

# 面向光载无线系统的混合频相调制信号产生

叶佳, 闫连山, 潘炜, 罗斌, 邹喜华

西南交通大学信息光子与通信研究中心, 四川 成都 611756

**摘要** 为提高光载无线系统传输容量, 提出一种混合频相调制信号光学产生技术。利用保偏光纤布拉格光栅对不同输入偏振态响应不同的特性, 将加载到信号偏振态的基带信息转换到输出波长上, 并通过在接收端的外插拍频实现频率调制。同时通过光学相位调制将信息映射到拍频产生的微波信号上, 最终产生混合频相调制信号。搭建基带传输式光载无线系统, 验证了该信号产生方法的有效性。产生了码率为 1 Gbit/s、频率为 12.5 GHz/9.5 GHz 的混合频相调制信号, 该信号经过 5 km 光纤传输后由接收端解调。信号的时域波形及解调后信号眼图与星座图等结果证明了所产生的混合频相调制信号的可靠性。

**关键词** 光通信; 射频光子技术; 混合频相调制; 保偏光纤布拉格光栅; 拍频

**中图分类号** TN929.11

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201838.0206002

## Generation of Hybrid Frequency and Phase Shift Keying Signal for Radio over Fiber System

Ye Jia, Yan Lianshan, Pan Wei, Luo Bin, Zou Xihua

Center for Information Photonics & Communications, Southwest Jiaotong University,  
Chengdu, Sichuan, 611756, China

**Abstract** In order to improve transmission capacity of radio over fiber system, a photonic generation method of hybrid frequency and phase shift keying (FPSK) signal is proposed. Based on various response characteristics of polarization maintaining fiber Bragg grating (PM-FBG), the baseband signal modulated onto the optical polarization is translated to output wavelength shift. Then frequency beating is implemented at the receiver to achieve frequency modulation. Meanwhile, an optical phase modulator is employed at the transmitter to map the phase information of the optical signal to the generated microwave signal. Finally, a hybrid FPSK signal is generated. The proposed method is experimentally demonstrated through a transmission test in a radio over fiber (RoF) system. A hybrid FPSK signal with 1-Gbit/s bit rate and 12.5-GHz/9.5-GHz frequency is generated and modulated by the receiver after transmitting a 5-km fiber. The results of temporal waveform, the eye-diagram and constellation diagram after demodulation verify the effectiveness of the proposed scheme.

**Key words** optical communications; radio frequency photonics; hybrid frequency and phase shift keying; polarization maintaining fiber Bragg grating; frequency beating

**OCIS codes** 060.5625; 350.4010; 060.2360

## 1 引 言

随着各种即时在线视频服务的兴起, 无线接入业务对传输容量的要求越来越高。光载无线技术由于其固有的大带宽、低损耗等特性受到了广泛的关注, 尤其在高频信号产生领域。相比传统电子学技术, 光生微波技术能提供更高的频率上限及更灵活

的频率可调性<sup>[1-2]</sup>。常用的光生微波技术包括光学拍频、光学振荡器及时频映射技术等<sup>[3-5]</sup>。其中, 外插式拍频技术所产生的微波信号频率由输入光频差决定, 仅受限于末端光电探测器(PD)的带宽, 适用于对系统传输频率有较高要求的场景。另一方面, 由于外插式拍频技术采用双光源结构, 符合基带传输式光载无线系统结构需求, 通过设置本地光源波

**收稿日期:** 2017-08-04; **收到修改稿日期:** 2017-09-22

**基金项目:** 国家自然科学基金(61405165, 61405167)、国家 863 计划(2015AA016903)、中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2016X004-A)

**作者简介:** 叶佳(1985—), 男, 博士, 讲师, 主要从事微波光子学、空间光通信方面的研究。E-mail: jiaye@swjtu.edu.cn

长可以灵活地调整基站端接入频率<sup>[6]</sup>。但由于采用分布式结构的双光源拍频会引入较大的相位噪声,仅适用于对相噪相对不敏感的调制格式,如幅度调制、频率调制、低阶相位调制等。因此,研究适用于基带传输式光载无线通信系统的不同调制格式信号产生技术具有重要意义。

目前已报道的微波光子信号产生技术可用于产生开关键控(OOK)信号、相移键控(PSK)信号及频移键控(FSK)信号等<sup>[7-10]</sup>。文献[11]的研究结果表明,对于常用的正交频分复用接入(OFDMA)网络,引入频率调制技术能有效抑制移动通信系统中的区间干扰,在多蜂窝覆盖下的边缘节点能提高数倍的信号传输码率。因此,结合调频技术的新型调制格式能在提升传输容量的基础上,进一步提高蜂窝移动通信用户接入端灵敏度。基于上述研究目标,本文提出一种用于基带传输光载无线系统的混合频相调制(FPSK)信号产生技术,并搭建了具有“中心站-基站(CS-BS)”结构的光载无线通信链路进行传输实验。实验结果表明,该技术产生的混合频相调制信号能实现有效的光载无线传输。

## 2 基本原理

### 2.1 保偏光纤布拉格光栅原理

当使用保偏光纤制作光纤布拉格光栅(PM-FBG)时,由于保偏光纤在两个正交方向上的折射率不同,PM-FBG会对不同的输入偏振态表现不同的响应特性,在两正交方向  $x$  及  $y$  轴的反射峰表示式为<sup>[12]</sup>

$$\begin{cases} \lambda_{\text{MAX},x} = 2(n_{\text{eff},x} + \delta n)\Lambda \\ \lambda_{\text{MAX},y} = 2(n_{\text{eff},y} + \delta n)\Lambda \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $\Lambda$  为光栅周期,  $\delta n$  为折射率调制量,  $n_{\text{eff}}$  为光纤

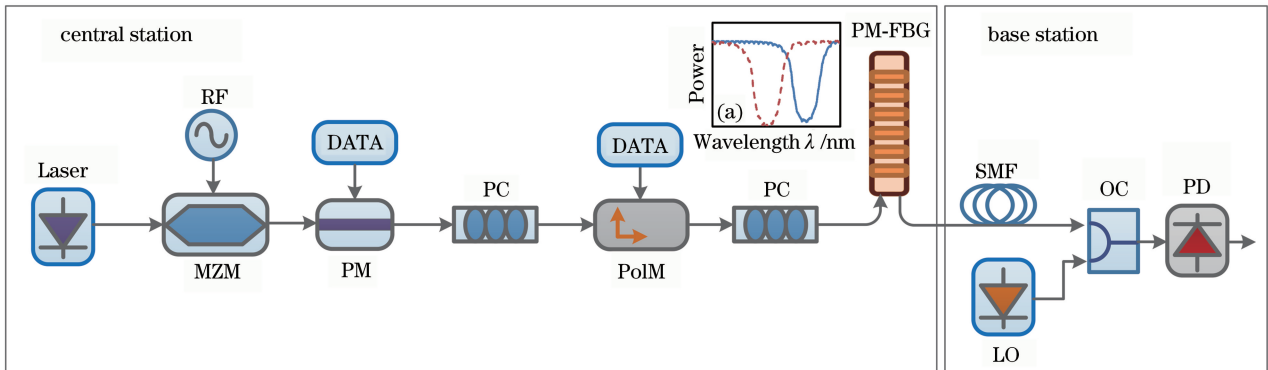
有效折射率,  $n_{\text{eff},x} = n_{\text{eff}} + \Delta n/2, n_{\text{eff},y} = n_{\text{eff}} - \Delta n/2$ , 其中  $\Delta n$  为光纤双折射率。

由(1)式可见,PM-FBG的反射波长随保偏光纤两主轴方向的不同而不同。利用该特性,可以通过改变输入光的偏振态来选择输出波长。

### 2.2 混合频相调制信号生成原理

一般来说,FSK信号仅通过频率变化承载基带信号,如2FSK信号通过两种不同的射频信号频率来表示信息“0”与“1”。因此对于FSK信号,可以通过相位的同时调制来提高单位码元周期的比特率,如对2FSK信号进行2PSK信号调制,则单位码元周期可携带2 bit信息。本文针对外插拍频式的光载无线通信系统研究FPSK信号的产生方法。

基于光学方法的FPSK信号产生原理如图1所示。对应于图中各数字标识,具体生成步骤如下:1)激光器输出的单波长光源经过马赫-曾德尔调制器(MZM)进行载波抑制调制,产生双频分量,其频率间隔为输入射频信号频率的2倍;2)通过相位调制器将基带信号  $A_i$  的相位调制到双频光上;3)通过偏振调制器将基带信号  $B_i$  的偏振态调制到入射光上(信息“0”与“1”分别对应输出相互正交的偏振光);4)将调制信号光输入PM-FBG,由于其对应不同输入偏振态具有不同的传输函数,因此基带信号  $B_i$  对应于不同波长的输出信号(信息“0”对应输出下边带信号,信息“1”对应输出上边带信号);5)与本地光源进行耦合并输入到PD,通过设置合适的波长(当本地光波长偏离双边带信号中心波长时,通过PD拍频会产生不同频率的微波信号),可以得到FPSK信号,此时基带信号  $A_i$  对应产生相移的微波信号(信息“0”与“1”分别对应信号相位“0”和“ $\pi$ ”),基带信号  $B_i$  对应产生频移的微波信号。



RF: radio frequency; PM: phase modulator; PolM: polarization modulator; OC: optical coupler; LO: local oscillator

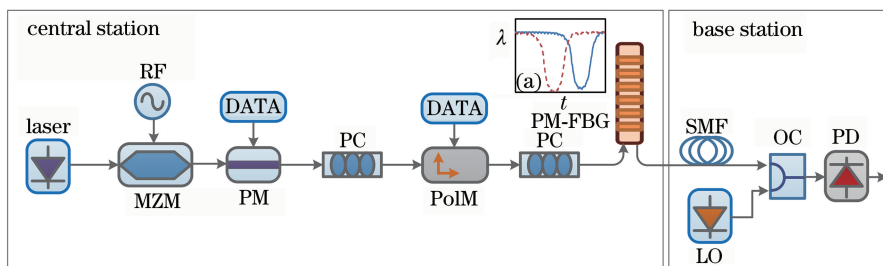
图1 混合频相调制信号产生原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the microwave FPSK signal generation

### 3 基于混合频相调制的光载无线传输实验及结果

FPSK 信号产生及传输实验装置如图 2 所示, 构建了包含中心站(CS)及基站(BS)的光载无线传输链路以验证所提出的 FPSK 信号产生及传输性能。在 CS 端, 波长为 1550.98 nm 的窄线宽激光器用于提供光功率为 10 dBm 的稳定输出。频率为 11 GHz 的射频信号被调制到信号光上, 通过设置合

适的偏置电压实现载波抑制调制, 从而产生频率间隔为 22 GHz 的双频光信号。随后, 两路 0.5 Gbit/s 的基带信号通过相位调制器及偏振调制器分别调制双频光信号的相位及偏振态。通过偏振控制器将偏振调制器的主轴与 PM-FBG 的主轴对准。调制光入射到 PM-FBG 后, 偏振调制被转换成波长调制, PM-FBG 的传输特性曲线如图 2(a) 所示。因此, 从 PM-FBG 出射的光信号为波长及相位调制信号。



SMF: single mode fiber; PC: polarization controller

图 2 FPSK 信号产生及传输原理图。(a) PM-FBG 传输特性曲线

Fig. 2 Schematic diagram of generating and transmitting FPSK signal in radio over frequency system.

(a) Transmission characteristic curve of PM-FBG

经过 5 km 光纤之后, 光信号从中心站传输到基站端, 与本地激光器输出波长为 1550.99 nm 的光, 通过 3 dB 耦合器输入到带宽为 18 GHz 的 PD, 拍频产生微波信号。基站端收到的光信号光谱如图 3(a) 所示。其中, 下边带光信号波长为 1550.89 nm, 上边带光信号波长为 1551.07 nm。因此, 本地光与接收光信号的频率差分别为 12.5 GHz 及 9.5 GHz。经过 PD 拍频后会产生具有相应频率的微波信号, 得到的微波信号频谱如图 3(b) 所示。由图 3(b) 可见, 由 PD 得到的微波信号包含 12.5 GHz 及 9.5 GHz 频率分量, 并包含相位调制信息。

经过 PD 得到的 FPSK 信号通过带宽为 13 GHz、采样频率为 40 GHz 的实时示波器采集, 采集信号包含载波频率分别为 12.5 GHz 及 9.5 GHz 的双频信号。对双频信号的原始数据未作平均处理, 得到的时域波形分别如图 4(a) 和图 4(b) 所示, 其中蓝色实线为初始相位为 0 的单码元周期信号波形, 红色虚线为初始相位为  $\pi$  的单码元周期信号波形。可以看到, 产生的 FPSK 信号单位码元包含 2 bit 信息, 分别由频率及相位决定。因此, 在接收端, 需要分别对频率及相位信息进行解调。

为了测试所产生的 FPSK 信号传输性能, 采用离线数字处理算法对接收到的微波信号进行解调。

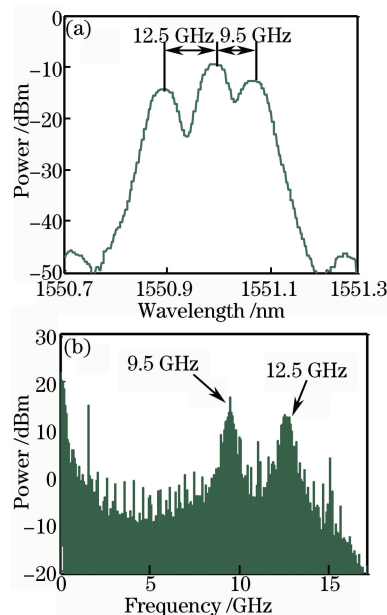


图 3 FPSK 信号。(a) 光信号光谱图; (b) 微波信号频谱图  
Fig. 3 FPSK signal. (a) Optical spectrum of optical signal; (b) frequency spectrum of microwave signal

首先, 采用数字解调方式解调频率调制部分, 解调方案如图 5(a) 所示。由于 FPSK 信号包含双频信息, 因此需要将接收信号分为两路, 分别与 12.5 GHz 及 9.5 GHz 的本地载频信号进行混频后, 经过带宽为 1 GHz 的低通滤波器处理, 然后将两路信号作差, 即可得到调频部分的基带解调信号, 其眼图如

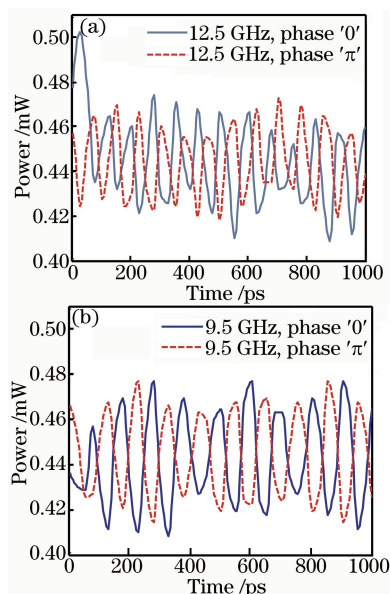


图 4 FPSK 信号时域波形图。(a)载波频率为 12.5 GHz;  
(b)载波频率为 9.5 GHz

Fig. 4 Temporal waveform of the FPSK signal with carrier frequencies of (a) 12.5 GHz and (b) 9.5 GHz

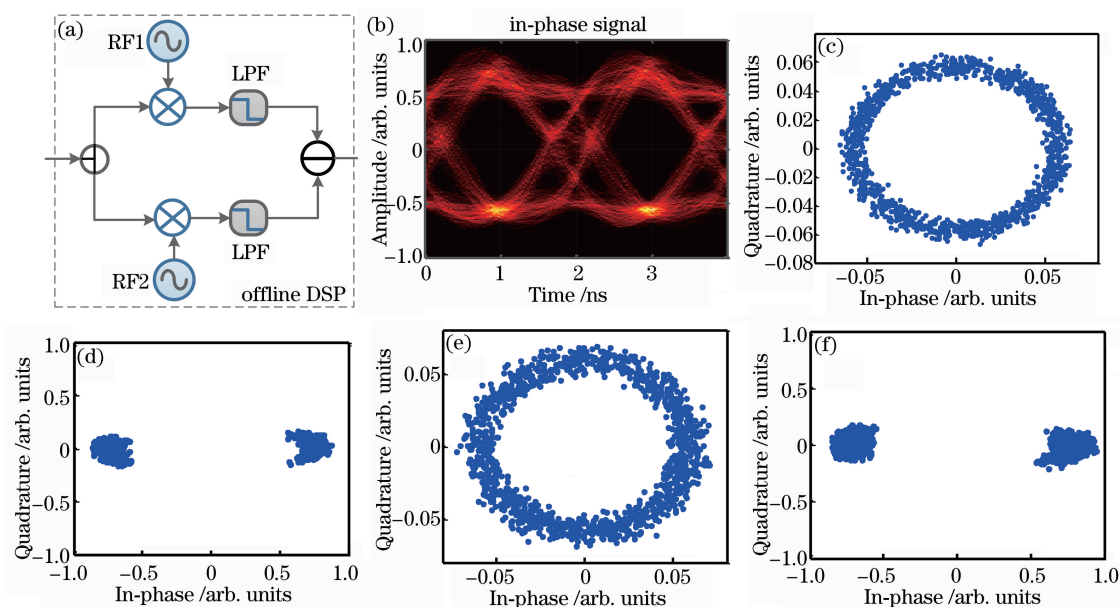


图 5 (a)数字解调方案框图;(b)频率调制信号解调后眼图;(c)相位恢复前 9.5 GHz 信号星座图;

(d)相位恢复后 9.5 GHz 信号星座图;(e)相位恢复前 12.5 GHz 信号星座图;(f)相位恢复后 12.5 GHz 信号星座图

Fig. 5 (a) Flow chart of digital signal process;(b) eye-diagram of FSK signal; constellations of 9.5 GHz signal (c) before and (d) after phase correction; constellation of 12.5 GHz signal (e) before and (f) after phase correction

## 4 结 论

提出了一种用于基带传输式光载无线通信系统的混合频相调制信号产生技术。搭建中心站-基站式的光载无线传输链路,验证了该信号产生技术的有效性。在接收端对所产生的混合频相调制信号进行离线数字处理,分别通过眼图及星座图展示了调

图 5(b)所示。再通过解调得到的双频信息对应的 FPSK 信号,并分别对双频微波信号进行相干解调以恢复相位信息,得到 9.5 GHz 及 12.5 GHz 微波信号星座图分别如图 5(c)及 5(e)所示。由于系统采用双光源外插式拍频技术,引入的相位噪声较大,直接解调得到的相位信息无法恢复基带“0”和“1”信号,故采用基于导频技术的相位均衡算法对相位信息进行恢复<sup>[13]</sup>。恢复后的星座图分别如图 5(d)及 5(f)所示。从图中可以看到,PM-FBG 对两正交轴的传输响应并不完全相同,因此生成的 FPSK 信号在两个频率分量上的强度存在差异,导致接收端的双频信号质量不完全相同。其中 9.5 GHz 频率的信号强度较高,得到的信号质量较好。该问题可以通过调节发射端光源波长以匹配最均衡的信号强度来解决。另外,由于 PM-FBG 对不同偏振态的滤波响应不同,因此 PM-FBG 输入端信号的偏振态稳定性也会影响接收端解调信号质量。

频及调相部分的解调信号质量。

提出了一种新型的混合调制格式信号产生方法,证明了调频技术在扩展单一调制方式传输容量方向的应用前景。但基于外差拍频式光载无线传输系统受限于非同步激光器拍频产生相位噪声的水平,仅验证了混合 2FSK/2PSK 调制下的信号传输质量。当应用链路稳相、锁相环、被动稳相等技术抑

制系统相位噪声对接收信号性能的影响后,可以将更高阶的相位调制信号与调频技术结合,在保证传输容量的基础上,提高蜂窝通信系统边缘节点的通信质量。

## 参 考 文 献

- [1] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(6): 319-330.
- [2] Yao J P. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314-335.
- [3] Chi Y C, Peng P C, Lin G R. Clock-free RZ-BPSK data generation using self-starting optoelectronic oscillator[J]. *Journal Lightwave Technology*, 2011, 29(11): 1701-1706.
- [4] Jiang Y, Yu J L, Wang Y T, *et al.* A novel scheme of dual-loop optoelectronic oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(5): 919-922.  
江阳, 于晋龙, 王耀天, 等. 一种新型双环路光电振荡器[J]. *光学学报*, 2007, 27(5): 919-922.
- [5] Zhang F Z, Pan S L. Microwave photonic signal generation for radar applications[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2014, 29(6): 922-929.  
张方正, 潘时龙. 面向雷达应用的微波光子信号产生技术[J]. *数据采集与处理*, 2014, 29(6): 922-929.
- [6] Lim C, Nirmalathas T A, Bakaul M, *et al.* Fiber-wireless networks and subsystem technologies[J]. *Journal Lightwave Technology*, 2010, 28(4): 390-405.
- [7] Ye J, Yan L S, Pan W, *et al.* Two-dimensionally tunable microwave signal generation based on optical frequency-to-time conversion[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(15): 2606-2608.
- [8] Li Z, Li W Z, Chi H, *et al.* Photonic generation of phase-coded microwave signal with large frequency tunability[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(11): 712-714.
- [9] Ye J, Yan L S, Chen Z Y, *et al.* Photonic generation of microwave phase-coded signals based on frequency to time conversion[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(17): 1527-1529.
- [10] Cao P, Hu X F, Zhang L, *et al.* Photonic generation of microwave frequency shift keying signal using a single-drive Mach-Zehnder modulator[J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 14433-14440.
- [11] Hong S, Sagong M, Lim C, *et al.* FQAM: A modulation scheme for beyond 4G cellular wireless communication systems[C]. *Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2013 IEEE, 2013: 14350913.
- [12] Feng X H, Li Z H, Guan B O, *et al.* Switchable UWB pulse generation using a polarization maintaining fiber Bragg grating as frequency discriminator[J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3643-3648.
- [13] Huang H T, Liang W L, Wei C C, *et al.* 150-km 103 GHz direct-detection OFDM-ROF system employing pilot-aided phase noise suppression[C]. *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, 2014: 14546381.