

# 利用线性 IQ 调制器抑制谐波串扰的多载波产生方案

孙 璐 林嘉川 李建蕊 唐先锋 席丽霞 张晓光

(北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

**摘要** 为抑制循环频移器(RFS)中 IQ 调制器的非线性引起的三阶串扰,提高多载波光源输出的平坦度和载噪比,提出了基于线性 IQ 调制器(LIQM)的循环频移器结构(LIQM-RFS)的多载波产生方案。理论分析得出线性 IQ 调制器在有效抑制三阶串扰的情况下,对射频信号驱动电压的选择范围是 IQ 调制器的两倍,特别是能够在一阶信号转换效率较高的范围内实现对三阶串扰的抑制。利用这一特性,基于 LIQM-RFS 的多载波发生器在保证输出子载波平坦度的同时可以降低所需的掺铒光纤放大器(EDFA)增益,从而降低光纤放大器引起的自发辐射噪声的功率,提高载噪比。仿真结果表明基于 LIQM-RFS 的多载波发生器输出载波的载噪比较传统 RFS 提高约 9 dB,同时可以保证约 2.95 dB 的平坦度。

**关键词** 光通信;线性 IQ 调制器;循环频移器;噪声抑制

**中图分类号** TN911.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1205001

## Scheme for Suppressing Harmonic Crosstalk in Multi-Carrier Generation Using Linear IQ Modulator

Sun Lu Lin Jiachuan Li Jianrui Tang Xianfeng Xi Lixia Zhang Xiaoguang

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** In order to suppress the third-order crosstalk caused by the nonlinearity of the IQ modulator in the recirculating frequency shifter (RFS), and to improve the flatness of the multi-carriers and carrier to noise ratio (CNR), a modified RFS scheme based on linear IQ modulator (LIQM-RFS) is presented to generate multi-carriers. According to theoretical analysis, the range of driving voltage of linear IQ modulator (LIQM) radio frequency (RF) source which can be selected is twice of that of IQ modulator, with the premise of effective suppression of the third-order crosstalk. In particularly, the third-order crosstalk loss can still be repressed in a range where the first-order harmonic component of LIQM is shifted at a higher efficiency. With this feature, LIQM-RFS-based multi-carrier generator ensures the flatness of subcarriers, meanwhile it requires lower erbium-doped fiber amplifier (EDFA) gain. Therefore, the power of amplified spontaneous emission noise caused by the optical amplifier is lower, by which the CNR is improved. The simulation results show that CNR of multi-carrier generated by LIQM-RFS multi-carrier generator increases by about 9 dB compared to traditional RFS, and the subcarrier flatness of about 2.95 dB can be ensured.

**Key words** optical communications; linear IQ modulator; recirculating frequency shifter; noise suppression

**OCIS codes** 060.5060; 060.3510; 060.4080; 060.2330

## 1 引言

超信道传输技术是目前实现高速大容量光纤传

输的研究热点之一。利用单个激光器的多载波发生器是实现上述方案的关键组成部分<sup>[1-4]</sup>。目前,基

**收稿日期**: 2014-06-06; **收到修改稿日期**: 2014-06-30

**基金项目**: 国家自然科学基金(61205065)、北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室开放课题(IPOC2013B005)、北京邮电大学青年科研创新计划(2014RC1201)

**作者简介**: 孙璐(1992—),女,硕士研究生,主要从事多载波方面的研究。E-mail: sunlu\_nox@gmail.com

**导师简介**: 张晓光(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信领域方面的研究。

E-mail: xgzhang@bupt.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

于单个激光器实现多载波输出的方案主要有三种：基于非线性效应的超连续谱、强度或相位调制器级联及循环频移器(RFS)的方案<sup>[5-9]</sup>。其中,利用RFS产生多载波的方案具有载波数目较多,频率间隔可调,低驱动电压和高稳定性等优点。然而,RFS环路中的IQ调制器固有的非线性所产生的三阶谐波分量作为输出多载波的主要谐波串扰严重影响了多载波平坦度<sup>[10]</sup>。为降低三阶串扰,常使用低驱动电压进行调制,但此时IQ调制器的调制损耗较高,需要掺铒光纤放大器(EDFA)补偿RFS环路损耗。然而大EDFA增益的情况下,EDFA所引入的自发辐射(ASE)噪声功率较大,这些噪声会随着循环次数的增加不断积累,降低输出载波的信噪比<sup>[10-12]</sup>。

本文提出一种改进的基于RFS的多载波发生器。用线性IQ调制器(LIQM)<sup>[13]</sup>取代传统RFS结构中的IQ调制器。理论研究了LIQM的调制原理,并分析其调制损耗和对三阶谐波分量的抑制能力,综合考虑基于LIQM的RFS结构(LIQM-RFS)抑制三阶串扰的同时能降低所需EDFA的增益,从而提高输出载波平坦度和载噪比(CNR)。根据理论分析选择

合适的参数进行仿真,结果表明相比于传统RFS(IQ-RFS),基于LIQM-RFS的改进方案产生的多载波的平坦度和载噪比有了较大改善。

## 2 基于线性IQ调制器的循环频移多载波发生器

LIQM由两个线性调制器(LM)<sup>[13]</sup>和一个相位调制器(PM)组成,其结构如图1所示。其中,LM是由两个工作在推挽模式下的马赫-曾德尔调制器(MZM)组成,分别偏置在相位相反的消光点,并且第二级MZM采用非对称的并联结构,可以削弱调制过程中的非线性效应。

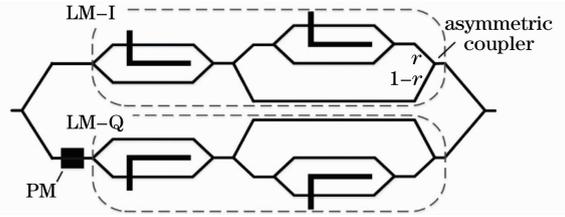


图1 线性IQ调制器

Fig.1 Linear IQ modulator

LM的传输函数为

$$T = \sqrt{1-r} \sin\left[\frac{\pi \cdot V(t)}{2V_\pi}\right] + \sqrt{r} \sin\left[\frac{-\pi \cdot V(t)}{2V_\pi}\right] \cos\left[\frac{\pi \cdot V(t)}{2V_\pi}\right] = \sqrt{1-r} \sin\left[\frac{\pi \cdot V(t)}{2V_\pi}\right] - \frac{\sqrt{r}}{2} \sin\left[\frac{\pi \cdot V(t)}{V_\pi}\right], \quad (1)$$

式中 $V_\pi$ 为MZM的半波电压, $V(t)$ 为调制信号, $r$ 为非对称Y型器的光耦合比例。根据文献[13],选择 $r = 0.12$ 的非对称Y型器效果最好。由于LM具有良好的线性调制性能,用LM-I和LM-Q代替传统IQ调制器的MZM-I和MZM-Q两臂,可以构成LIQM。LIQM的传输函数为

$$T = \left\{ \sqrt{1-r} \sin[\delta_m u_1(t)] - \frac{\sqrt{r}}{2} \sin[2\delta_m u_1(t)] \right\} + \exp\left(j \frac{\pi}{2}\right) \left\{ \sqrt{1-r} \sin[\delta_m u_Q(t)] - \frac{\sqrt{r}}{2} \sin[2\delta_m u_Q(t)] \right\}, \quad (2)$$

式中 $u_1(t), u_Q(t)$ 分别为LM-I路和LM-Q路的调制信号, $\delta_m$ 为调制深度,即 $\delta_m = \frac{\pi V_{pp}}{2V_\pi}$ , $V_{pp}$ 为调制信号的幅值。令 $u_1(t) = \cos(2\pi f_m t), u_Q(t) = \sin(2\pi f_m t)$ ,其中 $f_m$ 为调制信号的频率。PM调制在 $\frac{\pi}{2}$ ,I、Q两支路的射频信号在相位上相差 $90^\circ$ 。

### 2.1 基于LIQM的RFS多载波发生器中三阶串扰的分析

调制器是实现种子光频移产生子载波的关键器件,但其输出包含其他谐波分量。以IQ调制器为例,在五阶及五阶以上谐波分量<sup>[10]</sup>较小的情况下产生的三阶谐波分量是影响多载波平坦度的主要串扰量,如下式所示:

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cdot \left[ \underbrace{J_1(\delta_m) \exp(j2\pi f_m t)}_{\text{first order signal component}} - \underbrace{J_3(\delta_m) \exp(-j6\pi f_m t)}_{\text{third order harmonic component}} \right] + E_{in}(t) \cdot \left[ \underbrace{J_5(\delta_m) \exp(j10\pi f_m t)}_{\text{fifth order harmonic component}} - \underbrace{J_7(\delta_m) \exp(-j14\pi f_m t)}_{\text{seventh order harmonic component}} + \dots \right]. \quad (3)$$

改进的LIQM的调制输出为

$$\begin{aligned}
 E_{\text{out}}(t) &= \frac{E_{\text{in}}(t)}{2} \cdot [I(t) + Q(t)] = \\
 & 2\sqrt{1-r} \left\{ \sum_{n=1} J_{2n-1}(\delta_m) \cos[(2n-1)\theta] + j \cdot \sum_{n=1} (-1)^{n+1} J_{2n-1}(\delta_m) \sin[(2n-1)\theta] \right\} - \\
 & \sqrt{r} \left\{ \sum_{n=1} J_{2n-1}(2\delta_m) \cos[(2n-1)\theta] + j \cdot \sum_{n=1} (-1)^{n+1} J_{2n-1}(2\delta_m) \sin[(2n-1)\theta] \right\}, \\
 E_{\text{out}}(t) &= \underbrace{E_0[A_1 \exp[j2\pi(f_0 + f_m)t]}_{\text{first order signal component}} - \underbrace{E_0[A_3 \exp[j2\pi(f_0 - 3f_m)t]}_{\text{third order harmonic component}} + \\
 & \underbrace{E_0[A_5 \exp[j2\pi(f_0 + 5f_m)t]}_{\text{fifth order harmonic component}} - \underbrace{E_0[A_7 \exp[j2\pi(f_0 - 7f_m)t]}_{\text{seventh order harmonic component}} + \dots, \tag{4}
 \end{aligned}$$

式中

$$\begin{aligned}
 I(t) &= \sin(\delta_m \cos \theta) [\sqrt{1-r} - \sqrt{r} \cos(\delta_m \cos \theta)], \\
 Q(t) &= \sin(\delta_m \sin \theta) [\sqrt{1-r} - \sqrt{r} \cos(\delta_m \sin \theta)], \\
 A_1 &= 2\sqrt{1-r} J_1(\delta_m) - \sqrt{r} J_1(2\delta_m), A_3 = 2\sqrt{1-r} J_3(\delta_m) - \sqrt{r} J_3(2\delta_m), \\
 A_5 &= 2\sqrt{1-r} J_5(\delta_m) - \sqrt{r} J_5(2\delta_m), A_7 = 2\sqrt{1-r} J_7(\delta_m) - \sqrt{r} J_7(2\delta_m),
 \end{aligned}$$

$E_{\text{in}}(t) = E_0 \exp(j2\pi f_0 t)$  为输入种子信号,  $E_0$  为输入光场幅度,  $J_n$  为  $n$  阶贝塞尔函数。由式(4)可知, 各谐波分量系数与调制深度  $\delta_m$  有关, 为得到最优的三阶串扰抑制效果, 需要进一步分析。

图 2(a) 为调制器在不同调制深度下输出的一阶信号和三阶、五阶谐波分量的功率值曲线。由图可见, 在驱动信号  $V_{\text{pp}} \leq 0.3 V_\pi$  时三阶谐波分量可以忽略不计, 但此时调制器的功率转换效率较低, 导致一阶信号分量需要较大的增益补偿。LIQM 三阶谐波分量功率相比 IQ 三阶谐波分量功率有所降低, 在有效的调制深度范围内, LIQM 对三阶串扰的抑制最大提高了 48.4 dB。而且在  $0.55 \leq V_{\text{pp}}/V_\pi \leq 1.08$  范围内, 不仅三阶串扰被抑制, 一阶信号的损耗也很低。由图 2(a) 和(4)式可知, 抑制三阶谐波分量的代价是五阶谐波分量功率增加, 但是在一般的调制深度范围内, 五阶谐波分量仍足够小, 可以忽

略不计。例如,  $V_{\text{pp}}/V_\pi \leq 0.85$  时三阶和五阶谐波分量功率相当, 但是相比一阶分量小约 42 dB, 引起的串扰均可忽略;  $0.85 \leq V_{\text{pp}}/V_\pi \leq 1$  时, 三阶谐波分量功率出现向下尖峰, 引起的串扰远小于五阶谐波分量, 而五阶谐波分量引起的串扰很小。图 2(b) 更直接地反映了三阶、五阶谐波分量对一阶信号的影响, 该影响用无杂散动态范围(SFDR)表示。为实现高平坦度的多载波输出, 三阶串扰值越小越好, 即 SFDR 越大越好。当 SFDR 大于 30 dB 时可以得到较高的平坦度。由图 2(b) 可知, LIQM 比 IQ 调制器拥有更高的 SFDR, 并且在 SFDR 大于 37.8 dB 条件下其可取驱动信号范围比 IQ 调制器明显增大。此时对应于 IQ 调制器, 驱动电压  $V_{\text{pp}} \leq 0.3 V_\pi$ , 而对应于 LIQM, 驱动电压  $V_{\text{pp}} \leq 1.0 V_\pi$ 。此外, 当  $0.55 \leq V_{\text{pp}}/V_\pi \leq 1.08$  时, LIQM 的 SFDR 大于 30 dB, 最高可达 61.8 dB, 而 IQ 调制器的 SFDR 值

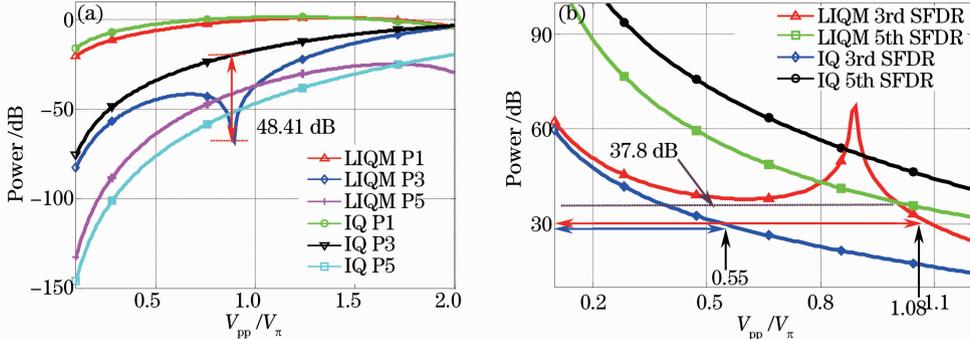


图 2 (a) LIQM 和 IQ 调制输出一阶、三阶和五阶分量功率随  $V_{\text{pp}}/V_\pi$  的变化图;

(b) LIQM 和 IQ 调制器 SFDR 随  $V_{\text{pp}}/V_\pi$  的变化图

Fig. 2 (a) Power of 1st, 3rd and 5th harmonic waves for LIQM and IQ versus  $V_{\text{pp}}/V_\pi$ ;

(b) SFDR of LIQM and IQ versus  $V_{\text{pp}}/V_\pi$

已低于30 dB。在  $0.8 \leq V_{pp}/V_{\pi} \leq 1.0$  范围内 LIQM 五阶谐波分量对一阶信号的影响比三阶谐波分量大,故为五阶串扰,而三阶谐波分量可忽略不计。

## 2.2 基于 LIQM 的 RFS 多载波发生器中噪声特性的分析

除三阶串扰对多载波的影响外,循环频移器中 EDFA 引起的放大自发辐射噪声循环积累将使输出子载波的载噪比降低。ASE 噪声服从高斯分布  $N \sim (0, \sigma^2)$ ,  $\sigma^2 = P_{ASE} = S(f)B$ ,  $P_{ASE}$  为 ASE 噪声功率,  $B$  为带宽,  $S(f)$  为 ASE 噪声谱密度。对于宽带放大器, ASE 噪声谱密度近似为常数。经过  $N$  次循环后, ASE 噪声的功率为

$$P_{ASE-N} = S(f)B = \frac{NF_n(G-1)hfB}{2}, \quad (5)$$

式中  $F_n$  为放大器噪声指数,  $h$  为普朗克常数,  $f$  为光频,  $G$  为 EDFA 的增益<sup>[11,14]</sup>。由此可知, ASE 噪声的功率正比于  $N$  和 EDFA 增益  $G$ , 增益越小, 引入的噪声功率随之减小。

当  $0.55 \leq V_{pp}/V_{\pi} \leq 1.08$  且 SFDR 大于 30 dB 时, 基于 LIQM 的多载波产生器的调制损耗(调制器输出一阶信号降低的功率)低于基于 IQ 调制器的多载波产生器, 如图 3 所示, 当 SFDR 为 43 dB 时, 调制损耗降低 6.67 dB。调制损耗越小, 需要补偿的增益  $G$  越小, 由(5)式可知 EDFA 所引入的噪声功率也将降低, 这对于提高多载波的载噪比是十分有利的。

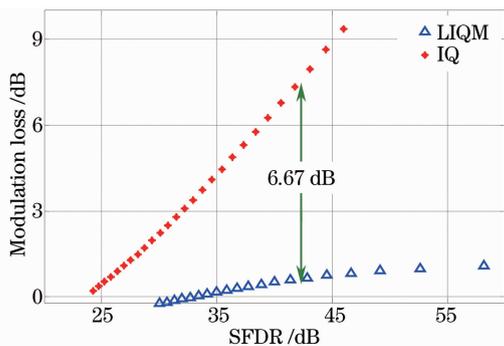


图 3 相同 SFDR 对应 LIQM 和 IQ 的调制损耗

Fig. 3 Modulation loss of LIQM and IQ at the same SFDR

## 3 基于 LIQM 的 RFS 多载波输出

基于 LIQM 的多载波发生器结构如图 4 所示。激光器产生频率为  $f_0$  的种子光, 经过一个 50:50 耦合器被分为两部分, 其中一部分直接输出, 另一部分经过耦合器进入 LIQM 进行调制, 输出载波经过带通滤波器(BPF)、及偏振控制器(PC)组成的环路。

BPF 用来控制输出子载波数目, PC 用来控制光信号的偏振态, EDFA 用来补偿环路损耗, 同时也不可避免地引入 ASE 噪声。LIQM 由频率为  $f_m$  的射频(RF)信号源驱动, 通过加载合适的直流偏压来实现线性调制和单边带调制。频率为  $f_0$  的种子光经过一次循环后输出频率为  $f_0 + f_m$  的子载波, 第二次循环后输出频率为  $f_0 + 2f_m$  的子载波, 经过  $N$  次循环后, 就产生了频率为  $f_0, f_0 + f_m, f_0 + 2f_m, \dots, f_0 + Nf_m$  的多载波。

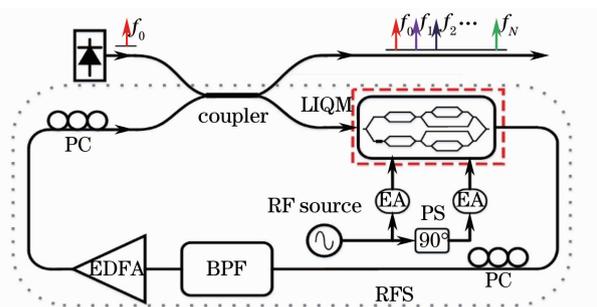


图 4 基于 LIQM 的多载波发生器

Fig. 4 LIQM-RFS multi-carrier generator

忽略五阶及五阶以上谐波串扰, RFS 的传输函数为

$T = [\exp(j2\pi f_m t) + b \exp(-j6\pi f_m t)] \exp(j\phi_{RT})$ , 式中  $\exp(j\phi_{RT})$  为每次循环引入的随机相位,  $b = -A_3/A_1$  为归一化三阶串扰系数。  $N$  次循环后输出  $E_N(t)$  可以简化为

$$E_N(t) = E_{in}(t) \cdot \sum_{n=0}^N T^n \approx E_{in}(t) \cdot \sum_{n=0}^N \{ \exp(j2\pi n f_m t) + nb \exp[-j2\pi(n-4)f_m t] \} \exp(jn\phi_{RT}). \quad (6)$$

在此结构中 IQ 调制器产生的三阶串扰和 EDFA 的放大自发辐射噪声经过多次循环积累, 造成输出多载波不平坦, 载噪比降低。鉴于此, 利用 LIQM 对三阶串扰的高抑制能力, 可以产生平坦度较高的多载波。此外, 选择合适的调制深度, 可以提高载噪比。

## 4 LIQM-RFS 产生多载波的仿真实验

仿真结构如图 4 所示, 输入种子光功率为 10 dBm, 驱动信号  $f_m = 12.5$  GHz, 滤波器带宽为 375 GHz, RFS 在每次循环中引入随机相位。图 5 为该条件下仿真产生的 30 个子载波的频谱图。SFDR 相同时, IQ-RFS 和 LIQM-RFS 具有相近的平坦度, 但是 IQ-RFS 的调制损耗高于 LIQM, 需要较大的 EDFA 增益补偿, 进而导致载噪比降低, 图 5

(a)和(b)分别为 LIQM-RFS 和 IQ-RFS 在 SFDR 为 37.7 dB 时相应的多载波输出,图 5(c)和(d)为 LIQM-RFS 和 IQ-RFS 在 SFDR 为 43 dB 时相应的多载波输出。其中图 5(a)为 LIQM-RFS 由  $V_{pp}=0.97 V_{\pi}$  的射频信号调制产生的多载波,此时调制损耗较低,故子载波的载噪比较高;图 5(b)为 IQ-RFS 由  $V_{pp}=0.35 V_{\pi}$  的射频信号调制产生的多载波,其调制损耗高于图 5(a),故其载噪比比图 5(a)低 9 dB。图 5(c)为 LIQM-RFS 由  $V_{pp}=0.8 V_{\pi}$  的射频信号调制产生的多载波,此时调制损耗比  $V_{pp}=0.97 V_{\pi}$  时高,故其载噪比比图 5(a)低 2.6 dB,但是仍比图 5(b)高约 6.4 dB;图 5(d)为 IQ-RFS 由  $V_{pp}=0.26 V_{\pi}$  的射频信号调制产生的多载波,虽然其平坦度良好,但此时 IQ-RFS 的调制损耗很大,其载噪比在四组实验中最低。由于图 5(a)和(b)的 SFDR 值比图 5(c)和(d)的 SFDR 值低,所以图 5

(a)和(b)的平坦程度低于图 5(c)和(d)。由于仿真过程中加入随机相位噪声,多载波的平坦度劣于忽略相位噪声而循环产生的多载波,而实际实验过程中,随机相位噪声往往是不可忽略的。显然,LIQM-RFS 生成的多载波既保证输出载波平坦,又有较高的载噪比。LIQM-RFS 的载噪比比 IQ-RFS 的载噪比提高 6.4 dB~9 dB。

IQ 调制器在  $V_{pp} \geq 0.55 V_{\pi}$  时处于低调制损耗区域(调制损耗小于 2 dB),但此时 SFDR 小于 30 dB,三阶串扰对输出载波的影响明显增加,如图 5(e)和(f)所示。其中图 5(e)为  $V_{pp}=0.7 V_{\pi}$  时调制产生的多载波,此时 IQ 调制器的调制损耗近似于 LIQM-RFS 在  $V_{pp}=0.97 V_{\pi}$  时的调制损耗,EDFA 增益相近,ASE 噪声功率相近;图 5(f)为 IQ-RFS 在  $V_{pp}=0.55 V_{\pi}$  时调制产生的多载波,此时

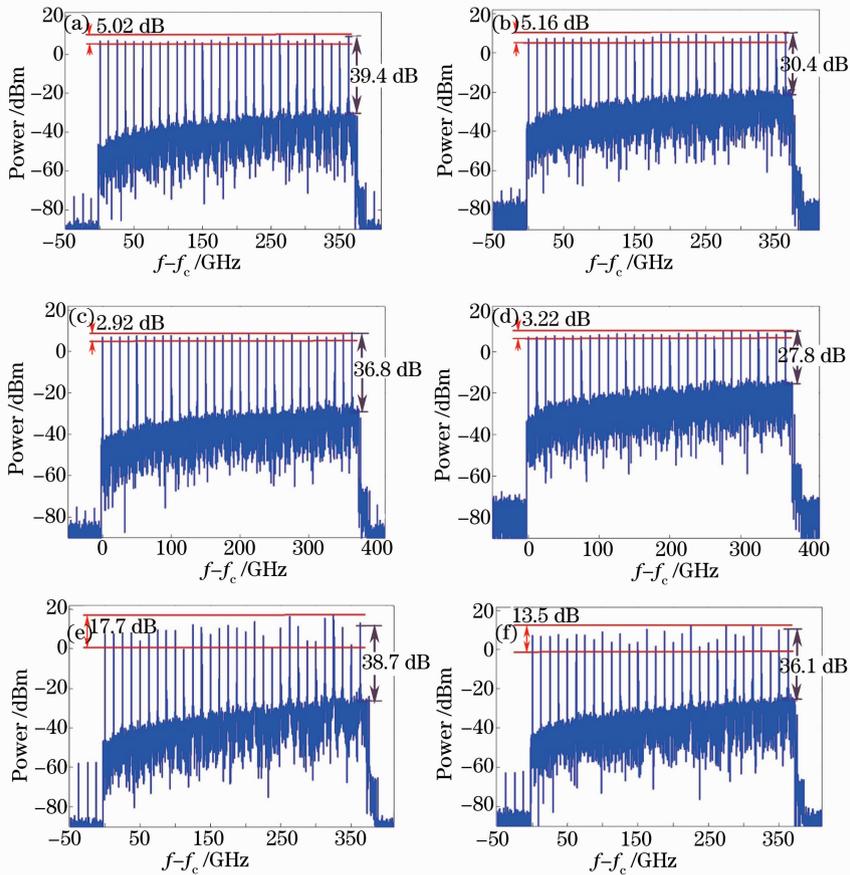


图 5 (a) LIQM-RFS 和(b) IQ-RFS 在 SFDR 等于 37.7 dB 时输出 30 个子载波的频谱图及相应平坦度和载噪比; (c) LIQM-RFS 和(d) IQ-RFS 在 SFDR 等于 43 dB 时输出 30 个子载波的频谱图及相应平坦度和载噪比; IQ-RFS 输出第 30 个子载波载噪比达到(e) 38.7 dB 和(f) 36.1 dB 时的平坦度

Fig. 5 Simulation results of spectrogram with the corresponding flatness and CNR of 30 multi-carriers generated by LIQM-RFS and IQ-RFS. (a) By LIQM-RFS and (b) IQ-RFS respectively when SFDR is 37.7 dB; (c) by LIQM-RFS and (d) IQ-RFS respectively when SFDR is 43 dB; by IQ-RFS when CNR is (e) 38.7 dB and (f) 36.1 dB respectively

IQ 调制器的调制损耗近似于 LIQM-RFS 在  $V_{pp} = 0.8 V_{\pi}$  时的调制损耗。显然图 5(e)和(f)的载噪比较高,但输出多载波明显不平坦。换言之,IQ-RFS 不能生成同时满足平坦度和高载噪比的多载波。

## 5 结 论

提出了一种基于 LIQM 的 RFS 多载波发生器。理论分析了 LIQM 对三阶串扰的有效抑制,其低调制损耗的特点降低了对 EDFA 增益的要求,从而抑制了由 ASE 噪声引起的载噪比下降。在引入随机相位噪声的情况下,相比传统 RFS,LIQM-RFS 在  $N$  次循环后的载噪比最高可提高 9 dB,并保证平坦度在 2.5 dB~5.5 dB 范围内。

## 参 考 文 献

- 1 F Tian, X Zhang, L Xi, *et al.*. Experiment of 2.56-Tb/s, polarization division multiplexing return-to-zero 16-ary quadrature amplitude modulation, 25 GHz grid coherent optical wavelength division multiplexing, 800 km transmission based on optical comb in standard single-mode fiber[J]. *Opt Eng*, 2013, 52(11): 116103.
- 2 B Zhu, X Liu, S Chandrasekhar, *et al.*. Ultra-long-haul transmission of 1.2-Tb/s multicarrier no-guard-interval CO-OFDM superchannel using ultra-large-area fiber[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2010, 22(11): 826–828.
- 3 X Liu, S Chandrasekhar, X Chen, *et al.*. 1.12-Tb/s 32-QAM-OFDM superchannel with 8.6-b/s/Hz intrachannel spectral efficiency and space-division multiplexed transmission with 60-b/s/Hz aggregate spectral efficiency[J]. *Opt Express*, 2011, 19(26): B958–B964.
- 4 Zhang Xia, Tian Feng, Zhang Xiaoguang, *et al.*. Study of coherent optical wavelength division multiplexing terabit transmission experiment system based on multi-carrier[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0605005.  
张霞,田风,张晓光,等.基于多载波的相干波分复用太比特传输实验研究[J].中国激光,2014,41(6):0605005.
- 5 Z Li, X Xiao, T Gui, *et al.*. 432-Gb/s direct-detection optical OFDM superchannel transmission over 3040-km SSMF[J]. *IEEE Photon Technol*, 2013, 25(15): 1524–1526.
- 6 T Yamamoto, T Komukai, K Suzuki, *et al.*. Spectrally flattened phase-locked multi-carrier light generator with phase modulators and chirped fibre Bragg grating[J]. *Electronics Lett*, 2007, 43(19): 20071505.
- 7 J Yu, Z Dong, J Zhang, *et al.*. Generation of coherent and frequency-locked multi-carriers using cascaded phase modulators for 10 Tb/s optical transmission system[J]. *J Lightwave Technol*, 2012, 30(4): 458–465.
- 8 C He, S Pan, R Guo, *et al.*. Ultraflat optical frequency comb generated based on cascaded polarization modulators[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(18): 3834–3836.
- 9 J Li, Z Li. Frequency-locked multicarrier generator based on a complementary frequency shifter with double recirculating frequency-shifting loops[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(3): 359–361.
- 10 J Li, X Zhang, L Xi. Generation of stable and high-quality frequency-locked carriers based on improved re-circulating frequency shifter[J]. *Opt Commun*, 2012, 285(20): 4072–4075.
- 11 J Lin, L Xi, J Li, *et al.*. Low noise optical multi-carrier generation using optical-FIR filter for ASE noise suppression in re-circulating frequency shifter loop[J]. *Opt Express*, 2014, 22(7): 7852–7864.
- 12 Zhang Xia, Bai Chenglin, Zhang Xiaoguang. Theoretical analysis and experimental study of noise suppression for high-carrier-noise-rate multi-carrier light source[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1105005.  
张霞,白成林,张晓光.高载噪比多载波光源的噪声抑制理论及实验研究[J].中国激光,2013,40(11):1105005.
- 13 H Yamazaki, H Takahashi, T Goh, *et al.*. Linear optical IQ modulator for high-order multilevel coherent transmission[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2013. OM3C. 1.
- 14 Zhang Kewei, Zhao Wei, Xie Xiaoping, *et al.*. Experimental research of high gain and low noise figure optical amplifier based on erbium-doped fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0506003.  
张珂卫,赵卫,谢小平,等.基于掺铒光纤的高增益低噪声光放大器实验研究[J].光学学报,2013,33(5):0506003.

栏目编辑:史敏