

光载无线通信系统射频信号相移特性研究

刘安良, 殷洪玺*, 吴宾, 刘畅

大连理工大学信息与通信工程学院, 辽宁 大连 116024

摘要 测试研制的 28 GHz 光载无线通信系统时发现, 经光纤传输后接收端恢复的基带信号眼图会随时间出现张开与闭合的现象, 使通信系统的可靠性遭到破坏。通过实验研究和理论分析发现, 射频信号的传输时延会随着光纤周围温度的变化而改变, 尤其对载波频率较高、传输距离较长的光载无线通信系统的可靠性影响更为严重。为了克服上述相位漂移问题, 提出并实验论证了一种基于载波恢复技术的改进型光载无线通信系统, 采用二次下变频结构, 从中频信号中提取同步时钟, 恢复出幅度稳定的原始基带数据。实验系统实现了 28 GHz 载频、1 Gb/s 数据速率、25 km 的光纤传输, 系统的误码率小于 10^{-9} 。

关键词 光通信; 相位漂移; 载波恢复; 温度变化; 误码率

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0506003

Phase-Shift Characteristics of Radio Frequency Signals for Radio over Fiber Transmission Systems

Liu Anliang, Yin Hongxi, Wu Bin, Liu Chang

School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract In the developed 28 GHz radio over fiber (RoF) transmission system, an eye diagram of the recovered baseband data changes between opening and closing with time after transmission through an optical fiber, which results in a destruction of the communication reliability. After a detailed experimental investigation and theoretical analysis on this phenomenon, we find the propagation delay of radio frequency (RF) signals changes with the temperature variation of the optical fiber, which can extremely destroy the communication reliability, especially for the RoF system with a high-frequency carrier and a long-distance transmission. In this paper, we propose and experimentally demonstrate an improved RoF system to overcome the phase-shift variation based on the carrier recovery technique. We employ a dual down-conversion structure and extract synchronous clock from the intermediate frequency signal to acquire a stable recovered original baseband data. A low bit error rate (less than 10^{-9}) is achieved after transmission over a 25 km single mode fiber in this improved 28 GHz RoF system with a data signal of 1 Gb/s.

Key words optical communications; phase shift; carrier recovery; temperature variation; bit error rate

OCIS codes 060.5625; 060.4510; 060.2360

1 引 言

移动用户对数据带宽和速率的需求日益增长, 基于万物互联的下一代 5G 通信系统将为单用户提供峰值速率超过 1 Gb/s 的通信体验^[1-2]。鉴于目前

低频段稀缺的频谱资源和有限的带宽, 使用毫米波等更高频率的载波, 将成为解决高速数据传输的主要手段。但高频载波在空气中传输衰减严重, 其传输距离受限, 需要更密集的蜂窝结构来保证无线信号的有效覆盖和移动用户的服务质量(QoS)。因

收稿日期: 2017-10-19; 收到修改稿日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(61071123)、河南省国家电网科技项目(5217Q014006U)

作者简介: 刘安良(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事光载无线通信及高速 FPGA 应用等方面的研究。

E-mail: anliangliu@mail.dlut.edu.cn

导师简介: 殷洪玺(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高速光纤通信系统与网络、卫星激光通信与组网、光载无线通信、水下蓝绿光通信等方面的研究。E-mail: hxyin@dlut.edu.cn(通信联系人)

此,实现高频载波的长距离传输、结构简单且成本低廉的基站设计,成为 5G 通信的研究重点^[3-5]。

光载无线(RoF)通信系统融合了光纤通信和无线通信的优势,成为解决上述问题的有效途径之一。RoF 系统由中心站(CS)和基站(BS)构成,为了简化远端基站的结构和节约系统成本,射频(RF)信号的副载波调制功能通常在中心站实现^[6]。受限于电子器件的带宽瓶颈和高昂的成本,RoF 系统中常采用光学方法产生高频载波,如外调制法和多光源外差法^[7-11]。基于外调制器的光生高频载波法,由于器件成熟度高、稳定性好、结构灵活,被广泛采用。模拟射频(RF)信号在光纤中传输时,受光纤色散效应的影响,信号幅度会随着传输距离的增加而产生周期性衰落的现象,使得 RoF 系统的传输距离和通信质量严重受限^[12],通过采用单边带(SSB)调制^[13]、载波抑制(OCS)调制^[14]和偏振复用^[15]等方法,可以有效地克服光纤传输的色散效应,增加 RoF 系统的通信距离。上述文献都专注于不同光纤传输长度下 RF 信号幅度特性的研究,而 RF 信号的相位特性同样会对 RoF 系统的可靠性产生影响,文献^[16-17]对 RoF 链路中载波信号的相位噪声特性进行了研究。本文将对传输光纤长度一定的 RoF 系统中,光纤周围环境的变化,对传输后 RF 信号的相位及 RoF 通信系统的可靠性造成的影响进行深入研究。

光纤链路周围环境的变化,主要包括链路的机械振动和环境温度的变化,机械振动是短期稳定的变化,对铺设的光纤链路或固定的实验系统来说影响较小,而环境温度的变化是渐变的过程,会导致 RoF 系统中 RF 信号的传输时延发生改变,使得接收端探测器输出的 RF 信号产生相位漂移的现象,尤其当 RF 信号的频率升高以及传输距离增加时,RF 信号的相位特性对温度的变化变得极为敏感。此时,传统 RoF 实验系统中,采用本地振荡器对接收端 RF 信号进行直接下变频的方法,将会存在相位失配的现象,无法获得稳定输出的原始基带数据信号,RoF 通信系统的可靠性遭到破坏,系统无法保持正常通信。因此,对 RoF 系统中信号相位特性的研究,以及如何克服 RF 信号光纤传输对 RoF 通信系统可靠性所造成的影响,对未来高频、长距离传输的 RoF 系统应用,是必须解决的问题。

本文基于马赫-曾德尔调制器(MZM),搭建了载波频率为 28 GHz 的 RoF 传输系统,基带信号速率为 1 Gb/s,光纤长度为 25 km,通过示波器观测直接下变频得到的基带信号眼图发现,接收端的基

带信号眼图无法稳定张开,RoF 系统无法正常通信。基于上述现象,对 RoF 系统中的 RF 信号相位特性进行了理论分析,RF 信号的传输时延受光纤周围环境温度变化的影响,发生相位漂移现象,导致接收端直接下变频 RoF 系统的通信可靠性遭到破坏。为了解决 RF 信号的相位漂移问题,本文提出了一种基于载波恢复技术的改进 RoF 系统。在接收端对 RF 信号采用一级下变频到中频(IF),然后对 IF 信号进行载波恢复,再将提取出的同步时钟与 IF 信号混频,恢复出原始基带数据信号,并获得稳定张开的眼图,搭建了该实验系统,测试得到系统误码率低于 10^{-9} ,实现了数据速率为 1 Gb/s、28 GHz RoF 系统的正常通信。

2 系统结构及理论分析

2.1 系统结构及实验结果

基于外调制器的 RoF 实验系统主要由中心站和基站构成,在中心站内通过控制外调制器的偏置电压产生不同的调制方式,如双边带调制(DSB)、SSB 和 OCS 等,基站端经过探测器获得所需频率的 RF 信号,通常为了验证系统性能,在基站对 RF 信号进行下变频,恢复出基带信号,并对其进行误码率和眼图等性能测试。本文在中心站采用了 DSB 的调制方式,搭建载波频率为 28 GHz 的 RoF 传输系统,其结构如图 1 所示,为了控制机械振动对实验系统的影响,实验中所用的光纤盘和光学器件的尾纤都被固定在光学平台上,以保持稳定。信号发生器(SQA)(Anritsu, MP1800A)产生的 1 Gb/s 伪随机序列基带信号,码长为 $2^{31} - 1$,首先通过混频器(mixer)将该基带信号与频率为 28 GHz 本地振荡源混频,再将所得到的 RF 信号经过 MZM 调制到光载波上,该系统中采用分布式反馈(DFB)激光器作为光源,激光器的波长为 1549.96 nm,设置 MZM 的偏置电压 $V_{\text{bias}} = 0.5V_{\pi}$ (V_{π} 为 MZM 调制器的半波电压),MZM 调制后输出光信号的频谱如图 2 所示。可见光载波信号实现了 DSB 调制,中心载波与一阶上、下边带的频率间隔均为 28 GHz,该信号经过 25 km 单模光纤(SMF)传输到达远端基站,在基站内,首先经过带宽为 40 GHz 的光电探测器(PD),由于拍频作用将得到 28 GHz 的 RF 信号,其频谱如图 3 所示。经过增益为 20 dB 的功率放大器(PA)与 28 GHz 本振信号进行直接下变频,利用低通滤波器(LPF)获得原始基带数据信号,通过示波器(OSC)(Agilent, DSO90404A)对其眼图进行观

测,如图 4(a)所示。但在实验中发现,所恢复出的基带数据眼图随着时间的变化出现逐渐闭合和再张

开的现象,如图 4(b)~(d)所示,该信号幅度值发生随机慢变化,无法使眼图保持稳定张开。

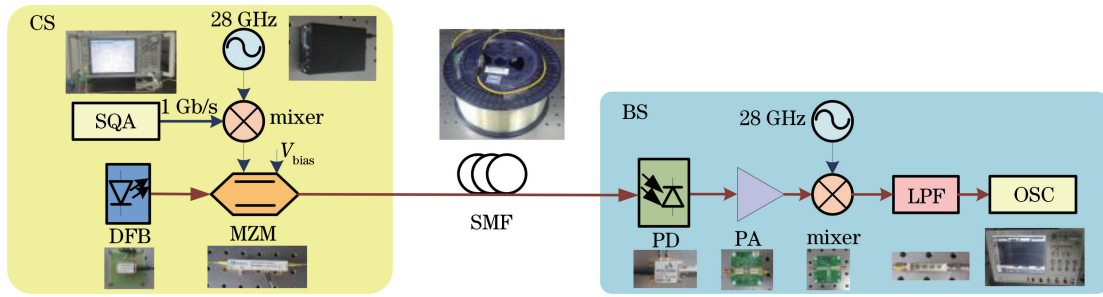


图 1 研制的 28 GHz RoF 系统结构图

Fig. 1 Structure of the developed 28 GHz RoF system

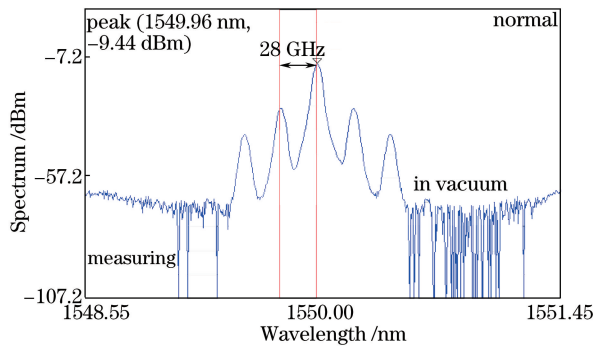


图 2 MZM 调制后信号光谱

Fig. 2 Optical spectrum of modulated signal by the MZM

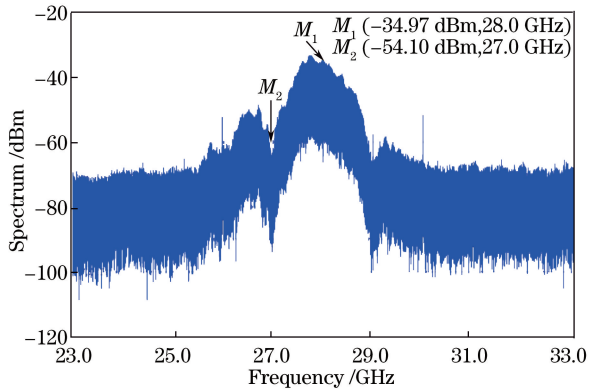


图 3 PD 探测后 28 GHz 电信号频谱

Fig. 3 28 GHz electrical signal spectrum after PD detection

2.2 理论分析

对上述现象进行理论分析,假设中心站发送的 RF 信号为 $V_{RF}(t)$, 经过 RoF 系统传输后的 RF 信号为 $V'_{RF}(t)$, 基站本振信号为 $V_{LO}(t)$ 。为了分析简单且不失一般性,忽略信号传输中光纤衰减对信号幅度的影响,各信号表达式分别为

$$V_{RF}(t) = A_0 m(t) \cos(\omega_1 t + \theta_1), \quad (1)$$

$$V'_{RF}(t) = A_0 m(t) \cos(\omega_1 t + \theta_1 + \tau), \quad (2)$$

$$V_{LO}(t) = A_0 \cos(\omega_1 t + \theta_2), \quad (3)$$

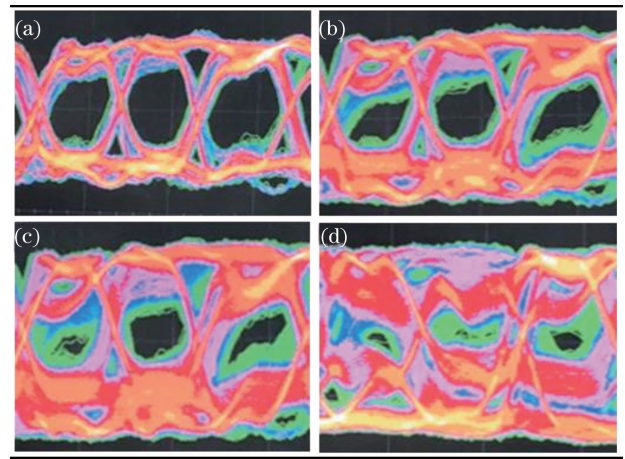


图 4 恢复后基带信号不同时刻眼图。

(a) $t=0$ s; (b) $t=15$ s; (c) $t=30$ s; (d) $t=60$ s

Fig. 4 Eye diagrams of the recovered baseband data at different time. (a) $t=0$ s; (b) $t=15$ s; (c) $t=30$ s; (d) $t=60$ s

式中: A_0 为本地振荡信号的幅度; $m(t)$ 为基带数据信号; ω_1 为射频信号角频率; θ_1 和 θ_2 分别为射频信号和本振信号的相位; τ 为系统传输时延。则接收端 RF 信号与本振信号混频后,得到

$$\begin{aligned} V_{MIX} &= V'_{RF}(t) \cdot V_{LO}(t) = \\ &= A_0 m(t) \cos(\omega_1 t + \theta_1 + \tau) \cdot A_0 \cos(\omega_1 t + \theta_2) = \\ &= \frac{1}{2} A_0^2 m(t) [\cos(\theta_1 + \tau - \theta_2) + \\ &= \cos(2\omega_1 t + \theta_1 + \tau + \theta_2)]. \end{aligned} \quad (4)$$

由此可知,通过低通滤波器可得到原始基带数据 $m(t)$, V_{MIX} 信号的幅度为 $A_0^2 \cos(\theta_1 + \tau - \theta_2)/2$, 当 $\theta_1 + \tau - \theta_2 = 2k\pi (k=0, \pm 1, \pm 2 \dots)$ 时, V_{MIX} 的幅值最大; 当 $\theta_1 + \tau - \theta_2 = 1/2k\pi (k=0, \pm 1, \pm 2 \dots)$ 时, V_{MIX} 的幅值为 0, 则无法恢复出 $m(t)$ 。由于 θ_1, θ_2 为确定值, 由此可以看出, 图 4 中的实验现象由系统的传输时延 τ 变化所引起, 传输时延可表示为^[18-19]

$$\tau = \beta_{TCD} \cdot L \cdot n \cdot \Delta T / c, \quad (5)$$

式中： β_{TCD} 为温度延迟系数(SMF28 光纤典型值约为 $7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)； L 为光纤长度(单位:km)； n 为光纤的折射率(单模光纤折射率为 1.467)； c 为光速(值为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$)， ΔT 表示光纤的温度变化量。单位温度、单位长度下，系统传输时延值为 $34.23 \text{ ps} \cdot (\text{km} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。因此，当光纤长度为 25 km时，温度变化 $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ，可计算出传输时延 τ 变化了 85.575 ps ，对于 28 GHz 的射频信号来说，相当于相位变化了 862.6° ，约为 2.4 个周期。

由于实验中采用的光纤为裸露在空气中的光纤盘，受实验仪器散热及空气温度变化的影响，会导致接收到的 RF 信号的相位产生随机变化，因而混频后无法获得稳定的基带信号。从(5)式可以看出，低频短距离的 RF 信号在光纤中传输时，其相位受温度变化的影响较小，但这并不符合 RoF 系统的实际需求。当光纤埋入地下时，其周围温度较实验室的盘状光纤相对稳定，但是当 RF 信号的频率较高、传输距离较远时，周围环境细微的温度变化也会对系统的稳定性带来较大的影响和破坏。

3 解决方案

为了解决光纤温度变化对 RF 信号传输造成的相位漂移问题，本文提出了一个基于载波恢复技术的改进 RoF 系统，其基站结构如图 5 所示。光电转换再经过放大后的 RF 信号首先与 26 GHz 本振源进行第一级下变频，得到频率为 2 GHz 的 IF 信号，信号频谱如图 6 所示，该信号经过损耗为 4 dB 的 1:2 功分器(PS)后，其中一路被送入锁相环的时钟恢复电路(CR)，该锁相环可处理的输入信号频率范围为 $100 \text{ MHz} \sim 2.7 \text{ GHz}$ ，输入信号采用交流耦合的方式，能检测的输入信号幅度峰-峰值为 0.05 V 。在实验系统中，通过锁相环电路提取出 2 GHz 的时钟信号，其波形如图 7 所示。该时钟信号与 PS 输出的另一路 2 GHz IF 信号进行混频，实现第二级下

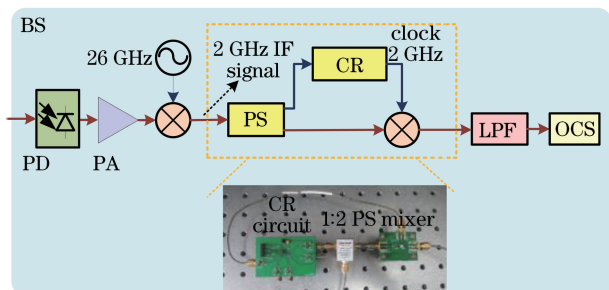


图 5 基于载波恢复技术的基站结构
Fig. 5 BS structure based on carrier recovery

变频，得到基带信号，再经过低通滤波器滤波，利用示波器对信号眼图进行测试，结果如图 8 所示，该眼图经过长时间测量，未出现眼图闭合的现象。由于采用与接收信号同步的时钟信号进行混频，混频后的基带信号幅度稳定，RF 信号的相位漂移问题得到解决。最后利用误码仪对恢复出的 1 Gb/s 信号进行误码率测量，其误码率低于 10^{-9} ，证明改进后的 RoF 系统可实现可靠通信。

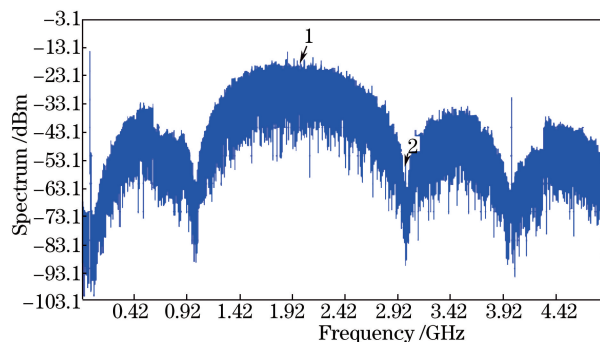


图 6 2 GHz 中频信号频谱
Fig. 6 Spectrum of the 2 GHz IF signal

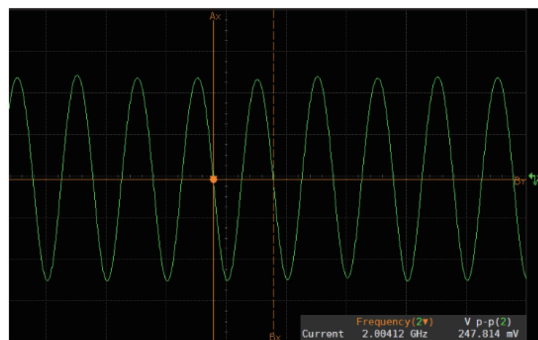


图 7 提取的 2 GHz 时钟信号波形
Fig. 7 Waveform of the extracted 2 GHz clock signal

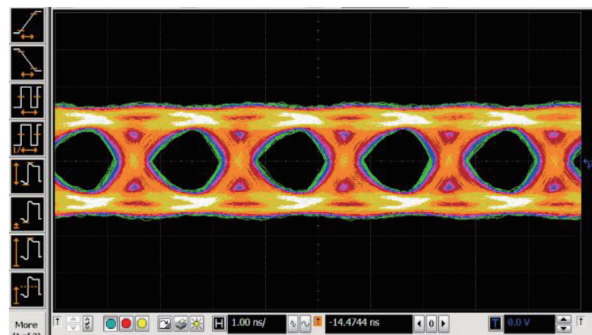


图 8 二次下变频后稳定的基带信号眼图
Fig. 8 Stable eye diagram of the baseband data after the second down-conversion

4 结 论

本文对 RoF 系统中,RF 信号经过光纤传输后

的相位特性进行了详细的实验考察和深入的理论分析。通过对数据速率为 1 Gb/s、光纤传输距离为 25 km 的 28 GHz RoF 传输实验系统进行测试发现,在基站接收端,采用传统的直接下变频方法,恢复出的基带信号眼图幅度不断发生变化,无法持续稳定地张开,无法保证 RoF 通信的可靠性。对 RF 信号的相位漂移现象和光纤周围环境温度的关系进行了理论分析,结果表明传输距离较长、载波频率较高的 RoF 系统,RF 信号的相位对温度变化敏感。为此,提出了一种基于载波恢复技术的改进 RoF 系统,在基站内对 RF 信号进行两级下变频,通过对 IF 信号的时钟提取,利用同步时钟进行二次下变频得到 1 Gb/s 基带信号,得到稳定的眼图波形及低于 10^{-9} 的误码率,消除了 RoF 系统中 RF 信号相位漂移对系统可靠性造成的影响,这对于未来的长距离、高载频的 RoF 系统的应用具有重要指导和实用意义。

参 考 文 献

- [1] Soldani D, Manzalini A. Horizon 2020 and beyond: on the 5G operating system for a true digital society [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2015, 10 (1): 32-42.
- [2] Andrews J G, Buzzi S, Choi W, *et al.* What will 5G be? [J]. IEEE Journal on selected areas in communications, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [3] Maier M, Rimal B P. The audacity of fiber-wireless (FiWi) networks: revisited for clouds and cloudlets [J]. China Communications, 2015, 12(8): 33-45.
- [4] Rimal B P, Van D P, Maier M. Mobile edge computing empowered fiber-wireless access networks in the 5G era [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(2): 192-200.
- [5] Waterhouse R, Novaek D. Realizing 5G: microwave photonics for 5G mobile wireless systems [J]. IEEE Microwave Magazine, 2015, 16(8): 84-92.
- [6] Shen D, Hu Z F, Wu J Q, *et al.* Design and realization of a radio-over-fiber system based on self-homodyned 60 GHz receiver [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0506005.
沈达, 胡宗福, 吴佳青, 等. 基于自差 60 GHz 接收机的光载无线通信系统设计与实现 [J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0506005.
- [7] Yao J. Microwave photonics [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.
- [8] Lin C Y, Chi Y C, Tsai C T, *et al.* Millimeter-wave carrier embedded dual-color laser diode for 5G MMW of link [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(12): 2409-2420.
- [9] Aldaya I, Beas J, Castanon G, *et al.* A survey of key-enabling components for remote millimetric wave generation in radio over fiber networks [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 49: 213-226.
- [10] Shi J W, Huang C B, Pan C L. Millimeter-wave photonic wireless links for very high data rate communication [J]. NPG Asia Materials, 2011, 3 (2): 41-48.
- [11] Ye J, Yan L S, Pan W, *et al.* Generation of hybrid frequency and phase shift keying signal for radio over fiber system [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0206002.
叶佳, 闫连山, 潘炜, 等. 面向光载无线系统的混合频相调制信号产生技术 [J]. 光学学报, 2018, 38 (2): 0206002.
- [12] Ma J, Yu J, Yu C, *et al.* Fiber dispersion influence on transmission of the optical millimeter-waves generated using LN-MZM intensity modulation [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25 (11): 3244-3256.
- [13] Yu J, Huang M F, Jia Z, *et al.* A novel scheme to generate single-sideband millimeter-wave signals by using low-frequency local oscillator signal [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(7): 478-480.
- [14] Yu J, Jia Z, Yi L, *et al.* Optical millimeter-wave generation or up-conversion using external modulators [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(1): 265-267.
- [15] Wiberg A, Olsson B E, Hedekvist P O, *et al.* Dispersion-tolerant millimeter-wave photonic link using polarization-dependent modulation [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25 (10): 2984-2991.
- [16] Li L, Zheng X P. Impact of carrier phase noise on vector signals and its suppression in RoF link system [J], Chinese Sciencepaper, 2014, 9(4): 380-382.
李龙, 郑小平. RoF 链路中载波相位噪声对矢量信号的影响及抑制 [J]. 中国科技论文, 2014, 9(4): 380-382.
- [17] Khayatzadeh R, Poette J, Cabon B. Impact of phase noise in 60-GHz radio-over-fiber communication system based on passively mode-locked laser [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(20): 3529-3535.
- [18] Narbonneau F, Lours M, Bize S, *et al.* High resolution frequency standard dissemination via optical fiber metropolitan network [J]. Review of scientific instruments, 2006, 77(6): 064701.
- [19] Kato T, Koyano Y, Nishimura M. Temperature dependence of chromatic dispersion in various types of optical fiber [J]. Optics Letters, 2000, 25 (16): 1156-1158.