

频率锁定多载波光源的研究进展

范依依 冯素春

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

摘要 频率锁定多载波光源是一种子载波之间有固定频率间隔的光源。介绍了近几年常用的一些产生多载波光源的方法,分析了各种方法间的不同点及每种方法的优缺点,为以后的相关研究提供参考。

关键词 光通信;多载波光源;光频梳;相位调制;强度调制;光正交调制器;偏振调制器;循环频移

中图分类号 TN91 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.020007

Progress in Optical Frequency-Locked Multicarrier Source

Fan Yiyi Feng Suchun

Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract Optical frequency-locked multicarrier is a light source which has a fixed frequency spacing between subcarriers. Some methods commonly used to generate optical frequency-locked multicarrier source in recent years are introduced. The differences between these methods are compared while the advantages and disadvantages of each method are analyzed. The comparison will provide reference for the related research in the future.

Key words optical communications; multicarrier source; optical frequency comb; phase modulator; intensity modulator; in-phase/quadrature modulator; polarization modulator; recirculation frequency shifter

OCIS codes 060.1660; 060.2630; 060.4510

1 引言

随着全球宽带业务流量的快速增长,太比特光纤通信传输系统已成为下一代光纤通信的发展方向,而频率锁定多载波光源是实现太比特高速光通信系统的关键器件之一,目前已成为光纤通信领域的研究热点。产生频率锁定多载波光源的主要方法有锁模激光器^[1-2]、超连续谱^[3-4]以及基于调制器的光频梳(OFC)^[5]等。锁模激光器可以产生宽带多载波,但其输出载波间隔与激光腔长有关,可调谐性差且易受温度影响,稳定性差。超连续谱主要是超短脉冲光源通过不同种类的非线性光纤后,产生的宽频谱通过滤波器进行滤波形成的梳状光源,其频率间隔稳定,但载波数目不易控制且平坦度和相位相关性较差;基于调制器产生多载波的方法可细分为基于单个调制器的频梳发生器、基于调制器级联的频梳发生器以及循环频移器,其中循环频移器按频移类型又可分为基于单边带调制器的循环频移器和基于多带调制器的循环频移器。基于调制器产生光频梳的方法主要是利用相位调制器/马赫-曾德尔调制器/偏振调制器(PM/MZM/PolM)等受到射频(RF)信号驱动时,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,产生的多载波具有较高的稳定性且频率间隔具有较好的可调谐性,而且其中循环频移器不需要较高的驱动电压,可产生大数目的子载波,同时子波数目及中心频率可控,平坦度较好。本文回顾了基于调制器产生频率锁定多载波光源的研究进展,阐述了各种方法的产生原理及其优缺点,为以后的相关研究提供参考,并介绍了一

收稿日期: 2014-07-22; 收到修改稿日期: 2014-09-16; 网络出版日期: 2015-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(61107094)、中央高校基本科研业务费(2013JBM017)

作者简介: 范依依(1989—),女,硕士研究生,主要从事频率锁定多载波光源方面的研究。

E-mail: fanyiyi0904@163.com

导师简介: 冯素春(1982—),男,博士,副教授,主要从事光纤通信、光纤器件、光纤激光器等方面的研究。

E-mail: fengsuchun@gmail.com(通信联系人)

种新的产生多载波的方法,即参量频梳发生器。

2 基于调制器的光频梳产生方法

2.1 基于单个调制器的光频梳发生器

随着铌酸锂波导调制器的发展,基于调制器的多载波发生器得到研究者的广泛关注。近年来,研究者们使用基于调制器的频梳发生器不仅产生了宽带光频梳,而且载波平坦度有了很大的提高。基于调制器的光频梳发生器主要是利用PM/MZM/PoIM受射频信号驱动时,其传输函数可化为贝塞尔函数,即产生多次谐波分量,进而形成多载波光源。基于PM的光频梳发生器如图1所示,但其平坦度较差。为此,2008年,Ozharar等^[6]使用双信号源驱动单个PM,产生了频率间隔为3 GHz、输出平坦度在1.9 dB之内的11光频梳。2010年,Lü等^[7]采用多频相位调制,产生了输出平坦度分别在0.13 dB、0.17 dB、0.24 dB、0.29 dB之内的5、7、9、11光频梳。正弦信号驱动PM产生的多载波光源的频率间隔由射频驱动信号的频率决定,而射频驱动信号的幅度则关系到产生的子载波的幅度大小与边带数量。

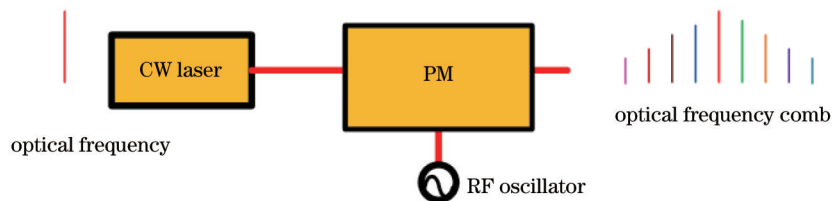


图1 基于相位调制器的光频梳发生器的原理图

Fig.1 Schematic diagram of OFC generation based on phase modulator

2007年,Sakamoto等^[8]使用单个双驱动马赫-曾德尔调制器(DD-MZM)产生了频率间隔为10 GHz、输出平坦度在4.3 dB之内的19光频梳,实验装置如图2(a)所示,其中输出平坦度在1.1 dB之内的载波数为11。2010年,Morohashi等^[9]提出了基于反馈环的MZM的频梳发生器,实验装置如图2(b)所示。与文献[8]相比,使用反馈环是通过多次循环调制来增大MZM的调制深度,从而产生了宽带光频梳。2013年,Mishra等^[10]提出了一种简单的方法,产生了输出平坦度在1.2dB之内的9梳光频梳,而且所需要的驱动电压较低,其实验装置与图2(a)相比,驱动MZM两臂的信号频率不同,下臂驱动信号的频率为上臂的2倍。主要原理是:两频率不同的驱动信号分别驱动MZM的上下两臂,产生两个不同的光频梳,当两光频梳混合时,通过调整两驱动信号的相位差和幅度便可产生较平坦的光频梳。使用MZM产生光频梳的频率间隔取决于驱动信号的频率,其幅度不仅与驱动信号振幅有关,还与直流偏置电压的大小有关。与PM相比,当驱动信号的幅度固定不变时,MZM可以通过调整直流偏置电压来改善载波平坦度,但是直流偏置电压的引入,使基于MZM产生的多载波的稳定性较差。

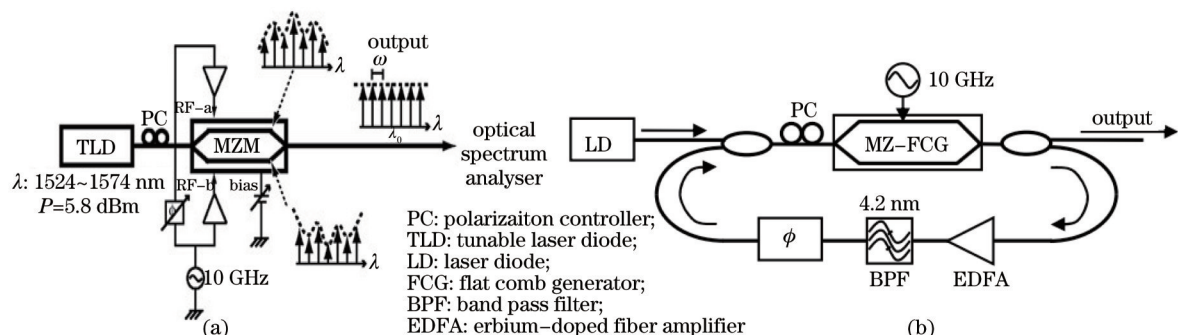


图2 基于MZM的光频梳发生器的实验装置

Fig.2 Experimental setup of OFC based MZM

2013年,Chen等^[11]提出使用单个偏振调制器(PoIM)来产生光频梳的方法,如图3所示。其原理为:连续波经过PoIM的调制后,产生的多载波经过偏振分束器(PBS)和偏振控制器(PC2)被分为奇数阶和偶数阶边带两路,功率较低的边带被掺铒光纤的大器(EDFA)放大后经偏振合波器(PBC)再次与另一边带混合,产生

了平坦的光频梳,实验中已经产生了输出平坦度在 1.8 dB 之内的 7 梳光频梳。与 DD-MZM 产生的光频梳相比,PolM 仅使用一个驱动信号,结构简单,且不需要引入直流偏压,故系统较为稳定,同时所需要的驱动信号电压比 PM 和 MZM 所需要的电压都要低。

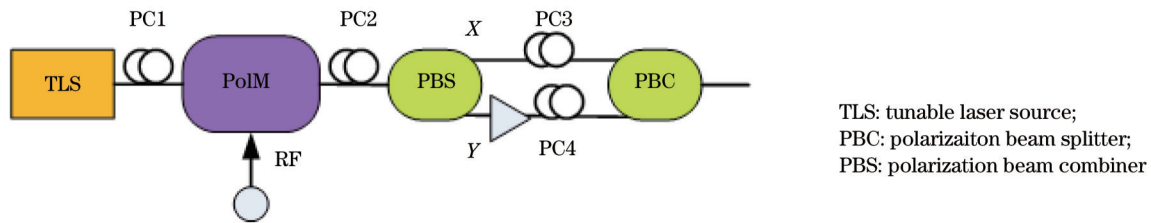


图3 产生光频梳的原理图

Fig.3 Schematic diagram of the proposed OFC generation scheme

2.2 基于调制器级联的光频梳发生器

在光频梳的许多应用中如光任意波形发生器^[12-13]和光通信^[14-17]等,往往要求其具有较高的平坦度,为此研究人员提出了许多提高光频梳平坦度的方法。一方面是使用单个调制器产生平坦光频梳^[6,7,10-11,18],但是这种方法需要使用两个驱动信号源,而且两个信号源的功率、相位和频率需要严格的控制。另一个方面研究者提出使用两个或多个调制器级联的频梳发生器,常见的几种方案如图4所示。图4(a)为强度调制器(IM)和PM级联的一般示意图,它包括一个连续波(CW)激光器、一个或多个铌酸锂(LiNbO₃)强度调制器、一个或多个铌酸锂相位调制器和相同频率的RF信号源。2001年,Fujiwara等^[19]首次在单波长光源下,通过幅度相位混合调制产生了频率间隔为 12.5 GHz、输出平坦度在 2 dB 之内的 9 梳频率梳;2009年,Sakamoto等^[20]首次使用 IM 和 PM 级联产生的多载波源实现了在 O 波段的密集波分复用(DWDM)传输系统;Hoshi等^[21]也产生了频率间隔为 50 GHz 的多载波,成功实现了传输距离为 100 km,速率为 10 Gb/s 的无误码传输;为了增大调制器的调制深度,研究者们往往采用两个以上调制器的级联^[22-25]。2010年,Wu等^[26]在 Torres-Company 理论^[27]的基础上使用 IM 产生平顶脉冲信号,然后经 PM 进行相位调制后产生了较平坦的光频梳,其中 PM 的驱动信号是周期的、随时间二次变化的。Wu等搭建了如图4(c)的实验装置,其中,级联 IM 是用来产生更加尖锐的平顶脉冲,从而使平顶脉冲的更多部分可以受到随时间二次变化的相位调制,使用相移器、倍频器和可调衰减器来调整 PM 驱动信号的基波与倍频波之间的相位及振幅比例关系,来获得更接近二次变化的 PM 驱动信号。Wu等基于图4(c)产生频梳数共约为 60 梳的光频梳,其中输出平坦度在 1dB 之内的光频梳数为 38。

IM 与 PM 级联可以产生较平坦的光频梳,但 IM 产生多载波通常插入损耗较大,而且 MZM 强度调制器中直

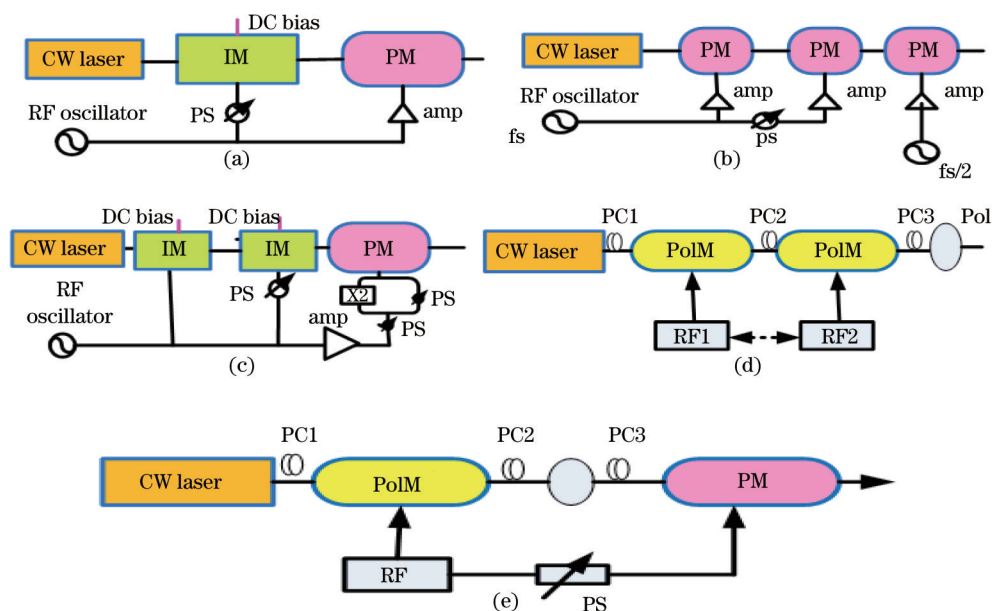


图4 常见的基于调制器级联的光频梳发生器

Fig.4 Layout of common electro-optic frequency comb generators by cascaded modulator

流偏置电压的引入使系统稳定性变差。为此2011年Zhang等^[28]提出级联PM来产生多载波的方法,原理如图4(b)所示。窄线宽外腔激光器(ECL)产生的连续波,经过驱动信号频率为 f_s 的高调制深度的PM₁的调制,产生一定数量的多载波,然后将产生的多载波输入到驱动信号频率为 $f_s/2$ 的较低调制深度的PM₂进行调制,最终可以产生平坦度较好、频梳数加倍的多载波。通过PM的级联成功产生了频率间隔为12.5 GHz、输出平坦度在10 dB之内的53个多载波,其信噪比高达40 dB。但是上述方法必须采用多倍频信号,而且需要严格控制射频信号的相位,为此,2013年,Zhang等^[29]对此方法进行了改进,通过小频差实现了单倍频驱动调制产生多载波。其原理为:第一级PM用于产生多载波,第二级PM通过引入一个小的频率差,使第一、二级调制器的相位差变成 $\varphi = 2\pi\Delta f t$,于是经第二级PM调制后的信号为

$$E_{\text{out}}(t) = E_0 \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |J_{m-n}(\pi R_1)| |J_n(\pi R_2)| \exp[j2\pi(f_c + n f_s)t], \quad (1)$$

式中 E_0 为ECL产生连续波的振幅, f_c 为连续波频率, f_s 为驱动信号频率, R_1 、 R_2 分别为一、二级PM驱动信号的归一化频率, J_n 为 n 阶贝塞尔函数。

此时,输出的载波幅度由两级PM的驱动电压共同决定,从而可以调整两级PM的驱动电压来获得平坦的多载波。通过此方法,Zhang等已经获得了频率间隔为25 GHz、输出平坦度在3 dB之内、载波数为21的多载波。

IM与PM级联和PM与PM级联可以产生较平坦的多载波,但是所需要的调制器较多,使系统变得复杂,而且微波信号源之间有较复杂的关系,为了使用简单的系统就能产生较平坦的多载波源,2012年,He等^[30]提出了一种新的方法来产生频率间隔可调的、超平坦的稳定光频梳,即使用PoIM级联,如图4(d)所示。其原理为:可调谐光源(TLS)产生的连续波经过PoIM1,调整与PoIM1相关的参数,可以产生5个等幅的光频梳,然后将5个等幅的频率经PoIM2的调制便可产生25个等幅频率梳,其中PoIM1的驱动信号频率为PoIM2驱动信号频率的5倍。He等^[30]已经在实验上产生了频率间隔分别为3.5 GHz和5 GHz的25梳光频梳,输出平坦度分别在0.92 dB和0.94 dB之内。

在文献[30]中使用PoIM级联产生较平坦的25梳光频梳,但是两个驱动信号源需要有固定的频率关系,在文献[31]IM和PM产生输出平坦度在1 dB之内的15梳光频梳,其PM的RF信号为 $3V_{\pi}$,为了简化系统并使用较低的驱动信号源,2013年,Chen等^[32]提出了PoIM和PM级联的光频梳发生器,原理结构如图4(e)所示。实验上,Chen等通过改变PoIM和PM的驱动信号功率得到了不同频梳数的光频梳,如当PoIM和PM的RF信号功率分别为26.33 dBm和19.17 dBm时,产生了输出平坦度在1 dB之内的9梳光频梳;当PoIM和PM的RF信号功率分别为26.63 dBm和20.61 dBm时,产生了输出平坦度在1.3 dB之内的11梳光频梳;当PoIM和PM的RF信号功率分别为27.02 dBm和23.14 dBm时,产生了输出平坦度在2.1 dB之内的13梳光频梳。在实验环境中,13梳的光频梳在90 min内几乎不变,这表明了基于PoIM和PM级联的光频梳发生器具有较好的稳定性,而且根据理论分析,如果继续增大调制器的RF信号功率,则可产生更多的光频梳。

为了在不增加调制器数量的情况下,既能增加光频梳的带宽,又能提高光频梳的平坦度,2012年,Supradeepa等^[33]提出一种产生光频梳的方法,原理如图5所示。CW1产生频率为 f_1 的光波依次经过IM与PM的调制,CW2产生频率为 f_2 的光波仅经过相同的PM的调制,产生两个中心频率分别为 f_1 和 f_2 的窄带宽、平坦度较差的种子梳。若输入高非线性光纤(HNLF)的两种子梳的包络分别为 $e_1(t)$ 和 $e_2(t)$,在相位匹配

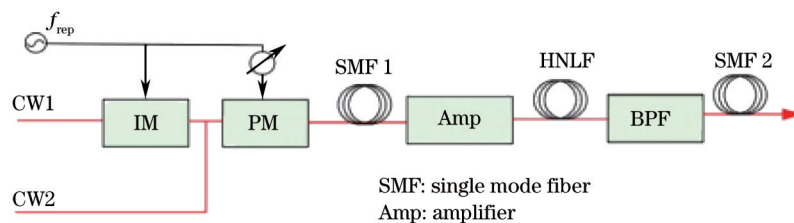


图5 级联四波混频的光频梳的实验装置

Fig.5 Experimental setup of optical frequency combs from phase-modulated continuous-wave lasers using cascaded four-wave mixing

的情况下,两种子梳在 HNLf 中通过一系列四波混频(FWM)的非线性作用,产生的第 N 阶光频梳的包络正比于 $[e_1(t)]^{N+1}[e_2(t)]^N$, 其中心频率为 $(N+1)f_1 - Nf_2$, 通过 HNLf 后产生的光频梳带宽为 IM 与 PM 级联产生光频梳带宽的 $2N+1$ 倍。实验中, Supradeepa 等^[33]选定 f_1 和 f_2 分别为 1542 nm 和 1532 nm, $N=2$, 产生了中心频率为 1562 nm, 频率间隔为 0.08 nm, 输出平坦度在 1 dB 之内的频梳数为 75, 产生的光频梳在带宽和平坦度上都有很大的提高。

2.3 基于循环频移器

基于单个调制器或调制器级联的频梳发生器具有较高的频率间隔可调谐性,频率间隔完全由加载的射频驱动信号的频率决定,但是产生的子载波数量不大,一般在 10 个左右。为了产生载波数目多、信噪比高、平坦性好的稳定多载波,研究者们将常用的电光调制器置于一个环路中,构成了循环频移结构,这种结构可以极大地提高多载波的数目,称为循环频移器(RFS)。按照频移类型的不同,循环频移器可分为基于单边带的循环频移器^[34-56]和基于多边带的循环频移器^[57-61]。2009年, Ma 等^[43]使用了基于同相正交(I/Q)调制器的循环频移器,产生了频率间隔为 8.9GHz 的 36 梳多载波,结构如图 6 所示。包括一个闭合光纤环路,一个 I/Q 调制器,一个可调光带通滤波器(BPF)和两个用于补偿环路损耗的放大器。其原理为: TLS 产生频率为 f_0 的种子光源,经过 I/Q 的频移调制,产生大小等于调制器驱动频率 f_m 的频移,产生了一个中心频率为 f_1 ($f_1=f_0+f_m$) 的边带。耦合器将 f_1 边带分为两路,一路作为输出,一路和 f_0 一起进入第二次循环, f_0 频移后变为 f_1 , f_1 频移后变为 f_2 ($f_2=f_0+2f_m$), 然后 f_1 和 f_2 一起作为输出。同样方法,经过 N 次循环后,形成了边带频率为 $f_1, f_2 \dots f_N$ 的多载波光源。2011年, Tian 等^[41]通过严格控制影响多载波输出质量的诸多重要因素,如 I/Q 调制器的两个 RF 信号的幅度及相位差等,产生了频率间隔为 12.5 GHz 的 50 梳多载波。2010年, Li 等^[49-50]分析了影响多载波质量的主要因素是调制器的非线性引起的高阶谐波串扰,并针对消除三阶串扰给出了改进方案,其主要是通过改变射频驱动信号部分对图 6 进行了优化,优化后的实验结构如图 7 所示。其原理为:在理想情况下, b1 支路的射频信号驱动 I/Q 调制器将产生一阶信号分量、三阶和五阶谐波分量,其中信号分量与谐波分量的幅度符号相反; b2 支路的射频信号先经过三倍频器(FM),然后再依次经过相移器(PS)和可调谐衰减器(ATT),然后驱动 I/Q 调制,将产生一个与 b1 支路的三阶分量幅度符号相反的一阶分量,两者共同作用,使三阶分量得到抑制或消除,剩下的分量中,信号分量占主要地位,五阶谐波分量较微弱。文献[49-50]中的仿真表明,通过此方法可以有效地提高多载波光源的平坦度和信噪比。

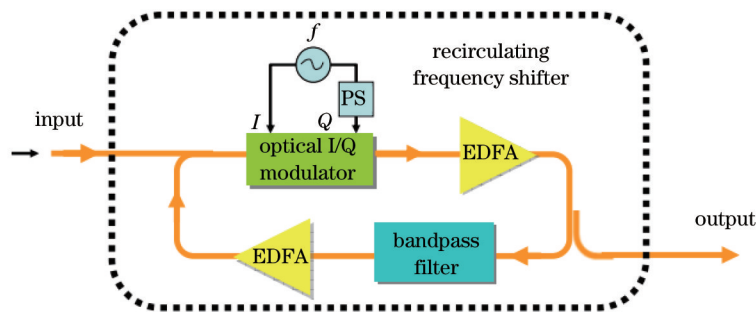


图 6 基于单边带的循环频移器的结构原理图

Fig.6 Schematic of the RFS as a multi-tone generator

基于单频移的单边带(SFS-SSB)循环频移器,每循环一次,输出的载波数量仅增加一个,而且噪声的积累,会使载波的信噪比降低,从而限制了子载波的数量。为了减少循环次数,研究者们提出了几种改进方案:1)采用多倍频驱动产生多载波。Zhang 等^[51-52]提出使用基于多倍频的单边带调制(MFS-SSB)循环频移器来产生频率锁定的多载波,原理如图 8 所示。 N 个频率间隔为 f_s 的等幅种子光源经保偏光纤耦合器(PM-OC)进入频移环路,经过 I/Q 的调制,每个频率分量均发生间隔为 $N f_s$ 的单边带频移,形成 N 个新的边频,然后和种子光源一起被耦合为两路,一路作为输出,一路进入环路继续频移。这样,经过 M 次循环,新产生的边频和种子光源一起作为多载波输出。产生一定数量的多载波,基于 MFS-SSB 方案的循环次数为 SFS-SSB 方案循环次数的 $1/N$ 倍,并实验证明了 MFS-SSB 方案产生多载波的信噪比要高于 SFS-SSB 方案的,

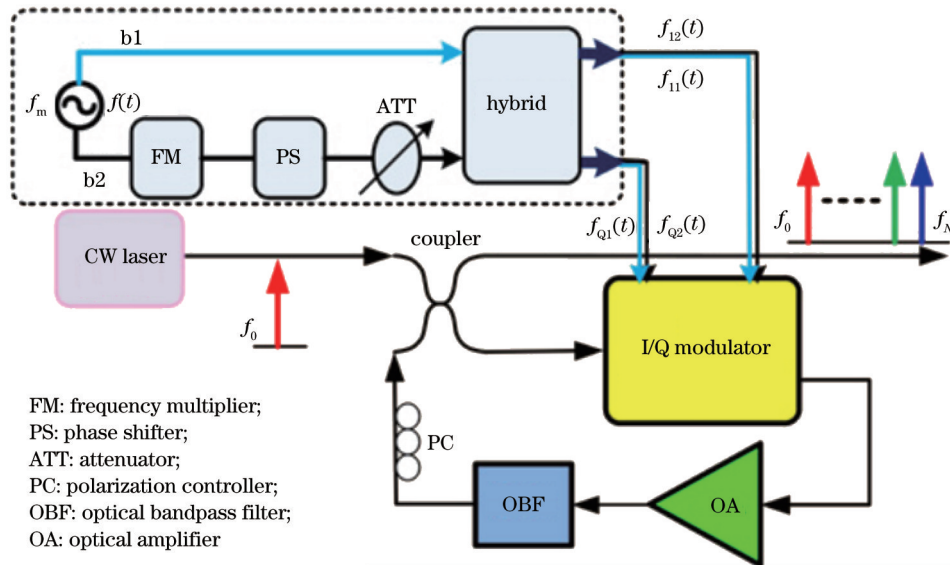
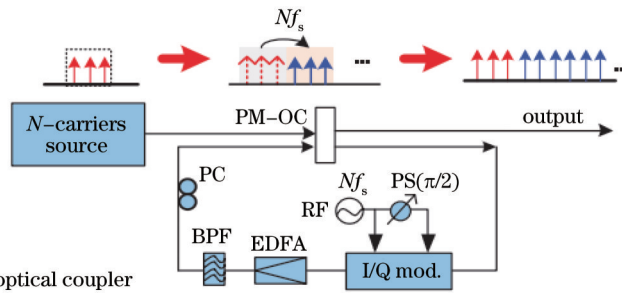


图7 改进的循环频移器

Fig.7 Basic configuration of the improved RFS

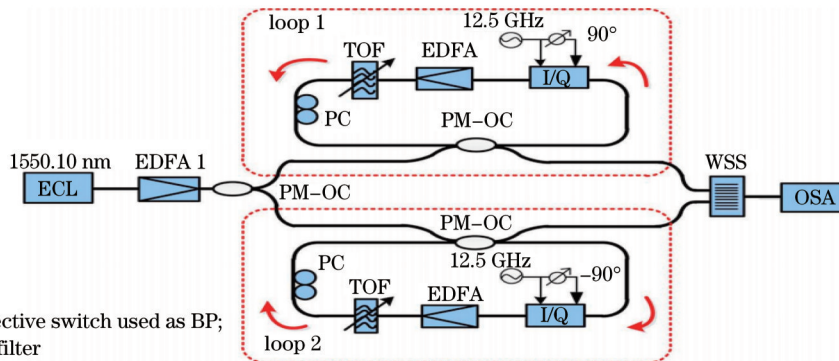


PM-OC: polarization maintaining optical coupler

图8 基于多频移-单边带调制的循环频移器的多载波的原理图

Fig.8 Principle of multi-carriers generation by using RFS loop based on MFS-SSB modulation

同时,文献[51]采用双载波种子源产生了信噪比为 23.3dB 的 95 梳多载波。2)采用多信道多频移产生多载波。由于文献[51-52]中产生的多载波为一个信道,为了更好的用于 WDM 系统,2012 年, Li 等^[53]提出了多信道多载波(MCMC)发生器,与文献[51-52]不同的是 I/Q 驱动信号使用的是单倍频,原理基本一致。但在文献[53]中,环路中的多载波共享一个放大器,而放大器对不同载波的增益不同,这使得输出多载波的平坦度难以控制。为了使每个信道获得独立的增益, Zhang 等^[54-55]对文献[53]做了优化,成功获得了频率间隔为 25 GHz 的较高信噪比的 62 多载波光源。3)采用双环结构产生双向双环路多载波。2012 年, Zhang 等^[56]提出了一种新的产生频率锁定多载波的方法,即基于单边带调制的双循环频移器,并已经在 1545.01~1555.22 nm 的带宽内产生了频率间隔为 12.5 GHz,信噪比高于 17 dB 的 104 梳频率锁定多载波,原理如图 9 所示。连续



WSS: wavelength selective switch used as BP;
 TOF: tunable optical filter

图9 基于双循环频移环的不同方向单边带频移的多载波发生器的实验装置

Fig.9 Experimental setup for multicarrier generation by double RFS loops based on different frequency shifting direction SSB modulation

光源经放大后被耦合进两个不同频移方向的循环频移环中,通过将频移环中 I/Q 的两 RF 正弦信号的相位差调整为 $\pi/2$ 或 $-\pi/2$,形成了向上或向下两个不同方向的单边带频移,然后经过多次循环,两个环中可分别形成短波长和长波长的多载波,最终通过波长选择开关(WSS)将两不同的多载波混合,其中一个频移环产生的中心波长被去除,以防产生干扰。

对于 PM 级联产生多载波的数目与驱动信号幅度有关,但是射频信号幅度有限,从而使产生的光频梳数不多,而基于 SFS-SSB 循环频移器,每循环一次,输出的载波数量仅增加一个,噪声的积累使载波的信噪比减少,从而限制了子载波的数量。为了减少循环次数,2011年, Yu 等^[58-61]提出了基于两个 PM 级联构成的多带循环频移器,并实现了 Tb/s 传输速率的光传输系统,结构如图 10 所示。其中,级联 PM 用来产生多载波, EDFA 用来补偿环路中的损耗,可调谐相移器(PD)用来匹配环路的长度,通过一个 WSS 或波形整形器得到理想多载波。由于 EDFA 的增益频谱具有不平坦性,而且 PM 级联产生多载波需要两个驱动信号,两驱动信号间的相位差会影响产生载波的平坦度。为了获得平坦多载波,2011年, Zhang 等^[60]对此方法做了改进,使用双环路循环频移,而每个环路中仅使用一个 PM,结构如图 10(b)所示。ECL 产生的种子源被耦合器分为两路,上路用于产生长波长范围的多载波,下路用于产生短波长范围的多载波,其中下路中的可调谐光滤波器是用来将下路产生的载波锁定在短波长范围,两个环路的输出合并后通过一个 WSS 或波形整形器便可产生覆盖整个 C 波段的平坦多载波。Zhang 等^[61]在实验中已经获得了频率间隔为 26 GHz,输出平坦度在 3 dB 之内,信噪比高于 20 dB 的 178 梳多载波。

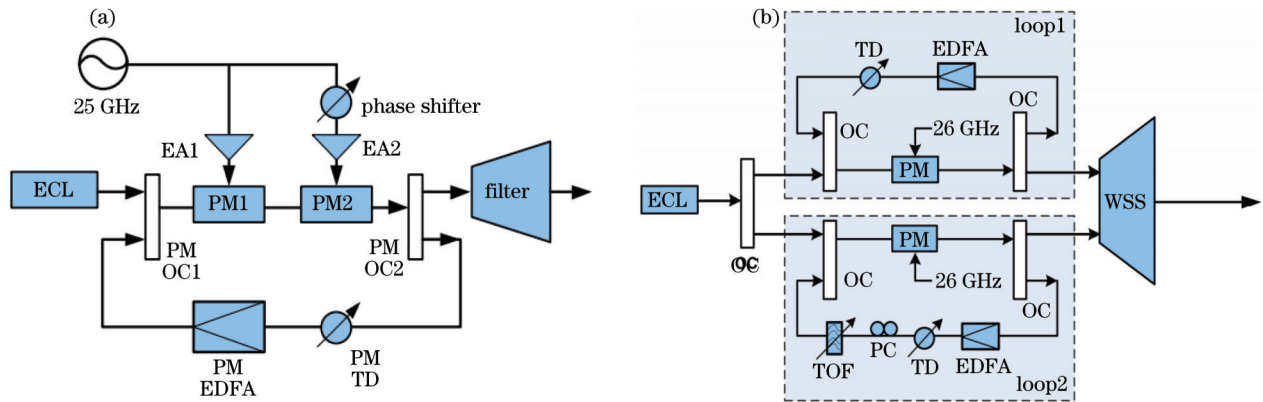


图 10 基于相位调制器的多带循环频移器

Fig.10 Schematic configuration of multi-carriers generation by using RFS loops based on phase modulator

3 参量频梳发生器

为了获得更宽带宽的高平坦度光频梳,2014年, Ataie 等^[62]使用无腔的、基于多阶混频器的参量频梳发生

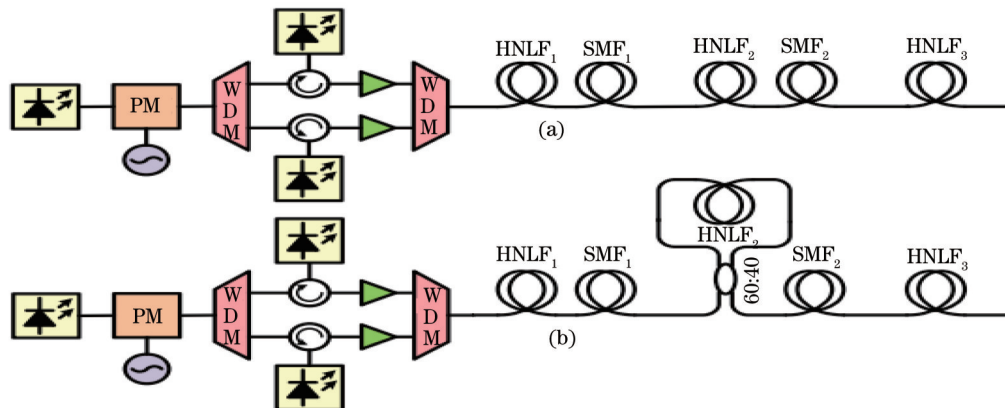


图 11 产生宽带、频率间隔为 100 GHz 频梳发生器的实验装置。(a)没有 NOLM 环;(b)有 NOLM 环

Fig.11 Experimental setup for wideband and coarse pitch (100 GHz) frequency comb generation. (a) Without NOLM stage; (b) with NOLM stage

器,产生了输出平坦度在 2 dB 之内、带宽为 120 nm、频梳数为 1500 的光频梳。为了能更高效地产生新的频率,参量频梳发生器需满足两个条件:高非线性混频品质因数(FoM)和相位匹配。在相位匹配条件满足的情况下,为了实现高混频品质因数,需要使用较高功率的种子源来驱动频梳发生器。脉冲锁模激光器(MLL)虽然可以产生高功率种子源,但由于腔的限制,MLL 不能够产生频率间隔可调的光频梳。基于上述限制,Ataie 等提出了使用低功率的连续波种子源来产生频率间隔可调的光频梳,这种方法通过多阶混频器先对连续波进行压缩整形,形成高功率及相位匹配的信号,然后通过 HNLFF 产生宽带平坦光频梳。Ataie 等基于参量频梳发生器实现了频率间隔分别为 100 GHz 和 10 GHz 的频率梳,实验装置分别如图 11 和图 12 所示,基于图 11(a)产生的光频梳如图 13(a)所示。为了产生更适合混频的种子源,Ataie 等使用 NOLM 环代替图 11(a)中的 HNLFF₂来对输入 HNLFF₃的信号进行再次整形,结构如图 11(b)所示,改进后产生的光频梳如图 13(b)所示,在大于 100 nm 的波长范围内,输出平坦度在 4 dB 之内的频梳数超过 100。

图 12 为产生频率间隔为 10 GHz 光频梳的实验原理图,其包括三个压缩部分(SMF₁-SMF₃)、两个再生部分非线性光纤环(NOLM)和非线性放大环(NALM)和一个主混频部分(HNLFF)。产生的密集频率梳如图 14 所示,在 120 nm 的带宽内,输出平坦度在 2dB 之内的频梳数为 1500,信噪比为 40 dB。

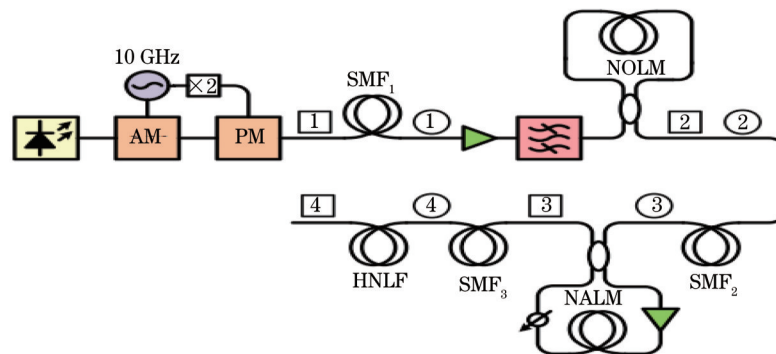


图 12 产生超平坦、宽带宽(10 GHz)的密集光频梳的实验原理

Fig.12 Experimental setup for ultra-flat and broad band (10 GHz) dense frequency comb

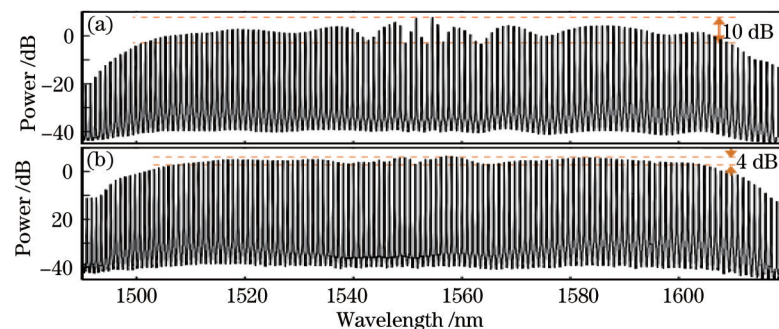


图 13 频率间隔为 100 GHz 的光频梳。(a)不带 NOLM 环;(b)带 NOLM 环

Fig.13 Optical spectra of the 100 GHz pitch frequency comb. (a) Without NOLM stage; (b) with NOLM stage

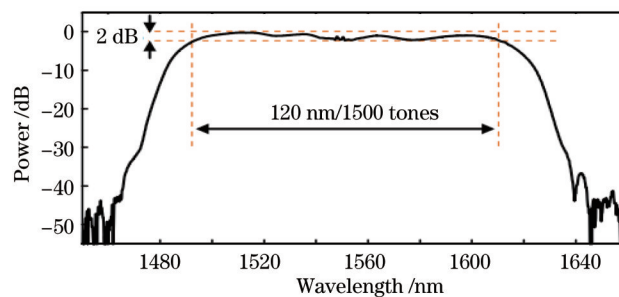


图 14 频率间隔为 10 GHz 的频率梳

Fig.14 Measured spectrum of 10 GHz pitched frequency comb

4 结 论

频率锁定多载波光源是实现太比特高速光传输系统的关键器件,其主要产生方法有:基于调制器的光频梳、超连续谱分割和循环频移器。其中基于调制器的光频梳发生器,需要较高的驱动电压且产生的频梳数有限,但通过引入非线性介质,已经在实验中产生了频梳数超过1000的平坦光频梳;基于循环频移器产生多载波光源的形式多样,不需要较高的驱动电压,具有产生大数目子载波的能力,在实验中也已产生频梳数超过100的平坦多载波。对产生载波数目多、输出信噪比高、平坦度好及稳定性高的频率锁定多载波进行研究,对实现单信道Tb/s及以上速度的高速光通信系统有巨大的推动作用。

参 考 文 献

- 1 W Lee, H Izadpanah, R Menendez, *et al.*. Synchronized mode-locked semiconductor lasers and applications in coherent communications [J]. *J Lightwave Technol*, 2008, 26(8): 908-921.
- 2 M Heck, J Bowers. Integrated Fourier-domain mode-locked lasers: Analysis of a novel coherent comb laser [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2012, 18(1): 201-209.
- 3 T Ohara, H Takara, T Yamamoto, *et al.*. Over-1000-channel ultradense WDM transmission with supercontinuum multicarrier source [J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(6): 2311-2317.
- 4 K Mori, K Sato. Supercontinuum lightwave source employing Fabry-Perot filter for generating optical carriers with high signal-to-noise ratio [J]. *Electron Lett*, 2005, 41(17): 975-976.
- 5 M Kouroggi, T Enami, M Ohtsu. A monolithic optical frequency comb generator [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1994, 6(2): 214-217.
- 6 S Ozharar, F Quinlan, I Ozdur, *et al.*. Ultraflat optical comb generation by phase-only modulation of continuous-wave light [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20(1): 36-38.
- 7 Yuelan Lü, Yongwei Xing, Yongkang Dong. Equal-amplitude optical comb generation using multi-frequency phase modulation in optical fibers [J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(3): 316-319.
- 8 T Sakamoto, T Kawanishi, M Izutsu. Widely wavelength tunable ultra-flat frequency comb generation using conventional dual-drive Mach-Zehnder modulator [J]. *Electron Lett*, 2007, 43(19): 1039-1040.
- 9 I Morohashi, T Sakamoto, N Yamamoto, *et al.*. Broadening of comb bandwidth by multiple modulation using feedback loop in Mach-Zehnder-modulator-based flat comb generator [J]. *IEEE Microwave Photonics*, 2010, 220-223.
- 10 A K Mishra, R Schmogrow, I Tomkos, *et al.*. Flexible RF-based comb generator [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(7): 701-704.
- 11 C Chen, F Zhang, S Pan. Generation of seven-line optical frequency comb based on a single polarization modulator [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(22): 2164-2166.
- 12 Z Jiang, C B Huang, D E Leaird, *et al.*. Optical arbitrary waveform processing of more than 100 spectral comb lines [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(8): 463-467.
- 13 E Frumker, Y Silberberg. Femtosecond pulse shaping using a two-dimensional liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(11): 1384-1386.
- 14 T Ohara, H Takara, T Yamamoto, *et al.*. Over-1000-channel ultradense WDM transmission with supercontinuum multicarrier source [J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(6): 2311-2317.
- 15 M Fujiwara, M Teshima, J I Kani, *et al.*. Optical carrier supply module using flattened optical multicarrier generation based on sinusoidal amplitude and phase hybrid modulation [J]. *J Lightwave Technol*, 2003, 21(11): 2705-2714.
- 16 M Yan, M Yao, H Zhang, *et al.*. En/decoder for spectral phase-coded OCDMA system based on amplitude sampled FBG [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20(10): 788-790.
- 17 C Chen, C Zhang, D Liu, *et al.*. Tunable optical frequency comb enabled scalable and cost-effective multiuser orthogonal frequency-division multiple access passive optical network with source-free optical network units [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(19): 3954-3956.
- 18 T Sakamoto, T Kawanishi, M Izutsu. Asymptotic formalism for ultraflat optical frequency comb generation using a Mach-Zehnder modulator [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(11): 1515-1517.
- 19 M Fujiwara, J Kani, H Suzuki, *et al.*. Flattened optical multicarrier generation of 12.5 GHz spaced 256 channels based on sinusoidal amplitude and phase hybrid modulation [J]. *Electron Lett*, 2001, 37(15): 967-968.

- 20 T Sakamoto, T Yamamoto, K Kurokawa, *et al.*. DWDM transmission in O-band over 24 km PCF using optical frequency comb based multicarrier source [J]. *Electron Lett*, 2009, 45(16): 850–851.
- 21 T Hoshi, T Shioda, Y Tanaka, *et al.*. 100-km DWDM transmission with 50-GHz channel spacing using a frequency-comb light source [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics-Pacific Rim*, 2007, 1–2.
- 22 J Yu, Z Dong, N Chi. 1.96 Tb/s (21×100 Gb/s) OFDM optical signal generation and transmission over 3200-km fiber [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23(15): 1061–1063.
- 23 C Chen, C F Zhang, W Zhang, *et al.*. Hybrid WDM-OFDMA-PON utilising tunable generation of flat optical comb [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 49(4): 276–277.
- 24 Yujie Dou, Hongming Zhang, Minyu Yao. Multi-wavelength pulse generation using flattop optical frequency comb and arrayed waveguide grating [J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(12): 123201.
- 25 Y Xiang, N Jiang, C Chen, *et al.*. Wired/wireless access integrated RoF-PON with scalable generation of multi-frequency MMWs enabled by tunable optical frequency comb [J]. *Opt Lett*, 2013, 21(17): 19762.
- 26 R Wu, V R Supradeepa, C M Long, *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]. *Opt Lett*, 2010, 35(19): 3234–3236.
- 27 V Torres-Company, J Lancis, P. Andrés. Lossless equalization of frequency combs [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(16): 1822–1824.
- 28 J Zhang, J Yu, L Tao, *et al.*. Generation of coherent and frequency-lock optical subcarriers by cascading phase modulators driven by sinusoidal sources [J]. *J Lightwave Technol*, 2012, 30(24): 3911–3917.
- 29 J Zhang, J Yu, N Chi, *et al.*. Flattened comb generation using only phase modulators driven by fundamental frequency sinusoidal sources with small frequency offset [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(4):
- 30 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.
- 31 Y J Dou, H M Zhang, M Y Yao. Improvement of flatness of optical frequency comb based on nonlinear effect of intensity modulator [J]. *Opt Lett*, 2011, 36: 2749–2751.
- 32 C Chen, C He, D Zhu, *et al.*. Generation of a flat optical frequency comb based on a cascaded polarization modulator and phase modulator [J]. *Opt Lett*, 2013, 38: 3137–3139.
- 33 V R Supradeepa, A M Weiner. Bandwidth scaling and spectral flatness enhancement of optical frequency combs from phase-modulated continuous-wave lasers using cascaded four-wave mixing [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(15): 3066–3068.
- 34 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 Photon Technol Lett*, 2010, 22(11): 826–828.
- 35 S Chandrasekhar, X 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]. *35th European Conference on Optical Communication*, 2009.
- 36 Q Yang, Z He, W Liu, *et al.*. 1-Tb/s large girth LDPC-coded coherent optical OFDM transmission over 1040-km standard single-mode fiber [C]. *OFC 2011, JThA35*.
- 37 G Gavioli, E Torrenco, G Bosco, *et al.*. Investigation of the impact of ultra-narrow carrier spacing on the transmission of a 10-carrier 1Tb/s superchannel [C]. *OFC 2010, 0ThD3*.
- 38 G Gavioli, E Torrenco, G Bosco, *et al.*. Ultra-narrow-spacing 10-channel 1.12Tb/s D-WDM long haul transmission over uncompensated SMF and NZDSF [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 22(19): 1419–1421.
- 39 Y Ma, Q Yang, S Chen, *et al.*. Multi-tone generation using a recirculating frequency shifter and its application to 1-Tb/s coherent optical OFDM signal [C]. *OECC 2009, ThLP75*.
- 40 J Li, X Zhang, F Tian, *et al.*. Generation of stable and high-quality multicarrier source based on re-circulating frequency shifter for Tb/s optical transmission [C]. *OFC 2011, 0WE4*.
- 41 F Tian, X Zhang, J Li, *et al.*. Generation of 50 stable frequency-locked optical carriers for Tb/s multicarrier optical transmission using a recirculating frequency shifter [J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29(8): 1085–1091.
- 42 Y Ma, Q Yang, Y 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(4): 308–315.
- 43 Y Ma, Q Yang, Y 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(11): 9421–9427.
- 44 X Liu, S Chandrasekhar, B Zhu, *et al.*. Efficient digital coherent detection of a 1.2-Tb/s 24-carrier no-guard-interval

- CO-OFDM signal by simultaneously detecting multiple carriers per sampling [C]. OFC 2010, OWO2.
- 45 S Chen, Y Ma, Q Yang, *et al.*. Ultra-broadband OFDM signal generation for 1-Tb/s super-channel coherent optical OFDM transmission [J]. *Opt Commun*, 2011, 284 (15): 3718.
- 46 S Chen, Y Ma, W Shieh. 110-Gb/s multi-band real-time coherent optical OFDM reception after 600-km transmission over SSMF fiber [C]. OFC OMS2, 2010.
- 47 Y Tang, W Shieh. Coherent optical OFDM transmission up to 1Tb/s per channel [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(16): 3511-3517.
- 48 J Li, X Li, X Zhang, *et al.*. Analysis of the stability and optimizing operation of the single-side-band modulator based on recirculating frequency shifter used for the T-bit/s optical communication transmission [J]. *Opt Express*, 2010, 18 (17): 17597-17609.
- 49 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.
- 50 Liu Na, Xi Lixia, Li Jianping, *et al.*. A scheme for improving optical signal-to-noise ratio of multi-carrier source based on recirculating frequency shifter [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(17): 174209.
- 刘娜, 席丽霞, 李建平, 等. 一种提高基于循环频移器的多载波光信噪比的方案 [J]. *物理学报*, 2012, 61(17): 174209.
- 51 J Zhang, J Yu, N Chi, *et al.*. Improved multicarriers generation by using multifrequency shifting recirculating loop [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(16): 1405-1408.
- 52 J Zhang, J Yu, N Chi, *et al.*. Theoretical and experimental study on improved frequency-locked multicarrier generation by using recirculating loop based on multifrequency shifting single-sideband modulation [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(6): 2249-2261.
- 53 X Li, J Yu, Z Dong, *et al.*. Multi-channel multi-carrier generation using multi-wavelength frequency shifting recirculating loop [J]. *Opt Express*, 2012, 20(20): 21833-21839.
- 54 J Zhang, J Yu, N 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.
- 55 J Zhang, J Yu, N Chi, *et al.*. Improved multi-channel multi-carrier generation using gain-independent multi-channel frequency shifting recirculating loop [J]. *Opt Express*, 2012, 20(20): 29599-29604.
- 56 J Zhang, J Yu, N Chi, *et al.*. Stable optical frequency-locked multicarriers generation by double recirculating frequency shifter loops for Tb/s communication [J]. *J Lightwave Technol*, 2012, 30(24): 3938-3945.
- 57 N Dupuis, C R Doerr, L Zhang, *et al.*. InP-based comb generator for optical OFDM [C]. OFC 2011, PDPC8.
- 58 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.
- 59 J Zhang, N Chi, J Yu, *et al.*. Generation of coherent and frequency-locked multi-carriers using cascaded phase modulators and recirculating frequency shifter for Tb/s optical communication [J]. *Opt Express*, 2011, 19(4): 2891-12902.
- 60 J Zhang, J Yu, Z Dong, *et al.*. Generation of full C-band coherent and frequency-locked multi-carriers by using recirculating frequency shifter loops based on phase modulator with external injection [J]. *Opt Express*, 2011, 19(27): 26370-26381.
- 61 J Yu, Z Dong, X Xiao, *et al.*. Generation of 112 coherent multi-carriers and transmission of 10 Tb/s (112 100 Gb/s) single optical OFDM superchannel over 640 km SMF [C]. inProc. OFC, 2011, Paper PDPA6.
- 62 V Ataie, E Myslivets, B P P Kuo, *et al.*. Spectrally equalized frequency comb generation in multistage parametric mixer with nonlinear pulse shaping [J]. *J Lightwave Technol*, 2014, 32(4): 840-846.

栏目编辑: 苏 岑