

基于 MZM 的倍频因子可调谐的光纤无线系统

王琨琨,张朝霞*,鲁雅,王倩,周晓玲

(太原理工大学 物理与光电工程学院,太原 030024)

摘要:为了充分利用光纤无线(RoF)系统中的频带资源,提出了一种基于马赫-曾德尔调制器(MZM)的倍频因子可调谐的 RoF 系统,采用波长选择、相干检测、波长重用和数字信号处理(DSP)等技术,实现了 RoF 系统上下行链路不同倍频因子信号的输出。仿真结果表明:RoF 系统传输 16 进制正交幅度调制(16QAM)信号时,上下行链路均可实现多倍频因子可选,下行链路传输、上行链路传输的最小矢量误差范围分别为 5.5%~7%、6.4%~8.6%。

关键词:光通信;光纤无线;波长重用;相干检测;最小矢量误差

中图分类号:TN929.11 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2022)06-0050-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.06.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Radio-over-fiber system with tunable frequency multiplication factor based on MZM

WANG Kunkun, ZHANG Zhaoxia*, LU Ya, WANG Qian, ZHOU Xiaoling

(College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to make full use of the frequency band resources in radio-over-fiber(RoF) system, a frequency multiplier tunable RoF system based on Mach-Zehnder modulator(MZM) is proposed, the techniques of wavelength selection, coherent detection, wavelength reuse and digital signal processing (DSP) are used to achieve the output of signals with different octave factors in the uplink and downlink of the RoF system. The simulation results show that when the RoF system transmits hexadecimal quadrature amplitude modulation(16QAM) signals, the multiple frequency multiplier factor can be realized in both the upstream and downstream links, and the minimum vector error ranges of downlink transmission and uplink transmission are 5.5% ~ 7% and 6.4% ~ 8.6% respectively.

Key words: optical communication, radio-over-fiber, wavelength reuse, coherent detection, minimum error vector magnitude

0 引言

光纤无线(RoF)系统将光纤通信和无线通信的优点相结合,具有损耗小、带宽大、传输距离远、成本低和可与光生毫米波技术相兼容等特点^[3]。现有的光生

收稿日期:2022-02-17。

基金项目:山西省重点研发计划项目(高新技术领域)(201803D121057)资助;2021年度中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX2021A007)资助;2020年度山西省高等学校科技成果转化培育项目(2020CG019)资助。

作者简介:王琨琨(1997—),女,硕士研究生,现就读于太原理工大学物理与光电工程学院光学工程专业,主要研究方向是基于微波光子光生毫米波的研究,并应用于光纤无线系统中对其信号传输进行理论研究及仿真验证。

*通信作者:张朝霞(1977—),女,博士,教授,主要研究方向为光通信、信号探测及处理。



毫米波技术包括光外差技术^[4]、外部调制技术^[5-9]和锁模激光器技术^[10-12],其中,针对前2种技术的研究较多。光外差技术结构简单,可产生高频毫米波信号,但是由于相位不相关,导致传输距离受到限制,若采用锁相环来解决相位问题,会增加系统的复杂性。外部调制技术是一种稳定、可靠的光生毫米波技术,不仅可以解决相位匹配问题,而且得到的毫米波信号具有较高的光谱纯度^[13]。例如,在利用外部调制技术生成毫米波的研究中,为提高系统接收灵敏度,2017年,姚建平课题组^[14]提出基于相干检测和数字信号处理(DSP)的 RoF 系统,但只实现了单向相干检测,且输出频率单一,限制了 RoF 系统的应用范围。2020年,广东工业大学韩一石课题组^[15]提出一种基于并行相位调制器的双向传输信号频率可选的 RoF 系统,可实现多倍频毫

米波信号的输出,但频率应用范围较窄。因此,本文以文献[15]为基础,提出一种基于马赫-曾德尔调制器(MZM)的倍频因子可调谐的 RoF 系统。

1 基本原理

本文所提系统的原理图如图 1 所示,图 1 (b)中 A、B、C、D、E、F、G、H、I、J 图形是图 1(a)中对应各点的频谱。

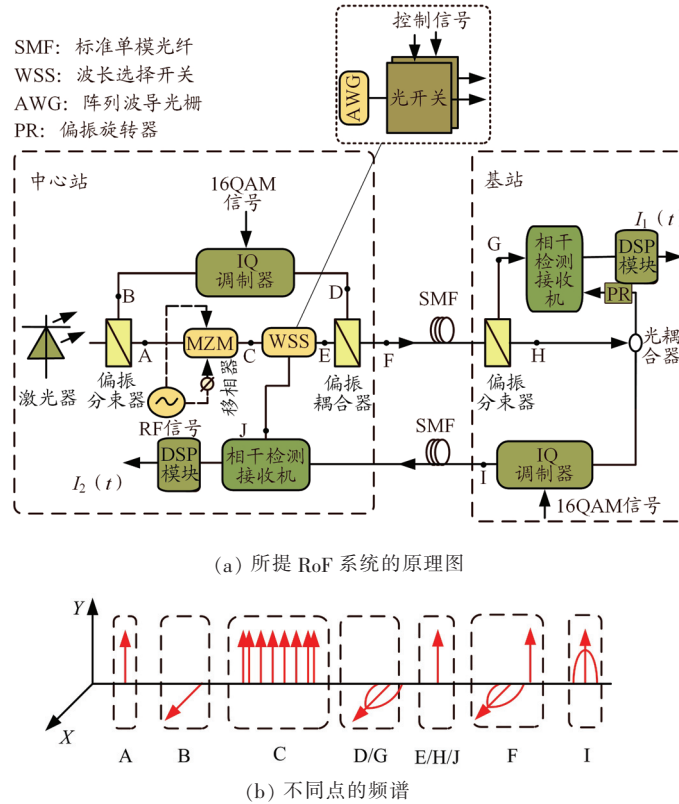


图 1 基于 MZM 的倍频因子可调谐的 RoF 系统原理图与频谱图

激光器输出光信号 $E_m(t) = E_0 \exp(j\omega_c t)$ 经过偏振分束器后被分解为正交的 X 偏振和 Y 偏振的光信号,16 进制正交幅度调制(16QAM)信号通过 IQ 调制器被加载到 X 偏振方向的光载波中进行传输。Y 偏振方向的光信号与射频信号 $V(t) = V_{RF} \sin(\omega_{RF} t)$ 同时输入 MZM 中,在 MZM 的上下两臂之间引入 $\pi/2$ 的相位差,并且使 MZM 工作偏置在最小传输点(MITP)上。MZM 的输出信号可表示为

$$E(t) = \frac{E_m(t)}{4} \left\langle \exp \left(j \frac{\pi V_{RF} \sin \omega_{RF} t}{V_{\pi}} \right) + \exp \left[j \frac{\pi \left(V_{RF} \left(\sin \omega_{RF} t + \frac{\pi}{2} \right) - V_{\pi} \right)}{V_{\pi}} \right] \right\rangle = \frac{E_m(t)}{4} \left\{ \exp(jm \sin \omega_{RF} t) + \exp \left[j m \sin \left(\omega_{RF} t + \frac{\pi}{2} \right) - \pi \right] \right\} \quad (1)$$

其中, t 为时间, V_{RF} 和 ω_{RF} 分别为射频信号的幅度和角频率, m 为调制指数 ($m = \pi V_{RF} / V_{\pi}$), V_{π} 为 MZM 的半波电压。根据 Bessel 函数恒等式 $\exp(jx \sin \varphi) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(x) \exp(jn\varphi)$, 式(1)可写成

$$E(t) = \frac{E_m(t)}{4} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(m) \exp(jn\omega_{RF} t) \left[1 - \exp(jn\frac{\pi}{2}) \right] \quad (2)$$

其中, $J_n(\cdot)$ 是第一类 n 阶 Bessel 函数, x 是 Bessel 函数的一个变量。由式(2)可得,当 $n=4k$ (k 为整数)时, $E(t)=0$ 。当 $m=1.635\pi$ 时, J_2, J_7 对应数值太小,可忽略不计,故式(2)可近似写成

$$E(t) \approx \frac{E_0}{4} \{ J_1(m) \exp[j(\omega_c - \omega_{RF})t] + J_1(m) \exp[j(\omega_c + \omega_{RF})t] + J_3(m) \exp[j(\omega_c - 3\omega_{RF})t] + J_3(m) \exp[j(\omega_c + 3\omega_{RF})t] + J_5(m) \exp[j(\omega_c - 5\omega_{RF})t] + J_5(m) \exp[j(\omega_c + 5\omega_{RF})t] + J_6(m) \exp[j(\omega_c - 6\omega_{RF})t] + J_6(m) \exp[j(\omega_c + 6\omega_{RF})t] \} \quad (3)$$

其中, E_0 和 ω_c 分别为激光器输出光场的幅度和角频率。由式(3)可知,输出光信号主要包括 8 路光边带,分别是 ± 1 阶、 ± 3 阶、 ± 5 阶和 ± 6 阶光边带,如图 1(b)中的 C 所示。8 路光边带信号输入到 WSS 中,通过改变控制信号中的二进制序列来选择输出波长。系统可输入的二进制序列分别为:000、001、010、011、100、101、110 和 111,每一个序列分别对应于不同的边带信号。WSS 的 2 个输出信号分别作为双向传输相干检测的本振信号。在中心站,偏振合束器将下行本振信号和 16QAM 光信号进行偏振合束,然后经下行光纤链路传输到基站。在基站,偏振分束器分解出本振光信号,本振光信号经光耦合器按 1:1 分成 2 路,其中一路信号利用 PR 旋转 90° 与 X 偏振方向的 16QAM 光信号进行相干检测,得到的信号可表示为

$$I_1(t) = I_I(t) + I_Q(t) = a_i \exp[j(\omega_c - \omega_{Loi}) + \psi_i] \quad (4)$$

其中, $I_I(t)$ 和 $I_Q(t)$ 分别表示下行链路探测器输出的同相分量和正交分量, a_i 为下行链路输出信号的幅值, ω_{Loi} 为下行第 i 条本振信号的频率, $|\omega_c - \omega_{Loi}|$ 为输出信号频率, $|\omega_c - \omega_{Loi}| / \omega_{RF}$ 为下行链路的倍频因子, ψ_i 为下行链路输出相位(包括本振信号相位和光信号相位)。相干检测后得到的信号输入到 DSP 模块中进行 IQ 补偿、时钟恢复、频偏估计和相位估计等处理。

光耦合器输出的另一路光信号作为上行链路的光

载波(波长重用),上行 16QAM 信号经 IQ 调制器加载到此光载波上,经上行光纤链路传输到中心站。在中心站,调制光信号与 WSS 输出的上行本振信号进行相干检测,得到的信号可表示为

$$I_2(t)=I'_1(t)+I'_Q(t)=a_2\exp[j(\omega_{LOl}-\omega_{LOl})+\psi_2] \quad (5)$$

其中, $I'_1(t)$ 和 $I'_Q(t)$ 分别表示上行链路探测器输出的同相分量和正交分量, a_2 为上行链路输出信号的幅值, ω_{LOl} 为上行第 l 个本振信号的频率, $|\omega_{LOl}-\omega_{LOl}|$ 为输出信号频率, $|\omega_{LOl}-\omega_{LOl}|/\omega_{RF}$ 为上行链路的倍频因子, ψ_2 为上行链路输出相位(包括本振信号相位和光信号相位)。上行链路中心站中 DSP 模块的处理方式与下行链路一致。

传输系统上下行链路可输出频率范围如图 2 所示,图中 f_{RF} 为射频信号的频率, 0~12 为倍频因子。由于系统的下行链路光载波频率保持不变,通过改变下行本振信号的频率便可实现 1、3、5、6 倍频因子的可选,如图 2(a)所示。将系统下行链路选择的本振信号作为上行链路传输的光载波,图 2(b)、图 2(c)分别表示当系统下行链路选择的本振信号频率对应于-6 阶

光边带、-5 阶光边带信号时,系统上行链路传输可实现的倍频因子可选范围。可以看出,系统下行链路选择的本振信号频率会影响上行链路中倍频因子可选的范围,具体的对应关系如表 1 所示,上行链路最高有 13 种倍频因子可选。

2 仿真与结果分析

为验证所提系统的可行性,本文基于图 1 使用 Optisystem 平台搭建仿真链路。仿真参数设置如下:激光器的中心频率为 193.1 THz,功率为 10 dBm;IQ 调制器的半波电压为 4 V,插入损耗为 5 dB;MZM 的调制指数为 1.635π ,半波电压为 4 V,插入损耗为 5 dB,消光比为 45 dB,偏置电压分别为 -2 V 和 2 V;光纤长度为 20 km,衰减系数为 0.2 dB/km、色散系数为 $16.75 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km}^{-1})$ 。光信号经 MZM 调制后得到较为平坦的光频梳,如图 3 所示,图中光学边带分别为 ± 1 阶、 ± 3 阶、 ± 5 阶、 ± 6 阶,且边带比小于 5 dB。当射频信号设置为 10 GHz 时,光边带信号从左至右所对应的频率分别为 193.04 THz、193.05 THz、193.07 THz、193.09 THz、

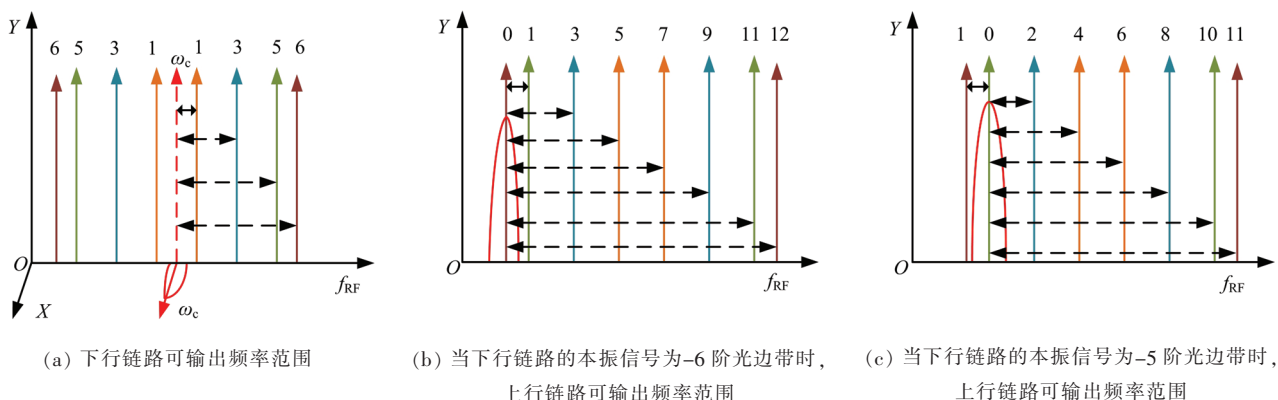


图 2 传输系统上下行链路可输出频率范围示意图

表 1 传输系统中倍频因子可选的范围

二进制序列	输出光信号频率/THz	下行链路倍频因子可选值	上行链路倍频因子可选值
000	193.04	6	0、1、3、5、7、9、11、12
001	193.05	5	0、1、2、4、6、8、10、11
010	193.07	3	0、1、2、4、6、8、9
011	193.09	1	0、2、4、5、6、7
100	193.11	1	0、2、4、5、6、7
101	193.13	3	0、1、2、4、6、8、9
110	193.15	5	0、1、2、4、6、8、10、11
111	193.16	6	0、1、3、5、7、9、11、12

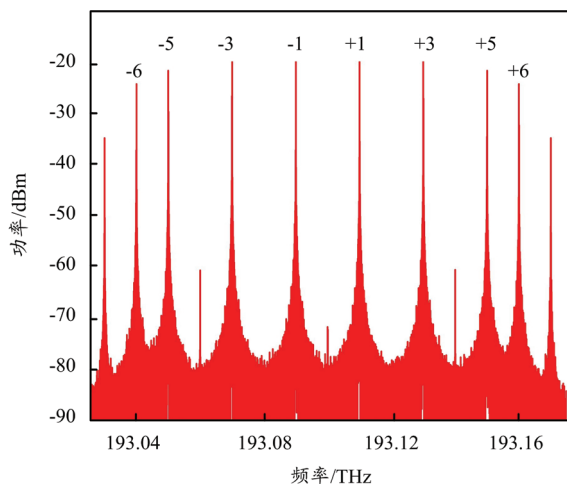


图 3 光信号经 MZM 调制后得到的光频梳光谱图

193.11 THz、193.13 THz、193.15 THz 和 193.16 THz。

相干检测接收机是根据零差相干接收机设计而成的,包括一组 3 dB 光纤耦合器和平衡探测器。平衡探测器的响应度为 1 A/W,暗电流为 10 nA。相干解调后的输出信号如图 4 所示,可实现 1、3、5、6 倍频因子可选,即对应的输出频率为 10 GHz、30 GHz、50 GHz 和 60 GHz。

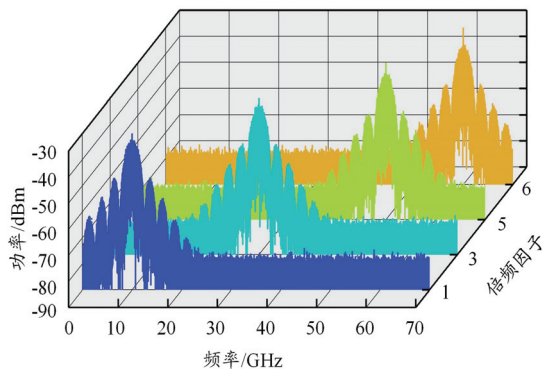


图 4 下行链路相干检测后的输出频率图

本文采用波长重用技术将下行链路的本振信号作为上行链路传输的光载波。当下行链路的本振信号频率为 193.04 THz 时,上行链路相干解调后的输出信号如图 5 所示,可实现 0、1、3、5、7、9、11、12 倍频因子可选,对应的输出频率为 0 GHz、10 GHz、30 GHz、50 GHz、70 GHz、90 GHz、110 GHz 和 120 GHz。当下行链路的本振信号频率选择为 193.05 THz 时,上行链路接收端处得到的输出信号如图 6 所示,可实现 0、1、2、4、6、8、10、11 倍频因子可选,对应的输出频率为 0 GHz、10 GHz、20 GHz、40 GHz、60 GHz、80 GHz、100 GHz 和 110 GHz。

根据第三代合作伙伴(3GPP)的标准可知,当误差矢量幅度(EVM)小于 12.5%时即可满足通信需求^[16-17]。本文通过仿真研究得出,在下行链路传输可实现的

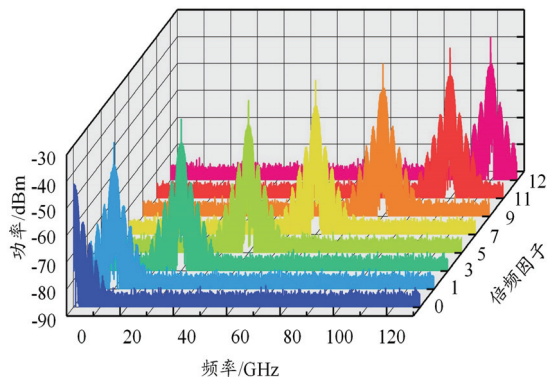


图 5 $\omega_{LO}=193.04$ THz 时上行链路输出频率图

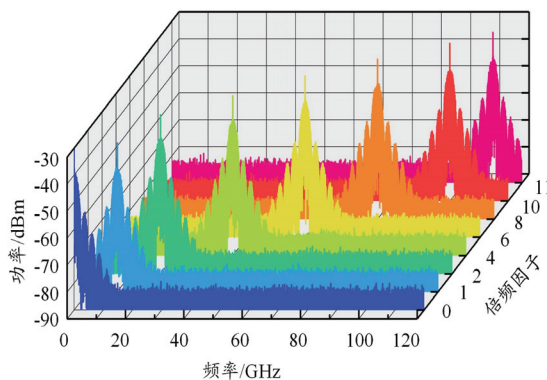


图 6 $\omega_{LO}=193.05$ THz 时上行链路输出频率图

10~60 GHz 的频率可选范围内,其传输最小 EVM 数值范围为 5.5%~7%,星座图如图 7(a)、图 7(b)所示;在上行链路传输可实现的 0~120 GHz 频率可选范围内,其传输最小 EVM 数值范围为 6.4%~8.6%,星座图如图 7(c)、图 7(d)所示。可以看出,上下行链路接收端所获得的星座图都较为清晰,并且根据计算得到的最小 EVM 值均符合 3GPP 标准。

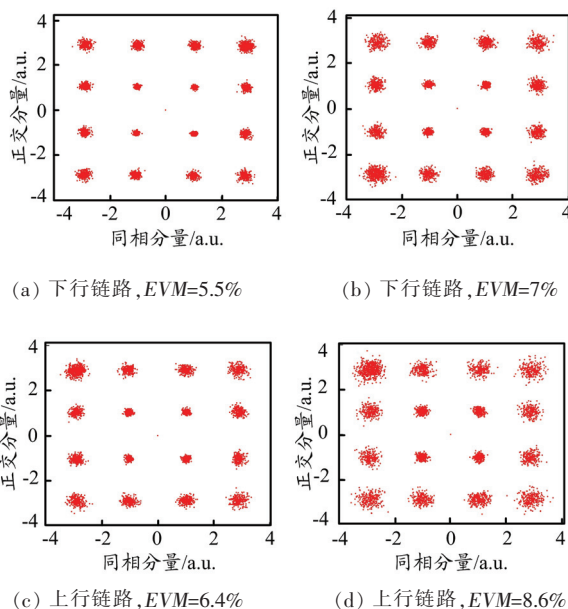


图 7 双向链路传输的接收端所获得的星座图

3 结束语

本文提出了一种基于 MZM 的倍频因子可调谐的 RoF 系统,在接收端采用自相干检测技术,无需加入额外激光器,大大降低了基站的建设成本。因其倍频因子的可调谐性,有效扩大了 RoF 系统的频率应用范围。仿真结果表明:RoF 系统传输 16QAM 信号时,下行链路倍频因子可实现 1、3、5、6 可选,输出信号的最

小EVM数值范围为5.5%~7%;上行链路倍频因子可实现0~12可选,输出信号的最小EVM数值范围为6.4%~8.6%。因此,本文提出的基于MZM的倍频因子可调谐的RoF系统具有良好的传输性能,为未来毫米波段信号的接入服务提供更多可选的技术方案。

参考文献:

- [1] CHEN S, JIAN Z. The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 36–43.
- [2] ZHANG F, ZHANG T, GE X, et al. A full-duplex OSSB modulated RoF system with centralized light source by optical sideband reuse[C]//2014 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), October 13–15, 2014, Shanghai, China. New York: IEEE, 2014: 146–150.
- [3] TANG Z, PAN S. A full-duplex radio-over-fiber link based on a dual-polarization Mach-Zehnder modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(8): 852–855.
- [4] PAN S, ZHU D, ZHANG F. Microwave photonics for modern radar systems[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 31(3): 219–240.
- [5] 吴波,于晋龙,刘毅,等. 基于低速光调相信号注入DFB-LD产生4~16倍频的40 GHz和60 GHz毫米波信号[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 156–162.
- [6] ZHU Z, ZHAO S, ZHENG W, et al. Filterless frequency 12-tupling optical millimeter-wave generation using two cascaded dual-parallel Mach-Zehnder modulators[J]. Applied optics, 2015, 54(32): 9432–9440.
- [7] SHIH P T, CHEN J, LIN C T, et al. Optical millimeter-wave signal generation via frequency 12-tupling [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 28(1): 71–78.
- [8] 韩一石, 罗志霄, 覃新宇, 等. 可选频的多路波分复用光纤无线系统[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 152–160.
- [9] CHEN X, XIA L, HUANG D. A filterless 24-tupling optical millimeter-wave generation and RoF distribution[J]. Optik, 2017, 147: 22–26.
- [10] YAO Y, CHEN X, DAI Y, et al. Dual-wavelength erbium-doped fiber laser with a simple linear cavity and its application in microwave generation [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 18(1): 187–189.
- [11] CHEN X, DENG Z, YAO J. Photonic generation of microwave signal using a dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber ring laser [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2006, 54(2): 804–809.
- [12] QI G, YAO J, SEREGELYI J, et al. Generation and distribution of a wide-band continuously tunable millimeter-wave signal with an optical external modulation technique [J]. IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 2005, 53(10): 3090–3097.
- [13] ZHAO Y, ZHENG X, WEN H, et al. Simplified optical millimeter-wave generation configuration by frequency quadrupling using two cascaded Mach-Zehnder modulators[J]. Optics Letters, 2009, 34(21): 3250–3252.
- [14] XIANG C, YAO J. Wavelength reuse in an RoF link based on CS-DSB, coherent detection and DSP [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(12): 975–978.
- [15] 雷珂珂, 罗吴金, 谢胜超, 等. 一种基于相干检测的双向输出信号频率可选的光纤无线系统[J]. 光子学报, 2020, 49(5): 32–41.
- [16] DING Q, WANG M, MU H, et al. Full-duplex broadcast RoF-WDM-PON with self-coherent detection and photonic frequency up/down-conversion using SSB pilot-carrier[J]. Optics Communications, 2018, 427: 54–60.
- [17] KAKATI D, ARYA S C. A 640-Gbps, 15.2344-b/s/Hz full-duplex optical fiber/wireless single-channel coherent communication system using IQM-based DP-256-QAM and DSP techniques [J]. Photonic Network Communications, 2020, 39(1): 26–38.