

DOI:10.16136/j.joel.2023.03.0252

基于四次乘方射频信号和级联 MZM 的梳线可调的光学频率梳

史睿, 李培丽*

(南京邮电大学 电子与光学工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要:提出了一种基于四次乘方射频(radio frequency, RF)信号和级联马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder modulator, MZM)的梳线可调的光学频率梳(optical frequency comb, OFC)产生方案。利用乘方运算电路对正弦 RF 信号进行运算耦合,产生的乘方 RF 信号驱动级联的 MZM,调制器对输入光进行调制,从而产生梳线数可调的平坦 OFC。建立了乘方 RF 信号驱动级联 MZM 产生 OFC 的理论模型,利用 OptiSystem 软件对其性能进行了研究。结果表明, OFC 的梳线间隔是 RF 信号源频率的 2 倍,可调谐并且拓展了频谱带宽;产生 OFC 的目标梳线数是基准调制电压的 4 倍,实现了梳线数可调谐;调节 MZM 上下支臂的调制和偏置电压差为确定的优化值,可以使不同目标梳线数的 OFC 平坦度均小于 0.95 dB。

关键词:光通信; 光学频率梳(OFC); 马赫-曾德尔调制器(MZM); 射频(RF)信号

中图分类号:TN29 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2023)03-0299-07

Comb line adjustable optical frequency comb based on 4th power RF signal and cascaded MZMs

SHI Rui, LI Peili*

(College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract: A comb line adjustable optical frequency comb (OFC) generation scheme based on 4th power radio frequency (RF) signal and cascaded Mach-Zehnder modulators (MZMs) is proposed. The power operation circuit is used to mix the sinusoidal RF signal; The generated power RF signal drives the cascaded MZMs; And a flat OFC with adjustable comb number is produced by the cascaded MZMs modulated the input light. The theoretical model of OFC generated by power RF signal driven cascaded MZMs is established, and its performance is studied by using OptiSystem. The results show that the comb line interval of OFC is twice the frequency of RF signal source, which is tunable and expands the spectrum bandwidth; The target number of comb lines to generate OFC is 4 times of the reference modulation voltage, thus the comb lines can be tuned; By adjusting the modulation and bias voltage difference between the upper and lower arms of MZM to the determined optimization value, the OFC flatness of different target comb numbers can be less than 0.95 dB.

Key words: optical communication; optical frequency comb (OFC); Mach-Zehnder modulator (MZM); radio frequency (RF) signal

* E-mail: lip@njupt.edu.cn

收稿日期: 2022-04-10 修订日期: 2022-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(61571237)、江苏省自然科学基金(BK20151509)、江苏省研究生科研创新计划(KYCX20_0796)资助项目

0 引言

光学频率梳(optical frequency comb, OFC)是由一系列均匀间隔的离散频率分量组成的、具有稳定相干相位关系的频谱,在光学精密测量、光任意波形产生、微波光子信号处理、波分复用技术等领域有着非常广泛的应用^[1-7]。如何产生频率分量数目多、梳线间隔可调、功率平坦度高的 OFC 一直是国内外学者的研究热点。

目前,已有的 OFC 产生方式主要有:基于外调制器^[8-13]、基于微环谐振腔^[14]、基于光纤非线性效应^[15]和基于锁模激光器^[16]。其中,基于外调制器产生 OFC 的方法具有结构简单、功率平坦度高且梳线间隔可调的优势。近几年,有基于单个马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder modulator, MZM)^[8]和单个 I/Q 调制器等^[9]调制器产生 OFC 的单个调制器 OFC 产生方案,但是基于单个外调制器的 OFC 往往产生的梳线数较少。

为了增加梳线数,可以采用级联调制器和多射频(radio frequency, RF)驱动的方法。文献[10, 11]分别利用两个 MZM 和两个相位调制器(phase modulator, PM)级联,产生了 9 根梳线;文献[12]利用 MZM 和 PM 级联,产生了 15 根梳线;文献[13]利用双平行马赫-曾德尔调制器(dual parallel Mach-Zehnder modulator, DP-MZM)和 MZM 级联,产生了 35 根梳线;文献[14]利用两个 MZM 和 PM 级联,产生了 55 根梳线。文献[15]利用周期

高斯脉冲信号,驱动级联的 5 个 MZM,产生了 61 根梳线;文献[16]利用复杂的倍频叠加信号驱动级联的一个 DP-MZM 和两个 MZM,产生了 72 根梳线。

基于级联调制器和多 RF 驱动产生 OFC 的方法,增加了梳线数,但是结构复杂,成本较高;而且虽然可以实现梳线间隔可调谐,但是无法实现梳线数调谐。

本文提出了一种基于四次乘方 RF 信号和级联 MZM 的可调谐 OFC 产生方案。采用简单的 RF 运算器件进行混频产生乘方 RF 信号,该乘方信号等于 2 倍频和 4 倍频正弦信号的叠加,由该乘方 RF 信号驱动两个级联的 MZM,增加了产生 OFC 的梳线数,降低了成本;根据该方案中 OFC 梳线数与 MZM 调制电压呈线性正相关的特点,通过调节 MZM 的调制电压,可以实现梳线数的可调谐。建立了基于乘方 RF 信号和级联 MZM 的可调谐 OFC 的理论模型;将理论数值分析和仿真研究相结合,研究了乘方 RF 信号频谱、RF 源输出频率、MZM 调制电压和偏置电压等参数对 OFC 性能指标的影响。

1 工作原理

基于四次乘方 RF 信号和级联 MZM 的可调 OFC 产生结构如图 1 所示。

RF 信号源输出的 RF 信号在乘方运算电路中发生乘方混频,产生乘方 RF 信号,该信号等于 2 倍

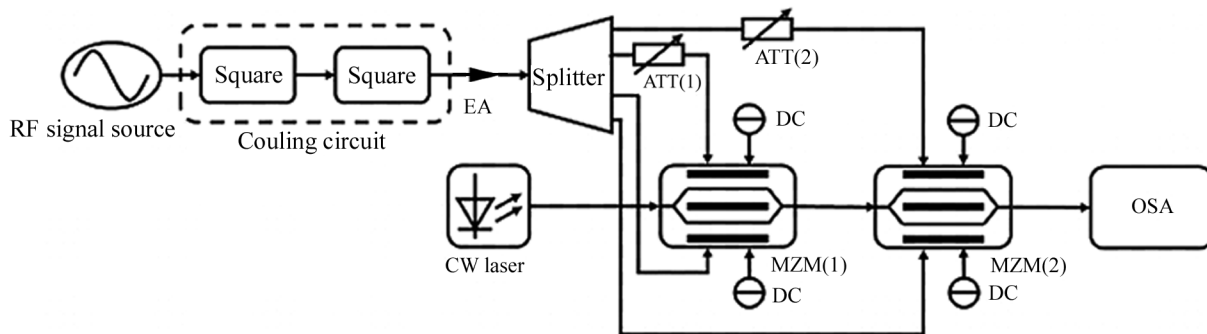


图 1 基于四次乘方射频信号和级联 MZM 的梳线可调 OFC 产生装置原理图

Fig. 1 Schematic of comb line adjustable OFC generation structure based on 4th power RF signal and cascaded MZMs

频和 4 倍频正弦信号的叠加。乘方 RF 信号经电放大器(electric amplifier, EA)放大后分为 4 路,其中两路经过衰减器衰减后施加到级联 MZM 的上支臂,另外两路直接施加到级联 MZM 的下支臂,作为驱动信号驱动 MZM。连续激光器输出的激光输入到第

一级 MZM 中,对输入光进行调制,产生新的频率分量。第一级 MZM 输出的光信号输入第二级 MZM 中,进行进一步的调制,产生更多的频率分量。调节上、下支臂的调制电压和偏置电压,使各阶频率分量的功率大小趋近于相等,可得到频率分量数目多且

功率平坦度高的 OFC。

2 理论分析

设 RF 信号源输出的信号为:

$$v_{\text{RF}}(t) = V_{\text{mod}} \cos(2\pi f_0 t) \quad (1)$$

式中, V_{mod} 为 RF 信号幅度, f_0 为 RF 信号频率。利用运算电路进行两次平方运算后产生的 4 次方 RF 信号可表示为:

$$v_{\text{mod}}(t) = V_{\text{mod}} \cos^4(2\pi f_0 t)。 \quad (2)$$

对式(1)进行傅里叶级数展开,可以得到:

$$v_{\text{mod}}(t) = V_{\text{mod}} \left[\frac{3}{8} + \frac{1}{2} \cos(4\pi f_0 t) + \frac{1}{8} \cos(8\pi f_0 t) \right]。 \quad (3)$$

由式(3)可以得出,该信号等于 2 倍频和 4 倍频正弦信号的叠加。

级联 MZM 的输出光场可表示为:

$$E_{\text{out}}(t) = E_{\text{in}}(t) M^2(t), \quad (4)$$

式中, $E_{\text{in}}(t) = E_c \exp(j2\pi f_c t)$ 为 CW 输出的连续激光, E_c 为激光的幅值, f_c 为激光频率, $M(t)$ 为级联 MZM 的传递函数, $M(t)$ 可表示为:

$$M(t) = 1/2 e^{j\pi \frac{V_{\text{bias1}} + v_{\text{mod1}}(t)}{V_\pi}} + 1/2 e^{j\pi \frac{V_{\text{bias2}} + v_{\text{mod2}}(t)}{V_\pi}} \quad (5)$$

式中, V_{bias1} 、 $v_{\text{mod1}}(t)$ 、 V_{bias2} 和 $v_{\text{mod2}}(t)$ 分别为施加在 MZM 上下支臂的偏置电压和调制信号, V_π 为 MZM 的半波电压。在乘方 RF 信号的驱动下,即将式(2)代入式(5),可以得到 MZM 的传递为:

$$\begin{aligned} M(t) = & \frac{1}{2} \exp \left[j\pi \frac{V_{\text{bias1}} + V_{\text{mod1}} \cos^4(2\pi f_0 t)}{V_\pi} \right] + \\ & \frac{1}{2} \exp \left[j\pi \frac{V_{\text{bias2}} + V_{\text{mod2}} \cos^4(2\pi f_0 t)}{V_\pi} \right] = \\ & (1/2) \exp(j\theta_1) \exp[jA_1 \cos^4(2\pi f_0 t)] + \\ & (1/2) \exp(j\theta_2) \exp[jA_2 \cos^4(2\pi f_0 t)], \quad (6) \end{aligned}$$

式中, $\theta_1 = \pi V_{\text{bias1}}/V_\pi$ 、 $\theta_2 = \pi V_{\text{bias2}}/V_\pi$ 为 MZM 上下支臂的调相指数, $A_1 = \pi V_{\text{mod1}}/V_\pi$ 、 $A_2 = \pi V_{\text{mod2}}/V_\pi$ 为 MZM 上下支臂的调制指数。将式(3)代入式(6),可以得到:

$$\begin{aligned} M(t) = & \frac{e^{j\theta_1}}{2} \exp \left\{ jA_1 \left[\cos(4\pi f_0 t) + \frac{1}{4} \cos(8\pi f_0 t) \right] \right\} + \\ & \frac{e^{j\theta_2}}{2} \exp \left\{ jA_2 \left[\cos(4\pi f_0 t) + \frac{1}{4} \cos(8\pi f_0 t) \right] \right\}。 \quad (7) \end{aligned}$$

对式(7)利用贝塞尔级数展开,可以得到:

$$M(t) = \frac{e^{j\theta_1}}{2} \left[\sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(A_1) \exp(jn4\pi f_0 t) \right] \times$$

$$\begin{aligned} & \left[\sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m \left(\frac{1}{4} A_1 \right) \exp(jm8\pi f_0 t) \right] + \\ & \frac{e^{j\theta_2}}{2} \left[\sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(A_2) \exp(jn4\pi f_0 t) \right] \times \\ & \left[\sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m \left(\frac{1}{4} A_2 \right) \exp(jm8\pi f_0 t) \right] = \\ & \frac{e^{j\theta_1}}{2} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_n(A_1) J_m \left(\frac{1}{4} A_1 \right) \times \right. \\ & \exp[j(2n+4m)2\pi f_0 t] \left. \right\} + \\ & \frac{e^{j\theta_2}}{2} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_n(A_2) J_m \left(\frac{1}{4} A_2 \right) \times \right. \\ & \left. \exp[j(2n+4m)2\pi f_0 t] \right\}, \quad (8) \end{aligned}$$

式中, J_n 、 J_m 分别为 n 阶、 m 阶贝塞尔函数。

由式(8)可知,最终产生的 OFC 为两个频率分别为 $2f_0$ 和 $4f_0$ 的 RF 信号驱动 MZM 调制产生 OFC 的叠加,即梳线间隔分别为 $2f_0$ 和 $4f_0$ 、光边带功率分别为 J_n 和 J_m 的两个 OFC 叠加在 $f_c + 2(n+2m)f_0$ 的频率位置。当 n 和 m 满足 $n+2m=N$ 时,在频率 $f_c + 2Nf_0$ 处产生一个功率大小为 $J_n \cdot J_m$ 的光边带分量,最终产生的 OFC 的每个光边带都是由多个频率分量叠加得到的。因此,最终产生的 OFC 的梳线间隔为 $2f_0$,且通过改变 RF 信号源的输出频率可以实现 OFC 梳线间隔的可调谐。

设上下支臂的调制指数差为 $\Delta A = |A_1 - A_2|$,上下支臂的调相系数差为 $\Delta\theta = |\theta_1 - \theta_2|$,可以得到:

$$\begin{aligned} M(t) = & \frac{e^{j\theta_1}}{2} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_n(A_1) J_m \left(\frac{1}{4} A_1 \right) \times \right. \\ & \exp[j(2n+4m)2\pi f_0 t] \left. \right\} + \\ & \frac{e^{j(\theta_1+\Delta\theta)}}{2} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_n(A_1 + \Delta A) J_m \left[\frac{1}{4} (A_1 + \right. \right. \\ & \left. \left. \Delta A) \right] \exp[j(2n+4m)2\pi f_0 t] \right\}。 \quad (9) \end{aligned}$$

为了产生功率平坦的 OFC,这里的 MZM 被设定为同相模式,即上下支臂的调制电压同为正电压。由式(9)可知,产生的 OFC 梳线数受到调制系数 A_1 的影响,即基准调制电压 V_{mod} 越大,产生的 OFC 梳线数越多;同时,产生的 OFC 平坦度由偏置相差 $\Delta\theta$ 和调制相差 ΔA 共同影响,即调节偏置电压差 ΔV_{bias} 和调制电压差 ΔV_{mod} ,使各阶光边带的功率大小趋近于相等时,可以产生平坦、可调谐的 OFC。

3 分析与讨论

基于乘方 RF 信号和级联 MZM 的可调 OFC 产生结构如图 1 所示,采用 OptiSystem 进行仿真研究。

CW 的中心频率为 193.1 THz、功率为 10 dBm、线宽为 10 MHz; RF 信号源的输出信号频率为 5 GHz; MZM 的半波电压为 4 V, 上下支臂偏置电压分别为 3.3 V 和 0 V, 调制电压分别为 6.25 V 和 7.45 V。

如图 2(a)所示, RF 源输出的 RF 信号经过乘方运算电路, 产生的四次乘方 RF 信号由 10 GHz 和 20 GHz 两个频率分量组成, 相较于正弦 RF 源的频率 5 GHz, 实现了 2 倍频和 4 倍频谐波的叠加混频。在这种混频后的乘方 RF 信号驱动下, 级联 MZM 产生的 OFC 如图 2(b)所示, OFC 的梳线数为 25, 平坦度为 0.6 dB, 梳线间隔为 10 GHz, 是 RF 输出频率的

2 倍, 与理论分析相符, 因此, 可以使用低频的 RF 信号源实现高梳线间隔的 OFC。

如图 3 所示, 保持其他条件不变, 改变 RF 信号源的输出信号频率, 当 RF 信号频率分别为 1 GHz、2 GHz、5 GHz 和 10 GHz 时, 产生的 OFC 梳线数都为 25, 梳线间隔分别为 2 GHz、4 GHz、10 GHz 和 20 GHz, 为 RF 信号频率的 2 倍, 对应的 OFC 带宽分别为 48 GHz、96 GHz、240 GHz 和 480 GHz。OFC 的梳线间隔由 RF 信号源的输出信号频率决定, 因此, 通过调节 RF 输出频率, 可以实现 OFC 梳线间隔的可调谐。

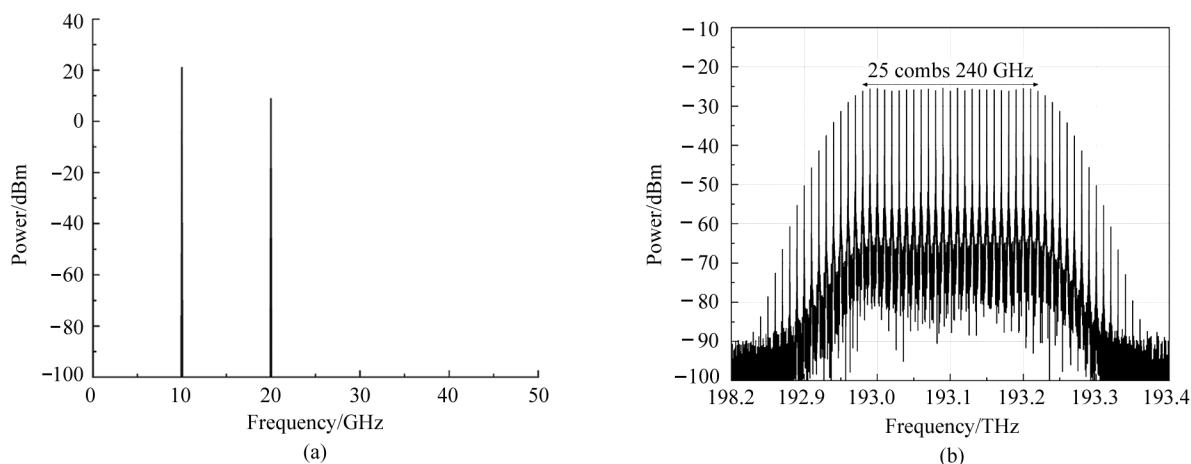


图 2 基于四次乘方射频信号和级联 MZM 的可调 OFC 产生装置输出频谱图:

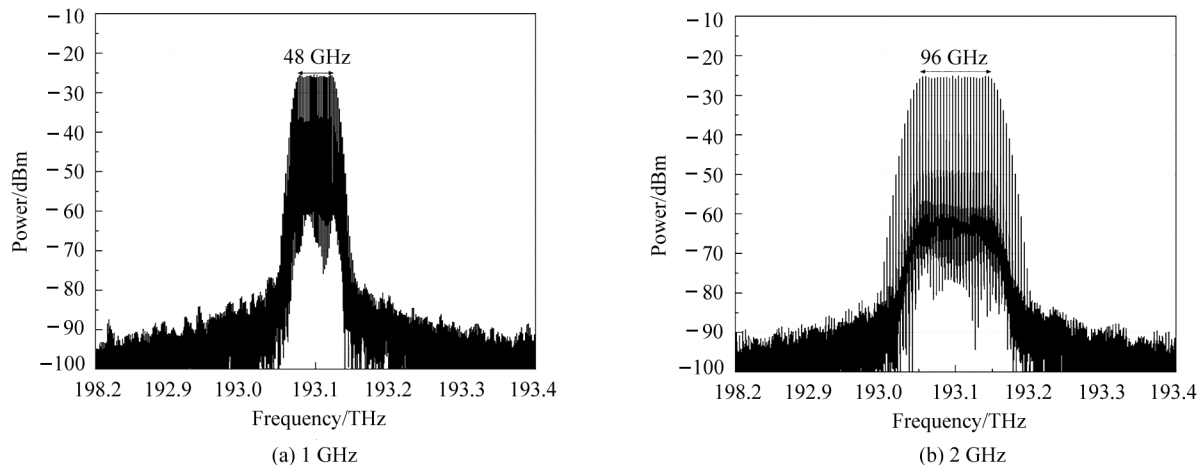
(a) 四次乘方射频信号频谱; (b) 25 梳线 OFC 光谱

Fig. 2 The output spectrum diagram of adjustable OFC generation device based 4th power RF signal and cascaded MZM: (a) 4th power RF signal spectrum; (b) Generated 25 combs OFC spectrum

如图 4 所示, 保持其他条件不变, 当基准调制电压在 12—32 V 范围内变化时, 随着基准调制电压的增大, MZM 非线性效应增强, 产生的 OFC 平坦度会逐渐变差, 但依然保持在 1.2 dB 内; OFC 梳线数随着 MZM 基准调制电压的增大而增多, 且二者呈线性趋势; 对数据进行线性拟合可以得到, 基准调制电压和梳线数之间存在正相关的线性关系, 其拟合表达

式为: $V_{\text{mod}} = N/4$ 。

由式(9)可知, OFC 的平坦度受到上下支臂的调制电压差和偏置电压差影响。图 5 为当产生 OFC 的梳线数不同时, 其平坦度随调制电压差和偏置电压差的变化。图 5 中每一个散点都代表一个平坦度在 1.1 dB 以内的 OFC 的工作点, 其颜色深浅即为该 OFC 的平坦度高低。由图 5 可以得出, 在产生不同



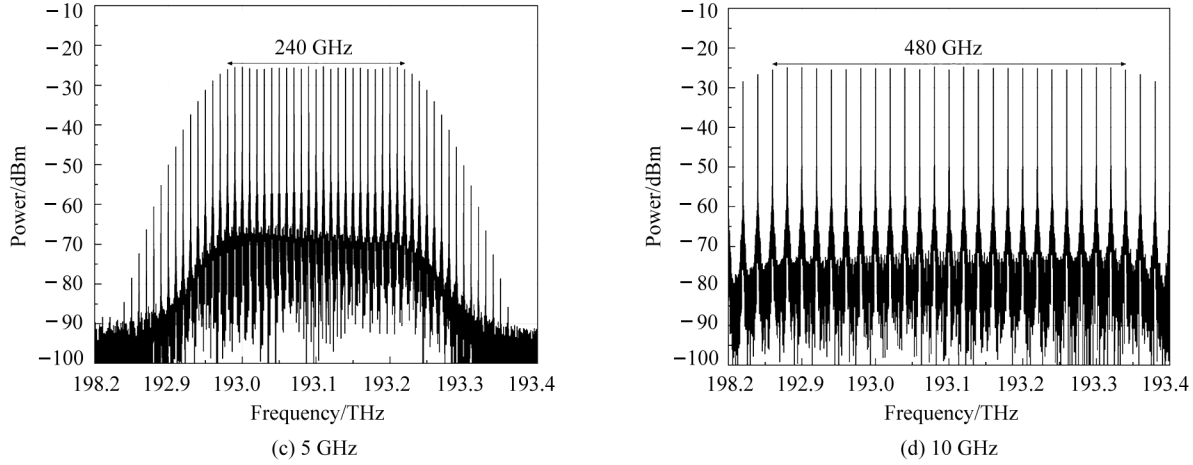


图3 不同射频信号频率下25梳线OFC带宽变化

Fig. 3 The spectrum width of 25 combs OFC for various RF signal with frequencies

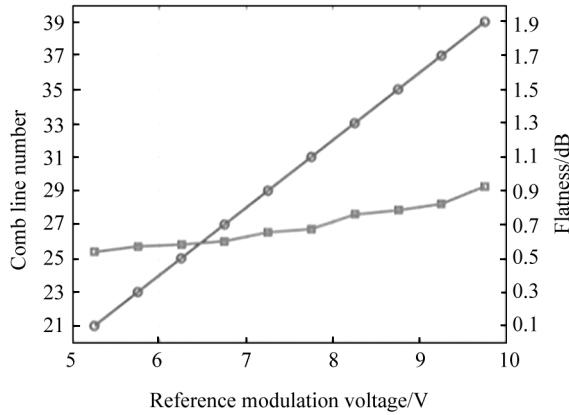
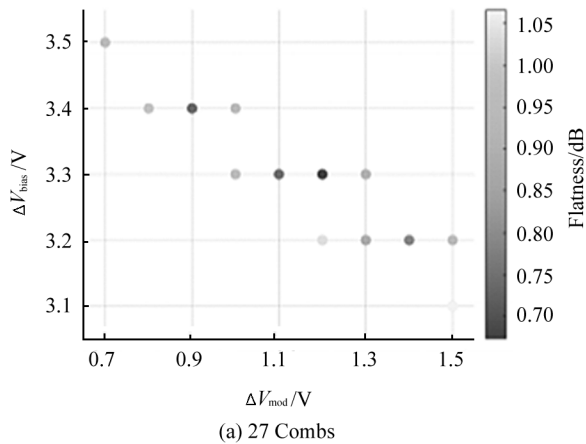


图4 OFC梳线数和平坦度随MZM基准调制电压的变化

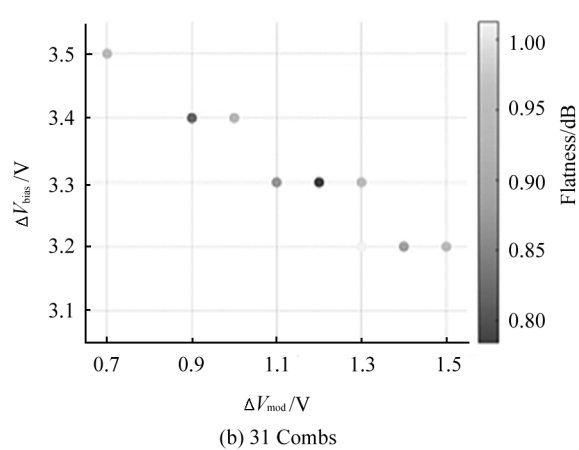
Fig. 4 The comb line number and flatness with the reference modulation voltage of MZM

的梳线数情况下,当调制电压差在0.7—1.5 V,偏置电压差在3.1—3.3 V之间变化时,都可以产生平坦度在1 dB以内的OFC;随着梳线数的增多,满足平坦度在1 dB以内的电压差工作点随之减少;在每种梳线数情况下,当调制电压差 $\Delta V_{\text{mod}} = 1.2$ V,偏置电压差 $\Delta V_{\text{bias}} = 3.3$ V时,均可以实现平坦度最优的OFC。

设置调制电压差 $\Delta V_{\text{mod}} = 1.2$ V,偏置电压差 $\Delta V_{\text{bias}} = 3.3$ V。为了得到不同的目标梳线数 N ,调节基准调制电压 V_{mod} ,产生的OFC平坦度与梳线数的对应关系如图6所示。由图6可以得到,当产生不同目标梳线数时,其平坦度均小于0.95 dB。因此,当调制电压差 $\Delta V_{\text{mod}} = 1.2$ V,偏置电压差 $\Delta V_{\text{bias}} = 3.3$ V时,通过调节基准调制电压,可以实现梳线数的可调谐。



(a) 27 Combs



(b) 31 Combs

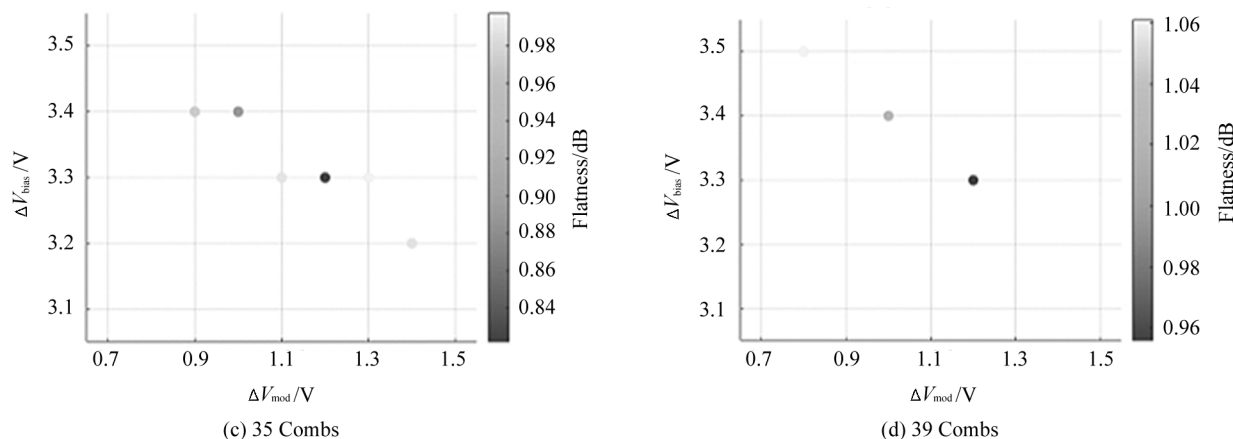


图5 不同梳线数和工作点下 OFC 平坦度变化

Fig. 5 The flatness of OFC for various comb line numbers and operating points

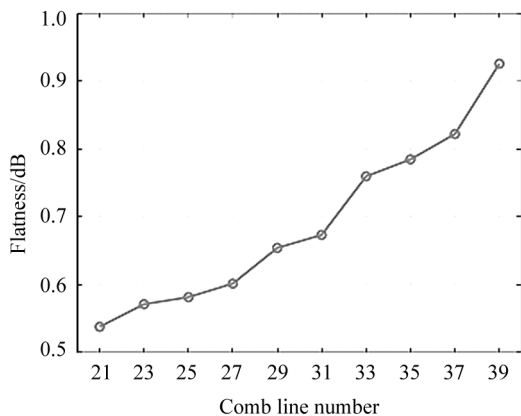


图6 OFC 平坦度随梳线数变化

Fig. 6 The flatness with the comb line number of OFC

4 结 论

本文提出一种基于四次乘方 RF 信号和级联 MZM 的梳线可调的 OFC 产生方案,建立了乘方 RF 信号驱动级联 MZM 产生 OFC 的理论模型,并进行了研究。结果表明,OFC 的梳线间隔随着 RF 信号源频率的增加而增大,且梳线间隔是 RF 信号源频率的两倍,拓展了输出光谱的频谱带宽;OFC 的目标梳线数目是基准调制电压的 4 倍,梳线数随着调制信号电压的增大而增多;调节 MZM 上下支臂的调制和偏置电压差为固定的优化值,可以使不同目标梳线数的 OFC 平坦度均小于 0.95 dB。本方案的主要优势是梳线数目可调谐,易于调控;同时,利用低频的 RF 信号源经过乘方运算耦合产生多频驱动信号的方法,拓宽了 OFC 带宽,降低了 OFC 产生装置的成本。本方案有望应用于对梳线数目要求灵活的平坦 OFC 领域。

参考文献:

- [1] YANG R, SUN H, GUO J, et al. Dual-comb generation from a dual-ring hybrid mode-locked fiber laser[C]//Tenth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation, August 8-10, 2018, Kunming, China. Bellingham, Washington: SPIE, 2019, 11053: 546-551.
- [2] WANG F, KANG W. Wideband optical frequency comb generation using a fiber re-circulating loop cascaded with a spectrum expander including highly nonlinear fiber[J]. Optica Applicata, 2021, 51(2): 181-191.
- [3] SHARMA V, SINGH S, ANASHKINA E A, et al. Demonstration of optical frequency comb generation using four-wave mixing in highly nonlinear fiber[J]. Optik, 2021, 241: 166948.
- [4] HASANUZZAMAN G, KANNO A, DAT P T, et al. Self-oscillating optical frequency comb: application to low phase noise mm-wave generation and radio-over-fiber link[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(19): 4535-4542.
- [5] MICOLTA J, CANO I N, POLO V, et al. Direct beat phase modulated DFB for flexible 1.25—5 Gb/s coherent UD-WDM-PONs[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 19-23, 2017, Los Angeles, California, USA. New York: IEEE, 2017: Th2A. 32.
- [6] BECKER S, WEIH R, SCHEUERMANN J, et al. Frequency comb investigation of monolithic mode-locked GaSb-based laser at 1.7 μm by heterodyne detection[J]. Electronics Letters, 2020, 56(22): 1206-1208.
- [7] VAINIO M, KARHU J. Fully stabilized mid-infrared frequency comb for high-precision molecular spectroscopy[J]. Optics Express, 2017, 25(4): 4190-4200.

- [8] LIN J, SEPEHRIAN H, XU Y, et al. Frequency comb generation using a CMOS compatible SiP DD-MZM for flexible networks[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(17):1495-1498.
- [9] CHIBA A, KOBAYASHI N, MOTOKI Y, et al. Generation of wide frequency-spacing optical frequency comb composed of odd/even multiple harmonics[C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), July 31-August 04, 2017, Singapore. New York: IEEE, 2017:1-2.
- [10] XIAO X, WU K, CHEN J. 0.18 dB ultra-flat optical frequency comb generation using cascaded modulators with low driving RF power[C]//Lasers & Electro-optics, May 14-19, 2017, San Jose, CA, USA. New York: IEEE, 2017:1-2.
- [11] LIU H M, PAN W, LU B, et al. Generation of flat optical frequency comb based on asynchronous RF-signal-driven cascaded phase modulators[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12):1206002.
- [12] XU M, HE M, CAI X. Generation of flat optical frequency comb using integrated cascaded lithium niobate modulators[C]//CLEO: Science and Innovations, May 10-15, 2020, San Jose, CA, USA. New York: IEEE, 2020:1-2.
- [13] QIAN J, LEI M, ZHENG Z, et al. A reconfigurable optical frequency comb generator with 35 flat comb lines[C]//2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), October 26-29, 2018, Hangzhou, China. New York: IEEE, 2018:1-3.
- [14] BONTEMPI F, N ANDRIOLLI, SCOTTI F, et al. Comb line multiplication in an InP integrated photonic circuit based on cascaded modulators[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(6):1-7.
- [15] HMOOD J K, HARUN S W. Broadband optical frequency comb generator based on driving N-cascaded modulators by Gaussian-shaped waveform[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 42:75-83.
- [16] ZHANG T, WU S. Optical frequency comb generation based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator and intensity modulator with RF frequency multiplication circuit[J]. Photonic Network Communications, 2018, 36: 256-262.

作者简介:

李培丽 (1972—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事全光网中的信号处理与光通信器件方面的研究。