号频率为 7.5 GHz、电压为

7.578 V, 4 个电增益器的增益值设置为 -1 , EPS1 相移角度值为 $\pi/2$, EPS2 和 EPS3 的值为 $\pi/6$ 。PIN PD 的响应灵敏度为 1 A/W , 暗电流为 10 nA , 热噪声功率密度为 10^{-21} W/Hz , 散粒噪声服从高斯分布。最后连接光谱仪与射频仪进行谱图分析。

2.1 倍频方案信号频谱分析

图 2 给出了图 1 中对应 A、B、C 3 点的光谱图与 D 点的电谱图。上支路经过 MZM-2 输出的光谱图如图 2(a) 所示, 成功实现了 2 阶边带、奇数阶边带以及 $4k(k=0, 1, 2\cdots)$ 阶边带的抑制; 当设置下支路 EPS 的角度为 $\pi/6$ 时, 能够使得两支路 6 阶边带相

位相反, 经过 MZM-4 的光谱图如图 2(b) 所示, 上下两支路经过光功率合束器(optical power combiner, OPC)在 C 点输出的光谱图如图 2(c) 所示, 可见 6 阶边带项得以相互抵消, 余下以 10 阶边带为主的光信号, 其中光边带抑制比(optical sideband suppression ratio, OSSR)为 33.2 dB ; 经 PD 拍频在 D 点产生的电谱图如图 2(d) 所示, 从图中可知, 14 阶边带会同 10 阶拍频产生除 150 GHz 以外的非理想频率信号, 但 150 GHz 毫米波信号依旧占据主导地位, 其射频杂散抑制比(spurious sideband suppression ratio, RFSSR)为 27.21 dB 。

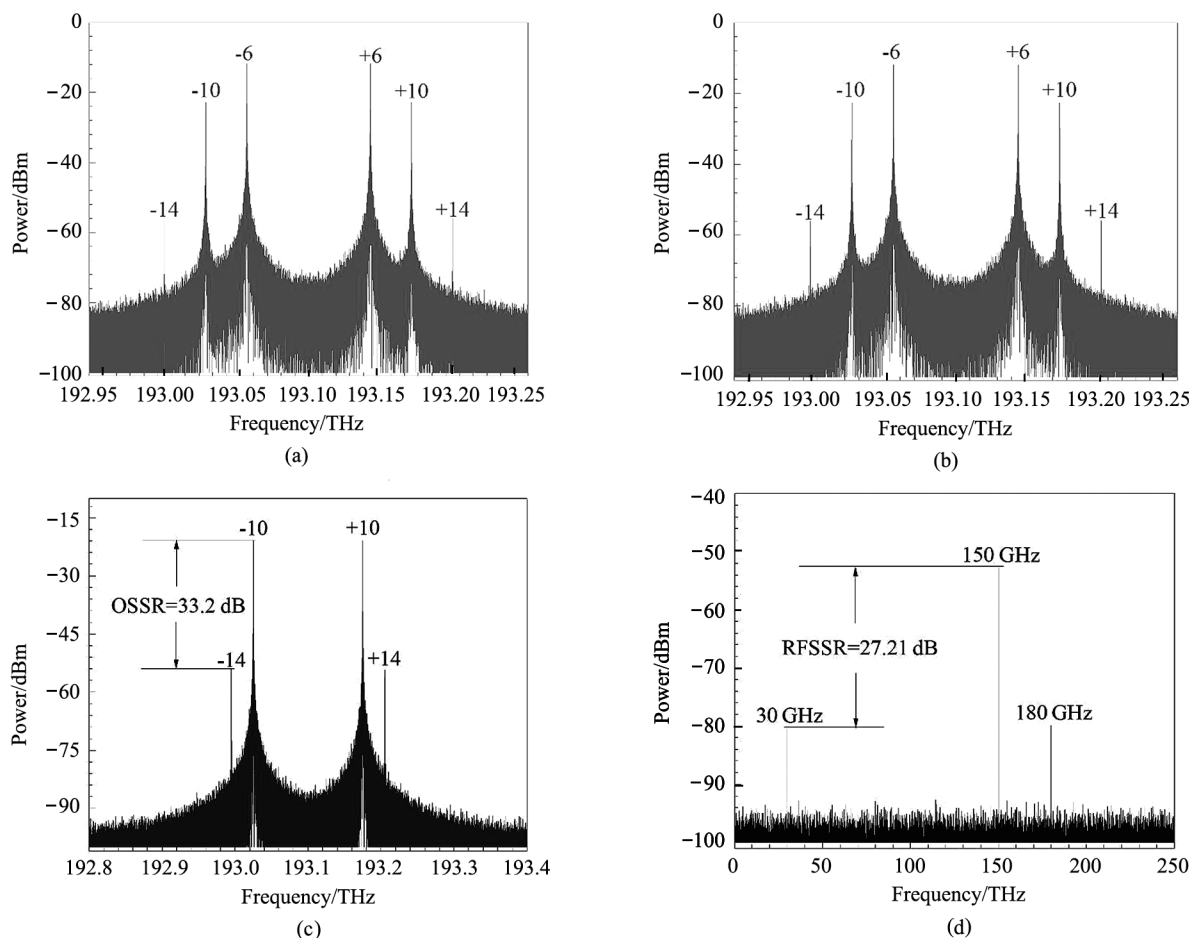


图 2 不同点处的频谱图:(a) 上支路 MZM-2 输出的频谱图;(b) 下支路 MZM-4 输出的光谱图;
(c) 上下支路耦合输出光谱图;(d) 20 倍频电谱图

Fig. 2 Spectra at different points: (a) The output spectrum diagram of upper branch MZM-2;

(b) The output spectrum diagram of lower branch MZM-4; (c) The output spectrum of upper and lower branches coupling;

(d) The electrical spectrum of frequency 20-tupling

2.2 信号性能的影响因素

在仿真实验中, 可以实现对各个器件参数的精准控制, 但在实际实现时, 由于工业制造技艺的限制

及环境因素的影响, 极难使器件参数达到理想值, 非理想参数的变化对毫米波信号性能均可能产生一定的影响。

2.2.1 偏置电压漂移的影响

图3给出了调制器偏置电压漂移对系统 OSSR 和 RFSSR 的影响,从图中可以看出,当调制器电压偏移度数在 ± 0.02 V时,OSSR 和 RFSSR 的数值变化范围均控制在 2.5 dB 范围内,系统性能对其变化不敏感;而当偏移度数为 ± 0.04 V时,系统依旧可以保持 RFSSR 在 18.5 dB 以上,OSSR 在 24.9 dB 以上,均可达到相对较好的频谱性能。

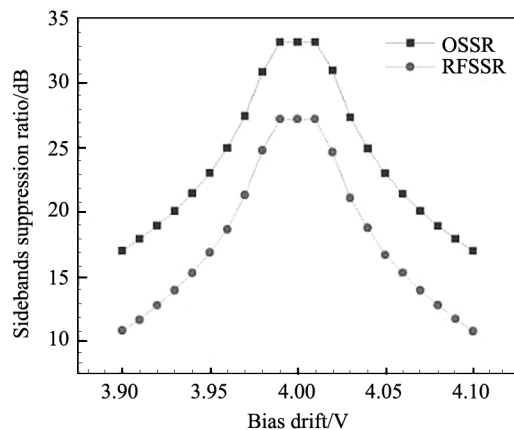


图3 电压漂移对 OSSR 和 RFSSR 的影响

Fig. 3 Effect of voltage drift on OSSR and RFSSR

2.2.2 调制指数的影响

图4给出了调制器调制指数对系统 OSSR 和 RFSSR 的影响,从图中可知,当调制指数位于最佳点时,可实现 2 阶边带的完全抑制,此时的 OSSR 高达 33.2033 dB,RFSSR 高达 27.2125 dB。系统对调制指数的变化较为敏感,改变调制指数愈来愈偏移其最佳值时,2 阶的抑制度亦愈来愈低,故系统的 OSSR 也随之降低,导致毫米波的性能下降;而当控制调制器的调制指数变化范围在 8.43—8.405 时,系统 OS-

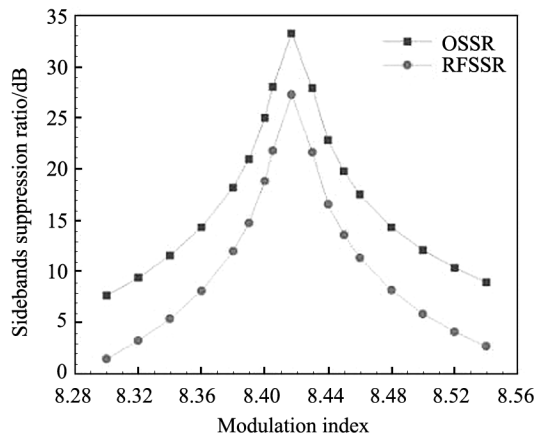


图4 调制指数对 OSSR 和 RFSSR 的影响

Fig. 4 Effect of modulation index on OSSR and RFSSR

SR 和 RFSSR 分别可达 27.8 dB 和 21.5 dB 以上,可见合理控制系统调制指数的稳定对系统具有重要的意义。

2.2.3 消光比的影响

图5中给出了当调制指数 $\beta=8.4168$ 时,调制器消光比对系统 OSSR 和 RFSSR 的影响,因制作工艺和技术的限制会导致调制器的消光比在实际工作时达不到理想数值,实验中给出了当 MZM 消光比变化时,OSSR $P_{10}/P_0, P_{10}/P_1, P_{10}/P_3, P_{10}/P_4, P_{10}/P_5, P_{10}/P_7, P_{10}/P_8, P_{10}/P_9, P_{10}/P_{11}, P_{10}/P_{12}, P_{10}/P_{13}$ 及 RFSSR 的变化情况。由图可知,随着 ER 的增加, P_{10}/P_{14} 保持不变,而其余抑制比均处于先增加后保持不变的趋势,也即实现杂余边带的抑制。当 $ER \leq 35$ dB 时,可以依次实现 12 阶、8 阶、4 阶以及中心载波的完全抑制;以 P_{10}/P_{14} 为参考基准时,当消光比 $ER \geq 44.5$ dB 时,有 $P_{10}/P_1 > P_{10}/P_{14}$,也即可使得 OSSR 达到饱和值 33.2033 dB,RFSSR 达到饱和值 27.2125 dB,此数值处的 ER 符合实际且能达到同样的效果,降低了调制器工作条件的苛刻性,有一定的实用参考价值。

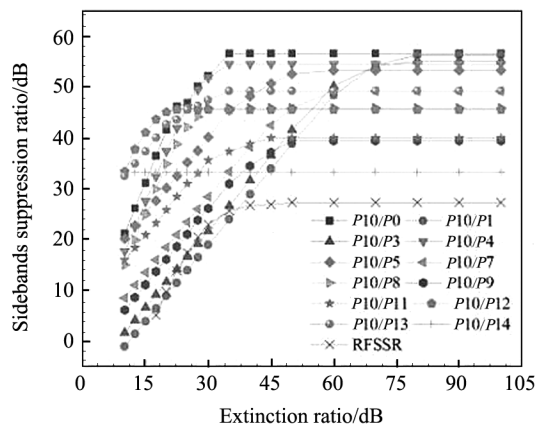


图5 调制器消光比对 OSSR 和 RFSSR 的影响

Fig. 5 Effect of extinction ratio on OSSR and RFSSR

3 倍频毫米波传输特性分析

为进一步评估倍频毫米波信号的传输性能,对此采用两种不同的数据调制方式,其结构框图如图6所示。

方式(a)中,使用 MZM 将 2.5 Gbit/s 的 OOK 信号 $S(t)$ 调制在倍频双边带信号上;方式(b)中,使用带宽为 31 GHz 的波分解复用器(WDM Demux)将频率为 193.175 GHz 的上边带(+10 阶边带)和 193.025 GHz 的下边带(-10 阶边带)分开,继而使用 MZM 将待传输的数据信号 $S(t)$ 加载到下边带进

行调制,之后经过波分复用器(WDM Mux)将其和未经调制的上边带进行耦合传输。图 7 给出了在(a)(b)两种调制方式下的光谱图;经过调制后携带信息的光信号经过色散系数为 $16.75 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}^{-1})$,有效纤芯面积为 $80 \mu\text{m}^2$,衰减系数为 0.2 dB/km 的标准单模光纤(single mode fiber, SMF)进行传输,为了使得注入 PD 的光功率保持在一定的范围内,连接可调谐光功率衰减器(attenuator, ATT)来均衡注入 PD 的光功率,继而送入响应度为 1 A/W 、暗电流为 10 nA 的 PD 进行拍频,可生成频率为射频信号源 20 倍的电毫米波信号,在基站(base station, BS)处利用基于电耦合器(electric coupler, EC)的自零差调节和低通滤波器(low pass filter, LPF)来实现对基带信号的解调,采用误码率分析仪(bit error rate tester, BERT)和射频频谱分析仪来观察信号的状态。

此外,在实验的倍频产生部分,为了更好地实现对杂余边带的抑制,将调制器消光比数值均设置在 60 dB ,且忽略了于 BS 处经 PIN 拍频而得的电毫米波信号送至用户端的无线传输部分。

为了验证仿真链路的传输性能,图 8 给出了两种方式下传输距离和最小误码率(bit error rate, BER)、最大 Q 因子值之间的关系曲线,从曲线中可以看出,随着传输距离的增加,BER 呈现增加趋势, Q 因子值呈现下降趋势,也即是由于传输过程中光纤色散及非线性效应的影响,导致了系统性能恶化。其中,在双边带调制方式下,当传输距离为 12 km 时,最小 BER 为 $10^{-8.61}$, Q 因子值为 5.7 ,但在单边带调制方式下,当传输距离为 45 km 时,最小误码率为 $10^{-11.23}$, Q 值为 6.7 。两种方式对比可知,单边带调制增加了系统的传输距离,可以更好地降低系统

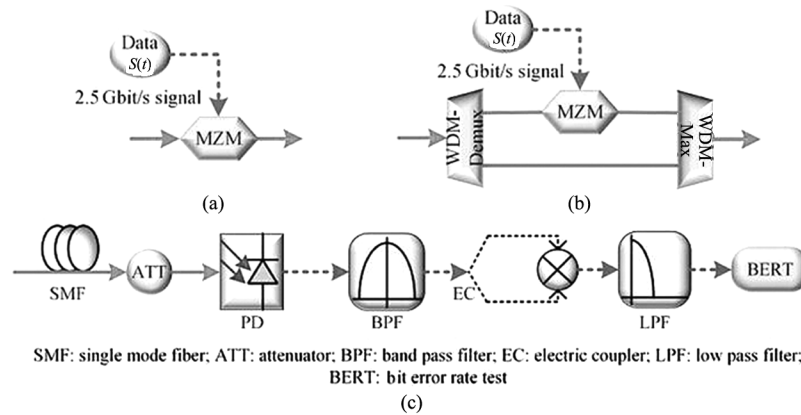


图 6 20 倍频 ROF 系统仿真链路:(a) 双边带调制;(b) 单边带调制;(c) 传输链路
Fig. 6 ROF scheme diagram of frequency 20-tupling: (a) Dual sidebands data modulation;
(b) Single sideband data modulation; (c) Transmission link

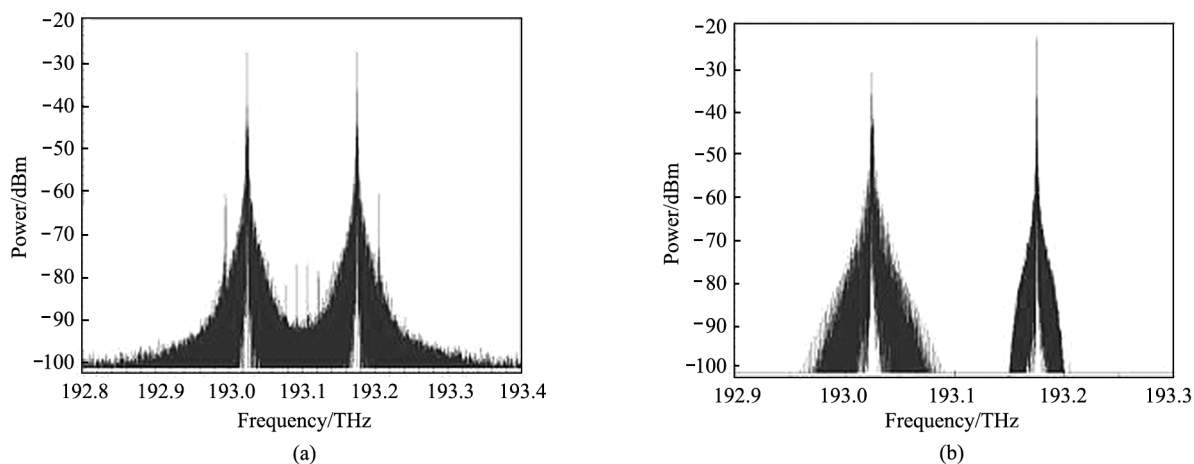


图 7 两种方式下加载数据信号的光谱图:(a) 双边带调制方式下的光谱图;(b) 单边带调制方式下的光谱图

Fig. 7 Spectrum of loading data signal under two modes:

(a) Spectrum of dual sidebands data modulation mode; (b) Spectrum of single sideband data modulation mode

中码间走离效应的影响,提高系统性能。

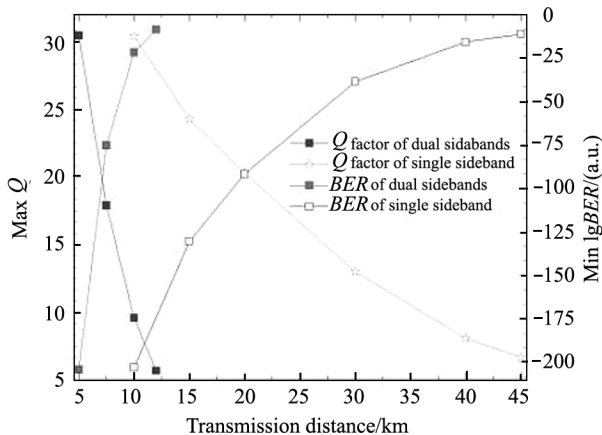


图 8 最小误码率和最大 Q 因子随 SMF 传输距离变化关系曲线

Fig. 8 Minimum value of BER and maximum value of Q vary with SMF transmission distance

图 9 进一步分析了两种调制方式下 12 km 和 40 km 光纤长度对应系统接收光功率与 BER 曲线关系。由图易知,当在方式(a)下,12 km 光纤长度对应的最小 BER 大于 10^{-9} (无差错传输);而在方式(b)下,由于单边带调制可以更好地降低由色散引起的码间走离效应,增加了系统的传输距离,所以当光纤长度为 40 km 时仍可以达到 10^{-9} ,具有较优秀的传输性能。

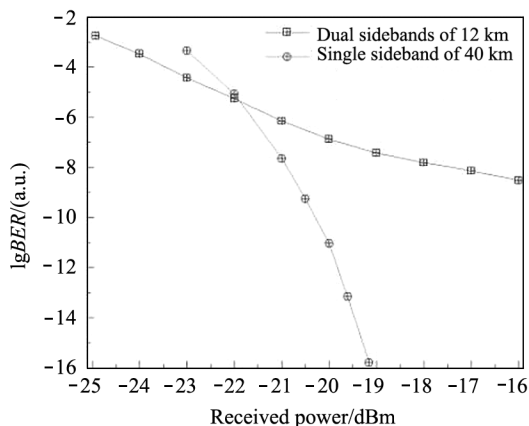


图 9 接收光功率与误码率的对应关系

Fig. 9 Relationship between received optical power and bit error rate

4 结 论

本文提出了一种基于并级联双驱动 MZM 的高倍频毫米波产生方案,通过调整 MZM 的工作点、调制系数及上下支路射频驱动相位值,可在奇数边带

及 $4k(k=0,1,2,\dots)$ 阶边带抑制的基础上再实现对 2 阶和 6 阶边带的抑制,最终生成以 ± 10 阶为主的双边带信号,仿真中分析考虑了调制器调制指数、偏压漂移、消光比等非理想参数变化对系统 OSSR 和 RF-SSR 的影响。仿真结果表明,倍频方案 OSSR 和 RFSSR 饱和值高达 33.2 dB 和 27.21 dB,且由分析可知,系统性能受调制指数变化比较敏感,当合理设置其偏差范围,亦可输出性能良好的毫米波信号。在搭建的 ROF 系统中,分别分析了两种不同调制方式下倍频毫米波的传输性能,当系统实现 12 km 的双边带调制时,BER 最小为 $10^{-8.61}$,而处于单边带调制时,40 km 的光纤长度下,系统的 BER 可低至 $10^{-15.8}$,其传输性能高于双边带调制方式,降低了由光纤色散带来的码间走离效应的影响,增加了系统的传输距离,使得较长距离的传输成为可能。此外,调制器的插入损耗是一个不可忽略的因素,由于系统中采用了多个调制器组合的方式,后续将会探索使用较少的调制器来实现更高因子的倍频方案。

参考文献:

- [1] AL-FALAHY N, ALANI O Y K. Millimeter wave frequency band as a candidate spectrum for 5G network architecture: A survey [J]. Physical Communication, 2019, 32: 120-144.
- [2] XIE B. Application of millimeter wave in 5G [J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2021, 34(3): 87-92.
颀斌. 毫米波在 5G 中的应用 [J]. 电信工程技术与标准化, 2021, 34(3): 87-92.
- [3] LIU X R, CHEN X Q, DI H. Research on the generation of submillimeter-wave based on optical polarization modulators [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2021, 32(9): 1007-1014.
刘晓蕊, 陈新桥, 狄哈. 基于光偏振调制器产生亚毫米波的研究 [J]. 光电子 • 激光, 2021, 32(9): 1007-1014.
- [4] WANG X B, LU Z J, GAO Y Y, et al. An RoF system with continuously tunable optical carrier-to-sideband ratio based on polarization multiplexing [J]. Optoelectronics Letters, 2021, 17(3): 140-143.
- [5] KAMISSOKO D, HE J, GANAME H, et al. Performance investigation of W-band millimeter-wave radio-over-fiber system employing optical heterodyne generation and self-homodyne detection [J]. Optics Communications, 2020, 474: 126174.
- [6] YAHYA OUI M E, MOUSSATI A E, ZEIN G E, et al. New millimeter wave generation scheme for MIMO-OFDM

- based Radio-over-Fiber system[J]. Optics Communications, 2019, 442: 101-105.
- [7] ZENG Y T, ZHOU H, CHEN M, et al. Research on 60 GHz radio over fiber system based on 18-tuple frequency technology[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2019, 30(7): 704-711.
曾羽婷, 周慧, 陈明, 等. 基于 18 倍频技术的 60 GHz 光载无线通信系统研究[J]. 光电子·激光, 2019, 30(7): 704-711.
- [8] TAO L B, GAO H Y, DENG S, et al. A simplified optical millimeter-wave generation scheme based on frequency-quadrupling[J]. Optoelectronics Letters, 2020, 16(1): 7-11.
王现斌, 杨彦彬, 卢智嘉, 等. 基于 FBG 和偏振复用的 8 倍频全双工 RoF 系统[J]. 光电子·激光, 2020, 31(2): 130-135.
- [9] WANG X B, YANG Y B, LU Z J, et al. Frequency eightfold full-duplex RoF system based on FBG and polarization multiplexing[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2020, 31(2): 130-135.
王现斌, 杨彦彬, 卢智嘉, 等. 基于 FBG 和偏振复用的 8 倍频全双工 RoF 系统[J]. 光电子·激光, 2020, 31(2): 130-135.
- [10] LU Z J, YANG B, WANG X B. Frequency 12-tupling full-duplex ROF system[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(7): 917-924.
卢智嘉, 杨蓓, 王现斌. 一种 12 倍频全双工 RoF 系统[J]. 激光与红外, 2021, 51(7): 917-924.
- [11] KUMARI A, KUMAR A, GAUTAM A. Photonic generation and theoretical investigation of phase noise in quadrupling and 12-tupling millimeter wave signal using optical self-heterodyne system[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2021, 231: 166432.
- [12] XUE Z Z, PEI L, LIU T T, et al. Photonic generation of filterless frequency multiple tupling optical millimeter-wave signal[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(4): 0406002.
薛壮壮, 裴丽, 刘婷婷, 等. 无滤波高倍频光载毫米波生成技术[J]. 光子学报, 2020, 49(4): 0406002.
- [13] LI Z H, NI P C, WANG D F, et al. A filter-less scheme for frequency 16-tupling millimeter-wave generation based on double parallel DPMZM[J]. Laser Journal, 2021, 42(3): 32-36.
李志浩, 倪鹏程, 王东飞, 等. 一种基于并联 DPMZM 结构的无滤波器 16 倍频光生毫米波方案[J]. 激光杂志, 2021, 42(3): 32-36.
- [14] ZHOU H, FEI C Y, ZENG Y T, et al. A ROF system based on 18-tuple frequency millimeter wave generation using external modulator and SOA[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 61: 102402.
- [15] ZHANG Z, WANG T L, ZHU W. Generation of 24 multiplied millimeter wave signal based on microwave photonics[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(6): 852-856.
张舟, 王天亮, 朱维. 基于微波光子的 24 倍频毫米波信号生成[J]. 半导体光电, 2019, 40(6): 852-856.

作者简介:

刘小磊 (1980—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事光通信与无线通信融合技术的研究。