

多种调制格式微波信号的光学产生方案

王国栋,赵尚弘,李 轩,张 昆,林 涛

(空军工程大学 信息与导航学院,陕西 西安 710077)

摘 要:提出了一种基于偏振调制器 (PolM) 和 Sagnac 环级联的多调制格式微波信号的光学产生方案。理论分析了 PolM 在基带编码信号的驱动下产生偏振键控(PolSK)信号的基本原理,Sagnac 环中嵌有两个马赫增德尔调制器(MZM),分别对顺时针和逆时针传输的 PolSK 信号进行独立调制。通过合理调整两个 MZM 的驱动信号,实现了幅移键控(ASK)、频移键控(FSK)和相移键控(PSK)微波信号的产生。在仿真实验中,产生了比特率为 2 Gbit/s 的 40 GHz ASK 信号、20/40 GHz FSK 信号和 20 GHz PSK 信号,同时验证了比特率和载波频率的宽带可调谐性。Sagnac 环结构提升了系统的稳定性,并且针对每种调制格式的微波信号,在不改变链路结构的情况下其比特率和载波频率都可以通过控制基带编码信号和 MZM 的射频驱动来进行独立且灵活的调谐。

关键词:微波信号的光学产生; 光通信; 偏振键控; 微波光子学; 宽带调谐

中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0622002

Optical generation scheme of microwave signals with multiple modulation formats

Wang Guodong, Zhao Shanghong, Li Xuan, Zhang Kun, Lin Tao

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: An optical generation scheme of microwave signals with multiple modulation formats based on a polarization modulator (PolM) and a Sagnac loop was proposed. The PolM was driven by a baseband coding signal to generate a polarization shift keying (PolSK) signal and the generation principle was theoretically analyzed. Two Mach-Zehnder modulators (MZM) were embedded in the Sagnac loop to modulate the PolSK signal transmitted clockwise or counterclockwise, respectively. The outputs of amplitude shift keying(ASK), frequency shift keying(FSK) and phase shift keying(PSK) microwave signals were achieved by properly adjusting the driving signals of two MZMs. In the simulation work, a 40 GHz ASK signal, a 20/40 GHz FSK signal and a 20 GHz PSK signal with a bit rate of 2 Gbit/s were produced. In addition, the broadband tunability of the bit rate and carrier frequency was verified. The system stability was improved with Sagnac ring structure. Furthermore, without changing the link

收稿日期:2019-01-25; 修订日期:2019-02-13

基金项目:国家自然科学基金(61571461)

作者简介:王国栋(1994-),男,硕士生,主要从事光生微波信号技术方面的研究。Email:1535859250@qq.com

导师简介:赵尚弘(1964-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事激光空间信息技术方面的研究。Email:zhaoshangh@aliyun.com

configuration, the bit rate and carrier frequency for each modulation format of microwave signals can be tuned flexibly and independently by controlling the baseband coding signal and the RF driven signals of two MZMs.

Key words: optical generation of microwave signals; optical communications; polarization shift keying; microwave photonics; broadband tunability

0 引言

幅移键控(ASK)、频移键控(FSK)和相移键控(PSK)调制格式的微波信号在无线通信和雷达系统中具有广泛的应用。例如在近距离超高速无线通信中,ASK体制的通信系统具有简洁的系统结构,相比于高阶体制通信更利于系统的集成小型化^[1],在雷达探测中,PSK信号具有良好的脉冲压缩比,可以提高系统的空间分辨率和灵敏度^[2];在光标记交换系统中,基于PSK和ASK的正交调制格式信号通过提升谱效率实现系统性能的优化^[3]。传统上,数字调制格式微波信号使用电学方法产生,因受限于电子瓶颈问题导致信号带宽较小,工作频率较低。而光学方法具有带宽大、频率高、调谐范围广、不受电磁干扰等优点,能有效克服传统电学方法的缺陷^[4]。

为了实现光学产生数字调制格式微波信号,国内外学者提出了许多方案^[5-9]。参考文献[5]利用编码信号控制马赫曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)的工作偏置点,产生高速率大带宽FSK信号。这种方法结构简单、成本低,但信号质量受偏置点漂移的影响较大。参考文献[6]利用数据信号驱动偏振调制器(Polarization Modulator, PolM)产生偏振键控(Polarization Shift Keying, PolSK)信号,PolSK信号根据其偏振状态被相应的MZM所调制,拍频后产生FSK信号。该方案中两路信号在相互平行的分离链路经历不同的时延与环境干扰,降低了系统稳定性。参考文献[7]采用级联MZM结构,通过设置调制器的直流偏置点和调制指数可产生高频、大连续调频范围的PSK信号,但信号质量受到偏置点漂移或调制指数变化的影响,导致系统稳定性差。参考文献[8-9]都是利用一个双平行结构的集成调制器来产生PSK信号。在这个集成的调制器中,上臂被射频信号(Radio Frequency, RF)驱动产生载波抑制双边带(CS-DSB)信号;下臂被数据信号驱动来控

制光载波的相位。上下两臂的光信号合路并拍频后可得到PSK信号。

值得注意的是,参考文献[5-9]的方案仅产生了一种调制格式的信号。当前,通信模块趋向于通用化、综合化、电子设备一体化,可重构性和功能集成在很多应用中有强烈需求,例如动态通信网络和各类综合电子系统^[10]。因此,如何利用一个链路方案产生多种调制格式信号开始被学者们所关注^[11-13]。参考文献[11]利用PolM对脉冲序列中每个超短光脉冲的偏振状态进行调制,结合频谱整形和频时映射(Frequency-to-time Mapping, FTTM)得到多种调制格式的微波信号。参考文献[12]设计了频率可调谐的光电振荡器(Optoelectronic Oscillator, OEO)结构,无需射频驱动信号即可实现倍频微波信号、相位编码信号以及光频梳的产生。参考文献[13]采用两个MZM并联的平行结构对PolSK信号进行调制,拍频后得到ASK、FSK或PSK调制格式的微波信号,且通过调整两个MZM的射频驱动即可灵活地改变调制格式和载波频率。

文中提出了一种基于PolM和Sagnac环的多数字调制格式微波信号的光学产生方案。在该方案中,数字调制格式的切换无需改动链路设置,只需要调整基带编码信号和MZM的射频驱动这两路输入信号即可。生成信号的载波频率和比特率可进行灵活且独立的宽带调谐。相比于参考文献[6,13]的链路结构,该方案中偏振键控信号在Sagnac环内正反向传输经历的是同一条物理链路,时延相同且环境干扰被抵消,克服了平行结构带来的稳定性问题。特别是针对PSK微波信号的产生,Sagnac环结构可以极大减小相位抖动。

1 基本原理

多种调制格式微波信号的光学产生结构如图1所示。该系统主要由两部分组成:以PolM为核心的

PolSK 信号产生结构和嵌有两个单驱动 MZM 的 Sagnac 环。基带信号驱动 PolM 对输入光进行调制,使输出的光信号随着比特‘0’和‘1’的变换在两个正交的偏振态上切换,即产生了 PolSK 信号。当基带信号为比特“1”时,光信号进入 Sagnac 环沿顺时针传输并被 MZM1 调制;当基带信号为比特“0”时,光信号沿逆时针传输并被 MZM2 调制。通过调节两个 MZM 的射频驱动信号,可得到 ASK、FSK、PSK 调制格式的微波信号。

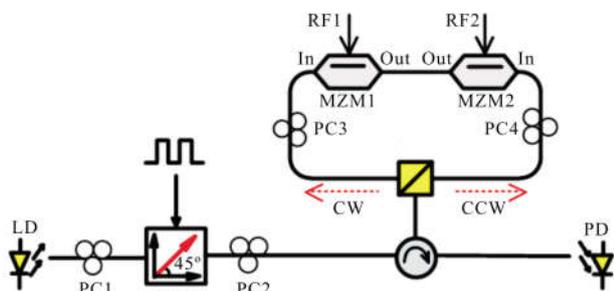


图 1 光生多种调制格式微波信号的结构模型

Fig.1 Schematic diagram of the photonic generation of microwave signal with format agility

1.1 偏振键控信号的产生

假设激光器 (Laser diode, LD) 输出的线偏振光表示为 $E_0(t)$,其偏振状态在偏振控制器 PC1 的调节下与 PolM 的主轴呈 45°角并注入到 PolM 中。PolM 是一种特殊的相位调制器,对 TE 模式和 TM 模式具有相反的调制指数^[14]。当 PolM 受到基带信号驱动时,其输出光场可以表示为:

$$E_{out}(t) = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} E_0(t) \cdot \expj \frac{\pi V s(t)}{V_{\pi-p}} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} E_0(t) \cdot \expj \frac{-\pi V s(t)}{V_{\pi-p}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $V_{\pi-p}$ 为 PolM 的半波电压; V 和 $s(t)$ 分别为基带信号的幅值和归一化波形。PolM 后面连接的偏振控制器 PC2 用于旋转光波的偏振方向。设旋转角度为 θ ,则 PC2 的 Jones 矩阵可以写成:

$$J_{PC2} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

当 PC2 对 PolM 的输出光进行调整后,其输出端光场为:

$$E_{PC2} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = J_{PC2} \cdot E_{out}(t) =$$

$$\frac{\sqrt{2}}{2} E_0(t) \begin{bmatrix} \cos \theta \cdot \expj \frac{\pi V s(t)}{V_{\pi-p}} - \sin \theta \cdot \expj \frac{-\pi V s(t)}{V_{\pi-p}} \\ \sin \theta \cdot \expj \frac{\pi V s(t)}{V_{\pi-p}} + \cos \theta \cdot \expj \frac{-\pi V s(t)}{V_{\pi-p}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

调整旋转角度 θ 为 45°,基带信号幅值 V 为 $V_{\pi-p}/2$,则公式(3)可以写为:

$$E_{PC2} = \begin{cases} [jE_0(t)] & \text{for } s(t) = '1' \\ 0 & \\ 0 & \\ E_0(t) & \text{for } s(t) = '0' \end{cases} \quad (4)$$

由公式(4)可知,当基带信号为比特‘1’时,输出的光波沿偏振 x 轴方向传输;当基带信号为比特‘0’时,输出的光波沿偏振 y 轴方向传输。至此,在 PC2 的输出端产生了 PolSK 信号。图 2 显示了 PolSK 产生的原理过程。

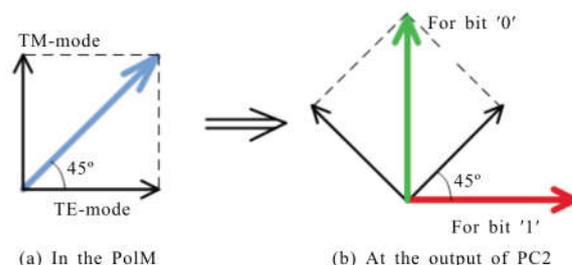


图 2 PolSK 信号的产生原理图(a)PolM 中光波的偏振态(蓝线); (b)PC2 输出端的光波偏振态(比特‘0’对应绿线,比特‘1’对应红线)

Fig.2 Schematic diagram of the generation of PolSK signals (a) polarization state of lightwave in the PolM (blue line); (b) polarization state of lightwave at the output of PC2 (green line for bit ‘0’ and red line for bit ‘1’)

1.2 ASK、FSK 和 PSK 微波信号的产生

PolSK 信号产生后进入 Sagnac 环结构,Sagnac 环中嵌有两个相同的马赫曾德尔调制器 (MZM1 和 MZM2),两个调制器的输入口分别连接偏振分束器 (Polarization Beam Splitter, PBS) 的两个输出口。MZM 属于行波器件,当光从 MZM 输入口进入时,受到射频驱动和直流偏置的调制;而当光从 MZM 输出口反向进入时存在速率失配问题,几乎不受射频驱动信号的调制^[15],只受到直流偏置的作用。该方案中,为确保 PolSK 信号在 Sagnac 环中沿不同方向传输时只受到相应 MZM 的调制,故令两个 MZM 的直流偏置为 0,即工作在最大传输点。

假设 MZM1 的射频驱动信号表示为 $V_1(t)=A\cos(\omega_1 t)$, 其中 A 、 ω_1 分别表示射频信号的幅度、角频率。则 MZM1 输出的光信号可以表示为:

$$E_{\text{MZM1}}(t)=\frac{1}{2}E_0(t)\exp(\pm j m \cos \omega_1 t)=E_0(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^n J_{2n}(m) \exp(j 2 n \omega_1 t) \approx E_0(t)(J_0(m)+J_2(m) \exp(j 2 \omega_1 t+\pi)+J_2(m) \exp(-j 2 \omega_1 t+\pi)) \quad (5)$$

式中: $m=\pi A/V_{\pi-m}$ 为 MZM 的调制指数; $V_{\pi-m}$ 为 MZM 的半波电压; $J_n(\cdot)$ 为第一类 n 阶贝塞尔函数。在小信号调制下, 忽略四阶及以上边带, 则输出光信号只剩下光载波和正负 2 阶边带分量。

经过 MZM1 调制后的光信号从 Sagnac 环中输出, 在光电探测器(Photodetector, PD)中拍频后, 可以

$$E_{\text{out}}(t)=\begin{cases} E_0(t)(J_0(m)+J_2(m) \exp(j 2 \omega_1 t+\pi)+J_2(m) \exp(-j 2 \omega_1 t+\pi)) & \text{for bit '1'} \\ E_0(t) & \text{for bit '0'} \end{cases} \quad (7)$$

输出的光信号经过 PD 拍频后可以得到:

$$i_{\text{out}} \propto \begin{cases} J_0(m)J_2(m) \cos(2\omega_1 t+\pi) & \text{for bit '1'} \\ 0 & \text{for bit '0'} \end{cases} \quad (8)$$

$$E_{\text{out}}(t)=\begin{cases} E_0(t)(J_0(m)+J_2(m) \exp(j 2 \omega_1 t+\pi)+J_2(m) \exp(-j 2 \omega_1 t+\pi)) & \text{for bit '1'} \\ E_0(t)(J_0(m)+J_2(m) \exp(j 2 \omega_2 t+\pi)+J_2(m) \exp(-j 2 \omega_2 t+\pi)) & \text{for bit '0'} \end{cases} \quad (9)$$

输出的光信号经过 PD 拍频后可得到:

$$i_{\text{out}} \propto \begin{cases} J_0(m)J_2(m) \cos(2\omega_1 t+\pi) & \text{for bit '1'} \\ J_0(m)J_2(m) \cos(2\omega_2 t+\pi) & \text{for bit '0'} \end{cases} \quad (10)$$

公式(10)表明在 PD 输出端产生了频率为 $2\omega_1/2\omega_2$ 的 FSK 信号, 其中比特‘0’、‘1’对应的载波频率分别为两个射频驱动信号频率的 2 倍。

同理, 当 MZM2 受到 $V_2(t)=A\cos(\omega_1 t+\varphi)$ 的射频驱动, 其中 $V_2(t)$ 可由 $V_1(t)$ 经过移相器移相 φ 后得到, 则在 PD 输出端可得到:

$$i_{\text{out}} \propto \begin{cases} J_0(m)J_2(m) \cos(2\omega_1 t+\pi) & \text{for bit '1'} \\ J_0(m)J_2(m) \cos(2\omega_1 t+\pi+2\varphi) & \text{for bit '0'} \end{cases} \quad (11)$$

公式(11)表明在 PD 输出端产生了相位差为 2φ 的二倍频 PSK 信号, 且相位跳变可通过调节移相器进行灵活调谐。

2 仿真分析与讨论

为验证文中方案的可行性和有效性, 采用 OptiSystem 软件对该系统进行仿真分析。仿真平台

得到:

$$i_1=R^2|E_0|^2(J_0^2(m)+2J_2^2(m)+2J_2^2(m)\cos(4\omega_1 t)+4J_0(m)J_2(m)\cos(2\omega_1 t+\pi)) \quad (6)$$

式中: R 为 PD 的响应度。其中, 直流分量因为天线的辐射特性而不能被辐射到自由空间中^[9], 四倍频分量因为功率小可以被忽略。因此, 经过 MZM1 调制后的光信号在拍频以后得到了二倍频的微波信号。

通过调节 MZM2 的输入信号, 即可产生 ASK、FSK 和 PSK 三种调制格式的微波信号。

当 MZM2 不加射频驱动, 则比特‘0’对应的光波在 Sagnac 环中逆时针传输时, 在 MZM2 中未受到调制; 而比特‘1’对应的光波在 Sagnac 环中顺时针传输时在 MZM1 中受到射频信号 $V_1(t)$ 的调制。因此, 在 Sagnac 环的输出端可得到:

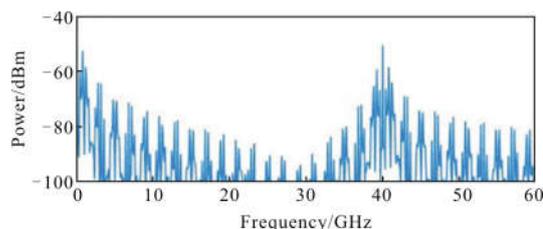
公式(8)表明在 PD 输出端产生了 ASK 微波信号。

当 MZM2 受到 $V_2(t)=A\cos(\omega_2 t)$ 的射频驱动时, 在 Sagnac 环的输出端可得到:

依照图 1 的结构模型进行搭建。设定激光器输出的光载波波长为 1 552.5 nm; 基带编码信号的高低电平幅值分别设为 $V_{\pi-p}/2$ 和 0; 两个 MZM 的半波电压为 4 V 且设置在最大传输点。考虑到实际应用, 将两个 MZM 的消光比都设为 30 dB。

2.1 ASK 微波信号仿真结果及分析

设定基带编码信号为“10110”比特串, 比特速率为 2 Gbit/s。在 MZM1 受到 20 GHz 的微波源信号驱动而 MZM2 不受驱动的情况下, PD 的输出电谱如图 3(a)所示。可以看到产生的 ASK 信号具有 40 GHz



(a) 电谱图

(a) Electrical spectrum

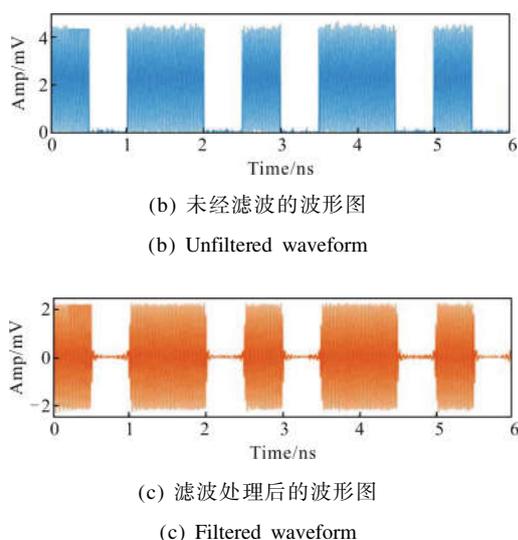


图 3 2 Gbit/s 40 GHz ASK 信号仿真结果

Fig.3 Simulation results of 2 Gbit/s 40 GHz ASK signal

的中心频率,同时也包含基带分量。但是基带分量由于天线的辐射特性而无法辐射到空间中,可不进行处理,也可用带通滤波器滤除。

图 3(b)和(c)分别显示经过滤波和未经滤波的 2 Gbit/s 40 GHz 的 ASK 时域波形图。其中 ASK 信号波形与编码比特串“10110”相符。

对于该方案产生的 ASK 信号,其比特率和载波频率只需要通过设置基带编码信号比特率和微波源频率即可分别进行独立调谐,无需改动其他链路设置。为了验证 ASK 信号的频率可调谐性,分别将基带编码信号比特率和微波源频率设为 2 Gbit/s、5 GHz 和 4 Gbit/s、20 GHz,生成的 ASK 信号的时域波形图和单微波脉冲放大图如图 4 所示。其中,图 4(a)展示的是比特速率 2 Gbit/s、中心频率 10 GHz 的 ASK 波形图,图 4(b)是该 ASK 波形的单脉冲放大图。可以看出,单个微波脉冲周期为 0.1 ns,对应频率为 10 GHz;单个比特周期为 0.5 ns,对应比特速率为 2 Gbit/s。

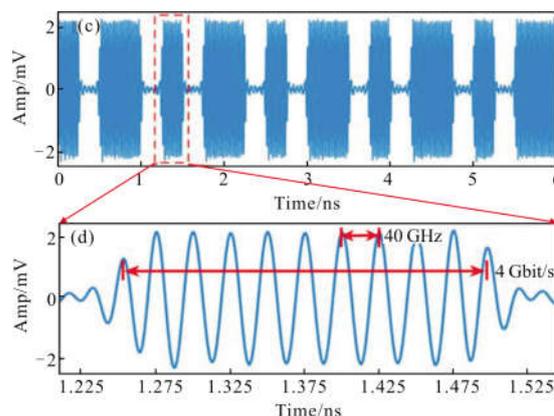
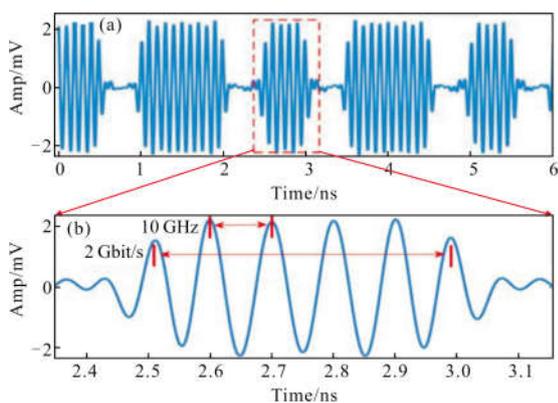


图 4 2 Gbit/s 10 GHz ASK 信号的(a)波形图,(b)单脉冲放大图;

4 Gbit/s 40 GHz ASK 信号的(c)波形图,(d)单脉冲放大图

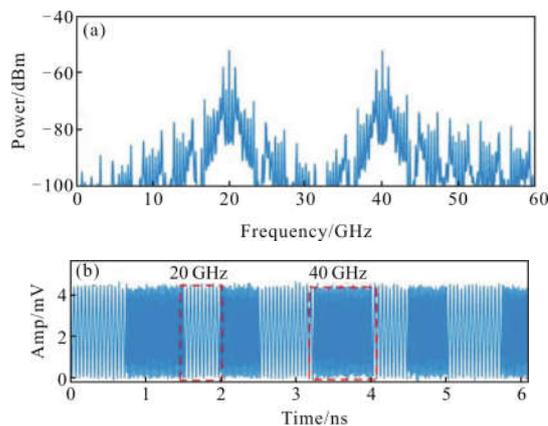
Fig.4 (a) Waveform, (b) zooming in on a single pulse of the 2 Gbit/s 10 GHz ASK signal; (c) waveform, (d) zooming in on a single pulse of the 4 Gbit/s 40 GHz ASK signal

图 4(c)展示的是比特速率 4 Gbit/s、中心频率 40 GHz 的 ASK 波形图,图 4(d)是该 ASK 波形的单脉冲放大图。可以看出,单个微波脉冲周期为 0.025 ns,对应频率为 40 GHz;单个比特周期为 0.25 ns,对应比特速率为 4 Gbit/s。

2.2 FSK 微波信号仿真结果及分析

设定基带编码信号为“1110001100”比特串,比特速率为 2 Gbit/s。在 MZM1 和 MZM2 分别受到 10 GHz 和 20 GHz 微波源信号的调制下,PD 的输出电谱如图 5(a)所示。可以看到产生的 FSK 信号具有 20 GHz 和 40 GHz 两个载频。FSK 的时域波形图如图 5(b)所示,可以看到 FSK 信号频率随着比特‘0’和‘1’在 20 GHz 和 40 GHz 之间跳变。

该方案中,FSK 信号的比特率和两个载频只需要通过设置基带编码信号比特率和两个微波源频率



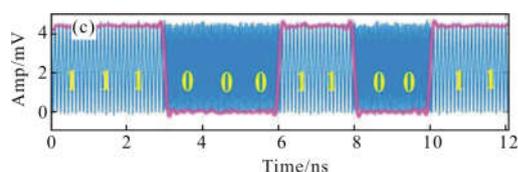


图 5 2 Gbit/s 20/40 GHz FSK 信号的(a)电谱图,(b)波形图;
1 Gbit/s 10/20 GHz FSK 信号的(c)波形图

Fig.5 (a) Electrical spectrum, (b) waveform of the 2Gbit/s 20/40GHz FSK signal; (c) waveform of the 1Gbit/s 10/20GHz FSK signal

即可分别进行调谐,且 FSK 信号的两个载频可灵活调节。同样对 FSK 信号的频率可调谐性进行了验证,图 5(c)展示了 1 Gbit/s 10/20 GHz 的 FSK 信号,图中红线表示利用相干解调法恢复出来的编码信号波形,与编码比特串“1110001100”相符。

2.3 PSK 微波信号仿真结果及分析

最后,利用该方案产生相位可调的 PSK 微波信号。设定基带编码信号的比特速率为 2 Gbit/s,微波源产生的 10 GHz 射频信号通过功分器后分为两路分别驱动 MZM1 和 MZM2,其中一路射频信号经过移相器后移相 90°。图 6(a)、(b)分别展示了产生的 PSK 信号的频域图和时域图,可以看到 PSK 信号具有

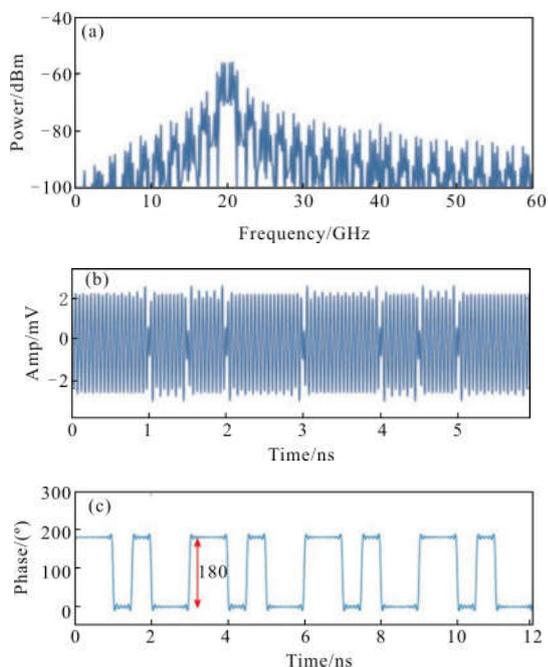


图 6 2 Gbit/s 20 GHz PSK 信号仿真结果(a)电谱图,(b)波形图和(c)利用希尔伯特变换提取的相位信息

Fig.6 Simulation results of the 2Gbit/s 20GHz PSK signal, (a) electrical spectrum and (b) waveform and (c) recovered phase information with Hilbert Transform

20 GHz 的频率,且相位随着比特‘0’和‘1’有着明显的跳变。图 6(c)展示了利用希尔伯特变换提取的相位信息,可以清楚地看到相位跳变为 180°,是移相器移相角度的 2 倍,与理论分析相符。该方案中 PSK 信号的比特率和相位跳变只需要通过调整基带编码信号比特率和移相器即可分别进行调谐,且相位跳变的大小为移相器移相角度的两倍。

值得一提的是,偏振键控信号在 Sagnac 环中顺时针和逆时针传输经历的是同一条物理链路,有效避免了光程差和环境干扰带来的相位抖动问题,因此相比于分离链路具有信号稳定的优势。

3 结论

文中提出了一种多数字调制格式微波信号的光学产生方案。结合偏振键控信号产生技术和 MZM 调制原理,通过调整 MZM 的射频驱动信号即可实现 ASK、FSK、PSK 调制格式的微波信号产生。针对每一种调制格式的微波信号,其比特率和载波频率都可通过调节基带编码信号和 MZM 的射频驱动进行灵活且独立的宽带调谐。由于实验室缺少实验所需的观测设备,因此未能进行实际验证。在仿真中,产生了比特率为 2 Gbit/s 的 40 GHz ASK 信号、20/40 GHz FSK 信号和 20 GHz PSK 信号,每种调制格式微波信号的比特率和载波频率的宽带可调谐性也进行了充分的验证。相比于众多产生单种调制格式微波信号的光学方案,文中方案在不改动链路设置的情况下可实现三种基础数字调制格式微波信号的产生,并且得益于 Sagnac 环的运用,系统稳定性得到了有效的提升。针对在可重构和功能集成上有强烈需求的应用中,例如动态通信网络和各类综合射频系统,文中方案在信号产生部分提供了新的思路和借鉴。

参考文献:

[1] Tian Yaoling, Jiang Jun, Huang Kun, et al. 0.34 THz high speed on-off keying (OOK) signal direct detector based on Schottky diode [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2017, 46 (7): 0822001. (in Chinese)

[2] Tang Z, Zhang T, Zhang F, et al. Photonic generation of a phase-coded microwave signal based on a single dual-drive Mach-Zehnder modulator [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(24):

- 5365–5368.
- [3] Zhang Lijia, Xin Xiangjun, Liu Bo, et al. Novel high-speed orthogonal optical label switching technology based on the 8PSK modulation [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2010, 39(1): 103–105. (in Chinese)
- [4] Yao J. Photonic generation of microwave arbitrary waveforms [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(15): 3723–3736.
- [5] Chen Yang. High-speed and wideband frequency-hopping microwave signal generation via switching the bias point of an optical modulator [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 1–7.
- [6] Huang L, Wang P, Xiang P, et al. Photonic generation of microwave frequency shift keying signals [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(18): 1928–1931.
- [7] Cong W, Yu L, Wo J, et al. Photonic generation of continuously tunable carrier frequency phase-coded waveform based on cascaded Mach-Zehnder modulators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 364–371. (in Chinese)
- [8] Gao B, Zhang F, Pan S, et al. Phase-coded microwave signal generation based on a single electro-optical modulator and its application in accurate distance measurement [J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 21867–21874.
- [9] Li X, Zhao S, Pan S, et al. Generation of a frequency-quadrupled phase-coded signal using optical carrier phase shifting and balanced detection [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4): 1151–1156.
- [10] Sun Zhaowei, Xing Lei, Xu Guodong, et al. Integrated electronic system of upper-stage spacecraft based on reconfigurable technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(2): 296–304. (in Chinese)
- [11] Xiang P, Zheng X, Zhang H, et al. A novel approach to photonic generation of RF binary digital modulation signals [J]. *Frequenz*, 2015, 21(1): 631–639.
- [12] Chen Y, Liu S, Pan S. Multi-format signal generation using a frequency-tunable optoelectronic oscillator [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 3404–3420.
- [13] Li Xuan, Zhao Shanghong, Zhang Kun, et al. Photonic generation of microwave binary digital modulation signal with format agility and parameter tunability [J]. *Optics Communications*, 2018: 10.1016/j.optcom.2018.08.004.
- [14] Pan Shilong, Zhang Yamei. Polarization-modulated microwave photonic signal processing [J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2014, 29(6): 874–884. (in Chinese)
- [15] Zheng H, Wen A, Gao Y, et al. Photonic frequency sextupling scheme based on two intensity modulators and a Sagnac loop [J]. *Microwave & Optical Technology Letters*, 2017, 59(4): 853–857.