

文章编号: 0253-2239(2010)s100202

基于 I/Q 调制器的频率锁定多载波光源的产生

田 凤 李建平 张晓光 席丽霞 徐 霞

(北京邮电大学信息光子学与光通信教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要 频率锁定多载波光源是实现 Tb/s 高数据率传输的关键器件。它具有结构简单, 频谱利用率高的优点, 因此成为高速大容量光纤通信系统中的研究热点。理论分析了 I/Q 调制器的结构和多载波光源产生的工作原理, 搭建了基于 I/Q 调制器的频率锁定多载波光源产生的实验系统, 实验实现了频率间隔为 12.5 GHz 的 15 个载波输出。同时仿真分析了影响多载波光源性能的几个参数。结果表明, 射频信号的驱动电压, 系统中偏振态的变化是影响频率锁定多载波光源产生的主要因素。

关键词 光纤通信; 多载波光源; I/Q 调制器; 稳定性

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201030.s100202

Generation of Frequency-Locked Multi-Carrier Source Based on I/Q Modulator

Tian Feng Li Jianping Zhang Xiaoguang Xi Lixia Xu Xia

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

Abstract The frequency-locked multi-carrier source is a key element for achieving Tb/s data rate transmission. It has high frequency efficiency and its implement is simple. Therefore, it has become the topic in high-speed mass optical fiber communication system. The structure of the I/Q modulator and the operation principle for generating multi-carrier are analyzed in theory, the experimental system of frequency-locked multi-carrier source based on I/Q modulator is set up. The 15-carrier space at 12.5 GHz generation is successfully conducted. Simultaneously, the parameters affecting the performance of the muti-carrier source is analyzed by simulation. The results show that the radio frequency drive voltage, the variation of states of polarization are main factors to affect the generation of the frequency-locked multi-carrier source.

Key words optical fiber communication; multi-carrier source; I/Q modulator; stability

OCIS codes 060.0060; 230.0230; 230.6080

1 引 言

目前随着急剧增长的通信用户需求, 高速大容量的太比特光纤通信传输系统已在实验中实现。它的主要解决方案之一是应用各种复用技术, 包括密集波分复用技术(DWDM)和光域正交频分复用技术(O-OFDM)。在这种情况下, 光源就成为太比特 DWDM、O-OFDM 光传输的一个关键器件。基于

单个激光器的频率锁定多载波光源就是一个新颖且性能良好的解决方案, 它具有低成本, 频谱利用率高和频率稳定的优点^[1,2]。

在理论分析频率锁定多载波光源产生的原理基础上, 搭建实验系统并实现了频率间隔为 12.5 GHz 的 15 个多载波光源的产生。根据实验结果, 仿真分析了影响载波数目和稳定性的各种主要因素, 包括

收稿日期: 2010-05-22; 收到修改稿日期: 2010-07-12

基金项目: 国家 863 计划(2009AA01Z224)资助课题。

作者简介: 田 凤(1984—), 女, 硕士研究生, 主要从事高速光纤通信系统偏振模色散补偿方面的研究。

E-mail: tian_feng_8888@163.com

导师简介: 席丽霞(1973—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光通信系统信号损伤恢复方面的研究。E-mail: xilixia@263.net

射频信号电压,系统中噪声和偏振态的变化。理论和实验研究对于频率锁定多载波光源在高速大容量通信系统中的应用具有十分重要的意义^[3-5]。

2 工作原理

2.1 I/Q 调制器的结构和工作原理

图 1 为 I/Q 调制器的结构框图,它是由两个平行的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)组成,每一个 MZI 有其独立的控制电压使性能达到最优。A、B 两处的直流偏压 DC A、DC B 偏置在传输曲线的谷底,直流偏压 DC C1 提供 $\pi/2$ 相移,射频电压 RF A、RF B 输入相位差为 $\pi/2$ 的时钟信号。当不加射频(RF)信号时,调制器工作在静态条件下测得传输曲线如图 2 所示。当直流偏置 DC C1 电压为 5 V,测

得 A port 和 B port 的传输曲线如图 2(a),当直流偏置 DC A、DC B 工作在谷底($V_{A\ bias}=1\ V, V_{B\ bias}=1.5\ V$)时,测得 C port 传输曲线如图 2(b)所示。根据上述实验结果可以分析调制器工作性能良好,并且由电压参数设定 I/Q 调制器工作在单边带调制模式。

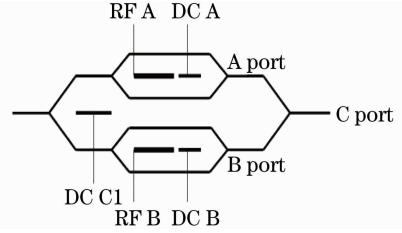


图 1 I/Q 调制器的结构框图

Fig. 1 Schematic diagram of I/Q modulator

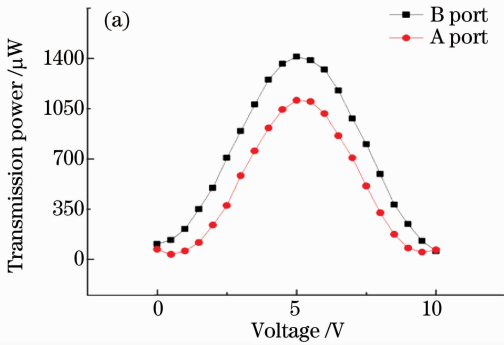


图 2 I/Q 调制器的传输曲线

Fig. 2 Transmission curves of I/Q modulator

I/Q 调制器是订购 COVEGA 公司的产品,参数指标如表 1。

表 1 I/Q 调制器参数指标

Table 1 Parameter indices of I/Q modulator

Parameter /Units	Measured value
Test wavelength /nm	1550.00
Insertion loss /dBm	5.89
On/Off extinction ratio	
Sub MZI A /dB	24.70
Sub MZI B /dB	24.47
V_{π} @ DC	
RF port A /VDC	6.78
RF port B /VDC	6.94
DC port A /VDC	3.97
DC port B /VDC	3.95
DC port C1 /VDC	4.72
P_{π} @ 1 GHz	
RF port A /dBm	20.14
RF port B /dBm	20.34

2.2 频率锁定多载波光源产生的工作原理

频率锁定多载波光源产生框图如图 3 所示。激

光器发出频率为 f_0 的连续光,经过 50:50 耦合器进入 I/Q 调制器,在 I 支路和 Q 支路上分别加载 $V_m \sin(2\pi f_s t)$ 和 $V_m \cos(2\pi f_s t)$ 的时钟信号,根据调制原理,在输出光场增加了一个调制参数为 $\cos(2\pi f_s t) + j\sin(2\pi f_s t) = \exp(j2\pi f_s t)$ 的调制信号,相应地就会产生第一个频移为 $f_1 = f_0 + f_s$ 的载波,当循环频移环路闭合后,频移载波经过掺铒光纤

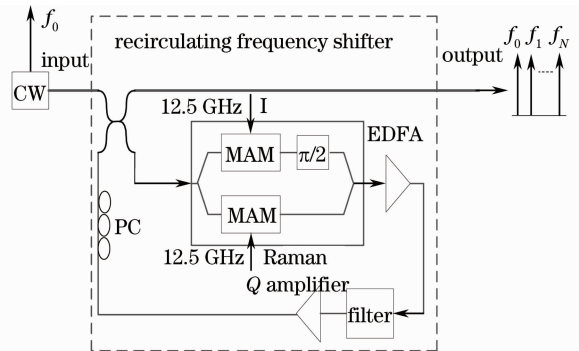


图 3 频率锁定多载波光源产生的框图

Fig. 3 Schematic of generation for frequency-locked multi-carrier source

放大器(EDFA)放大和耦合器另一端口输出的信号耦合再次进入 I/Q 调制器,产生第二个子载波 $f_2 = f_0 + 2f_s$, 经过 N 次循环,则可以产生频率为 $f_0 \cdots f_N$ 的多个载波。实验中通过调节光带滤波器的中心波长和带宽来控制子载波数目,偏振控制器用来控制链路中光信号偏振态(SOP)的变化,使多载波源稳定输出,若环路中加入偏振稳定装置,则可以达到载波的长期稳定输出。

3 实验结果与分析

3.1 实验结果

实验中连续波(CW)激光器输出波长为 1550.396 nm 的连续激光,滤波器的带宽和中心波长可调,用来控制循环频移载波的数目。EDFA 的饱和输出功率为 13 dBm,拉曼(Raman)放大器的输出饱和功率为 27 dBm,I/Q 调制器的插入损耗为 10 dBm,其工作偏压点在传输曲线的谷底,直流偏置 A,B 电压分别为 1 V 和 1.5 V,直流偏置 C 产生 $\pi/2$ 相移,电压为 5 V。给 A 和 B 加 12.5 GHz 的射频(RF)时钟信号,用相移器使得两个 RF 信号相位差为 $\pi/2$,分别成为 $\cos(2\pi f_s t)$ 和 $\sin(2\pi f_s t)$ 的 RF 调制信号。

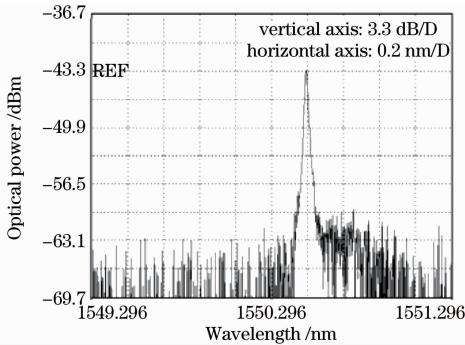


图 4 第一个频移载波的频谱

Fig. 4 Spectrum of the first carrier frequency signal

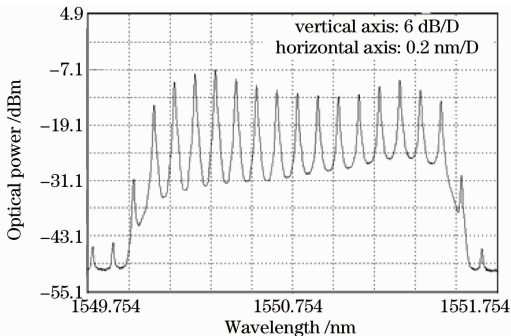


图 5 频率锁定的 15 个载波的输出频谱

Fig. 5 Output spectrum of frequency-locked 15-carrier

当环路不闭合,经过一次调制后的频谱图,如图 4 所示。产生了波长为 1550.496 nm 的第一个频移载波,波长移动 0.1 nm (相当于频率移动 12.5 GHz)。当环路闭合,调节滤波器的带宽和射频驱动信号电压,得到 15 个载波的稳定输出,如图 5 所示。

3.2 结果分析

根据实验结果分析,基于 I/Q 调制器的频率锁定多载波光源产生器,其优点是不需要高的驱动电压,可以对预期子载波数目进行控制,并且输出频谱只进行红移或者蓝移,但是输出易受各种因素影响,使载波输出不稳定,下面就载波产生的自激过程、环路噪声、偏振态变化等因素进行了分析。

首先,分析环路的谐振和自激过程。一般来说,谐振有时也称为自激都可以认为是由光传输一个循环产生正反馈而生,直至增益与损耗(包括光信号输出产生的广义损耗)平衡。实验中产生这种谐振是由于在 I/Q 调制器两个口加上两个具有相位差的射频信号,经过循环产生的。因此可以说:实验中频移产生的原理就是利用了种子光源的谐振原理,每经过一次循环,从而产生各个等间隔谐波。实验中通过调节 I/Q 调制器的偏置电压和微波信号的功率,抑制掉不必要的高阶谐波分量,保留需要的一阶分量,图 4 和图 6 对比说明了这种调制产生的原理过程。

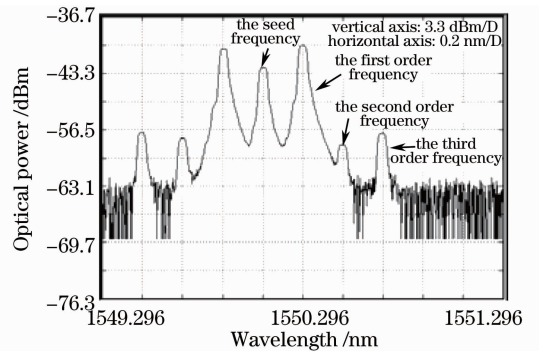


图 6 含有各谐波分量的一次频移载波的频谱

Fig. 6 Spectrum of the first carrier frequency signal with other harmonic components

环路中的噪声主要包括两部分:谐波分量产生的三阶串扰和放大器引入的放大自发辐射(ASE)噪声。假设 P_{in_tone} , P_{out_tone} 为每一个载波的输入和输出功率, P_{ASE_total} 为环路总的 ASE 噪声功率。 G 为放大器输出饱和增益因子, P_3 为三阶谐波分量功率, N 为总的载波数目。则 ASE 噪声引入的光信噪比(OSNR)和三阶谐波串扰引入的信噪比可以表示为

$$O_{\text{SNR_EDA}} = \frac{P_{\text{out_tone}}}{P_{\text{ASE_total}}} = \frac{GP_{\text{in_tone}}}{P_{\text{ASE_total}}}, \quad (1)$$

$$O_{\text{SNR_3rd-harmonic}} = \frac{P_{\text{out_tone}}}{(N-3)GP_3} = \frac{P_{\text{in_tone}}}{(N-3)P_3}, \quad (2)$$

由(1)式,(2)式推得

$$P_{\text{ASE_total}} = P_{\text{in_tone}} 10^{-\frac{O_{\text{SNR_EDA}}}{10}}, \quad (3)$$

$$P_3 = P_{\text{in_tone}} 10^{-\frac{O_{\text{SNR_3rd-harmonic}}}{10}}, \quad (4)$$

因此,总的等效信噪比为

$$O_{\text{SNR_eff}} = 10 \lg \frac{P_{\text{out_tone}}}{P_{\text{ASE_total}} + P_3} = -10 \lg \left(10^{-\frac{O_{\text{SNR_EDA}}}{10}} + 10^{-\frac{O_{\text{SNR_3rd-harmonic}}}{10}} \right). \quad (5)$$

可以看出,环路的信噪比和载波数目 N 有关,和信号的发射功率,也就是微波信号驱动电压 V_{pp} 有关。因此,根据以上公式仿真分析了信噪比和射频驱动电压(引入谐波串扰)的关系(图7)。

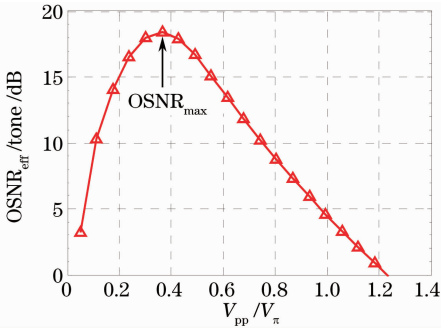


图7 信噪比与射频驱动电压的关系

Fig. 7 Relationship between OSNR and RF drive voltage

在图7中 V_{pp} 是驱动 RF 信号的峰-峰值, V_{π} 是调制器的半波电压。可以看出当 V_{pp}/V_{π} 为 0.4 时,谐波串扰最小,每一个载波的信噪比最大。文献[1]的实验结果分析,在 24 个载波,1.2-Tb/s 背靠背系统中误码率(BER)为 1×10^{-3} 时所需要的信噪比为 26 dB^[1]。

根据(5)式仿真分析了载波数目与 OSNR 代价的关系,如图8所示,可以看出产生 24 个载波需要 0.9 dB OSNR 代价。在 1 dB OSNR 代价下,最多能够输出 25 个载波,而在 2 dB OSNR 代价下,最多能够输出 36 个载波。因此,如果需要产生 25 个以上的载波,BER 为 1×10^{-3} 时 OSNR 代价应该大于 1 dB。实验中应综合考虑各种因素并设计优化参数,以得到最佳的多载波输出性能^[6~10]。

另外实验中 I/Q 调制器的 A 与 B 两臂制作得不太对称[图2(a)],插入损耗较大,而 EDFA 的饱和输出相对较低(13 dBm),以及滤波器的性能等因素,因此得到的稳定载波数目为 15。

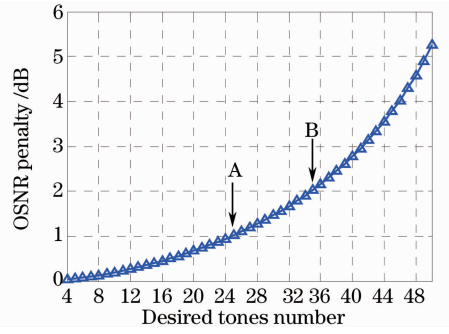


图8 不同载波数目的 OSNR 代价

Fig. 8 Effective OSNR penalty with different desired tones number

实验中还发现,环路中偏振态的变化造成载波输出不稳定,当把环路中的手动偏振控制器(PC)去掉时,测得载波输出如图9所示。可以看出,由于偏振态的不断变化,各载波功率相差很大,稳定性很差。实验中在加偏控和不加偏控两种情况下,每隔 5 s 记录了载波最高峰值的功率变化,共记录 5 min,结果如图10所示。可以看出偏振控制器在保持载波稳定输出起到重要作用。

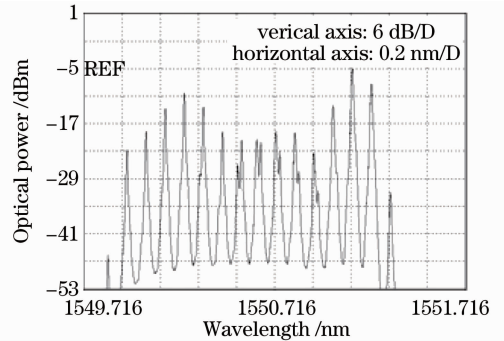


图9 环路中不加偏振控制器时 15 个不稳定载波的输出
Fig. 9 Unstable 15-carrier when without PC in the loop

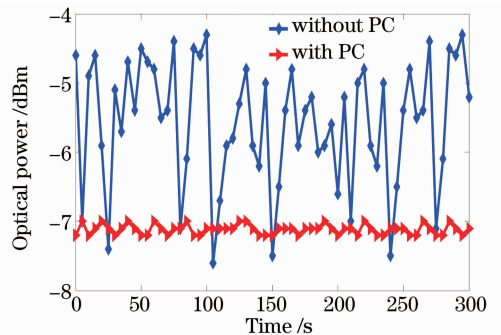


图10 在加偏控和不加偏控情况下 15 个载波的峰值变化

Fig. 10 Peak value variation of 15-carrier spectrum when with and without PC

4 结 论

理论分析了 I/Q 调制器的结构和频率锁定多载波光源产生的工作原理,搭建了基于 I/Q 调制器的频率锁定多载波光源产生的实验系统。根据实验结果仿真分析了相关参数对多载波光源性能的影响。结果表明:射频驱动信号的大小,系统中的噪声和偏振态变化是影响稳定多载波产生的主要因素,优化上述参数提高多载波光源性能,这在实际太比特光纤通信系统中的应用具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 S. Chandrasekhar, Xiang Liu, B. Zhu *et al.*. Transmission of a 1. 2-Tb/s 24-carrier no-guard-interval coherent OFDM superchannel over 7200-km of ultra-large-area fiber[C]. ECOC PD2. 6, 2009
- 2 Yiyang Ma, Qi Yang, Yan Tang *et al.*. 1-Tb/s single-channel coherent optical OFDM transmission with orthogonal-band multiplexing and subwavelength bandwidth access [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**: 308~315
- 3 Izutsu, M., Shikama. S., Sueta, T.. Integrated optical SSB modulator/frequency shifter[J]. *IEEE J. Quan. Electronics*, 1981, **QE-17**(11): 2225~2227
- 4 Zhang Xiaoguang, Fang Guangqing, Zhao Xinyuan *et al.*. Experimental research of polarization stabilization in optical fiber communication systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 888~891
张曙光, 方光青, 赵鑫媛 等. 光纤中偏振稳定控制的实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 888~891
- 5 Yiran Ma, Qi Yang, Yan Tang *et al.*. 1-Tb/s single-channel coherent optical OFDM transmission over 600-km SSMF fiber with subwavelength bandwidth access[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**, 9421~9427
- 6 Xia Minmin, Dong Ze, Cao Zizheng *et al.*. Performance comparison of 40 GHz optical millimeter wave with OFDM signal generated by an optical phase modulator and an optical intensity modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1586~1591
夏敏敏, 董 泽, 曹子峥 等. 光相位调制器和光强度调制器产生 40 GHz 光载 OFDM 毫米波信号的传输性能比较[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1586~1591
- 7 Lei Xiaoyan, Dong Ze, Pi Yazhi *et al.*. Performance of a novel scheme to generate single-sideband millimeter-wave signals[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 889~893
雷小燕, 董 泽, 皮雅雅 等. 一种新型的单边带调制技术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 889~893
- 8 Huang Cheng, Chen Lin, Yu Jianjun *et al.*. Millimeter-wave generation utilizing one phase modulator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 73~76
黄 诚, 陈 林, 余建军 等. 采用单个相位调制器产生毫米波[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 73~76
- 9 Zhu Chuanhu, Lu Jia, Dong Ze *et al.*. Radio-over-fiber system with frequency quadruple optical millimeter-wave generation utilizing cascaded phase modulator along with an intensity modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 321~325
朱传湖, 卢 嘉, 董 泽 等. 采用级联相位调制器和强度调制器产生四倍频光载毫米波的光纤无线通信系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 321~325
- 10 S. Liu, T. T. Ng, D. J. Richardson *et al.*. An optical frequency comb generator as a broadband pulse source[C]. OFC, 2009, paper OThG7