

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.240251.

光电子器件技术

徐恺,黄瑶玲,姚兵,等.可编程光倍频和光频梳产生方法研究[J].光通信研究,2026(4):213-218.

Xu K, Huang Y L, Yao B, et al. Study on Programmable Optical Frequency Multiplication and Optical Frequency Comb Generation Methods[J]. Study on Optical Communications, 2026(4):213-218.

可编程光倍频和光频梳产生方法研究

徐 恺¹,黄瑶玲²,姚 兵²,万 泉²,段施奇²,赵诗雅²,邓 磊¹

(1. 华中科技大学 光学与电子信息学院,武汉 430074; 2. 国网湖北省电力有限公司直流公司,湖北 宜昌 443000)

摘要:【目的】传统的毫米波移动前传系统通常采用电子器件实现信号的产生和处理,其频段和带宽受到“电子瓶颈”限制。微波光子技术具有低损耗、高频率、大带宽和可重构的优势,可以有效突破“电子瓶颈”,实现大带宽高速信号产生和长距离传输。但目前基于电光调制器(EOM)的光生毫米波方法通常结构复杂且控制困难。【方法】针对这一问题,文章提出了一种可编程光倍频和光频梳(OFC)产生方法,所有的光学功能集成在一个双偏振同相正交调制器(DPIQM)中。通过基于数字混沌导频和谐波相关检测的自动偏置控制技术,控制 DPIQM 偏置在不同状态,可分别生成高平坦度的 OFC 和高抑制比的光倍频信号。【结果】文章基于所提方法设计了样机并进行了实验验证。实验产生了自由光谱范围(FSR)为 8 GHz,功率平坦度高达 0.86 dB 的 9 线 OFC。此外还产生了 FSR 为 2~4 GHz、谐波抑制比超过 13 dB 的 1~4 阶光倍频。实验还证明了产生的 OFC 和光倍频信号具有理想的相位噪声特性,4 阶光倍频信号拍频得到的电信号的相位噪声低于-115 dBc/Hz@1 MHz。【结论】文章所提可编程光倍频和 OFC 产生方法具有功能集成、结构紧凑、控制灵活和易于调谐的特点,最高可实现 8 倍频毫米波信号,对未来多波段毫米波通信系统的带宽和速率扩展具有实际意义。

关键词:光频梳;光倍频;电光调制器;偏置点控制

中图分类号:TN929 **文献标志码:**A

Study on Programmable Optical Frequency Multiplication and Optical Frequency Comb Generation Methods

XU Kai¹, HUANG Yaoling², YAO Bing², WAN Quan², DUAN Shiqi², ZHAO Shiya², DENG Lei¹

(1. School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., DC Branch, Yichang 443000, China)

Abstract: 【Objective】Conventional millimeter-wave mobile forward transmission systems usually utilize electronic devices to realize signal generation and processing, with their frequency bands and bandwidths limited by the “electronic bottleneck”. Micro-wave photonics technology has the advantages of low loss, high frequency, large bandwidth and reconfigurable, which can effectively break through the “electronic bottleneck”. It also enables the generation and long-distance transmission of high-speed wideband signals. However, current photogenerated millimeter-wave methods based on Electro-Optical Modulator (EOM) are often complex in structure and difficult to control. 【Methods】To address this problem, a programmable optical frequency multiplication and optical frequency comb generation method is proposed in this paper, with all optical functions integrated in a Dual-Polarization In-phase and Quadrature Modulator (DPIQM). Utilizing the automatic bias control technique based on digital chaotic dither and harmonic correlation detection, the DPIQM can be controlled at different bias states, allowing the generation of Optical Frequency Combs (OFC) with high flatness and optical frequency multiplication signals with high suppression ratio. 【Results】A prototype is designed and experimentally demonstrated based on the proposed method in this paper. A 9-line OFC with a Free Spectral Range (FSR) of 8 GHz and a power flatness of up to 0.86 dB was experimentally generated. Optical frequency multiplication signals of 1st to 4th order with an FSR of 2 to 4 GHz and a harmonic rejection ratio of more than 13 dB were also generated. In addition, the generated OFC and optical frequency multiplication signals were also experimentally proven to have excellent phase noise characteristics. The phase noise of the electrical signal obtained by beating the 4th order optical frequency multiplication signal is lower than -115 dBc/Hz@1 MHz. 【Conclusion】The programmable optical frequency multiplication and OFC generation method provided in this paper is integrated in function, compact in structure, flexible in control, convenient in adjustment, and can realize millimeter-wave signal with up to 8 folds of frequency multiplication. It has important practical significance to expand the bandwidth and rate of future multi-band millimeter-wave communication systems.

Key words: OFC; optical frequency multiplication; EOM; bias point control

0 引言

毫米波移动前传系统具有频谱资源丰富、延迟

低和方向性好等优势,能够满足未来移动通信业务的需求^[1]。毫米波通信需要提供一种灵活可调谐的信号源,以服务于不同业务场景。传统的毫米波通

收稿日期:2024-12-02; 修回日期:2024-12-26; 纸质出版日期:2026-08-10

基金项目:国网湖北直流公司科技资助项目(B7152124003C)

作者简介:徐恺(2000—),男,湖南益阳人。博士,主要研究方向为微波光子应用技术。

通信作者:邓磊,教授。E-mail:denglei_hust@mail.hust.edu.cn

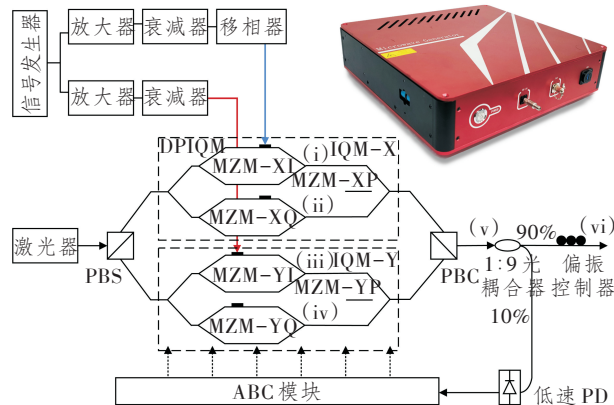
© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

信系统通常采用电子器件实现信号的产生和处理,但电子器件存在带宽与速率的“电子瓶颈”,限制了无线信号的频段和带宽,提高了系统成本^[2]。微波光子技术兼具光子技术和微波技术的特点,具有低损耗、高频率、大带宽和可重构的优势,可以有效突破“电子瓶颈”,实现大带宽高速信号产生和低损耗长距离传输^[3-4]。

目前,电光调制器(Electro-Optical Modulator, EOM)被广泛用于光生毫米波信号^[5-8],但基于EOM的光频梳(Optical Frequency Comb, OFC)和光倍频方案难以通过自动控制实现毫米波频率的灵活调谐,且通常需要复杂的调制器结构实现不同阶数的光倍频,严重限制了毫米波信号产生的可拓展性。因此,本文对光倍频和 OFC 产生方法进行了研究,基于双偏振同相正交调制器(Dual-Polarization In-phase and Quadrature Modulator, DPIQM)和自动偏置控制(Automatic Bias Control, ABC)技术,提出了一种功能集成的可编程光倍频和 OFC 产生方案。基于该方案设计的样机可以产生平坦度<1 dB 的 9 线 OFC,同时可以产生谐波抑制比>13 dB 的 1~4 阶光倍频。所有的光学功能集成在一个调制器中,非常适合移动前传中的光生毫米波应用。

1 结构与原理

本文所提可编程光倍频和 OFC 产生方案系统结构如图 1 所示。激光器产生的连续波光载波,通过偏振分束器(Polarization Beam Splitter, PBS)注入 DPIQM 中。用于调制的射频信号可表示为



注:PBC为偏振合束器;PD为光电探测器;XI/II/XQ/YQ分别为4个MZM编号,X/Y为X、Y偏振方向,I/Q为同向/正交分量。

图1 可编程光倍频和 OFC 产生方案系统结构

Figure 1 System structure of the programmable optical frequency multiplication and OFC generation scheme

$V_{R1} \cos(\omega_R t + \phi_R)$ 和 $V_{R2} \cos(\omega_R)$, 其中 V_{R1} 和 V_{R2} 为两路射频信号的幅度, ω_R 为射频信号的角频率, ϕ_R 为两路射频信号的相对相位。射频信号注入马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)-XI/YI 射频端口并调制在光载波上,通过调制器的非线性效应激发光载波的高阶谐波频率分量。而 MZM-XQ/YQ 始终保持空置,仅用于抑制载波。DPIQM 的输出光信号 E_{out} 可表示为

$$E_{out} = E_{in} \left\{ \begin{aligned} &\cos \left[\frac{\varphi_{XI} + \beta_{R1} \cos(\omega_R t + \phi_R)}{2} \right] + \\ &\cos \left(\frac{\varphi_{XQ}}{2} \right) \exp(j\varphi_{XP}) \end{aligned} \right\} \vec{e}_x + E_{in} \left\{ \begin{aligned} &\cos \left[\frac{\varphi_{YI} + \beta_{R2} \cos(\omega_R t)}{2} \right] + \\ &\cos \left(\frac{\varphi_{YQ}}{2} \right) \exp(j\varphi_{YP}) \end{aligned} \right\} \vec{e}_y, \quad (1)$$

式中: E_{in} 为输入光的光场强度; $\varphi_x = \pi V_{bias-x}/V_\pi$ 为每个 MZM 的偏置相位; x 为各子 MZM 的编号 XI/XQ/YI/YQ/XP/YP, V_{bias-x} 为各子 MZM 加载的偏置电压, V_π 为每个 MZM 的半波电压。 $\beta_{R1/R2} = \pi V_{R1/R2}/V_\pi$ 为两路射频信号的调制深度; $\vec{e}_x$ 和 $\vec{e}_y$ 为 X 和 Y 偏振态的单位矢量; j 为虚数单位。以 MZM-XI 为例,其输出光信号 E_{XI} 通过 Jacobi-Anger 展开可表示为

$$E_{XI} = E_{in} \cos \left[\frac{\varphi_{XI} + \beta_{R1} \cos(\omega_R t + \phi_R)}{2} \right] = E_{in} \left\{ \begin{aligned} &\cos \left(\frac{\varphi_{XI}}{2} \right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_{2n} \left(\frac{\beta_{R1}}{2} \right) \cos[2n(\omega_R t + \phi_R)] + \\ &\sin \left(\frac{\varphi_{XI}}{2} \right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_{2n-1} \left(\frac{\beta_{R1}}{2} \right) \cos[(2n-1)(\omega_R t + \phi_R)] \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

式中, $J_n(\cdot)$ 为 n 阶的第一类贝塞尔函数。显然,当 MZM-XI 偏置于峰值(Peak)点,即 $\varphi_{XI} = 0$ 时,其输出光信号只包含光载波的偶数阶谐波分量。同理,当 MZM-XI 偏置于谷值(Null)点,即 $\varphi_{XI} = \pi$ 时,其输出光信号只包含光载波的奇数阶谐波分量。

根据上述原理,本文设计了基于 DPIQM 产生光倍频和 OFC 的可编程方法,如表 1 所示。为了产生 OFC 信号,将 MZM-XI 偏置于 Peak 点以产生偶数阶谐波, MZM-YI 偏置于 Null 点以产生奇数阶谐波, MZM-XQ 和 MZM-YQ 不注入射频信号,均偏置于 Null 点以抑制载波。两个偏振方向的谐波信号通过 PBC 合束,输出的光信号具有梳状的

频率结构,相邻频率分量的自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)严格定义为射频信号频率 f_R 。图2所示为产生OFC时,图1中不同节点信号频谱的特征。为了优化OFC的平坦度,根据贝塞

尔函数曲线,当MZM-XI和MZM-YI的调制深度满足 $J_1(\beta_{R2}/2)=J_3(\beta_{R2}/2)$, $J_2(\beta_{R1}/2)=J_4(\beta_{R1}/2)$ 时,奇/偶次谐波之间功率相差约0.3 dB,可以产生具有较高平坦度的9线OFC。

表1 产生光倍频和OFC的可编程方法

Table 1 Programmable method for optical frequency multiplication and optical frequency comb generation

产生信号	偏置点						射频信号
	MZM-XI	MZM-XQ	MZM-XP	MZM-YI	MZM-YQ	MZM-YP	相位差
OFC	Peak	Null	Null	Null	Null	Null	0
1阶光倍频	Null	Null	Null	Null	Null	Null	$\pi/3$
2阶光倍频	Peak	CS	Null	Peak	CS	Null	$\pi/4$
3阶光倍频	Null	Null	Null	Null	Null	Null	$2\pi/3$
4阶光倍频	Peak	CS	Null	Peak	CS	Null	$\pi/2$

注:CS为载波抑制点。

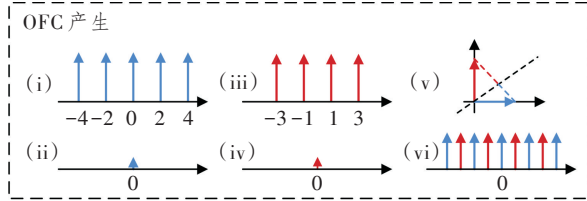


图2 产生OFC时不同节点的信号频谱

Figure 2 Signal spectra at different points in optical frequency comb generation

本文所提方案还可产生1~4阶的光倍频信号,例如,为了生成4阶的光倍频信号,将MZM-XI和MZM-XQ均偏置于Peak点以产生偶数阶谐波,此时DPIQM的输出光信号可以表示为

$$E_{out} = E_{in} \left\{ \begin{aligned} & \left[J_0\left(\frac{\beta_{R1}}{2}\right) + J_2\left(\frac{\beta_{R1}}{2}\right) \cos(2\omega_R t + 2\phi_R) \right. \\ & \left. + J_4\left(\frac{\beta_{R1}}{2}\right) \cos(4\omega_R t + 4\phi_R) \right] + \\ & \cos\left(\frac{\phi_{XQ}}{2}\right) \exp(j\phi_{XP}) \Big\} e_x + \\ & E_{in} \left\{ \begin{aligned} & \left[J_0\left(\frac{\beta_{R2}}{2}\right) + J_2\left(\frac{\beta_{R2}}{2}\right) \cos(2\omega_R t) \right. \\ & \left. + J_4\left(\frac{\beta_{R2}}{2}\right) \cos(4\omega_R t) \right] + \\ & \cos\left(\frac{\phi_{YQ}}{2}\right) \exp(j\phi_{YP}) \Big\} e_y. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

本文5阶及以上的谐波可以忽略以简化讨论,因为激发更高阶的谐波需要非常大的射频驱动。通过控制两路射频信号相对相位为 $\phi_R = \pi/2$,可抵消输出信号中的2阶谐波,MZM-XQ和MZM-YQ均偏置于特殊的CS点,满足 $\cos(\phi_{XQ/YQ}/2) = J_0(\beta_{R1/R2}/2)$,以抑制载波。因此,在上述条件下,

DPIQM的输出信号以 ± 4 阶谐波为主。图3所示为产生4阶光倍频时,图1中不同节点的信号频谱特征。本方案生成的多波长OFC和光倍频信号均具有高度相干特性,通过拍频可以进一步生成高质量和低相噪的2~8倍频毫米波信号。

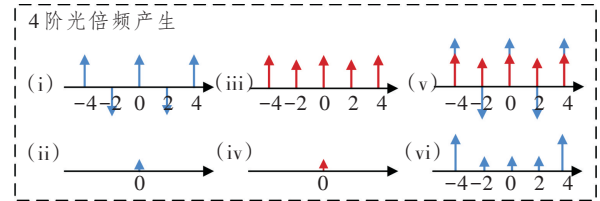


图3 产生4阶光倍频时不同节点的信号频谱

Figure 3 Signal spectra at different points in 4th order optical multiplication generation

本文所提不同功能的可编程控制和稳定工作通过自研的ABC技术和模块实现^[9]。所提ABC技术基于数字混沌导频注入和谐波相关检测,具体结构如图4所示。与传统的ABC技术相比^[10],该技术可减轻高功率射频调制带来的本底噪声的影响,有效控制MZM-XQ和MZM-YQ偏置于特殊要求的CS点。图4所示数字混沌合成单元产生的混沌导频信号可以表示为 $V_c \cdot f_c(t)$,其与数/模转换器(Digital to Analog Converter, DAC)产生的偏置电压叠加,用于扰动DPIQM。假设此时MZM-XI/YI和MZM-XP/YP已经按表1分别偏置于Peak点和Null点,图4中低速PD探测到的导频产物可以表示为

$$I_c(t) = |E_{in}|^2 \left\{ -J_0\left(\frac{\beta_{R1/R2}}{2}\right) \cos\left[\frac{\phi_{XQ/YQ} + \beta_c f_c(t)}{2}\right] + \cos^2\left[\frac{\phi_{XQ/YQ} + \beta_c f_c(t)}{2}\right] \right\}, \quad (4)$$

式中, $\beta_c = \pi V_c / V_\pi$ 。低速 PD 探测电流经过模/数转换器 (Analog to Digital Converter, ADC) 量化为数字信号, 然后在相干运算单元中与初始的数字混沌导频进行互相关积分, 其积分系数 CIQ 可以表示为

$$CIQ = \int_0^T I_c(t) \cdot f_c(t) dt \propto \left[J_0 \left(\frac{\beta_{R1/R2}}{2} \right) - \cos \left(\frac{\varphi_{XQ/YQ}}{2} \right) \right] \cdot \sin \left(\frac{\varphi_{XQ/YQ}}{2} \right), \quad (5)$$

式中, T 为信号周期。因此, 本文所提 ABC 方法只需要追踪 CIQ 的零点, 就可以将 MZM-XQ 和 MZM-YQ 的偏置收敛于 CS 点。

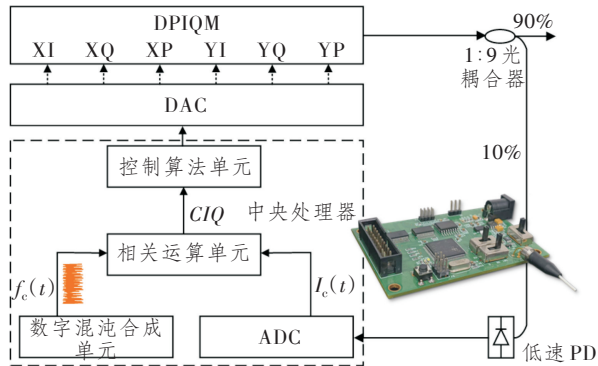


图 4 ABC 技术原理

Figure 4 Principle of ABC technology

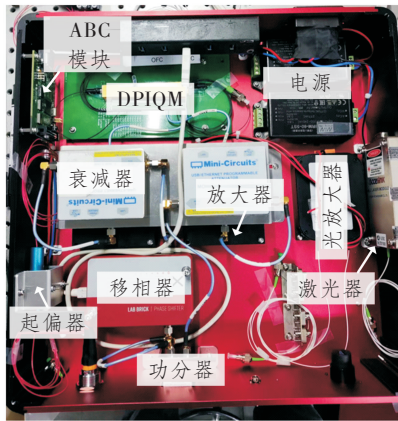
2 结果与分析

为了验证本文所提可编程光倍频和 OFC 产生方案的可行性和有效性, 本文根据图 1 所示的系统结构设计了实验样机, 并搭建了实验测试平台, 如图 5 所示。由窄线宽激光器生成中心波长为 1 550 nm, 功率为 10 dBm 的光载波, 作为种子光注入 DPIQM 中。由低相噪射频合成器生成的射频信号通过功分器分成两路, 通过功率放大器放大、衰减器调节功率平衡和移相器调节相对相位后, 注入 MZM-XI 和 MZM-YI 的射频端口, 调制在种子光上。DPIQM 的偏置通过自研的 ABC 模块进行编程控制, 输出的 OFC 或光倍频信号通过光谱仪进行测量。实验中主要器件的型号及参数如表 2 所示。

表 2 实验中主要器件的型号及参数

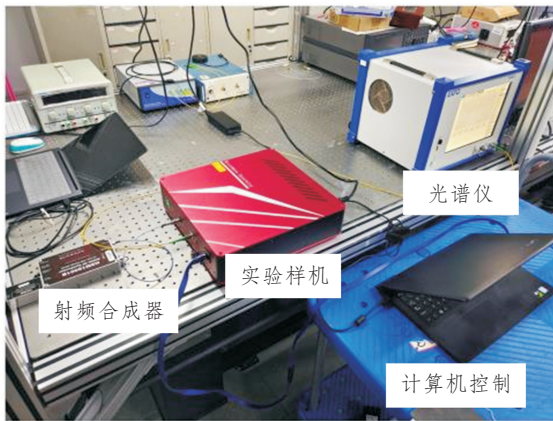
Table 2 Models and parameters of the main devices in the experiment

器件名称	型号	带宽
射频合成器	Holzworth HSM18001B	10 MHz~20 GHz
放大器	GT-PA-20G	1~20 GHz
衰减器	Mini-CircuitsRC-DAT-8000-30	1 MHz~8 GHz
移相器	Vaunix LPS-402	2~4 GHz



(a) 实验样机图

(a) Image of the experimental prototype



(b) 实验平台图

(b) Image of the experimental platform

图 5 实验样机和测试平台图

Figure 5 Images of the experimental prototype and test platform

实验生成了高平坦度的 OFC 信号。图 6 所示为实验生成的 OFC 的光谱, 不同频率分量的 FSR 等于射频信号频率, 设置为 8 GHz。由于偏置点控制的高精度和稳定性, 中间 9 根梳具有高度的功率一致性, 其功率平坦度达到 0.86 dB, 超过了文献[8]

中 9 线 OFC 为平坦度 2.7 dB 的最好结果。此外, 根据上一节的理论推导, OFC 的平坦度仅与调制深度和偏置点的稳定性有关, 与 FSR 无关, 因此只需要改变射频合成器生成的射频信号频率, 就可以产生不同带宽的高平坦 OFC。

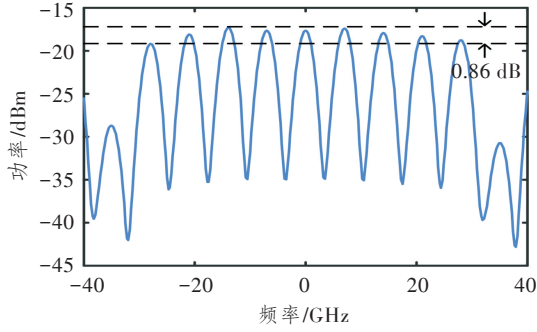
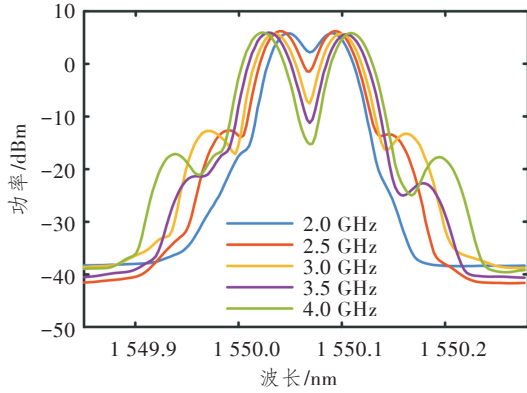
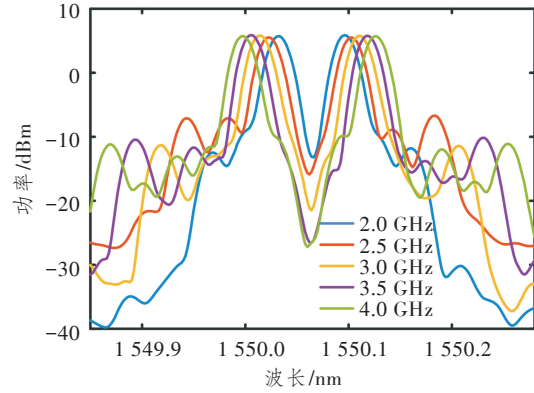


图 6 实验生成的 OFC 光谱

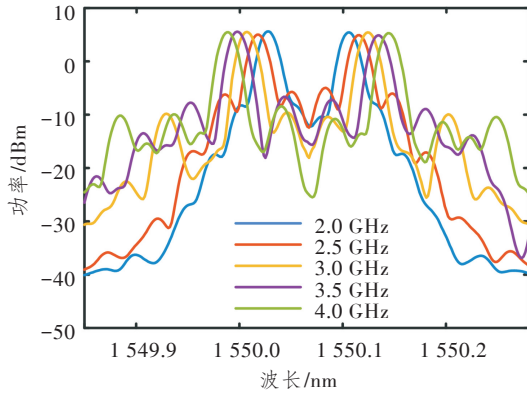
Figure 6 Spectrum of the experimentally generated OFC



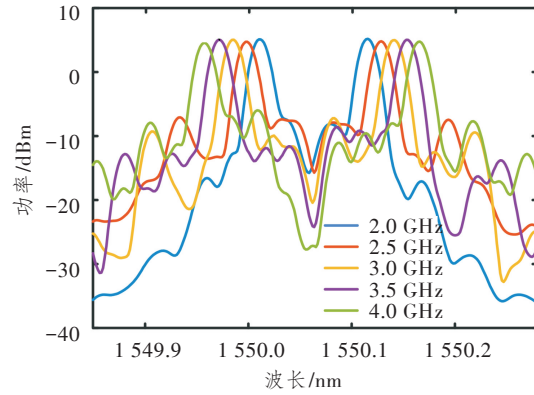
(a) 1 阶光倍频光

(a) 1st order optical frequency multiplication

(b) 2 阶光倍频光

(b) 2nd order optical frequency multiplication

(c) 3 阶光倍频光

(c) 3rd order optical frequency multiplication

(d) 4 阶光倍频光

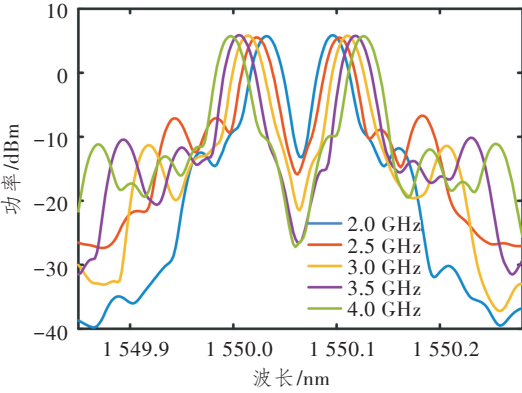
(d) 4th order optical frequency multiplication

图 7 实验生成的光倍频光谱

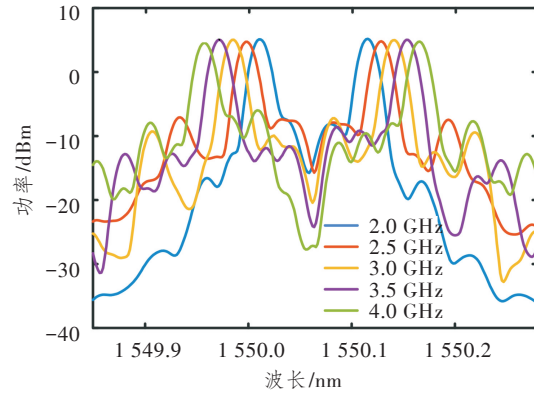
Figure 7 Spectra of the experimentally generated optical frequency multiplication

实验产生的 OFC 和光倍频信号具有非常高的频谱纯度。相较于热噪声和散粒噪声,相位噪声是影响本文所提方案生成信号质量的关键噪声成分。基于电光调制非线性产生的光谐波信号理论上没有频偏和额外的相位噪声,因此本方案生成的 OFC 和光倍频信号的相位噪声特性和频率稳定性仅由射频信号源本身的相位噪声和倍频阶数决定。在实验中,射频信号频率设置为 4 GHz,将生成的光倍频信号经 PD 拍频转换为电信号,用相位噪声分析仪进

实验生成了高质量的光倍频信号。图 7(a)~(d)所示分别为射频信号频率设置为 2~4 GHz 时实验产生的 1~4 阶光倍频信号光谱。受光谱仪分辨率限制,1 阶光倍频信号的部分频率分量无法有效分辨。1~4 阶光倍频信号的杂散谐波抑制比最大可分别达到 23.3、17.1、15.3 和 13.6 dB。通过对 MZM-XQ 和 MZM-YQ 的偏置控制,光倍频信号的载波抑制比可以达到 30 dB。高纯度的光倍频信号拍频即可以产生最高至 8 倍频的多波段毫米波信号。



(b) 2 阶光倍频光

(b) 2nd order optical frequency multiplication

(d) 4 阶光倍频光

(d) 4th order optical frequency multiplication

行测量。实测相位噪声曲线如图 8(a)所示,由图可知,电信号的相位噪声随倍频阶数的增加而增大,与理论分析一致。在 1 MHz 频偏处,8 倍频电信号的实测相位噪声低于 -115 dBc/Hz,相较于 2 倍频电信号劣化小于 12 dB。图 8(b)所示为系统连续工作 30 min 内,载波抑制比、杂散谐波抑制比和 OFC 平坦度的波动情况,可以看到信号的功率水平始终具有较好的稳定性,满足系统长时间稳定运行的要求。

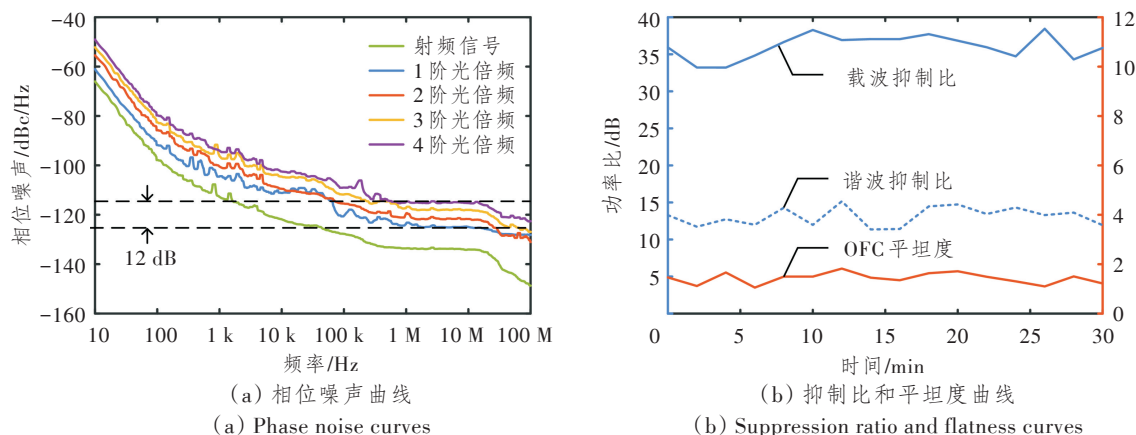


图8 实验测量的相位噪声和稳定性曲线

Figure 8 Experimentally measured curves of the phase noise and stability

3 结束语

本文提出了一种可用于毫米波移动前传系统的OFC和光倍频信号的可编程产生方法。所有的光学功能集成在一个DPIQM中,通过基于数字混沌导频和谐波相关检测的ABC模块实现不同功能的切换和稳定。基于该方案设计了实验样机并搭建实验平台验证了所提方案的可行性和有效性。实验产生了高平坦度的9线OFC,其功率波动仅为0.86 dB,同时产生了高质量的1~4阶光倍频,其谐波抑制比>13 dB。实验产生的OFC和光倍频信号具有非常高的频谱纯度,拍频电信号的相位噪声仅与射频信号源和倍频阶数有关。本文所提方案功能集成、结构紧凑、控制灵活且易于调谐,最高可实现8倍频毫米波信号,且能够长期稳定运行,有望应用于未来多波段毫米波通信场景。

参考文献:

- [1] 毛嘉智, 芦启超, 陶理, 等. E波段毫米波远距离通信技术[J]. 光通信研究, 2024(4): 240008.
Mao J Z, Lu Q C, Tao L, et al. Research on E-Band Millimeter-Wave Long-Distance Communication Technology[J]. Study on Optical Communications, 2024(4): 240008.
- [2] 邵帅, 杨四刚, 陈宏伟, 等. 基于光子学的线性调频微波信号产生技术进展(特邀)[J]. 光学学报, 2024, 44(15): 507-521.
Shao S, Yang S G, Chen H W, et al. Progress in Photonics-based Linear Frequency-Modulated Microwave Signal Generation Technology(Invited)[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(15): 507-521.
- [3] Minasian R A. Ultra-Wideband and Adaptive Photonic Signal Processing of Microwave Signals[J]. IEEE Jour-

nal of Quantum Electronics, 2016, 52(1): 0600813.

- [4] Yao J. Microwave Photonic Systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(20): 6595-6607.
- [5] 邱纪琛. 基于光域相干频梳的微波/毫米波信号调频技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
Qiu J C. Research on Microwave and Millimeter Wave Signal Frequency Modulation Technology based on Optical Coherent Frequency Comb[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2023.
- [6] 刘翠微, 余建军, 熊良明, 等. 带预编码的六倍频矢量毫米波信号产生和探测[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0906006.
Liu C W, Yu J J, Xiong L M, et al. Generation and Detection of Six-Fold Frequency Vector Millimeter-Wave Signal with Precoding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0906006.
- [7] 钱金旺, 孙俊灵, 金秋春, 等. 基于调制器级联的可调谐平坦光频梳产生[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(17): 1706013.
Qian J W, Sun J L, Jin Q C, et al. Generation of Tunable Flat Optical Frequency Comb based on Cascaded Modulators [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(17): 1706013.
- [8] Yan J, Zhang S, Xia Z, et al. A Tunable Optical Frequency Comb Generator Using a Single Dual Parallel Mach-Zehnder Modulator[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 72: 74-78.
- [9] Li H, Li X, Huang C, et al. Low-Disturbance Automatic Bias Point Control for Optical IQ Modulator Using Digital Chaotic Waveform as Dither Signals[J]. Optics Express, 2023, 31(13): 22179.
- [10] Li X, Deng L, Chen X, et al. Modulation-Format-Free and Automatic Bias Control for Optical IQ Modulators based on Dither-Correlation Detection [J]. Optics Express, 2017, 25(8): 9333.