

doi:10.3788/gzxb20184705.0506001

# 频率间隔可调的平坦多载波光源结构设计

韩一石, 陆敏婷, 郑俊文, 付晨远, 余剑钊

(广东工业大学 信息工程学院, 广州 510006)

**摘 要:** 为了克服密集波分复用系统中多个光源难以同步且成本高等缺点, 提出了一种平坦度好、子载波数多、频谱宽度大且频率间隔可调的多载波光源生成结构. 系统结构由马赫增德尔调制器、电吸收调制器和相位调制器级联组成, 在单一正弦信号驱动下, 输出多个低平坦度、频率间隔可调的子载波. 在驱动信号频率为 9 和 12.5 GHz, 系统生成的子载波数量为 31 个的条件下, 平坦度可达到 0.09 dB. 当驱动信号频率在 3 GHz~16 GHz 范围变化时, 输出的子载波数量基本不变, 且在子载波数量为 31 个的条件下, 平坦度均小于 0.15 dB. 当驱动信号频率为 16 GHz, 平坦度小于 0.15 dB 时, 系统输出的多载波光源频谱宽度可达 480 GHz. 此外, 分析了 MZM 的上、下臂偏置电压差、EAM 的啁啾因子、调制指数对生成多载波光源的平坦度、子载波数以及频谱宽度的影响.

**关键词:** 光通信; 多载波光源; 频率间隔可调; 外调制器; 平坦度; 频谱宽度

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)05-0506001-8

## Design of Flat Multi-carrier Light Source with Adjustable Frequency Spacing

HAN Yi-shi, LU Min-ting, ZHENG Jun-wen, FU Chen-yuan, YU Jian-zhao

(School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** In dense wavelength division multiplexing systems, the light sources are difficult to be synchronized and costly. A structure of multi-carrier light source with good flatness, large number of subcarriers, large spectrum width and adjustable frequency spacing was proposed which can be used in dense wavelength division multiplexing systems. The structure is cascaded with a Mach-Zehnder modulator, an electro-absorption modulator and a phase modulator. In the structure, all the modulators can be driven by a sinusoidal signal to obtain multiple sub-carriers with low flatness and adjustable frequency spacing. When the driving signal frequency is 9 GHz and 12.5 GHz, the number of subcarriers is 31, the flatness of the generated multi-carrier light source can reach 0.09 dB. When the driving signal frequency is turned from 3 GHz to 16 GHz, the number of generated subcarriers is almost unchanged, and the flatness of the subcarriers is always less than 0.15 dB under the condition of 31 subcarriers. And when the driving signal frequency is 16 GHz, the spectrum width of the obtained multi-carrier light source can reach 480 GHz. In addition, the influence of the parameters, such as the upper and lower arm bias voltages of Mach-Zehnder modulator, the chirp factor and the modulation index of electro-absorption modulator, are analyzed with the performance of the system, such as the number of subcarriers, the spectrum width of the generated multi-carrier light source.

**Key words:** Optical communication; Multi-carrier light source; Adjustable frequency spacing; External modulator; Flatness; Spectrum width

**OCIS Codes:** 060.2380; 060.4080; 060.5060; 060.4230; 060.4510

## 0 引言

具有矩形光谱分布的光频梳(Optical Frequency Combs, OFC)作为光子学研究的重要组成部分, 被广

基金项目: 国家自然科学基金(No.61471130), 广东省科技计划(No. 2016B090918060)和广州市科技计划(No. 201604016079)资助

第一作者: 韩一石(1970-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为全光通信网络器件及光纤无线技术等. Email: yshan@gdut.edu.cn

收稿日期: 2017-11-17; 录用日期: 2018-02-02

<http://www.photon.ac.cn>

泛应用于光学任意波形生成<sup>[1]</sup>,微波光子信号处理<sup>[2]</sup>,精密光学测量<sup>[3]</sup>和密集波分复用系统<sup>[4]</sup>等领域.在光任意波形发生器和光通信应用中,往往要求光频梳具有较高的平坦度;在密集波分复用系统中,光频梳作为多载波光源,要求其频谱宽度大且具有较多的子载波数,为此,研究人员提出了许多改善多载波光源平坦度和增加子载波数、增大频谱宽度的多载波光源生成方法.

产生多载波光源的技术方案主要分为几大类:通过锁模激光器获得多载波光源<sup>[5]</sup>、基于微谐振器生成多载波光源<sup>[6-7]</sup>、循环频移技术生成多载波光源<sup>[8-9]</sup>、利用光外调制器的非线性获得多载波光源<sup>[10-11]</sup>等.锁模激光器获得多载波光源的方法主要是利用光注入锁定技术,利用其腔体特性来决定多载波的频率间隔,从而在时域上输出为周期性脉冲序列,对周期性脉冲做傅里叶变换可得到在频域上频率间隔相等、相位固定的多载波光源.具有由连续波光泵浦的异常色散的微谐振器可以产生具有等间距和一串超短光脉冲的多载波光源,当微谐振腔与正交偏振态结合设计时,可获得双多载波光源<sup>[7]</sup>.循环频移技术利用外调制器和耦合器构成的环形结构可以产生具有高灵活性且子载波数较多的多载波光源,其通过带通滤波器来控制子载波数量,同时利用光放大器对信号放大以免循环过程中信号逐渐衰弱.光外调制器主要通过输入驱动信号对其驱动来产生多载波光源.该种技术方案因其结构简单稳定、生成的多载波光源频率间隔可调等优点被广泛使用,但单个外调制器生成多载波光源的子载波数量较少且平坦度不好.

级联或并联多个外调制器不仅可以产生子载波数多的多载波光源,还可以通过调节外调制器的相关参数来优化生成多载波光源的平坦度.级联马赫增德尔调制器(Mach Zehnder Modulator, MZM)和相位调制器(Phase Modulator, PM)产生平坦多载波光源方案<sup>[12-13]</sup>、基于双平行 MZM 产生多载波光源方案<sup>[14]</sup>主要通过调节 MZM 的偏压及其驱动信号来调节多载波光源的平坦度和子载波数.文献[12]和[13]的方案分别生成了子载波数为 17、11,对应平坦度为 4.02 dB、0.82 dB 的多载波光源,文献[14]获得子载波数为 9、平坦度为 1 dB 的多载波光源.比较可知,文献[12]的平坦度有待改善,文献[13]、[14]的子载波数量较少,且频谱宽度窄.基于两个 PM 级联产生多载波光源方案<sup>[15]</sup>主要是通过调节 PM 获得子载波数为 112、平坦度为 5 dB 多载波光源,但该方案利用循环频移结构来增加多载波光源的子载波数量及增大其频谱宽度,同时使用滤波器和光放大器,增加了结构的复杂度和成本,此外生成多载波光源的平坦度也不理想.级联双驱动 MZM 和电吸收调制器(Electroabsorption Modulator, EAM)产生多载波光源方案<sup>[16]</sup>以及基于 EAM 和 PM 生成多载波光源方案<sup>[17]</sup>都用到了 EAM 来调节多载波光源的平坦度,文献[16]和文献[17]分别得到了子载波数为 15、19,对应平坦度为 2 dB、0.1 dB 的多载波光源.这两种方案生成多载波光源的平坦度相对于前几种方案有了较大的改善,但是子载波数少、频谱宽度窄,且文献[16]用到多个激光器和耦合器、滤波器,结构复杂.因此,为了简化结构,同时产生平坦度好、子载波数多、频谱宽度大的高质量的多载波光源,本文提出了一种基于外调制器级联的频率间隔可调的平坦多载波光源生成结构,并获得子载波数为 31、平坦度最优为 0.09dB 的多载波光源.

## 1 基本原理

本文提出的多载波光源生成结构如图 1.该结构主要由连续激光源(Continuous Wave Laser, CW)、射频驱动信号源(RF)、电功分器、MZM、EAM 和 PM 组成,其中 MZM 上、下臂施加直流偏置(DC).

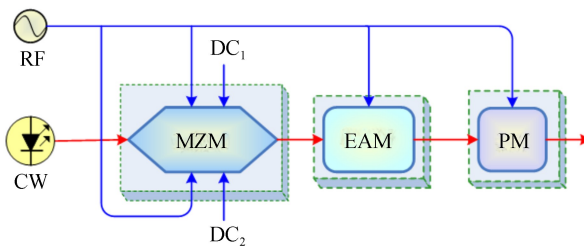


图 1 采用单 PM 的多载波光源生成结构

Fig.1 Schematic diagram of the generation of Multi-carrier light source PM

激光源发出的光信号表示为

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

式中,  $E_0$  为光信号的振幅,  $\omega_0$  为光信号的频率.

驱动信号表示为

$$V_{\text{RF}}(t) = V_{\text{RF}} \sin(\omega_f t) \quad (2)$$

式中,  $V_{\text{RF}}$  是驱动信号的幅度,  $\omega_f$  是驱动信号的频率.

连续激光源发出的光信号进入到 MZM 中, MZM 上、下臂受到相同的驱动信号  $V_{\text{RF}}(t)$  驱动对接收到的光信号  $E_{\text{in}}(t)$  进行调制. 输出信号表示为

$$E_{\text{MZM}}(t) = E_{\text{MZMin}}(t) \left\{ \frac{1}{2} \exp\{j \cdot \pi \cdot [V_1(t) + V_{\text{bias1}}]/V_\pi\} + \frac{1}{2} \exp\{j\pi [V_2(t) + V_{\text{bias2}}]/V_\pi\} \right\} \quad (3)$$

式中,  $E_{\text{MZMin}}(t)$  是输入的光信号;  $V_1(t)$  和  $V_2(t)$  分别为 MZM 的上下臂的驱动信号;  $V_{\text{bias1}}$  和  $V_{\text{bias2}}$  为 MZM 上、下臂的直流偏置电压;  $V_\pi$  是 MZM 的半波电压.

MZM 输出的信号输入到 EAM 中, EAM 在驱动信号  $V_{\text{RF}}(t)$  的驱动下对输入的信号进行调制. 输出信号可以表示为

$$E_{\text{EAM}}(t) = E_{\text{EAMin}}(t) \sqrt{\text{Mod}(t)} \exp\left\{j \frac{\alpha}{2} \ln[\text{Mod}(t)]\right\} \quad (4)$$

$$\text{Mod}(t) = (1 - \delta) + \delta V_{\text{EAM}}(t) \quad (5)$$

式中,  $E_{\text{EAMin}}(t)$  是输入 EAM 的光信号,  $\alpha$  是啁啾因子,  $\delta$  是调制指数,  $V_{\text{EAM}}(t)$  是 EAM 的驱动信号.

EAM 输出的信号输入到 PM 中, PM 在驱动信号  $V_{\text{RF}}(t)$  的驱动下分别对输入的信号进行调制. 光信号经过 PM 的输出信号表示为

$$E_{\text{PM}}(t) = E_{\text{PMin}}(t) \exp\left[j \cdot \frac{\pi}{V_{\pi\text{PM}}} \cdot V_{\text{PM}}(t)\right] \quad (6)$$

式中,  $E_{\text{PMin}}(t)$  是输入 PM 的光信号,  $V_{\pi\text{PM}}$  是 PM 的半波电压,  $V_{\text{PM}}(t)$  是 PM 的驱动信号.

对式(1)~(6)进行相应的代入和贝塞尔函数展开并整理后得到最后的输出信号表示为

$$E_{\text{out}}(t) \propto A \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m(\gamma) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} B_n \sum_{k=-\infty}^{+\infty} J_k(\beta) \exp\{j[\omega_0 + (m + n + k)\omega_f]t\} \quad (7)$$

式中,  $m$ 、 $n$ 、 $k$  是整数;  $A$  是一个常数;  $\gamma$  和  $\beta$  分别是 MZM 和 PM 的调制指数,  $\gamma = (\pi \cdot V_{\text{RF}})/V_\pi$ ,  $\beta = (\pi \cdot V_{\text{RF}})/V_{\pi\text{PM}}$ ;  $J_m(\gamma)$ 、 $B_n$ 、 $J_k(\beta)$  是幅度系数. 从式(7)可以看出, 最后输出的多载波光源由一系列子载波组成, 设  $\omega_0 = 193.1$  THz,  $\omega_f = 10$  GHz, 则输出的一系列子载波的频率为...、193.08 THz、193.09 THz、193.1 THz、193.11 THz、193.12 THz、... 根据式(7)还可以看到, 多载波光源的频率间隔是由驱动信号的频率  $\omega_f$  决定的, 改变  $\omega_f$  的大小就可以改变生成多载波光源的频率间隔; 比如,  $\omega_f$  分别设为 5 GHz、10 GHz、15 GHz 时, 得到的多载波光源的频率间隔也分别对应为 5 GHz、10 GHz、15 GHz, 这也说明了生成多载波光源的频率间隔具有可调性.

## 2 仿真实验及结果分析

按照图 1 采用单 PM 的多载波光源生成结构示意图搭建模型进行仿真实验. 其中, 连续激光器的中心频率为 193.1 THz, 功率为 10 dBm, 线宽为 10 MHz; 射频驱动信号(RF)的幅度为 1 V, 初始相位为  $0^\circ$ , 频率为 15 GHz; 图 1 中引入电功分器对射频驱动信号进行等分, 保证输入到 MZM、EAM、PM 的驱动信号幅度、相位和频率保持一致; MZM 的半波电压为 4V, 上、下臂偏置电压分别为 0 V 和 2.31 V; EAM 的调制指数和啁啾因子分别为 0.99 和 5. 此外, 分别将 PM 的调制指数设置为 4、6、8 进行仿真实验, 得到的多载波光源如图 2. 比较图 2(a)、(b)、(c) 三幅图发现, 随着 PM 调制指数的增大, 生成多载波光源的边沿逐渐锐化, 从而增加了生成多载波光源的子载波个数. 再结合表 1 的数据可知, 增大 PM 的调制指数还可以改善多载波光源的平坦度. 然而, 单个 PM 的调制指数有限, 为了得到更高质量的多载波光源, 在图 1 结构的基础上再级联一个 PM, 得到了如图 3 所示的多载波光源生成结构.

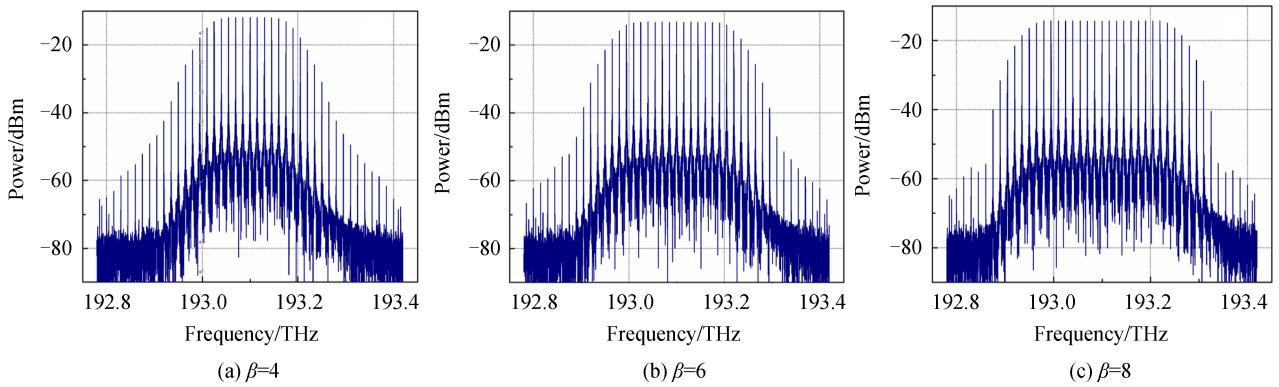


图2 不同的PM调制指数下生成的多载波光源  
Fig.2 Multi-carrier light source generated under different modulation indices

表1 PM调制指数分别为4、6、8时生成多载波光源的子载波数及平坦度

Table 1 Shows the number of subcarriers and flatness of the optical combs generated when the modulation indices of the phase modulator are 4, 6, 8 respectively

$\beta$	Subcarriers $W$	Flatness
4	11	1.31
6	15	0.93
8	19	0.64

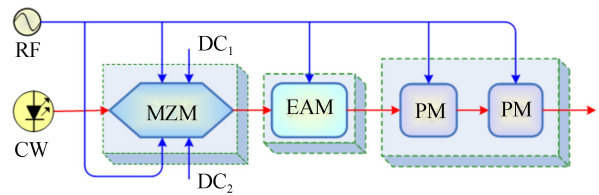


图3 采用双PM的多载波光源生成结构  
Fig.3 Schematic diagram of the generation of multi-carrier light source with two PM

根据图3的多载波光源生成结构进行仿真实验,相关参数需要适当进行调整.连续激光器的参数设置与图1的相同;MZM的下臂偏置电压设置为2.35,其它的参数不变;EAM的调制指数和啁啾因子分别为0.99和7.9;两个PM的调制指数都设置为8;驱动信号的幅度和相位仍为1V和0°。在此基础上,分别将驱动信

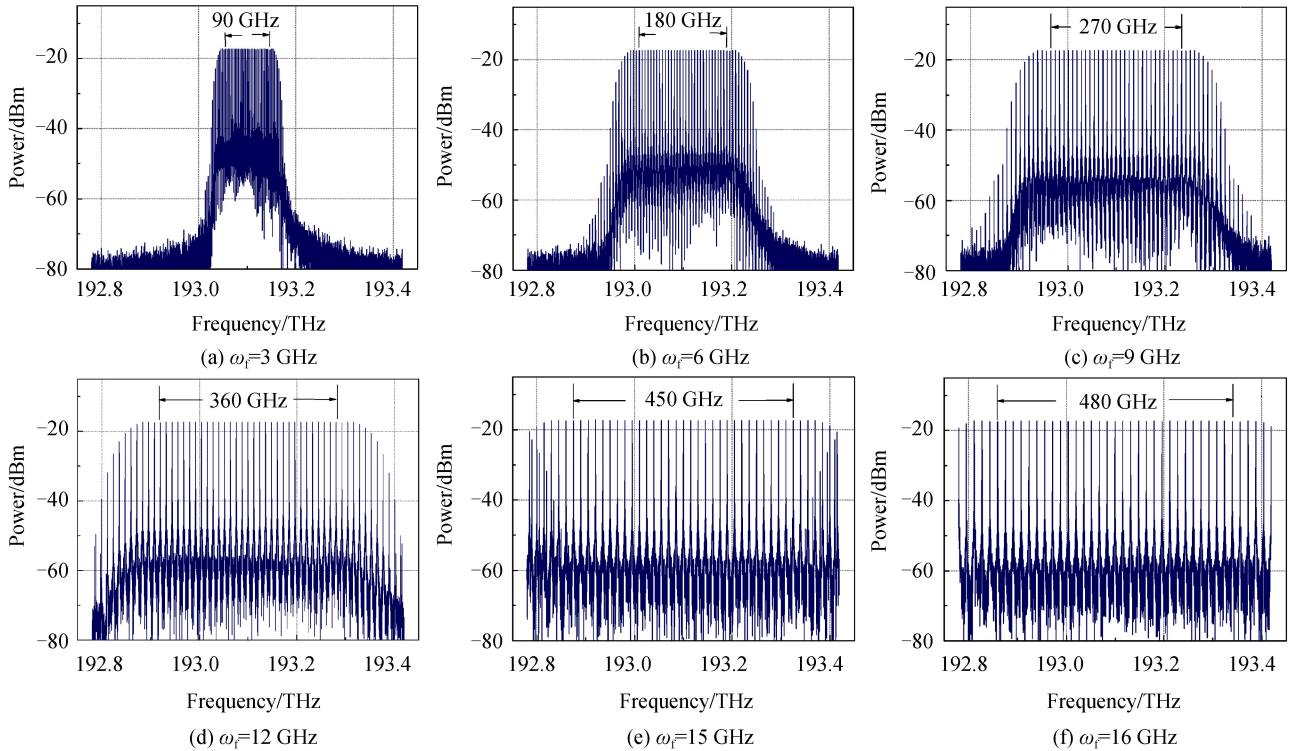


图4 不同驱动信号频率下生成的多载波光源  
Fig.4 Multi-carrier light source generated at different drive signal frequencies

表 2 不同射频驱动信号频率下生成多载波光子的子载波数、平坦度及频谱宽度

Table 2 Subcarriers, flatness and spectral width of the multi-carrier light source generated at different RF drive signal frequencies

Drive signal frequency/GHz	Subcarriers $W$	Flatness/dB	Spectral width/GHz
3	31	0.15	90
6	31	0.13	180
9	31	0.09	270
12	31	0.1	360
15	31	0.10	450
16	31	0.14	480

号的频率设置为 3 GHz、6 GHz、9 GHz、12 GHz、15 GHz、16 GHz 进行仿真实验,得到的多载波光源如图 4 所示.同时,将图 4 中各个多载波光子的子载波数、平坦度以及频谱宽度列表表示出来,如表 2 所示.

图 4 分别是驱动信号频率为 3 GHz、6 GHz、9GHz、12 GHz、15 GHz、16 GHz 的多载波光源,图中分别标出了多载波光源中间 31 个子载波的频谱宽度.观察发现,在相同的子载波数条件下,采用不同的驱动信号频率,得到的多载波光源频谱宽度不同.这是因为多载波光源的频率间隔等于驱动信号的频率,驱动信号的频率越大,频率间隔越大,其多载波光源的频谱宽度越宽.由于受光谱仪器件特性的限制,这里只能给出频率间隔最大为 16 GHz、频谱带宽最大为 480 GHz 的多载波光源图.若不受器件特性限制,可以通过仿真实验得到更大频谱带宽的多载波光源.再结合表 2 中的数据可以看到,生成多载波光子的子载波数不变,多载波光源的频谱宽度随着驱动信号频率的增大而不断展宽,且平坦度均在 0.15 dB 范围内,最好可达到 0.09 dB.

此外,为了进一步说明不同射频驱动信号频率下生成多载波光子的平坦度保持稳定,给出了图 5.图 5 中的平坦度都是在子载波数为 31 时取得的,观察发现平坦度曲线在 0.09~0.15 dB 范围内波动,波动幅度仅为 0.06 dB,体现了多载波光源生成系统的稳定性.

表3为本文方案与其它生成多载波光源方案的对比表.文献[12]采用了 12.5 GHz 的驱动信号,获得了 17 个子载波、平坦度为 4.02 dB、频谱宽度 200 GHz 的多载波光源,而本文结构在采用 12.5 GHz 驱动信号时,生成的多载波光源超过 30 个子载波,在 31 个子载波时平坦度可达到 0.09 dB,频谱宽度达到 375 GHz.文献[13]和文献[12]一样是基于 MZM 和 PM 串联生成多载波光源,但是相比于文献[12],文献[13]采用的是单驱动 MZM,获得了子载波数为 11 的多载波光源,平坦度小于 1 dB.文献[15]采用了较高的驱动信号频率,获得较多数量的子载波,频谱宽度也最宽,但是其引入循环频移结构,增加了噪声的积累,得到的多载波光源平坦度也较差,达到了 5 dB.文献[14]、[16]得到多载波光源的平坦度都在 1 dB 以上,且子载波数较少.文献[17]采用了 15 GHz 的驱动信号生成多载波光源,

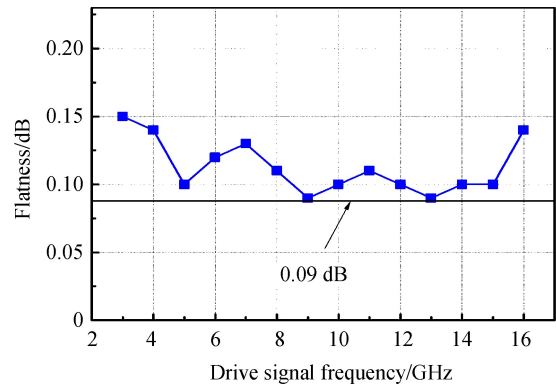


图 5 不同驱动信号频率生成的多载波光子的平坦度关系图  
Fig.5 Shows the flatness relationship of the multi-carrier light source generated at different frequencies of the drive signal

表 3 不同方案生成多载波光源的对比表

Table 3 Comparison table of different schemes to generate multi-carrier light source

Schemes	Drive signal frequency/GHz	Subcarriers	Flatness/dB	Spectral width/GHz
DD-MZM+PM <sup>[12]</sup>	12.5	17	4.02	200
MZM+PM <sup>[13]</sup>	10,12	11	0.82,0.93	100,120
DP-MZM <sup>[14]</sup>	20	9	1	160
PM+PM+RFS EDFA LOOP <sup>[15]</sup>	25	112	5	2775
DD-MZM+EAM <sup>[16]</sup>	25	15	2	350
EAM+EAM+PM <sup>[17]</sup>	15	19	0.1	270
Scheme in this paper	12.5,15	31	0.09,0.1	375,450

利用了两个 EAM 来调节多载波光源的平坦度,获得了 19 个子载波、平坦度为 0.1 的多载波光源,频谱宽度为 270 GHz.但相对于本文结构生成的多载波光源,其子载波较少,频谱宽度也较小.本文结构在采用 15 GHz 时,在 0.1 dB 平坦度条件下多载波光源可达到 31 个,频谱宽度可以达到 450 GHz.因此,相比而言,本文结构生成的多载波光源子载波数量多、频谱宽度大且平坦度好.

### 3 影响因素分析

首先,分析 MZM 的上、下臂偏压变化对生成的多载波光源平坦度和子载波数的影响.参照图 3 实验结构,选取驱动信号频率 15 GHz, MZM 的上臂偏压保持为 0 V,改变 MZM 的下臂偏压,以获得 MZM 的偏置电压差变化情况,仿真实验结果如图 6 所示.需要指出的是,平坦度是基于子载波数为 31 的条件下、子载波数是基于平坦度为 3 dB 条件下获得的.

由图 6 可见, MZM 的偏置电压差对多载波光源的影响呈周期性变化. MZM 的直流偏置电压差决定了 MZM 调制方式和传输特性,实验中选取 MZM 半波电压为 4 V,对应生成的多载波光源的平坦度和子载波数随之周期变化,变化周期  $T=8$  V.图 6 中,在一个周期范围内,随着偏压差变化,多载波光源的平坦度变化非常大,在 0.1 dB 到 14 dB 之间波动,可见 MZM 偏压波动对生成的多载波光源的性能影响较大.当偏压差为 2.35 V 时,平坦度达到最优,为 0.1 dB.此时,多载波光源的子载波数量也接近最优值,达到 41 个.因此,综合考虑生成多载波光源的平坦度和子载波数,选择偏置电压差为 2.35 V,可获得平坦度低、子载波数量多、频谱宽度大的多载波光源.

其次,分析 EAM 实验参数变化对生成多载波光源的性能影响.实验中,选取不同啁啾因子进行实验对比,发现 EAM 的啁啾因子对多载波光源的边沿平滑度具有调节作用,结果如图 7.图 7 分别为啁啾因子取 2、4、6、8 时的多载波光源,随着啁啾因子的增大,生成多载波光源的边沿逐渐变平滑,边沿角逐渐扁平化,生成的多载波光源平坦度得到提高.此外,图 7 中给出了多载波光源的子载波个数变化情况,当啁啾因子取 2、4、6、8 时,生成多载波光源的子载波个数分别为 35、37、39、41.由此可见,增大 EAM 啁啾因子在一定程度上可增加生成多载波光源的子载波个数和频谱宽度.

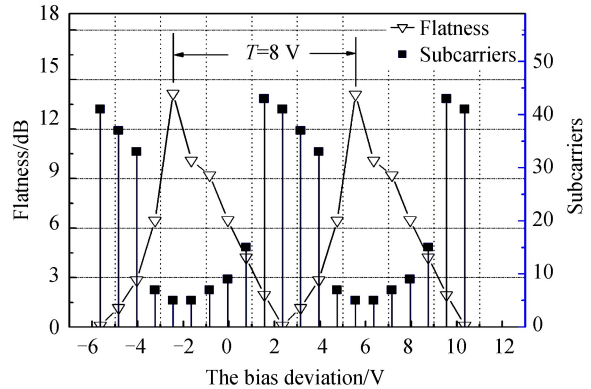
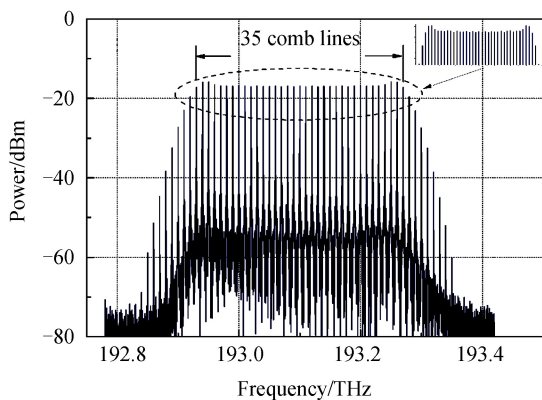
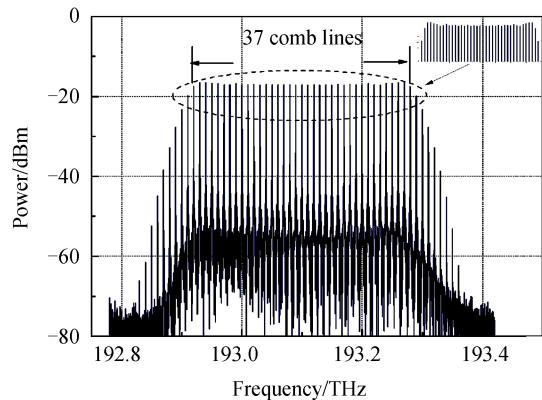


图 6 MZM 上、下臂偏置电压差对平坦度以及子载波数的影响

Fig.6 The influence of MZM upper and lower's bias deviation on the flatness and the subcarriers



(a)  $\alpha=2$



(b)  $\alpha=4$

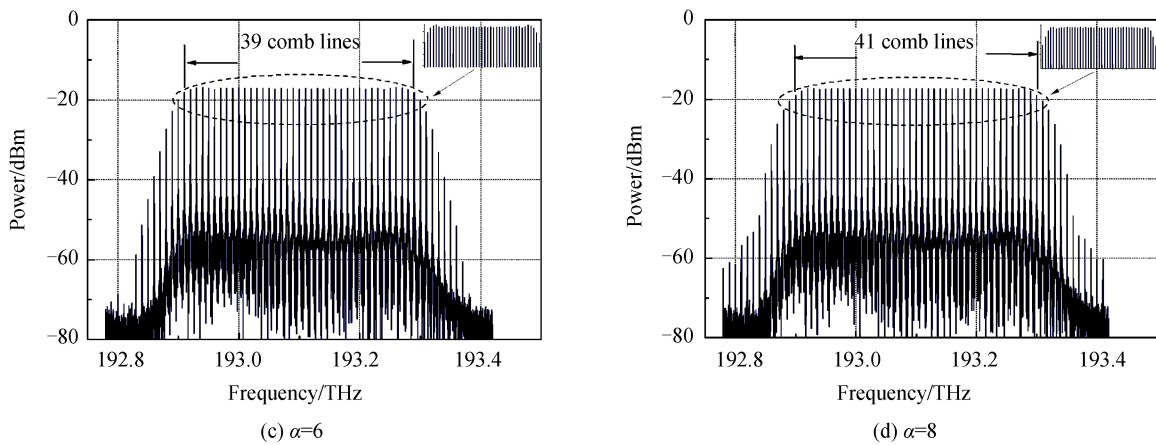


图7 不同 EAM 啾啾因子下多载波光源  
Fig.7 Multi-carrier light source under different chirp factors of EAM

最后,分析 EAM 调制指数对生成多载波光源的性能影响,如图 8 所示.从图 8 可见,多载波光源的平坦度随着 EAM 调制指数的增大而变小,波动范围:0.1~5 dB;同时,多载波光源的子载波数随 EAM 调制指数增大呈增多的趋势.图 8 中,多载波光源的子载波数呈类似阶梯状变化趋势,这主要是由于 EAM 调制指数在一定的小范围变化时,生成的子载波数变化较小,且由于仿真实验本身精度受限,最终对实验数据精确度产生的影响.但总体看,增加 EAM 调制指数大小可获取更低平坦度,更多子载波数的载波光源.

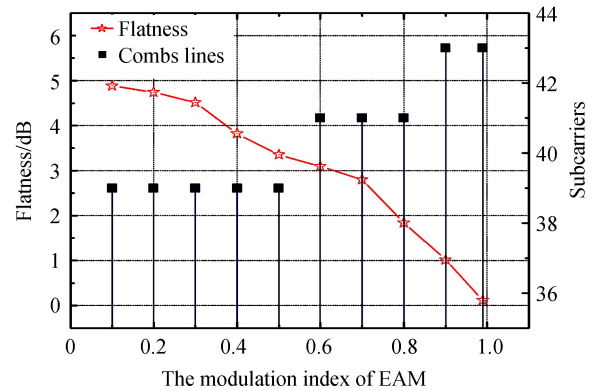


图 8 EAM 调制指数对平坦度以及子载波数的影响  
Fig.8 The influence of the modulation index of EAM on the flatness and the subcarriers

#### 4 结论

本文提出了一种基于 MZM、EAM 和 PM 级联的多载波光源生成结构,在单一正弦信号驱动下,可获得平坦度好、子载波数多且频谱宽度大的多载波光源.仿真实验研究表明,该结构生成的多载波光源平坦度可达到 0.09 dB,子载波数超过 30 个,频谱宽度最大可达 480 GHz.此外,其生成的多载波光源频率间隔可调,由于受到器件特性的限制,频率间隔最大只能调到 16 GHz,但是在频率可调范围内,生成多载波光源的平坦度一致且子载波数不变,体现了系统的良好稳定性.所提出的多载波生成方案有望作为较高质量的多载波光源的实现方案之一,有利于密集波分复用系统中多载波光源的实现.后续将该方案进行优化,力争从硬件上进行验证.

#### 参考文献

[1] ZHOU Xin, ZHENG Xiao-ping, WEN He, et al. Pair-by-pair pulse shaping for optical arbitrary waveform generation by dual-comb heterodyne[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(24): 5331-5333.

[2] WINKLER G, FELLINGER J, SERES J, et al. Non-planar femtosecond enhancement cavity for VUV frequency comb applications[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(5): 5253-5262.

[3] VAINIO M, KARHU J. Fully stabilized mid-infrared frequency comb for high-precision molecular spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(4): 4190-4200(2017).

[4] FERNANDO A, MARTIN E P, PERRY P, et al. WDM orthogonal subcarrier multiplexing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(8): 1815-1823.

[5] MOSKALENKO V, KOELEMEIJ J, WILLIAMS K, et al. Study of extra wide coherent optical combs generated by a QW-based integrated passively mode-locked ring laser[J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(7): 1428-1431.

[6] WU Zi-jian, MING Yang, XU Fei, et al. Optical frequency comb generation through quasi-phase matched quadratic frequency conversion in a micro-ring resonator[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(15): 17192-17200.

[7] ZHAO X, SILVER J M, BINO L D, et al. Dual comb generation in a single microresonator[C]. Conference on Lasers

- and Electro-Optics, 2017, OSA Technical Digest (online).
- [8] WAN Ming-gui, WANG Lin, LI Feng, *et al.* Rapid, k-space linear wavelength scanning laser source based on recirculating frequency shifter[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(24): 27614-27621.
- [9] ZHANG J. Multichannel optical frequency-locked multicarrier source generation based on multichannel recirculation frequency shifter loop[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(22): 4714-4716.
- [10] DUO Y, ZHANG H, YAO M. Generation of flat optical-frequency comb using cascaded intensity and phase modulators [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(9): 727-729.
- [11] CHEN C, HE C, ZHU D, *et al.* Generation of a flat optical frequency comb based on a cascaded polarization modulator and phase modulator[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(16): 3137-3139.
- [12] ZHANG Lin, SONG Ying-xiong, ZHOU Shi-huan, *et al.* Flat frequency comb generation based on Mach-Zehnder modulator and phase modulator[C]. International Conference on Communication Technology, 2010: 211-213.
- [13] DAI Jian, XU Xing-yuan, WU Zhong-le, *et al.* Self-oscillating optical frequency comb generator based on an optoelectronic oscillator employing cascaded modulators[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(23): 30014-30019.
- [14] XIE Qian, TIAN Xiao, FENG Su-chun. Based on RF frequency doubling signal driven double parallel Mach-Zehnder modulator to produce optical comb[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(S1): 43-48.  
谢倩,田晓,冯素春. 基于射频倍频信号驱动双平行马赫曾德调制器产生多载波光源[J]. 光子学报, 2017, **46**(S1): 43-48.
- [15] YU J, DONG Z, ZHANG J, *et al.* Generation of coherent and frequency-locked multi-carriers using cascaded phase modulators for 10 Tb/s optical transmission system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(4): 458-465.
- [16] NAZNEEN R, ZAHIR E. Cascading of dual drive mach zehnder modulator and electro absorption modulator for producing an optical comb[C]. International Conference on Electrical and Computer Engineering, 2016: 455-458.
- [17] FENG Su-chun, FAN Yi-yi, CHEN Xiao-yan, *et al.* Design of multi-carrier light source generator based on cascade electroabsorption modulator and phase modulator[J]. *China Laser*, 2016, **43**(11): 2-15.  
冯素春,范依依,陈晓燕,等. 基于级联 EAM 和 PM 的多载波光源发生器的设计[J]. 中国激光, 2016, **43**(11): 2-15.