

# 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

冯素春<sup>1</sup> 范依依<sup>1</sup> 陈晓燕<sup>2</sup> 谢倩<sup>1</sup> 任文华<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

<sup>2</sup>航天恒星科技有限公司, 北京 100086

**摘要** 提出了一种基于级联电吸收调制器(EAM)和相位调制器(PM)的多载波光源发生器方案。对比分析了基于单个 EAM 级联 PM 的多载波光源发生器与基于两个 EAM 级联 PM 的多载波光源发生器产生的多载波光源, 利用基于两个 EAM 级联 PM 的多载波光源发生器实现了频率间隔为 15 GHz、平坦度在 0.1 dB 范围内的 19 个子载波的多载波光源。同时研究了 EAM 的调制指数和啁啾因子、PM 的驱动信号幅度以及调制器驱动信号的相位差等参数对产生多载波光源的影响。

**关键词** 光通信; 光频率梳; 多载波光源; 电吸收调制器; 相位调制器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1106001

## Design of Multicarrier Optical Source Using Cascaded Electro-Absorption Modulator and Phase Modulator

Feng Suchun<sup>1</sup> Fan Yiyi<sup>1</sup> Chen Xiaoyan<sup>2</sup> Xie Qian<sup>1</sup> Ren Wenhua<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

<sup>2</sup>Space Star Technology Co., Ltd., Beijing 100086, China

**Abstract** A new method for multicarrier optical source generator based on cascaded electro-absorption modulator (EAM) and phase modulator (PM) is proposed. The multicarrier optical source based on single EAM cascaded PM and the multicarrier optical source based on two EAM cascaded PM are studied and analyzed respectively. Multicarrier optical source with frequency interval of 15 GHz, and 19 subcarriers in the range of 0.1 dB flatness using multicarrier optical source generator based on two EAM cascaded PM are achieved. Meanwhile, the influence of the parameters such as modulation index and chirped factor of EAM, modulation signal amplitude of PM, and phase difference of modulators on the multicarrier optical source are also analyzed.

**Key words** optical communications; optical frequency comb; multicarrier optical source; electro-absorption modulator; phase modulator

**OCIS codes** 060.4080; 060.4510; 060.5060; 060.5625

## 1 引言

随着通信网和互联网业务的增加,人们对网络容量和带宽的需求越来越高。为了满足这种需求,许多研究者对大容量,即 Tb/s 及以上速率的光通信系统开展了研究。要实现超大容量光纤通信,国际上普遍认可的技术是基于多波长技术的光波分复用(WDM)技术和光正交频分复用(OOFDM)技术。这类方法利用多波长传输技术,将数据分别调制到不同频率的光子载波上,然后进行传输,在接收端采用相干探测进行解调。

收稿日期: 2016-05-23; 收到修改稿日期: 2016-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(61107094)、北京交通大学青年英才计划

作者简介: 冯素春(1982—),男,博士,副教授,主要从事光纤通信、光纤器件和光纤激光器方面的研究。

E-mail: fengsuchun@gmail.com

要实现多波长大容量传输,需要解决的一个关键问题是多波长光源的产生,而频率间隔稳定、波长数众多、幅度平坦的多载波光源是 WDM 和 OOFDM 系统的理想光源之一。频率锁定多载波光源是子载波之间具有固定频率间隔的光源,属于光频率梳的范畴,近年来随着 Superchannel 光传输系统的兴起,已被广泛应用于光纤通信、微波光子学、光任意波形发生器和超快光信号处理等领域<sup>[1]</sup>。

目前,产生多载波光源的方法主要有:超连续谱分割技术<sup>[2]</sup>、基于调制法布里珀罗激光光源或锁模激光光源等多模式激光光源技术<sup>[3]</sup>、基于外调制器的多载波光源发生器<sup>[4-13]</sup>、基于循环频移器技术<sup>[14-15]</sup>、基于光参量放大的光频梳发生器<sup>[16-17]</sup>以及基于片上微腔的光频梳发生器<sup>[18]</sup>等。超连续谱分割技术通过超短脉冲光源耦合进高非线性光纤后产生较宽频谱,使用滤波器对产生的宽频谱滤波形成梳状光源,其载波平坦度以及子载波之间的相位相关性较差;基于调制法布里-珀罗激光光源或锁模激光光源等多模式激光光源技术在激光谐振器中没有设置滤波器等波段限制单元,为了保证振荡光频的稳定,需要对外部光进行注入锁定或者利用波长滤波器的光频率锁定单元;基于外调制器的多载波光源发生器原理是当各类调制器加载合适的射频驱动信号时,其传输函数可以化为贝塞尔级数,即产生了多次正弦函数形式的谐波分量而得到的一定数目的子载波,包括基于马赫曾德尔调制器(MZM)的多载波光源发生器、基于相位调制器(PM)的多载波光源发生器、基于偏振调制器(PolM)的多载波光源发生器以及基于级联多个外调制器的多载波光源发生器等<sup>[19]</sup>;循环频移器技术基于外调制器等构成环状结构的循环调制,其不需要较高的驱动电压,能够产生数目较大的子载波,中心频率可控、平坦度较好,但循环结构形成了噪声积累,降低了光源的信噪比;基于光参量放大的光频梳发生器以及基于片上微腔的光频梳发生器需要利用昂贵的高非线性光纤和高非线性片上微腔,还需要进行平坦度优化。

基于外调制器的多载波光源发生器具有输出频谱稳定、频率间隔可调谐和结构简单等优点,是实现较高质量的频率锁定多载波光源的主要方案之一。基于 MZM 的多载波光源发生器常用的方案有基于双驱动 MZM(DD-MZM)的多载波光源发生器<sup>[4]</sup>、基于不同频率驱动信号的 DD-MZM 的多载波光源发生器<sup>[5]</sup>以及基于双平行 MZM(DP-MZM)的多载波光源发生器<sup>[6]</sup>,其特点是通过控制两个射频驱动信号之间的幅度、相位、频率等关系以及直流偏置电压产生较平坦的多载波光源,但是存在控制参数较多问题,同时需要较高的射频驱动电压;基于 PM 的多载波光源发生器常用的方案有基于 IM 与 PM 级联的多载波光源发生器<sup>[8]</sup>、基于级联 PM 的多载波光源发生器<sup>[9]</sup>、基于小差频驱动级联 PM 的多载波光源发生器<sup>[10]</sup>,其通过控制射频驱动信号来产生较平坦的多载波光源,通过级联 PM 增加调制深度,但是其平坦度有待提高;基于 PolM 的多载波光源发生器常用的方案有基于 PolM 级联的多载波光源发生器<sup>[11]</sup>和基于 PolM 级联 PM 的多载波光源发生器<sup>[12]</sup>,此方案需要较低的射频驱动电压,但产生的多载波数目较少。因此为了进一步提高多载波光源的输出质量,包括子载波数目以及平坦度等,本文设计了一种基于级联电吸收调制器(EAM)和 PM 的多载波光源发生器的新方案。

## 2 理论模型与仿真研究

EAM 是利用半导体中激光吸收效应制作而成的光外调制器,其结构与激光器非常相似,可以在同一 InP 衬底上制作光子集成回路,使激光器与调制器能够集成在单芯片上,因此 EAM 与其他调制器相比具有体积小、结构紧凑、易于集成、所需驱动信号电压低以及响应速度快等特点。基于单个 EAM 级联 PM 的多载波光源发生器的结构如图 1 所示,其包括连续波激光器(CW)、EAM、PM、射频驱动信号源(RF)、功分器和电放大器(EA)。连续波激光器的中心频率为 193.1 THz,功率为 0 dBm,激光线宽为 1 MHz。其中,正弦射频信号被功分器分为 2 路,分别用来驱动 EAM 和 PM,EA 可以放大驱动 PM 的射频驱动信号的幅度,用来产生较多的子载波,该系统结构简单、稳定性好,且可调谐。设射频驱动信号的表达式为

$$I_{\text{RF}}(t) = V_{\text{RF}} \cos(\omega_m t), \quad (1)$$

式中  $V_{\text{RF}}$  为驱动信号的幅度,  $\omega_m = 2\pi f_{\text{RF}}$  为驱动信号的角频率,  $f_{\text{RF}}$  为射频驱动信号频率。设输入信号为单频光信号,其表达式为

$$E_{\text{in}}(t) = E_0 \cdot \exp(j\omega_0 t). \quad (2)$$

则经过 EAM 后输出信号为

$$E_{\text{out1}}(t) = E_{\text{in}}(t) \cdot \sqrt{(1-\gamma) + \gamma \cdot I_{\text{RF}}(t)} \cdot \exp\{j \cdot (\alpha/2) \cdot \ln[(1-\gamma) + \gamma \cdot I_{\text{RF}}(t)]\}, \quad (3)$$

式中  $\gamma$  为调制器的调制指数,  $\alpha$  为调制器的啁啾因子, 若  $\alpha = 0$ , 则(3)式变为

$$E_{\text{out1}}(t) = E_{\text{in}}(t) \cdot \sqrt{(1-\gamma) + \gamma \cdot I_{\text{RF}}(t)} = E_0 \cdot \exp(j\omega_0 t) \cdot \sqrt{(1-\gamma) + \gamma V_{\text{RF}} \cos(\omega_m t)}. \quad (4)$$

经过 EAM 后的输出信号被送入 PM, 设 PM 的射频驱动信号为

$$V_{\text{PM}}(t) = V_{\text{PM}} \cos(\omega_m t), \quad (5)$$

式中  $V_{\text{PM}}$  为驱动信号的幅度。则经过 PM 后的输出信号为

$$E_{\text{out2}}(t) = E_{\text{out1}}(t) \cdot \exp[j\pi m_{\text{PM}} \cdot \cos(\omega_m t)] = E_{\text{out1}}(t) \cdot \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_n(\pi m_{\text{PM}}) \cdot \exp(jm\omega_m t), \quad (6)$$

式中  $m_{\text{PM}}$  为 PM 的调制指数, 等于  $V_{\text{PM}}$  与调制器半波电压  $V_{\pi}$  的比值,  $J_n(\cdot)$  为  $n$  阶贝塞尔函数。对(4)式进行处理, 得到

$$E_{\text{out1}}(t) \propto \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n \cdot \exp[j(\omega_0 + n\omega_m)t], \quad (7)$$

式中  $A_n$  为  $n$  阶边频的幅值。则基于 EAM 级联 PM 产生的多载波光源表达式为

$$E_{\text{out2}}(t) \propto \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n \cdot \exp[j(\omega_0 + n\omega_m)t] \cdot \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_n(\pi \cdot m_{\text{PM}}) \cdot \exp(jm\omega_m t). \quad (8)$$

为了研究  $\alpha$  对 EAM 输出信号的影响, 分别对  $\alpha = 0$ 、 $\alpha = 1$  时的两种情况进行仿真, 设驱动信号的频率为 15 GHz, 得到单频光信号经过 EAM 后的输出信号频谱图, 如图 2 所示。对比图 2 (a) 和 (b) 可知, 在  $\alpha \neq 0$  时, 经过 EAM 调制后产生的子载波数目比  $\alpha = 0$  的子载波数目多, 且各边频的幅度均有所变化。

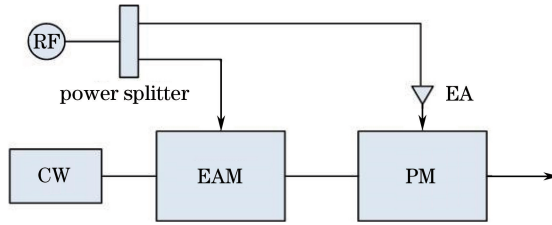


图 1 基于 EAM 级联 PM 多载波光源发生器的结构示意图

Fig. 1 Schematic of multicarrier optical source generator based on the EAM cascaded PM

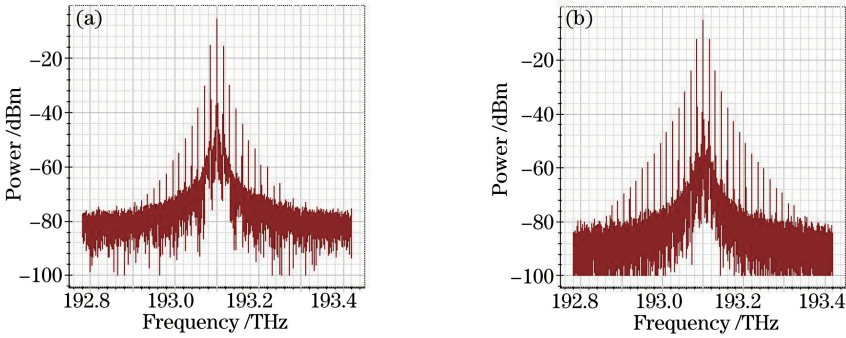


图 2 单频信号经过 EAM 的输出信号频谱。(a)  $\alpha = 0$ ; (b)  $\alpha = 1$

Fig. 2 Output spectrums of single frequency signal from the EAM. (a)  $\alpha = 0$ ; (b)  $\alpha = 1$

表 1 基于单个 EAM 级联 PM 的多载波光源发生器的调制器各项参数

Table 1 Parameters of multicarrier optical source generator based on single EAM cascaded PM

$\gamma$	$\alpha$	$V_{\text{PM}}/V$
0.50	0	3.0
0.99	0	3.0
0.99	2.5	3.0
0.99	2.5	5.2

然后对基于单个 EAM 级联 PM 的多载波光源发生器进行仿真。先设射频驱动信号频率  $f_{\text{RF}} = 15$  GHz, 初始相位为  $90^\circ$ , 幅度为 1 V, 其他参数保持不变。将 EAM 与 PM 的各参数按照表 1 中的数据进行变化, 产生的多载波光源的频谱如图 3 所示。通过对比图 3(a) 和 (b) 可知, 改变参数  $\gamma$ , 可以改善多载波光源

的平坦度,即  $\gamma$  对子载波的强度有影响;对比图 3(b)和(c)可知,增大  $\alpha$  可以增加子载波数目并改善其平坦度;对比图 3(c)和(d)可知,增大  $V_{PM}$  可以增加子载波数目。基于表 1 中的数据最终产生了频率间隔为 15 GHz、平坦度在 5 dB 范围内子载波数目为 21 的多载波光源,其中平坦度在 1 dB 范围内的子载波数目为 11。

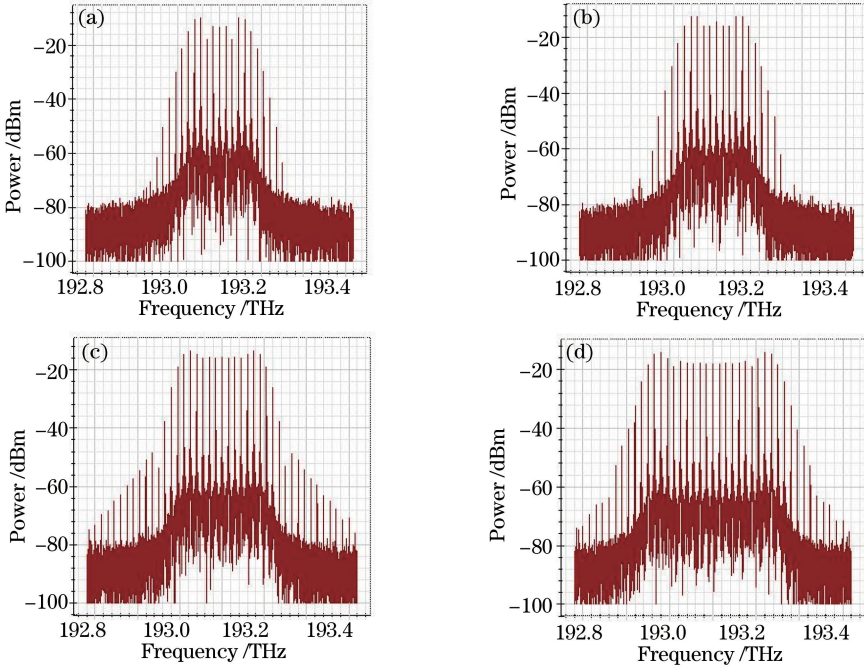


图 3 不同参数设置下基于单个 EAM 级联 PM 产生的多载波光源。(a)  $\gamma=0.50, \alpha=0, V_{PM}=3.0$ ; (b)  $\gamma=0.99, \alpha=0, V_{PM}=3.0$ ; (c)  $\gamma=0.99, \alpha=2.5, V_{PM}=3.0$ ; (d)  $\gamma=0.99, \alpha=2.5, V_{PM}=5.2$

Fig. 3 Multicarrier optical source based on single EAM cascaded PM under different parameters. (a)  $\gamma=0.50, \alpha=0, V_{PM}=3.0$ ; (b)  $\gamma=0.99, \alpha=0, V_{PM}=3.0$ ; (c)  $\gamma=0.99, \alpha=2.5, V_{PM}=3.0$ ; (d)  $\gamma=0.99, \alpha=2.5, V_{PM}=5.2$

可见, EAM 的调制指数与啁啾因子对多载波光源的平坦度都有影响,为了改善基于 EAM 级联 PM 的多载波光源发生器产生的多载波光源的平坦度,采用两个 EAM 与 PM 进行级联来产生多载波光源,其结构如图 4 所示。同样对该结构的多载波光源发生器进行仿真研究。

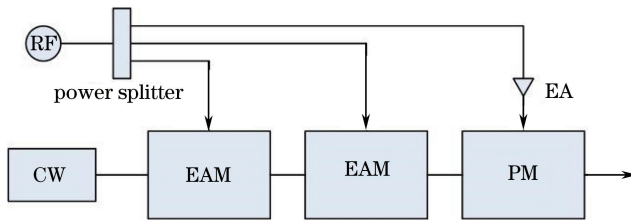


图 4 基于两个 EAM 级联 PM 的多载波光源发生器的结构示意图

Fig. 4 Schematic of multicarrier optical source generator based on two EAM cascaded PM

为便于分析,同样先设射频驱动信号频率  $f_{RF}=15$  GHz,初始相位为  $90^\circ$ ,幅度为 1 V,其他参数保持不变;将基于两个 EAM 级联 PM 的多载波光源发生器中的两个 EAM 与 PM 的各项参数按照表 2 中的数据进行变化,产生的多载波光源的频谱如图 5 所示。通过比较图 5(a)和(b)可知,改变 EAM 的调制指数,可以改善多载波光源的平坦度,即  $\gamma$  对子载波的强度有影响;通过比较图 5(b)和(c)可知,增大  $\alpha$  可以增加子载波数目并改善其平坦度;通过比较图 5(c)和(d)可知,增大  $V_{PM}$  可以增加子载波数目。基于表 2 的参数设置,最终产生了频率间隔为 15 GHz、平坦度在 0.1 dB 范围内子载波数目为 19 的多载波光源。

表 2 基于两个 EAM 级联 PM 的多载波光源发生器中的调制器各项参数

Table 2 Parameters of multicarrier optical source generator based on two EAM cascaded PM

$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$V_{PM}/V$
0.50	0.40	0	0	3.0
0.99	0.99	0	0	3.0
0.99	0.99	2.5	2.0	3.0
0.99	0.99	2.5	2.0	5.2

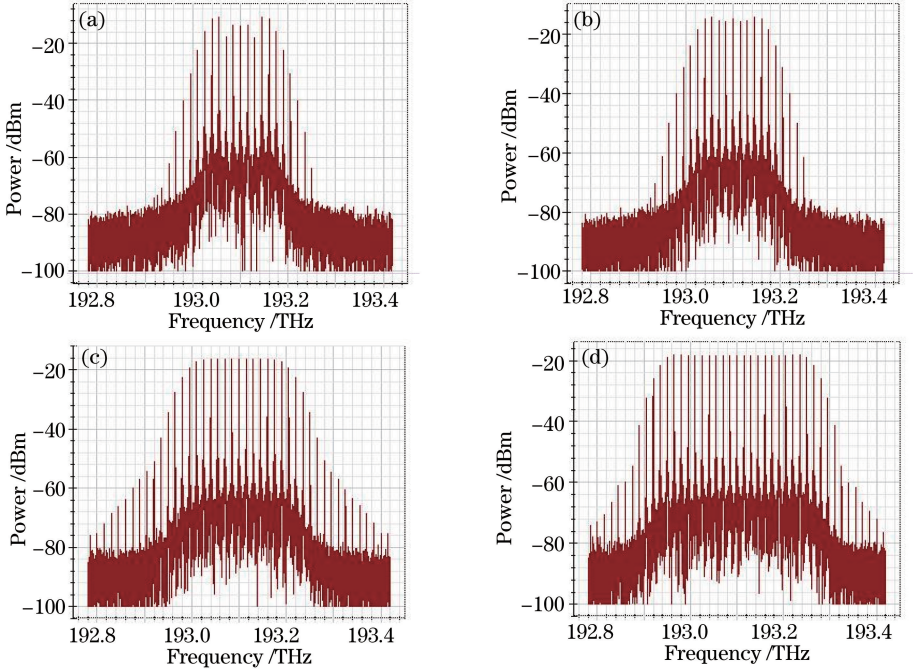


图 5 不同参数设置下基于两个 EAM 级联 PM 产生的多载波光源. (a)  $\gamma_1=0.50, \gamma_2=0.40, \alpha_1=0, \alpha_2=0, V_{PM}=3.0$ ;  
 (b)  $\gamma_1=0.99, \gamma_2=0.99, \alpha_1=0, \alpha_2=0, V_{PM}=3.0$ ; (c)  $\gamma_1=0.99, \gamma_2=0.99, \alpha_1=2.5, \alpha_2=2.0, V_{PM}=3.0$ ;  
 (d)  $\gamma_1=0.99, \gamma_2=0.99, \alpha_1=2.5, \alpha_2=2.0, V_{PM}=5.2$

Fig. 5 Multicarrier optical source based on two EAM cascaded PM under different parameters. (a)  $\gamma_1=0.50, \gamma_2=0.40, \alpha_1=0, \alpha_2=0, V_{PM}=3.0$ ;  
 (b)  $\gamma_1=0.99, \gamma_2=0.99, \alpha_1=0, \alpha_2=0, V_{PM}=3.0$ ; (c)  $\gamma_1=0.99, \gamma_2=0.99, \alpha_1=2.5, \alpha_2=2.0, V_{PM}=3.0$ ;  
 (d)  $\gamma_1=0.99, \gamma_2=0.99, \alpha_1=2.5, \alpha_2=2.0, V_{PM}=5.2$

比较基于单个 EAM 级联 PM 的多载波发生器与基于两个 EAM 级联 PM 的多载波发生器的仿真结果 (图 3 和图 5) 可知, 在其中一个 EAM 参数及 PM 参数均相同的情况下, 使用两个 EAM 可使多载波光源更平坦. 根据文献[13]和文献[8], 在理论上, 当时域为平顶的光脉冲经过抛物线形相位调制时, 经过相位调制器后, 根据时间-频率变换关系, 可以获得平坦的频率梳. 但实际上, 这种理想情况只能近似获得. 文献[8]基于该理论, 采取措施使进入 PM 的光脉冲的下降沿更锐化, 减小了多载波光源边缘的“蝙蝠耳”, 从而提高了多载波光源的平坦度, 本文采用级联两个 EAM 的方式来提升多载波光源的平坦度即利用了这一点. 图 6 对比了 CW 激光分别进入单个 EAM 输出的光脉冲信号和进入两个级联 EAM 输出的光脉冲信号, 可以看到, 级联 EAM 输出的光脉冲信号比单个 EAM 输出的光脉冲信号更锐化. 因此, 增加一个 EAM 能够有效改善多载波光源的平坦度.

### 3 多载波光源的影响因素

为了进一步分析影响基于两个 EAM 级联 PM 产生多载波光源的因素, 分别对 EAM 的调制指数和啁啾因子、PM 的驱动信号幅度、调制器驱动信号的相位差等参数对产生多载波光源的影响进行研究.

选择 EAM 调制指数变化范围为 0~0.99, 保持  $\alpha_1=0, \alpha_2=0$  和  $V_{PM}=3.0$ , 分 3 种情况进行仿真和数据分析.

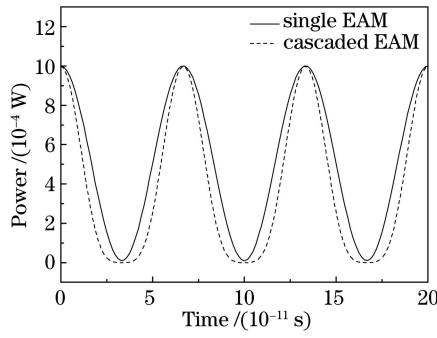


图 6 CW 激光分别进入单个 EAM 和级联 EAM 时输出的光脉冲信号

Fig. 6 Optical pulse outputs of CW lasers from single EAM and cascaded EAM

1)  $\gamma_1, \gamma_2$  同时以相同的变化间隔从  $0 \sim 0.99$ , 且在变化过程中保持相等,  $\gamma_1, \gamma_2$  对多载波光源平坦度的影响如图 7 中的黑色  $\blacktriangle$  标记所示, 变化过程中子载波数均为 11 个。可以看到  $\gamma_1, \gamma_2$  从 0 变化到 0.99 时, 多载波光源的平坦度从 8.7 dB 提升到 4.2 dB。

2) 在第 1 个 EAM 的调制指数  $\gamma_1 = 0.99$  的情况下, 第 2 个 EAM 调制指数  $\gamma_2$  从 0 变化至 0.99 时对多载波光源平坦度的影响, 如图 7 中黑色  $\blackstar$  标记所示, 变化过程中子载波数目均为 11。可以看到, 多载波光源的平坦度变化较小, 从 3.7 dB 缓慢变化到 4.2 dB。

3) 在第 2 个 EAM 的调制指数  $\gamma_2 = 0.99$  的情况下, 第 1 个 EAM 调制指数  $\gamma_1$  从 0 变化至 0.99 时对多载波光源平坦度的影响, 如图 7 中黑色  $*$  标记所示, 变化过程中子载波数目也为 11。即多载波光源的平坦度变化与第 2 种情况类似。

由图 7 可知, 针对两个 EAM 的调制指数  $\gamma_1, \gamma_2$  而言,  $\gamma_1, \gamma_2$  同时变化时, 对多载波平坦度影响较大; 当  $\gamma_1, \gamma_2$  中的某一个调制指数固定为 0.99, 另外一个调制指数从 0 变化到 0.99 时, 变化趋势基本相同, 对多载波的平坦度影响较小; 而  $\gamma_1, \gamma_2$  对多载波光源的子载波数目影响较小。

根据 PM 的调制原理, 驱动信号幅度对产生多载波光源的子载波数目有较大影响, 为了研究 PM 的驱动信号幅度对多载波光源的子载波数目的影响趋势, 在假设两个 EAM 的调制系数  $\gamma_1, \gamma_2$  均为 0.99 的情况下, 保持  $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0$  不变, 通过改变驱动信号幅度, 对平坦度在 5 dB 范围内的子载波数目进行分析, 其平坦度和子载波数目变化趋势结果如图 8 所示。可见, 多载波光源的子载波数目随着驱动信号幅度的增大而增加, 且呈线性关系。同时, 驱动信号幅度对多载波光源的平坦度也有一定的影响。

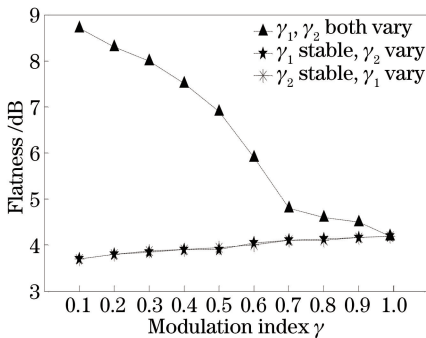


图 7 EAM 调制指数对多载波光源平坦度的影响

Fig. 7 Flatness of multicarrier optical source versus the EAM modulation index

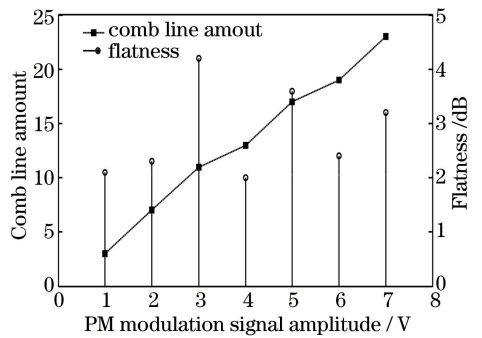


图 8 PM 驱动信号幅度与子载波数目以及平坦度的关系

Fig. 8 Comb line amount and flatness of multicarrier optical source versus PM modulation signal amplitude

为了研究啁啾因子对产生多载波光源的影响, 在两个 EAM 的调制指数  $\gamma_1, \gamma_2$  均等于 0.99,  $V_{PM} = 7.0$  的情况下, 分析两个啁啾因子之和对多载波光源的影响, 其结果如图 9 所示。其中, 图 9(a) 为在允许平坦度在 5 dB 范围内的最大子载波数目, 以及多载波光源的平坦度与 EAM 啁啾因子之和的关系; 图 9(b) 为较小平坦度下的最大子载波数目, 以及多载波光源的平坦度与 EAM 啁啾因子之和的关系。由图 9 可知, 增大 EAM 啁啾因子可以使多载波数目增加; 而最优化的子载波数目和多载波光源的平坦度, 则需要折中考虑选

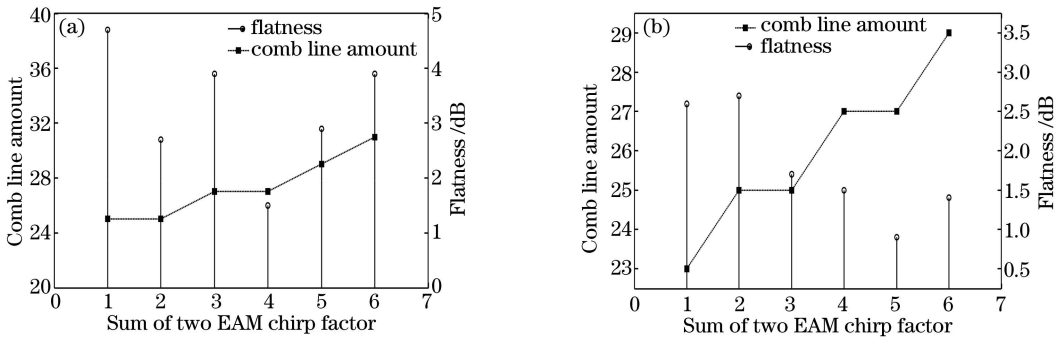


图 9 两个 EAM 啁啾因子之和与多载波光源的关系。(a)平坦度在 5 dB 范围内；(b) 平坦度在 3.5 dB 范围内

Fig. 9 Multicarrier optical source versus sum of two EAM chirp factor.

(a) Flatness within 5 dB; (b) flatness within 3.5 dB

取 EAM 的啁啾因子。

此外,研究了加载在 EAM 和 PM 上的驱动信号的相位差对产生多载波光源的平坦度的影响。图 10 为保持其他参数不变的情况下[与图 5(d)参数设置一致],加载在 EAM 上的驱动信号具有相同的初始相位

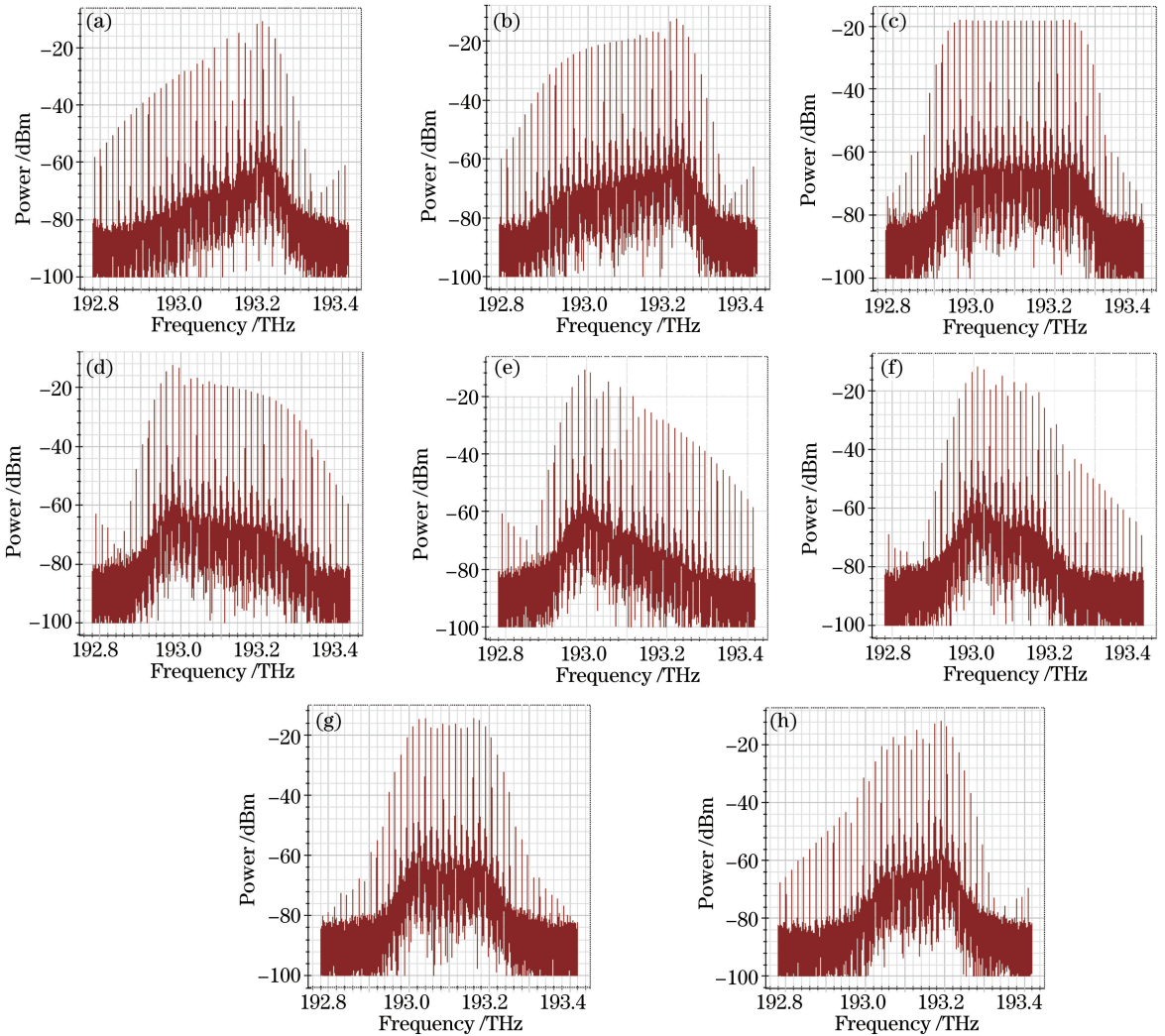


图 10  $\varphi_1 = 90^\circ$ , 不同的  $\varphi_2$  所产生的多载波光源。(a)  $\varphi_2 = 0^\circ$ ; (b)  $\varphi_2 = 45^\circ$ ; (c)  $\varphi_2 = 90^\circ$ ; (d)  $\varphi_2 = 135^\circ$ ; (e)  $\varphi_2 = 180^\circ$ ; (f)  $\varphi_2 = 225^\circ$ ; (g)  $\varphi_2 = 270^\circ$ ; (h)  $\varphi_2 = 315^\circ$

Fig. 10 Multicarrier optical source with  $\varphi_1 = 90^\circ$  and different  $\varphi_2$ . (a)  $\varphi_2 = 0^\circ$ ; (b)  $\varphi_2 = 45^\circ$ ; (c)  $\varphi_2 = 90^\circ$ ; (d)  $\varphi_2 = 135^\circ$ ; (e)  $\varphi_2 = 180^\circ$ ; (f)  $\varphi_2 = 225^\circ$ ; (g)  $\varphi_2 = 270^\circ$ ; (h)  $\varphi_2 = 315^\circ$

$\varphi_1 = 90^\circ$ , 而加载在 PM 的驱动信号的初始相位  $\varphi_2$  分别为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$  和  $315^\circ$  时产生的多载波光源。可以看到, EAM 和 PM 的驱动信号的相位差对产生多载波光源的平坦度影响较大, 当 EAM 和 PM 的驱动信号的相位差 ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) 为零时产生的多载波光源的平坦度最好。

最后, 将所提方案与已报道的级联外调制器相关方案的结果进行总结对比, 如表 3 所示。基于 EAM 级联 PM 的多载波光源发生器与基于 PM 或者 MZM 的多载波光源发生器相比, 在驱动电压较小的情况下, 可以产生子载波数目较多的多载波光源, 并且具有较好的平坦度。

表 3 不同方案所产生多载波光源的对比

Table 3 Comparison of the multicarrier optical source with different schemes

Different schemes	Driving signal	Frequency spacing /GHz	Comb line amount	Flatness /dB
DDMZM <sup>[4]</sup>	High	10.0	19	4.30
DDMZM <sup>[5]</sup>	High	12.5	9	1.20
DPMZM <sup>[6]</sup>	High	25.0	5	0.10
IM+IM+PM <sup>[8]</sup>	High	10.0	38	1.00
PM+PM+PM <sup>[9]</sup>	Normal	12.5	50	10.00
PM+PM+PM <sup>[10]</sup>	Normal	25.0	19	3.00
PolM+PolM <sup>[11]</sup>	Normal	17.5	5	0.49
PolM+PM <sup>[12]</sup>	Normal	10.0	19	1.65
Proposed EAM+EAM+PM	Normal (simulation)	15.0 (simulation)	19 (simulation)	0.10 (simulation)

## 4 结 论

提出一种基于级联 EAM 和 PM 的多载波光源发生器的设计方案, 通过理论推导与仿真分析证明了该方法的可行性。对基于单个 EAM 级联 PM 的多载波光源发生器产生的多载波光源, 与基于两个 EAM 级联 PM 的多载波光源发生器产生的多载波光源进行了对比分析, 利用基于两个 EAM 级联 PM 的多载波光源发生器实现了频率间隔为 15 GHz、平坦度在 0.1 dB 范围内的 19 个子载波的多载波光源。受实验室硬件条件的限制, 没有进行具体的硬件实验, 但是所提出的基于 EAM 级联 PM 产生多载波光源的方案经理论分析是可行的, 有望作为较高质量的频率锁定多载波光源的实现方案之一。后续将该方案进行更详细的参数优化, 力争从硬件上进行验证。

## 参 考 文 献

- 1 Torres-Company V, Weiner A M. Optical frequency comb technology for ultra-broadband radio-frequency photonics[J]. Laser & Photonics Reviews, 2014, 8(3): 368-393.
- 2 Wang J P, Nan Y B, Lou C Y, *et al.* Multiwave-length CW source with precise 25-GHz channel spacing based on longitudinal mode-carving of supercontinuum[J]. Chinese Optics Letters, 2004, 2(1): 7-8.
- 3 Anandarajah P M, Mahe R, Xu Y Q, *et al.* Generation of coherent multicarrier signals by gain switching of discrete mode lasers[J]. IEEE Photonics Journal, 2011, 3(1): 112-122.
- 4 Sakamoto T, Kawanishi T, Izutsu M. Widely wavelength tunable ultra-flat frequency comb generation using conventional dual-drive Mach-Zehnder modulator[J]. Electronics Letters, 2007, 43(19): 1039-1040.
- 5 Mishra A K, Schmogrow R, Tomkos I, *et al.* Flexible RF-based comb generator[J]. IEEE Photonic Technology Letters, 2013, 25(7): 701-704.
- 6 Wang Q, Huo L, Xing Y F, *et al.* Ultra-flat optical frequency comb generator using a single-driven dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. Optics Letters, 2014, 39(10): 3050-3053.
- 7 Fujiwara M, Kani J, Suzuki H, *et al.* Flattened optical multicarrier generation of 12.5 GHz spaced 256 channels based on sinusoidal amplitude and phase hybrid modulation[J]. Electronics Letters, 2001, 37(15): 967-968.
- 8 Wu R, Supradeepa V R, Christopher M L, *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.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 He C, Pan S, Guo R, *et al.* Ultraflat optical frequency comb generated based on cascaded polarization modulators[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3834-3836.
- 12 Chen C H, 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.
- 13 Torres-Company V, Lancis J, Andrés P. Lossless equalization of frequency combs[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(16): 1822-1824.
- 14 Zhang J W, Yu J J, Chi N, *et al.* Improved multi-channel multicarrier generation using gain-independent multi-channel frequency shifting recirculating loop[J]. *Optics Express*, 2012, 20(28): 29599-29604.
- 15 Tian F, Zhang X G, Li J P, *et al.* Generation of 50 stable frequency-locked optical carriers for Tb/s multicarrier optical transmission using a recirculating frequency shifter[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(8): 1085-1091.
- 16 Supradeepa V R, Weiner A M. Bandwidth scaling and spectral flatness enhancement of optical frequency combs from phase-modulated continuous-wave lasers using cascaded four-wave mixing[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(15): 3066-3068.
- 17 Ataie V, Myslivets E, Kuo B P P, *et al.* Spectrally equalized frequency comb generation in multistage parametric mixer with nonlinear pulse shaping[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(4): 840-846.
- 18 Kippenberg T J, Holzwarth R, Diddams S A. Microresonator-based optical frequency combs[J]. *Science*, 2011, 332(6029): 555-559.
- 19 Fan Yiyi, Feng Suchun. Progress in optical frequency-locked multicarrier source[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(2): 020007.
- 范依依, 冯素春. 频率锁定多载波光源的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(2): 020007.