

# 高载噪比多载波光源的噪声抑制理论及实验研究

张霞<sup>1,2</sup> 白成林<sup>1</sup> 张晓光<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 聊城大学山东省光通信科学与技术省重点实验室, 山东 聊城 252000)  
(<sup>2</sup> 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** 基于循环频移器(RFS)载波产生原理,创新性地提出了一种在循环频移环路中插入一个非对称马赫曾德尔干涉仪(AMZI),通过抑制噪声来提高信噪比的多载波产生改进方案。理论推导出光信号功率和放大自发辐射(ASE)噪声功率通过非对称马赫曾德尔干涉仪后的表达式。根据假设,在干涉仪两臂的光程差远远大于 ASE 噪声的相干长度,同时远远小于光信号相干长度的条件下,ASE 噪声功率降低了 3 dB,而光信号功率没有改变。同时通过仿真和实验分别得到了 50 个子载波的输出。结果表明,基于该改进方案产生的多载波的载噪比可以达到 37.5 dB,比传统结构最多提高了 17.5 dB。

**关键词** 光通信;多载波光源;噪声抑制;非对称马赫曾德尔干涉仪

**中图分类号** TN911.22 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1105005

## Theoretical Analysis and Experimental Study of Noise Suppression for High-Carrier-Noise-Rate Multi-Carrier Light Source

Zhang Xia<sup>1,2</sup> Bai Chenglin<sup>1</sup> Zhang Xiaoguang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Optical Communications Science & Technology in Shandong Province, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252000, China

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract** According to the theory of multi-carrier generation based on recirculating frequency shifter (RFS), a modified scheme for multi-carrier generation to improve signal to noise ratio (SNR) through noise suppression by inserting an asymmetric Mach-Zehnder interferometer (AMZI) in the RFS loop is proposed creatively. The formulas of optical signal power and amplified spontaneous emission (ASE) noise power after AMZI are deduced. According to the assumption that the AMZI arms optical path difference is much shorter than the coherence length of the laser and longer than the coherence length of the ASE noise, ASE noise is reduced by 3 dB without affecting the optical signals power simultaneously. 50 output subcarriers are generated with both simulation and experiment confirmations, respectively. The results show that carrier to noise ratio of the multi-carrier generated by the improved scheme can be as high as 37.5 dB and is up to 17.5 dB higher than the traditional structures.

**Key words** optical communications; multi-carrier light source; noise suppression; asymmetric Mach-Zehnder interferometer

**OCIS codes** 060.2330; 060.4510; 060.3510; 060.2630

## 1 引言

随着目前全球宽带业务流量的迅速增长,应用各种高级码型调制技术与复用技术相结合<sup>[1-5]</sup>的太

比特以太网已经成为下一代光纤通信系统的发展方向。基于单个激光器的多载波光源是利用频分复用技术实现太比特高速光通信传输的关键器件。目

**收稿日期**: 2013-06-08; **收到修改稿日期**: 2013-06-27

**基金项目**: 国家自然科学基金(61205065)、高等学校博士学科点专项科研基金(20110005110014)、深圳市科技研发资金基础研究计划(JC201105191003A)、山东省自然科学基金项目(ZR2010FM043)

**作者简介**: 张霞(1975—),女,博士研究生,副教授,主要从事多载波传输方面的研究。E-mail: wenezhang2002@163.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

前,基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<sup>[6]</sup>、强度或相位调制器级联<sup>[7]</sup>及循环频移器(RFS)的方案<sup>[8-15]</sup>。其中基于 RFS 产生多载波的方案由于载波数目较多以及具有高稳定性和高平坦度因而成为首选方案。但是由基于 RFS 产生多载波的传统结构产生的子波载噪比大约在 20 dB 左右,不能满足高级调制码对光源信噪比的要求<sup>[16]</sup>。

本文提出了一种改进的基于 RFS 结构的多载波产生方案。在传统 RFS 多载波产生结构的环路中插入一个非对称马赫曾德尔干涉仪 (AMZI),通过抑制放大自发辐射 (ASE) 噪声提高了多载波的载噪比,并分别通过仿真和实验得到了 50 个子载波的多载波输出。

## 2 理论分析

AMZI 的结构原理图如图 1 所示。光信号和 ASE 噪声经过耦合器 1 被分为两路,一路加时延  $\Delta\tau$ ,另一路加相移  $\varphi$ 。假设  $\varphi=0$ ,由于 AMZI 两臂的光程差  $x=\Delta\tau c$ ,则其传输函数为

$$H^2(\nu) = \frac{1 + \cos(2\pi x\nu/c)}{2}, \quad (1)$$

$$P = \frac{A^2}{\pi\Delta\nu_{\text{signal}}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi x}{c}\nu\right) \right] \frac{1}{1 + \{(\nu - \nu_0)/[(\Delta\nu_{\text{signal}}/2)]\}^2} d\nu = \frac{A^2}{4} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi x}{c}\nu_0\right) \exp\left(-\frac{\pi x \Delta\nu_{\text{signal}}}{c}\right) \right]. \quad (4)$$

根据 (2) 式的假设, (4) 式中右边的项  $\exp\left(-\frac{\pi x \nu_{\text{signal}}}{c}\right) \approx 1$ 。另外,选择合适的  $x$ , 使 (4) 式中的余弦项达到峰值,即

$$\frac{2\pi x \nu_0}{c} = 2n\pi, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5)$$

此时, (4) 式简化为

$$P \approx \frac{A^2}{2}. \quad (6)$$

式中  $c$  为真空中的光速,  $\nu$  为光传输频率。

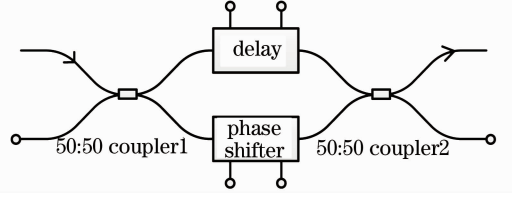


图 1 AMZI 的结构原理图

Fig. 1 Schematic of AMZI

假设

$$\frac{c}{\Delta\nu_{\text{ase}}} \ll x \ll \frac{c}{\Delta\nu_{\text{signal}}}, \quad (2)$$

式中  $\Delta\nu_{\text{signal}}$  和  $\Delta\nu_{\text{ase}}$  分别是信号和 ASE 噪声的线宽,即干涉仪两臂的光程差远远大于 ASE 噪声的相干长度,同时远远小于信号的相干长度。

### 2.1 AMZI 对光信号的影响

由激光原理可知光信号的功率谱密度服从洛伦兹分布,即

$$G_{\text{signal}} = \frac{A^2}{\pi\Delta\nu_{\text{signal}}} \cdot \frac{1}{\{1 + \{(\nu - \nu_0)/[(\Delta\nu_{\text{signal}}/2)]\}^2\}}, \quad (3)$$

式中  $A$  光信号的振幅,  $\nu_0$  为中心频率。所以,光信号经过 AMZI 后的功率为

(6) 式表明光信号经过 AMZI 后功率基本没有改变。光信号经过 AMZI 前后的频谱如图 2(a) 和 (c) 所示。

### 2.2 AMZI 对 ASE 功率的影响

假设 ASE 噪声的功率谱密度服从高斯分布,即

$$G_{\text{ase}} = \frac{P_{\text{ase}}}{\sqrt{2\pi}\Delta\nu_{\text{ase}}} \exp\left[-\frac{(\nu - \nu_0)^2}{2\Delta\nu_{\text{ase}}^2}\right], \quad (7)$$

则 ASE 噪声经过 AMZI 后的功率为

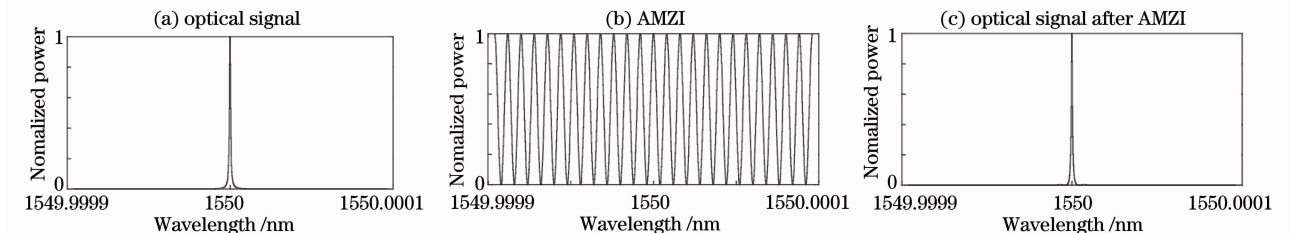


图 2 光信号经过 AMZI 前后的频谱图

Fig. 2 Spectra of optical signal before and after AMZI

$$P_{\text{ase}}^{\text{out}} = \frac{P_{\text{ase}}}{\sqrt{2\pi}\Delta\nu_{\text{ase}}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1 + \cos(2\pi x\nu/c)}{2} \exp\left[-\frac{(\nu - \nu_0)^2}{2\Delta\nu_{\text{ase}}^2}\right] d\nu = \frac{P_{\text{ase}}}{2} \left\{ 1 + \cos\left(\frac{2\pi x\nu_0}{c}\right) \exp\left[-2\pi^2 \Delta\nu_{\text{ase}}^2 \left(\frac{x}{c}\nu_{\text{ase}}\right)^2\right] \right\}. \quad (8)$$

根据(2)式的假设,(8)式中右边的项  $\exp[-2\pi^2 \Delta\nu_{\text{ase}}^2 (\frac{x}{c}\nu_{\text{ase}})^2]$  可以被忽略,因此简化为

$$P_{\text{ase}}^{\text{out}} = \frac{P_{\text{ase}}}{2}. \quad (9)$$

(9)式表明 ASE 噪声经过 AMZI 后功率降为原来的

一半,根据 2.1 节的分析,光信号经过 AMZI 后功率基本没有改变,所以光信号的信噪比理论上提高了 3 dB. 因此该干涉仪可以被用作如图 2(b)图 3(b)所示的噪声抑制滤波器,图 3(a)和图 3(c)分别给出了 ASE 噪声经过 AMZI 前后的频谱。

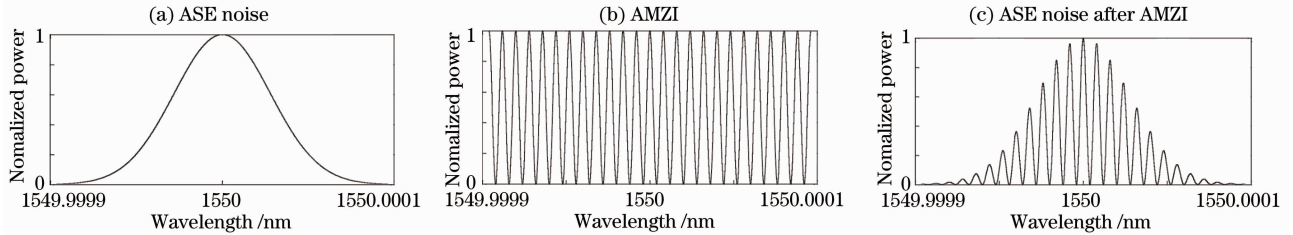


图 3 ASE 噪声经过 AMZI 前后的频谱图

Fig. 3 Spectra of ASE noise before and after AMZI

### 3 利用 AMZI 的多载波产生的改进方案

多载波产生方案如图 4 所示。激光器发出频率为  $f_0$  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,另一部分进入由 IQ 调制器(IQM),带通滤波器(BPF),掺铒光纤放大器(EDFA)和偏振控制器(PC)组成的循环频移环路。IQM 由频率为  $f_m$  的射频信号源(RF source)驱动,通过加载合适的直流偏压来实现单边带调制,BPF 用来控制输出的子载波数目。EDFA 用来补偿环路

的损耗,PC 用来控制光信号的偏振态。经过第一次循环,频率为  $f_0 - f_m$  的子波输出;第二次循环后频率为  $f_0 - 2f_m$  的子波输出;经过  $N$  次循环之后,就产生了频率为  $f_0, f_0 - 2f_m, f_0 - 3f_m \dots, f_0 - Nf_m$  的多载波。

由于这种多载波产生方案是环路结构,产生过程中噪声不断累积,会导致最后生成的子载波的载噪比严重下降。根据 2.2 小节的分析,可以将一个 AMZI 插入环路来抑制噪声的累积,从而达到提高载噪比的目的。如图 4 所示,改进的方案中插入了虚线框中的 AMZI。

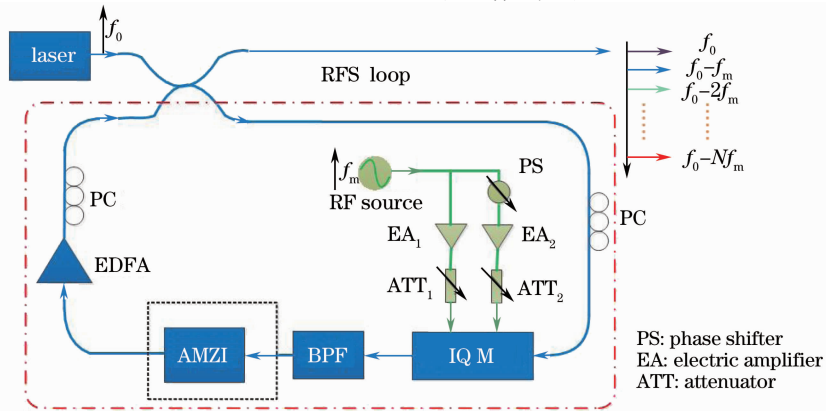


图 4 插入 AMZI 后的多载波产生改进方案图

Fig. 4 Improved schematic of the multi-carrier generation after inserting AMZI

## 4 基于 AMZI 的改进方案的多载波产生仿真和实验

为了验证理论分析的正确性和改进方案的有效性,搭建了如图 4 所示的实验系统平台,并进行了相应的仿真和实验。参数设置:种子光源的输出功率和中心波长分别为 13 dBm 和 1550 nm,信号源的频率为 10.7 GHz,EDFA 的饱和输出功率为 25 dBm。

### 4.1 仿真结果分析

图 5 是仿真得到的 50 个子载波的输出频谱图。

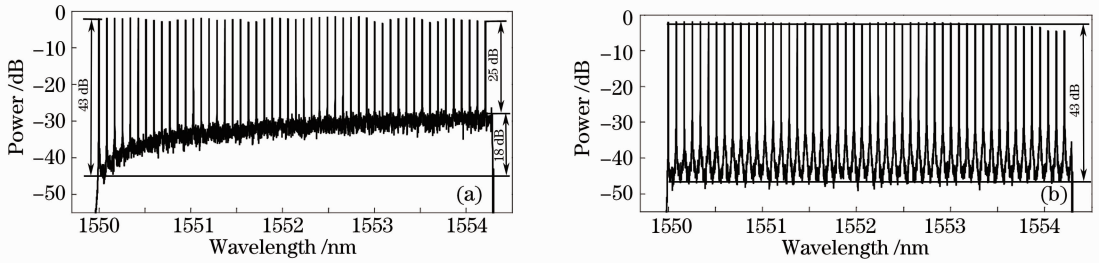


图 5 50 个子载波的多载波仿真输出频谱图。(a) 基于传统方案; (b) 基于改进方案

Fig. 5 Simulation output spectra of multi-carriers with 50 subcarriers. (a) Based on traditional scheme; (b) based on improved scheme

### 4.2 实验结果分析

图 6 是实验得到的 50 个子载波的输出频谱图。从图 6(a)中同样可以看出,由于噪声的积累,多载波的载噪比随着循环次数的增加逐渐下降,第一个

从图 5(a)中可以看出,由于噪声的积累,多载波的载噪比随着循环次数的增加逐渐下降,第一个子载波的载噪比为 43 dB,最后一个子载波的载噪比为 25 dB,下降了 18 dB。而基于改进方案的 50 个子载波的多载波输出,其各个子载波的载噪比几乎完全相同,均为 43 dB,如图 5(b)所示。这说明基于 AMZI 的多载波产生方案非常有效地抑制了噪声,从而提高了载噪比。

子载波的载噪比为 35 dB,最后一个子载波的载噪比为 20 dB,噪声底部下降了 13 dB。而基于改进方案的多载波输出,其 50 个子载波载噪比大约都为 37.5 dB,如图 6(b)所示。

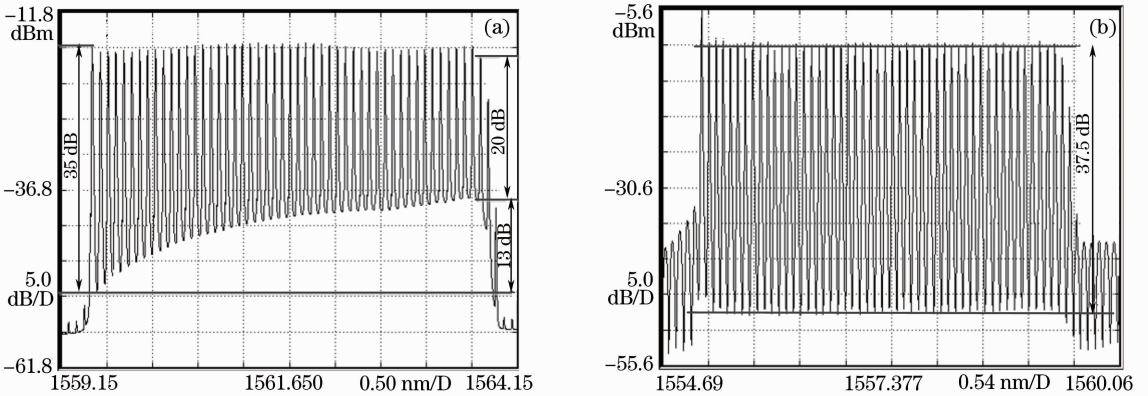


图 6 50 个子载波的多载波实验输出频谱图。(a) 基于传统方案; (b) 基于改进方案

Fig. 6 Experimental output spectra of multi-carriers with 50 subcarriers. (a) Based on traditional scheme; (b) based on improved scheme

仿真和实验结果表明,改进的方案比传统方案产生的多载波的载噪比分别最多提高了 18 dB 和 17.5 dB。根据 2.2 节的分析,经过一次循环 AMZI,理论上可以抑制噪声 3 dB。在仿真和实验中,与插入 AMZI 前相比,相邻子载波间的载噪比平均提高了约 0.35 dB。

## 5 结 论

提出了一种基于 RFS 的能够提高载噪比的多载波产生改进方案。理论推导出 ASE 噪声经过 AMZI 后功率降为原来的一半,同时信号的功率没有改变,从而一次循环后输出子载波的载噪比提高了 3 dB。根据理论分析,分别仿真和实验得到了

50 个子载波的输出。结果表明,改进方案输出多载波的载噪比可高达 37.5 dB,比传统方案最多提高了 17.5 dB。因此,这种高载噪比的多载波可以作为 64-QAM(正交幅度调制)调制码型的光源。

### 参 考 文 献

- 1 Hu Hao, Wang Hongxing, Sun Xiaoming, *et al.*. Multilevel coded modulation of free space optical communication based on pulse position modulation with multiple-step demodulation and decoding algorithm [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39 (4): 0405006.
- 胡 昊, 王红星, 孙晓明, 等. 基于脉冲位置调制的无线光通信多级编码调制及其多阶段解调译码算法[J]. 中国激光, 2012, 39 (4): 0405006.
- 2 Hao Yaohong, Li Yuquan, Wang Rong. Optimum design for optical modulator in coherent optical orthogonal frequency-division multiplexing system[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0305003.
- 郝耀鸿, 李玉权, 王 荣. 相干光正交频分复用系统中光调制的优化设计[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0305003.
- 3 Li Rongling, Tang Chanjuan, Wang Yuanquan, *et al.*. A MISO-OFDM visible light communication system using LED based on subcarrier multiplexing[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39 (11): 1105001.
- 李荣玲, 汤婵娟, 王源泉, 等. 基于副载波复用的多输入单输出正交频分复用 LED 可见光通信系统[J]. 中国激光, 2012, 39 (11): 1105001.
- 4 Zhang Yaping, Ma Xiurong, Bai Yuan, *et al.*. Impact of subcarrier's number on bit error rate of asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0605001.
- 张亚平, 马秀荣, 白 媛, 等. 子载波个数对非对称限幅光正交频分复用误码率的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0605001.
- 5 Liu Binhui, Chen Lin, Xiao Jiangnan. Least mean square adaptive algorithm for direct-detection optical orthogonal frequency division multiplexing transmission system[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0905005.
- 刘彬晖, 陈 林, 肖江南. 直接检测的光正交频分复用传输系统最小均方自适应算法[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0905005.
- 6 Chao Wang, Fei Zeng, Jianping Yao. All-fiber ultra-wideband pulse generation based on spectral shaping and dispersion-induced frequency-to-time conversion [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(3): 137-139.
- 7 J Zhang, J Yu, Z Dong, *et al.*. Generation of full C-band coherent and frequency-lock multi-carriers by using re-circulating frequency shifter loops based on phase modulator with external injection[J]. Opt Express, 2011, 19(27): 26370-26381.
- 8 Qi Yang, Zhixue He, Wu Liu, *et al.*. 1-Tb/s large girth LDPC-coded coherent optical OFDM transmission over 1040 km standard single-mode fiber[C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition, 2011. 1-3.
- 9 X Liu, S Chandrasekhar, X Chen. 1.12-Tb/s 32-QAM-OFDM super channel with 8.6-b/s/Hz intrachannel spectral efficiency and space-division multiplexed transmission with 60-b/s/Hz aggregate spectral efficiency[C]. ECOC, 2011. Th. 13. B.
- 10 B Zhu, X Liu, S Chandrasekhar, *et al.*. Ultra-long-haul transmission of 1.2-Tb/s multicarrier no-guard-interval CO-OFDM super-channel using ultra-large-area fiber [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 22(11): 826-828.
- 11 J P Li, X G Zhang, F Tian, *et al.*. Theoretical and experimental study on generation of stable and high-quality multi-carrier source based on re-circulating frequency shifter used for Tb/s optical transmission[J]. Opt Express, 2011, 19(2): 848-860.
- 12 Junwen Zhang, Jianjun Yu, Nan Chi, *et al.*. Multichannel optical frequency-locked multicarrier source generation based on multichannel recirculation frequency shifter loop[J]. Opt Lett, 2012, 37(22): 4714-4716.
- 13 X Li, J Yu, Z Dong, *et al.*. Multi-channel multi-carrier generation using multi-wavelength frequency shifting re-circulating loop[J]. Opt Express, 2012, 20(20): 21833-21839.
- 14 J P Li, Z H Li. Frequency-locked multicarrier generator based on a complementary frequency shifter with double re-circulating frequency-shifting loops[J]. Opt Lett, 2013, 38(3): 359-361.
- 15 Jianping Li, Xiaoguang Zhang, Lixia 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.
- 16 T Pfau, S Hoffmann, R Noé. Hardware-efficient coherent digital receiver concept with feed-forward carrier recovery for M-QAM constellations[J]. J Lightwave Technology, 2009, 27 (8): 989-999.

栏目编辑:王晓琰