

基于异步射频信号驱动级联相位调制器产生平坦光学频率梳

刘昊明*, 潘炜, 卢冰, 于歌

西南交通大学信息科学与技术学院, 四川 成都 611756

摘要 基于级联相位调制器(PM),设计并实现了一种梳线数量与梳线间距均可调谐的光学频率梳(OFC)产生方案。采用正弦型射频信号与其倍频信号分别驱动两级 PM,并在第二级射频信号加入微小的频率偏移,得到了相位不敏感、平坦度高的 OFC。梳线数量与平坦度由两级 PM 的调制指数调控。当频率偏移为第二级射频信号频率的 10^{-5} 倍时,OFC 的平坦度低于 3 dB。实验结果表明,产生 OFC 的梳线数量为 7,9,11 根,梳线间距分别为 5.5 GHz 和 7.5 GHz,平坦度不超过 2.4 dB。

关键词 光通信; 光学频率梳; 相位调制器; 频率偏移; 平坦度

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1206002

Generation of Flat Optical Frequency Comb Based on Asynchronous RF-Signal-Driven Cascaded Phase Modulators

Liu Haoming*, Pan Wei, Lu Bing, Yu Ge

School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China

Abstract Based on cascaded phase modulators (PM), a scheme to generate a optical frequency comb (OFC) with adjustable comb number and comb spacing is proposed and experimentally demonstrated. The sinusoidal radio frequency (RF) signal and its double-frequency signal are used to drive the two cascaded PMs, respectively, simultaneously a small frequency offset is introduced in the second RF signal, and finally a phase-insensitive and high flatness OFC is obtained. The comb number and flatness are regulated by the modulation index of these two cascaded PMs. When the frequency offset is 10^{-5} times the frequency of the second RF signal, the flatness of this OFC is less than 3 dB. The experimental results show that the comb numbers are 7, 9, and 11, the comb spacing is 5.5 GHz and 7.5 GHz, and the flatness is smaller than 2.4 dB for the generated OFC.

Key words optical communications; optical frequency comb; phase modulator; frequency offset; flatness

OCIS codes 060.4510; 060.4080; 060.5060

1 引言

光学频率梳(OFC)是指在频谱上由一系列等间距的离散频率分量组成的光谱。作为光学频率标准与微波频率标准联系的纽带,OFC 具有稳定度高、梳线间隔精确、频率可精密调谐等优点,被广泛应用于光通信^[1-2]、光学任意波形产生^[3-4]、绝对距离测量^[5-6]以及时间频率标准^[7-8]等领域。在 OFC 产

生的相关研究中,采用平坦度表示有效梳线中最大功率与最小功率之差。一般情况下,差值越小,平坦度越高,实际应用效果越好。在光通信应用中,对 OFC 平坦度和稳定性要求较高,因此国内外学者提出了很多优化 OFC 平坦度、增强 OFC 稳定性的方案。

OFC 的产生方案主要有以下几种:基于锁模激光器^[9-10]、基于非线性光纤^[11-12]、基于循环频移

收稿日期: 2018-06-14; **修回日期:** 2018-07-17; **录用日期:** 2018-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(61775185)、国家 863 计划(2015AA016903)、四川省国际科技合作重点项目(2018HH0002)

* **E-mail:** Haoming_Liu@163.com

器^[13-14]以及基于外调制器^[15-17]等。基于锁模激光器的方案原理是通过固定激光器中各纵模初始相位,获得时间间隔固定、频率间隔相等的光脉冲,但 OFC 梳线的数量不易调整;基于非线性光纤技术的方案是利用高非线性光纤中四波混频、自相位调制等非线性效应,将单光源频谱展宽获得 OFC,但得到的 OFC 平坦度较差;基于循环频移器原理是通过外调制器等形成环路进行循环频移,能够得到梳线数量较多的 OFC,但产生的 OFC 信噪比不高;基于外调制器的技术利用调制器本身的非线性效应,通过加载相应的射频信号产生多个正弦形式的谐波分量,得到一定梳线数量的 OFC。由于外调制器法产生的 OFC 具有梳线数量、梳线间距等参数均可调谐的优势,因此受到了国内外学者的广泛关注。Wu 等^[15]利用特定的射频信号驱动级联强度调制器(IM)与相位调制器(PM),获得了 38 根平坦度小于 1 dB 的 OFC。Lu 等^[16]采用多频信号驱动单个 PM,产生了 5,7,9,11 根平坦度均在 0.3 dB 以内的 OFC。Zhang 等^[17]利用级联 PM,并通过在第二级 PM 中加入微小的频率偏移,得到了 21 根平坦度小于 3 dB 的 OFC。Shang 等^[18]提出了一种基于两个 IM 实现级联调制的方案,获得了 15 根平坦度在 1 dB 以内的 OFC。Feng 等^[19]采用基于两个电吸收

调制器(EAM)与 PM 级联的方法,产生了 19 根平坦度小于 0.1 dB 的 OFC。

现有的基于外调制器产生 OFC 的方案多数需要使用 IM 或者偏振调制器(PolM),存在着系统稳定性不高、参数调节复杂等问题。为得到平坦度高、运行稳定、调节参数较少的 OFC,本文设计并实验实现了一种基于两级 PM 级联产生 OFC 的方案。采用倍频信号与微小频率偏移结合的异步射频信号,产生的 OFC 具有相位不敏感、平坦度高等特点。得到了平坦度与两级 PM 调制指数之间的关系,并分析了平坦度随微小频率偏移的变化。实验得到了 7,9,11 根 OFC,梳线间距分别为 5.5 GHz 和 7.5 GHz,平坦度不超过 2.4 dB。

2 系统模型与理论分析

基于异步射频信号驱动两级 PM 产生 OFC 示意图如图 1 所示。其中,图 1(a)为方案的系统结构,包括一台可调谐激光源(TLS)、两个 PM、两台射频信号源(RF)、两个放大器(EA)和一台光谱分析仪(OSA)。其中,两个 PM 由两个 RF 以不同频率分别进行驱动,EA 放大射频驱动信号的功率,OSA 观察产生的 OFC。两级相位调制过程中,子载波能量转移如图 1(b)所示。

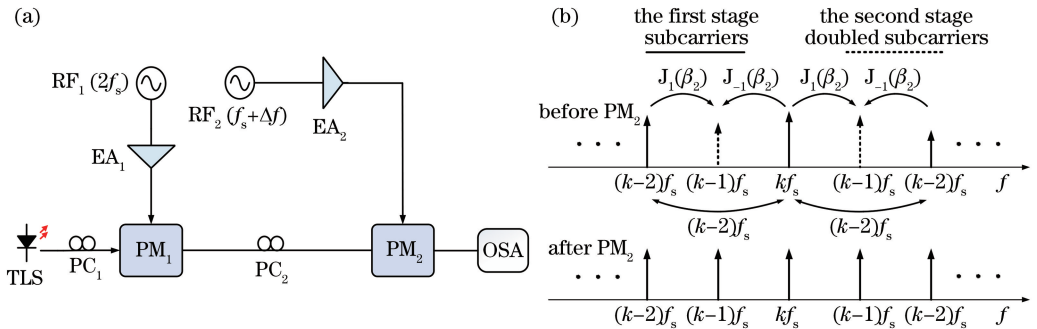


图 1 基于异步射频信号驱动两级 PM 产生 OFC 示意图。(a)系统结构;(b)子载波能量转移

Fig. 1 Schematic of OFC generation based on two cascaded PMs driven by asynchronous RF signal.

(a) System structure; (b) subcarrier power transfer

设 TLS 输出为单频光信号,其表达式为 $E_{in}(t) = E_0 \exp(j2\pi ft)$,式中: E_0 为场幅度常数, f 为光信号频率, t 为信号传输时间。本方案中,将第一级 RF 输出频率设置为第二级的两倍且存在微小的频率偏移,设 $2f_s$ 为第一级 RF 的输出频率,则经 EA1 放大后加载到 PM1 的射频信号可表示为

$$E_{in1}(t) = V_{PM1} \sin[2\pi(2f_s t)] = \frac{\beta_1 V_{\pi1} \sin[2\pi(2f_s t)]}{\pi}, \quad (1)$$

式中: V_{PM1} 为加载到 PM1 的信号幅度; β_1 为 PM1 的调制指数; $V_{\pi1}$ 为 PM1 的半波电压,满足 $\beta_1 = \pi V_{PM1} / V_{\pi1}$ 。经 PM1 调制后输出的光信号为

$$E_{out1}(t) = E_{in}(t) \exp\{j\beta_1 \sin[2\pi(2f_s t)]\} = E_1 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta_1) \exp[j2\pi(f + 2nf_s)t], \quad (2)$$

式中: $J_n(\beta_1)$ 表示第一类 n 阶贝塞尔函数,且有 $J_{-n}(\beta) = (-1)^n J_n(\beta)$ 。由(2)式可知,输出的光信号存在多个关于频率 f 对称分布的,间隔为 $2f_s$ 的

边带。而另一路中,假设最开始不存在频率偏移,设第二级射频信号频率为 f_s ,则经 EA_2 放大后加载到 PM_2 的信号表达式为 $f_{in2}(t) = \beta_2 V_{\pi 2} \sin(2\pi f_s t + \varphi)/\pi$,其中 β_2 为 PM_2 的调制指数, $V_{\pi 2}$ 为 PM_2 的半波电压, φ 为两路信号的相位差。 PM_2 的调制过程同时存在新的频率间隔为 f_s 的第 $2n-1$ 阶边带生成和原有的频率间隔为 $2f_s$ 的第 $2n$ 阶边带之间的功率调谐。 PM_2 的传输方程为

$$F_{PM_2}(t) \approx \sum_{n=-2}^{+2} J_n(\beta_2) \exp(j2n\pi f_s t + jn\varphi), \quad (3)$$

调节 φ 使 OFC 的平坦度达到最佳,经 PM_2 调制后的第 $2n-1$ 阶和第 $2n$ 阶边带功率分别为

$$P_{2n-1} \simeq J_1(\beta_1)^2 E_0^2 [J_{2n}(\beta_1)^2 + J_{2n-2}(\beta_1)]^2, \\ P_{2n} \simeq E_0^2 \{J_0(\beta_1)^2 J_{2n}(\beta_1)^2 + J_2(\beta_1)^2 [J_{2n+2}(\beta_1) - J_{2n-2}(\beta_1)]^2\}. \quad (4)$$

输出的光信号实现了两级相位调制,但产生的 OFC 平坦度较低且受到 φ 的影响。为提高 OFC 的平坦度,在第二路射频信号中加入微小的频率偏移 Δf ($\Delta f \ll f_s$),则信号频率变为 $f_s + \Delta f$,两路信号的相位差由固定值 φ 变为变量 $\Delta\varphi$,且 $\Delta\varphi = 2\pi\Delta f t$ 。由 EA_2 放大后加载到 PM_2 的信号为 $f_{in3}(t) = \beta_2 V_{\pi 2} \sin[2\pi(f_s + \Delta f)t]/\pi$,最终经过 PM_2 调制后输出的光信号为

$$E_{out2} = E_0 \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} [J_{2k-n}(\beta_1) J_n(\beta_2) \exp(jn\Delta\varphi)] \times \exp[j2\pi(f + kf_s)t]. \quad (5)$$

对应的第 k 阶光载波的功率为

$$P_k = E_0^2 \left| \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_{2k-n}(\beta_1) J_n(\beta_2) \exp(jn\Delta\varphi) \right|^2. \quad (6)$$

由(5)式和(6)式可知,输出的光信号成功实现了两级相位调制。由于 $\Delta\varphi$ 是随时间变化的变量,故 OFC 的平坦度主要由调制指数 β_1 和 β_2 决定。分别调节 β_1 与 β_2 ,可以得到平坦且能稳定运行的 OFC。

3 数值分析

通过数值分析,可以得到两级调制指数 β_1 、 β_2 与 OFC 平坦度之间的关系。图 2 为调制指数与平坦度关系等高线图。调节 β_1 与 β_2 并使其分别位于图 2 中的 A、B 和 C 区域时,平坦度分别小于 2 dB、3 dB 和 3 dB。数值分析结果表明,调节 β_1 会得到多个具有高平坦度 OFC 的区域;但随着 β_1 的增大,平坦度会逐渐降低且高平坦度区域也会逐渐减小;而

β_2 的取值变化较小,其主要作用是调节各梳线间的功率分布,提高 OFC 的平坦度。

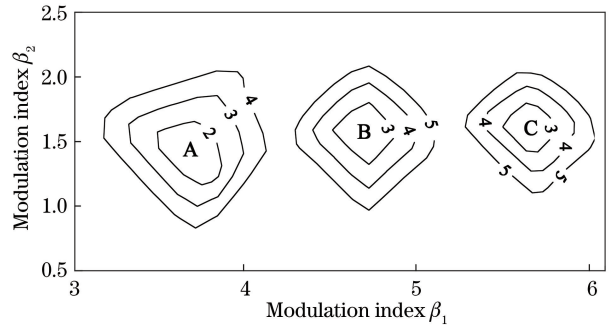


图 2 调制指数与平坦度关系等高线图

Fig. 2 Contour map of relationship between modulation index and flatness

继续分析频率偏移大小对 OFC 平坦度的影响。当调制指数 β_1 、 β_2 取值位于图 2 的区域 B 时,区域 B 中平坦度随频率偏移的变化如图 3 所示。可知,当频率偏移为 f_s 的 10^{-5} 倍时,得到的 OFC 的平坦度最佳。

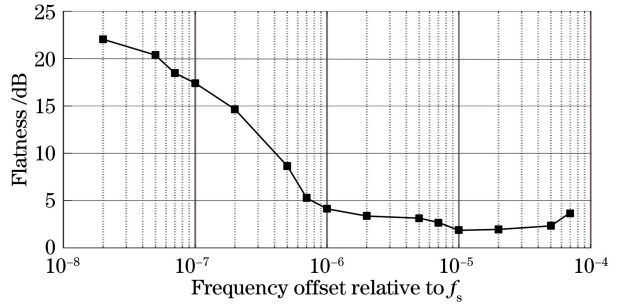


图 3 区域 B 中平坦度随频率偏移的变化

Fig. 3 Flatness versus frequency offset in zone B

4 实验与结果分析

基于图 1 所示结构搭建实验系统。TLS (Teraxion PS-TNL) 的输出为窄线宽光信号,功率为 5 dBm,波长为 1549.35 nm,线宽小于 1 kHz,C 波段中频率稳定度典型值为 $50 \text{ MHz} \cdot \text{h}^{-1}$,以保证得到的 OFC 整体具有高频率稳定度。经过 PC_1 调节后进入 PM_1 中进行第一级调制,再将输出的光信号经过 PC_2 调节后进入 PM_2 中进行第二级调制,最后在分辨率为 0.01 nm 的 OSA (Advantest Q8384) 中观察两级相位调制后得到的光谱。实验中 PM_1 和 PM_2 由两个相同的 RF (Anritsu MG3694C) 各自提供不同频率的射频驱动信号,其频率稳定度典型值为每天 2×10^{-9} ,以保证得到 OFC 的梳线间距同样具有高频率稳定度。由于 RF 输出功率的限制,需要使用 EA_1 、 EA_2 分别对两路信号进行放大,其中

EA₁的放大增益较高,保证经过 PM₁ 调制后产生较多的边带信号,增加最终产生的 OFC 的梳线数量; PM₂的作用是调节各梳线间的功率分布,使最终产生的 OFC 更加平坦。

实验中, RF₁ 和 RF₂ 的输出频率分别设置为 11 GHz 和 5.500055 GHz, 满足频率偏移为 f_s 的 10^{-5} 倍条件, 梳线间隔为 5.5 GHz 的 OFC 光谱图如图 4 所示。调节 EA₁、EA₂ 放大增益使 $\beta_1 = 3.60$ 、 $\beta_2 = 1.45$, 满足在图 2 中区域 A 以内的条件, 得到的

实验结果如图 4(a)所示, 产生 OFC 的梳线数量为 7 根, 平坦度为 1.3 dB。继续调节 EA₁、EA₂ 的放大增益并分别使 $\beta_1 = 4.79$ 、 $\beta_2 = 1.55$ 和 $\beta_1 = 5.69$ 、 $\beta_2 = 1.64$, 对应分别满足在图 2 中区域 B 和区域 C 以内的条件, 得到的实验结果如图 4(b)和图 4(c)所示。产生 OFC 的梳线数量为 9 根和 11 根, 平坦度为 2.0 dB 和 2.3 dB。综上所述, 实验中得到的 7, 9, 11 根 OFC 梳线的平坦度分别小于 2 dB、3 dB 和 3 dB, 与图 2 中区域 A、B 和 C 的平坦度取值范围一致。

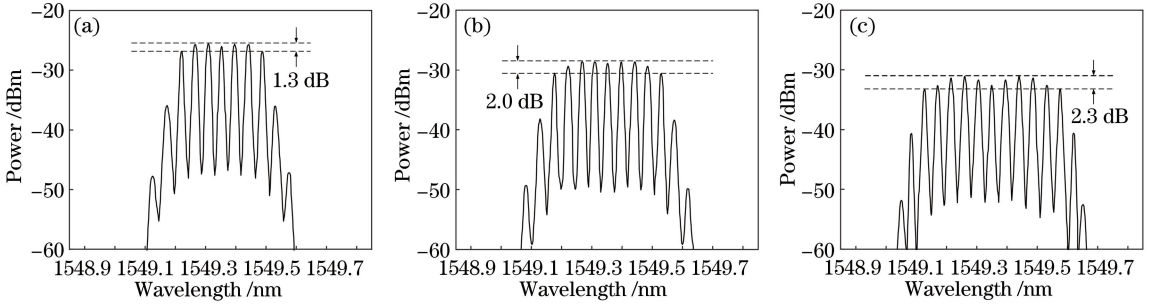


图 4 梳线间隔为 5.5 GHz 的 OFC 光谱图。(a) 7 根; (b) 9 根; (c) 11 根

Fig. 4 Spectra of OFC with comb spacing of 5.5 GHz. (a) 7 lines; (b) 9 lines; (c) 11 lines

为探究不同梳线间隔对 OFC 平坦度的影响, 将 RF₁ 和 RF₂ 的输出频率分别改为 15 GHz 和 7.500075 GHz, 同样满足频率偏移为 f_s 的 10^{-5} 倍条件。调节 EA₁、EA₂ 的放大增益并分别使 $\beta_1 = 3.60$ 、 $\beta_2 = 1.45$ 、 $\beta_1 = 4.79$ 、 $\beta_2 = 1.55$ 和 $\beta_1 = 5.69$ 、 $\beta_2 = 1.64$, 此时 β_1 和 β_2 的取值与之前相同且仍然分别位于图 2

中区域 A、B 和 C 以内, 得到的梳线间隔为 7.5 GHz 的 OFC 光谱图如图 5(a)~(c)所示。产生的 OFC 的梳线数量为 7, 9, 11 根, 平坦度分别为 1.4 dB、2.1 dB 和 2.4 dB。由图可见, 在 OFC 的梳线数量相同时, 平坦度变化仅为 0.1 dB, 证明梳线间距在 5.5~7.5 GHz 范围内对 OFC 的平坦度没有影响。

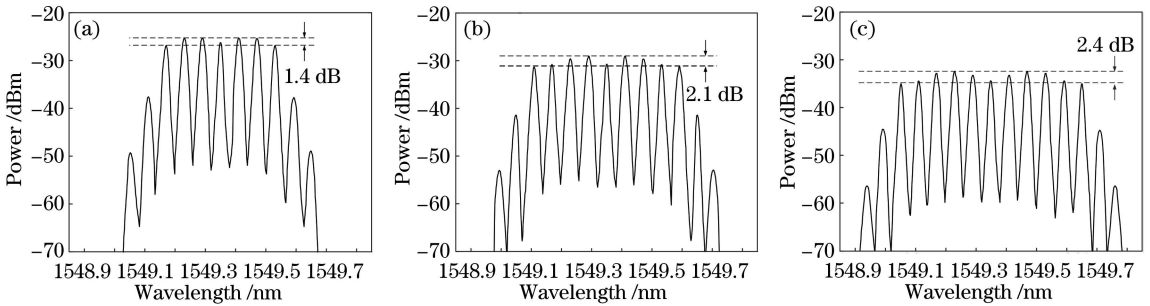


图 5 梳线间隔为 7.5 GHz 的 OFC 光谱图。(a) 7 根; (b) 9 根; (c) 11 根

Fig. 5 Spectra of OFC with comb spacing of 7.5 GHz. (a) 7 lines; (b) 9 lines; (c) 11 lines

实验最终得到 OFC 的每条梳线由有效频率成分与干扰频率成分两部分组成, 其中干扰频率成分由第二级相位调制中引入的微小频率偏移所引入。单一梳线有效频率成分与干扰频率成分功率图如图 6 所示。当梳线间距为 5.5 GHz 和 7.5 GHz 时, 各自提取 OFC 的一条梳线, 其射频功率谱如图 6 (a)与图 6(b)所示。梳线的有效频率成分与干扰频率成分的频率差分别为 55 kHz 与 75 kHz, 与引入的微小频率偏移相等。而有效频率成分的功率比干

扰频率成分分别高出 31.8 dB 和 32.6 dB, 因此干扰频率成分在后续应用中的影响可以被忽略。

本实验中得到的 OFC 能在两个小时内保持不变, 梳线数量和平坦度没有发生恶化, 为以后的应用提供了可靠的保障。在基于级联 PM 产生 OFC 的相关方案中, 与不使用倍频信号, 仅使用微小频率偏移驱动产生 OFC 的方案相比, 本方案得到的 OFC 平坦度由 3 dB 提升至 2.4 dB^[17]; 与仅使用倍频信号, 不使用微小频率偏移驱动产生 OFC 的方案相

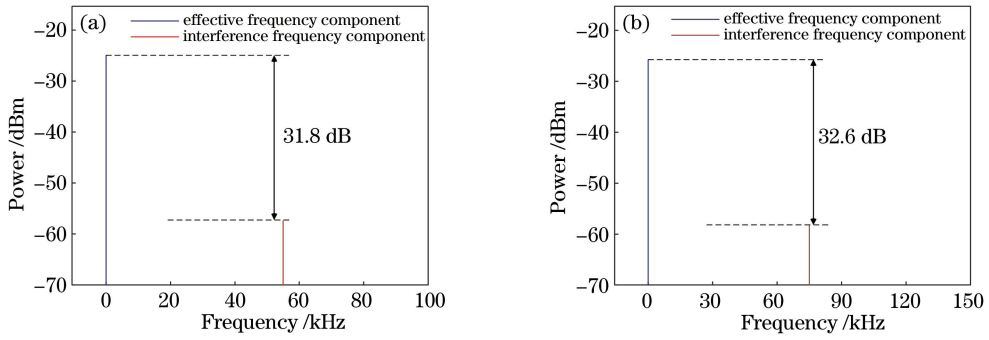


图 6 单一梳线有效频率成分与干扰频率成分功率图。(a) 55 kHz;(b) 75 kHz

Fig. 6 Power spectra of effective frequency component and interference frequency component for single comb line.

(a) 55 kHz; (b) 75 kHz

比,本方案得到的 OFC 平坦度由接近 10 dB 提升至 2.4 dB^[20]。本方案中由于受到 PM₁ 最大输入功率的限制,最多仅能获得 11 根平坦的 OFC,梳线数量不及文献[17]与文献[20]所报道的 OFC 数量;但如果能提高 PM₁ 所能承受的最大功率,则能够产生更多的 OFC。与基于 IM 或者 PolM 产生 OFC 的方案相比,本方案中外调制器只使用了 PM,同时也无须使用直流偏置电压、光滤波器、频率分束器等器件,具有结构简单、易于调谐、稳定性高等优点。

5 结 论

设计并实现了一种基于异步射频信号驱动级联 PM 产生 OFC 的方案。采用倍频信号与微小频率偏移结合的方式,得到了相位不敏感、平坦度高的 OFC。调节两级 PM 的调制指数,得到了 3 个平坦度分别小于 2 dB、3 dB 和 3 dB 的 OFC 生成区域。当频率偏移为 f_s 的 10^{-5} 倍时,产生的 OFC 平坦度在 3 dB 以内。实验得到的 OFC 在梳线数量和梳线间距方面具有可调谐性,梳线数量为 7, 9, 11 根,梳线间距分别为 5.5 GHz 和 7.5 GHz,平坦度不超过 2.4 dB。增大 PM₁ 的调制指数能增加 OFC 的梳线数量;增大 OFC 的梳线间隔,其平坦度保持不变。与其它基于级联外调制器方案对比,本方案具有调节参数较少,系统稳定等特点,可应用于微波光子滤波器、特定波形产生以及全光信号处理等领域。

参 考 文 献

[1] Tan J, Zhao Z P, Wang Y H, *et al.* 12.5 Gb/s multi-channel broadcasting transmission for free-space optical communication based on the optical frequency comb module[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 2099-2106.

[2] Villarreal G, Cardenas A M, Botia J. Performance of

WDM-OFDM for using unequalized optical frequency comb[J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2015, 13(8): 2551-2558.

[3] Zhou X, Zheng X P, Wen H, *et al.* Pair-by-pair pulse shaping for optical arbitrary waveform generation by dual-comb heterodyne [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(24): 5331-5333.

[4] Zhang F Z, Wu J, Li Y, *et al.* Flat optical frequency comb generation and its application for optical waveform generation [J]. *Optics Communications*, 2013, 290: 37-42.

[5] Zhuge J C, Xing S J, Gao J S. Theoretical analysis of arbitrary and absolute length measurement by using femtosecond optical frequency comb[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0112004.

诸葛晶昌, 邢书剑, 高建树. 飞秒光频梳的任意长绝对测距理论分析 [J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0112004.

[6] Wu G H, Takahashi M, Inaba H, *et al.* Pulse-to-pulse alignment technique based on synthetic-wavelength interferometry of optical frequency combs for distance measurement[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(12): 2140-2143.

[7] Lipphardt B, Grosche G, Sterr U, *et al.* The stability of an optical clock laser transferred to the interrogation oscillator for aCs fountain [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(4): 1258-1262.

[8] Papp S B, Beha K, Del' Haye P, *et al.* Microresonator frequency comb optical clock [J]. *Optica*, 2014, 1(1): 10-14.

[9] Hatanaka S, Sugiyama K, Mitaki M, *et al.* Phase locking of a mode-locked titanium-sapphire laser-based optical frequency comb to a reference laser using a fast piezoelectric actuator [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(12): 3615-3621.

[10] Merghem K, Calò C, Rosales R, *et al.* Stability of optical frequency comb generated with InAs/InP

- quantum-dash-based passive mode-locked lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2014, 50(4): 275-280.
- [11] Kuse N, Jiang J, Lee C C, *et al.* All polarization-maintaining Er fiber-based optical frequency combs with nonlinear amplifying loop mirror [J]. Optics Express, 2016, 24(3): 3095-3102.
- [12] Melo S A S, do Nascimento A R, Cerqueira S A, *et al.* Frequency comb expansion based on optical feedback, highly nonlinear and erbium-doped fibers [J]. Optics Communications, 2014, 312: 287-291.
- [13] Liu J L, Liu A N, Dai J, *et al.* A broadband, rectangular, and self-sustained optical frequency comb generation employing recirculation frequency shifter [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(5): 1-7.
- [14] Jiang W, Zhao S H, Li X J, *et al.* Optical frequency comb generation based on three parallel Mach-Zehnder modulators with recirculating frequency shifting loop [J]. Optical Review, 2017, 24(4): 533-539.
- [15] Wu R, Supradeepa V R, Long C M, *et al.* Generation of very flat optical frequency combs from continuous-wave lasers using cascaded intensity and phase modulators driven by tailored radio frequency waveforms [J]. Optics Letters, 2010, 35(19): 3234-3236.
- [16] Lu Y L, Xing Y W, Dong Y K. Equal-amplitude optical comb generation using multi-frequency phase modulation in optical fibers [J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(3): 316-319.
- [17] Zhang J W, Yu J J, Chi N, *et al.* Flattened comb generation using only phase modulators driven by fundamental frequency sinusoidal sources with small frequency offset [J]. Optics Letters, 2013, 38(4): 552-554.
- [18] Shang L, Wen A J, Lin G B, *et al.* A flat and broadband optical frequency comb with tunable bandwidth and frequency spacing [J]. Optics Communications, 2014, 331: 262-266.
- [19] Feng S C, Fan Y Y, Chen X Y, *et al.* Design of multicarrier optical source using cascaded electro-absorption modulator and phase modulator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1106001. 冯素春, 范依依, 陈晓燕, 等. 基于级联电吸收调制器和相位调制器的多载波光源发生器设计 [J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1106001.
- [20] Zhang J W, Yu J J, Tao L, *et al.* Generation of coherent and frequency-lock optical subcarriers by cascading phase modulators driven by sinusoidal sources [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(24): 3911-3917.