

一种多波段信号输出的全双工光载无线系统

郭冠锋,郭忠国,李忠坤,钟永明,曾昶盛

(广东工业大学 信息工程学院,广州 510006)

摘要:为了提升通信系统的灵活性,扩大应用范围,同时降低建设成本,提出一种多波段信号输出的全双工光载无线系统。在单光源条件下,通过灵活控制偏振控制器、线性偏振器的角度,实现3路不同频段的下行矢量信号传输;利用载波重用和相干检测技术,实现上行基带信号输出。仿真结果表明:6 Gb/s 四进制正交幅度调制(16QAM)信号经30 km 光纤传输后,下行链路中5 GHz、45 GHz 和 25 GHz 频段输出信号的最小误差矢量幅度(EVM)分别为5.66%、4.03%和2.67%,上行链路输出信号的最小EVM为4.01%。

关键词:光载无线系统;多波段信号;偏振复用;全双工;抗色散

中图分类号:TN912.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)06-0055-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.06.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Full-duplex radio-over-fiber system with multi-band signal output

GUO Guanfeng, GUO Zhongguo, LI Zhongkun, ZHONG Yongming, ZENG Changsheng

(School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to improve the flexibility of the communication system, expand the application range and reduce the construction cost, a full-duplex radio-over-fiber system with multi-band signal output is proposed in this paper. Under the condition of single light source, this paper realizes the downlink vector signal transmission in three different frequency bands by flexibly controlling the angle of polarization controller and linear polarizer. Using carrier reuse and coherence detection technology, uplink baseband signal output is realized. The simulation results show that for the 6 Gb/s hexadecimal quadrature amplitude modulation (16QAM) signals are transmitted through 30 km optical fiber, the minimum error vector amplitude (EVM) of the output signals in 5 GHz, 45 GHz and 25 GHz bands in the downlink are 5.66%, 4.03% and 2.67%, respectively. The minimum EVM of the uplink output signal is 4.01%.

Key words: radio-over-fiber system, multi-band signal, polarization multiplexing, full duplex, anti-dispersion

0 引言

光载无线(RoF)通信技术因具有低传输损耗、抗电磁干扰和固有的大带宽等特性受到学术界的广泛关注,传输频率可达毫米波频段,已成为第五代移动通信技术(5G)乃至未来6G通信系统中极具前景的备选方案^[1]。RoF技术能够充分利用光纤通信和无线通信的优势,解决了长距离传输损耗大、器件带宽受限和低频谱资源紧张的问题。由于复杂、昂贵的信号处

理组件集中在中心站(CS),基站(BS)只需完成光/电转换操作,因此让多个BS共享一个CS,可以降低系统的建设成本,同时方便后期维护与升级^[2]。

为了进一步降低BS的复杂度和成本,许多利用波长重用技术进行无色传输的体系结构相继被提出^[3-8]。文献[3-4]通过马赫-曾德尔调制器(MZM)在下行链路输出毫米波信号,复用下行纯净的光边带以实现上行信号传输。但是,系统中光学滤波器、光交叉波分复用器的使用限制了信号传输的带宽范围,无法满足大带宽的通信需求。文献[5-8]利用偏振复用技术实现了全双工无色无源光纤链路,然而其中的下行链路只能输出单频段信号,频谱利用率低。

在RoF系统中,多波段信号的传输网络可以扩大无线信号的覆盖范围,增加通信容量,降低系统成本,

收稿日期:2022-03-23。

作者简介:郭冠锋(1996—),男,广东化州人,硕士研究生,现就读于广东工业大学信息工程学院信息与通信工程专业,从事微波光子信号处理、光纤无线技术方面的研究工作,主要针对全光通信网络、光载无线系统中传输高性能信号进行仿真验证。



目前已有文献提出多波段信号产生和传输的方案^[9-12]。2018年, 文献[9]提出一种双向波分复用无源光网络, 将单边带(SSB)调制的导频载波与下行数据信号进行自相干检测, 有效消除了相干检测中的光载波相位噪声, 并实现了2个频段的下行信号输出。但是, 在远程BS中使用了光相干接收机, 使得系统的建设成本较高。文献[10-11]提出可同时输出2种不同服务类型信号的RoF系统, 提高了频谱利用率, 然而产生信号频段相同, 并且只实现下行传输。文献[12-14]提出的系统结构简单, 可同时生成2个频段信号, 但是光纤布喇格光栅、光交织器等波长相关器件的使用极大地限制了传输信号的频段与带宽。

为解决上述问题, 本文提出一种多波段信号输出的全双工RoF系统。

1 基本原理

本文提出的多波段信号输出的全双工RoF系统结构及不同位置频谱如图1所示。该系统主要由偏振复用MZM(PDM-MZM)、偏振控制器(PC)、线性偏振器(Pol)、光耦合器(OC)和光电探测器(PD)构成。其中, PDM-MZM由2个并联的MZM(Sub-MZMX, Sub-MZMY)、90°偏振旋转器(PR)和偏振合束器(PBC)组成。

1.1 CS 原理

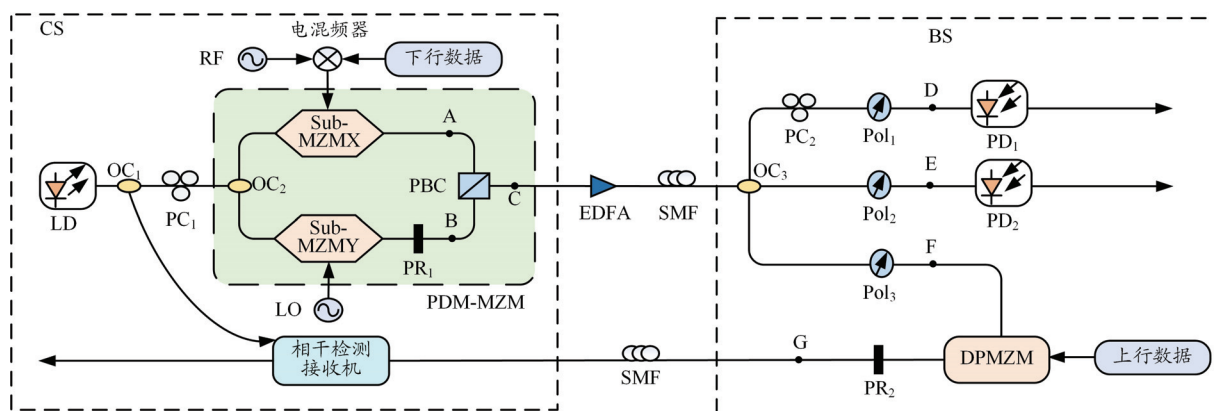
激光二极管(LD)发出的线偏振光波注入到PDM-MZM中, 调节PC使得光载波的偏振方向与PDM-MZM

的主轴对齐, 最小化偏振相关损耗。加载下行数据信息的射频(RF)信号驱动Sub-MZMX, 本振(LO)信号驱动Sub-MZMY。调节Sub-MZMX的直流偏置电压使其在正交传输点生成SSB信号。Sub-MZMY在最大传输点处(Sub-MZMY上下两臂的信号幅值差为0)偏置, 生成奇数阶抑制光信号。假设由LD发出的光载波 $E_c(t) = E_c \exp(j\omega_c t)$, 其中 E_c 和 ω_c 分别代表光载波的幅度和角频率, t 为时间。忽略插入损耗, 图1(a)中A点和B点输出信号分别表示为

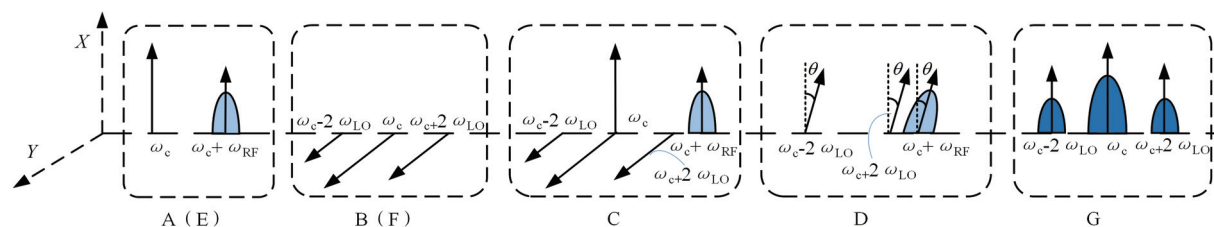
$$E_A(t) = \frac{1}{2} E_c(t) \left\{ \exp[j\beta_1 \cos(\omega_{RF} t)] + \exp\left[j\beta_1 \cos\left(\omega_{RF} t - \frac{\pi}{2}\right) + j\pi \left(\frac{V_\pi}{2} / V_\pi\right)\right] \right\} = \frac{1}{2} E_c(t) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} [j^n J_n(\beta_1) \times (1 + j^{1-n}) \exp(jn\omega_{RF} t)] \quad (1)$$

$$E_B(t) = \frac{1}{2} E_c(t) \left\{ \exp[j\beta_2 \cos(\omega_{LO} t)] + \exp[j\beta_2 \cos(\omega_{LO} t + \pi)] \right\} = E_c(t) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} [j^{2n}(\beta_2) \times (-1)^n \exp(j2n\omega_{LO} t)] \quad (2)$$

其中, $\beta_1 = \pi V_{RF} / V_\pi$, $\beta_2 = \pi V_{LO} / V_\pi$ 分别为RF信号和LO信号的调制指数, V_π 为调制器的半波电压; V_{RF} 、 V_{LO} 分别为RF信号和LO信号的幅度, ω_{RF} 、 ω_{LO} 分别为RF信号和LO信号的角频率; $J_n(\cdot)$ 表示第一类 n 阶贝塞尔函数, n 为非负整数。在小信号调制条件下, 只考虑一



(a) 多波段输出RoF系统结构



(b) A~G点处频谱

图1 多波段信号输出的全双工RoF系统结构及不同位置频谱

阶以内的光边带,因此,A点输出信号可以简化为

$$E_A(t) \approx \frac{1}{2} E_c \exp(j\omega_c t) \times [(1+j)J_0(\beta_1) + 2jJ_1(\beta_1) \exp(j\omega_{RF} t)] \quad (3)$$

在大信号调制条件下,忽略功率相对较低的边带,B点输出信号可以简化为

$$E_B(t) \approx E_c \exp(j\omega_c t) \times [J_0(\beta_2) - J_2(\beta_2) \times \{\exp(-j2\omega_{LO} t) + \exp(j2\omega_{LO} t)\}] \quad (4)$$

经PR旋转90°后,B点输出信号与A点输出信号在PBC中实现偏振复用,经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大送入单模光纤(SMF)进行传输。

1.2 BS原理

调节PC和Pol,将输入光信号的2个正交偏振态投影到一个偏振方向,PBC的X主轴与Pol的主轴之间的角度为 α ,2个正交光信号之间的相位差为 θ 。Pol输出光信号为

$$\begin{aligned} E_{Pol}(t) = & E_A(t) \cos \alpha + E_B(t) \sin \alpha \times \exp(j\theta) = \\ & \frac{1}{2} E_c \exp(j\omega_c t) [(1+j)J_0(\beta_1) + \\ & 2jJ_1(\beta_1) \exp(j\omega_{RF} t)] \times \cos \alpha + E_c \exp(j\omega_c t + j\theta) \times \\ & [J_0(\beta_2) - J_2(\beta_2) [\exp(-j2\omega_{LO} t) + \exp(j2\omega_{LO} t)]] \times \sin \alpha \end{aligned} \quad (5)$$

调节PC₂和Pol₁,使 θ 和 α 满足式(6)时,可以抑制光载波。

$$(1+j)J_0(\beta_1) \times \cos(\alpha) + 2J_0(\beta_2) \exp(j\theta) \times \sin \alpha = 0 \quad (6)$$

当 $\theta = \pi/4$ 、 $\alpha = \arctan\{[-J_0(\beta_1)]/[\sqrt{2}J_0(\beta_2)]\}$ 时,Pol₁输出信号可以化简为

$$\begin{aligned} E_{Pol1}(t) = & jE_c \exp(j\omega_c t + j\omega_{RF} t) J_1(\beta_1) \times \cos \alpha - \frac{1}{\sqrt{2}} (1+j) \times \\ & E_c \exp(j\omega_c t - j2\omega_{LO} t + j2\omega_{LO} t) J_2(\beta_2) \times \sin \alpha \end{aligned} \quad (7)$$

信号经PD₁拍频后,输出光电流可以表示为

$$\begin{aligned} I_1(t) = & \eta_1 E_{Pol1}(t) \cdot E_{Pol1}^*(t) \propto 2E_c^2 J_1^2(\beta_1) J_2^2(\beta_2) \times \cos \alpha \sin \alpha \times \\ & \left[\sin\left(\omega_{RF} t + 2\omega_{LO} t - \frac{\pi}{4}\right) + \sin\left(\omega_{RF} t - 2\omega_{LO} t - \frac{\pi}{4}\right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

其中, η_1 为PD₁的响应度, $E_{Pol1}^*(t)$ 为 $E_{Pol1}(t)$ 的共轭复数。

由式(8)可知,生成了2个频率分别为 $\omega_{RF} + 2\omega_{LO}$ 、 $\omega_{RF} - 2\omega_{LO}$ 携带数据信号的电信号。此外,当调节Pol₂,使 $\alpha = 0^\circ$ 时,Pol₂输出信号表示为

$$\begin{aligned} E_{Pol2}(t) = & \frac{1}{2} E_c \exp(j\omega_c t) [(1+j)J_0(\beta_1) + \\ & 2jJ_1(\beta_1) \exp(j\omega_{RF} t)] \end{aligned} \quad (9)$$

经PD₂拍频后,输出光电流表示为

$$I_2(t) = \eta_2 E_{Pol2}(t) \cdot E_{Pol2}^*(t) \propto E_c^2 [\cos(\omega_{RF} t) - \sin(\omega_{RF} t)] \quad (10)$$

其中, η_2 为PD₂的响应度。

由式(10)可知,拍频后产生一个 ω_{RF} 频率且携带数据信号的电信号。调节Pol₃,使 $\alpha = \pi/2$ 时,Pol₃输出信号表示为

$$\begin{aligned} E_{Pol3}(t) = & E_c \exp(j\omega_c t) \{J_0(\beta_2) - J_2(\beta_2) [\exp(-j2\omega_{LO} t) + \\ & \exp(j2\omega_{LO} t)]\} \end{aligned} \quad (11)$$

从式(7)~式(11)可知,输出信号只包含Y偏振方向的光载波和二倍频率的LO信号。因此,Y偏振方向信号可以波长重用,重用后的信号作为上行传输链路的光源信号,通过双驱动双平行MZM(DPMZM)加载上行传输的16进制正交幅度调制(16QAM)矢量信号,经30 km SMF传输后返回CS,与LD信号一起送至相干检测接收机进行相干检测。

1.3 相干检测接收机原理

相干检测接收机由2个输入、4个输出的光混频器单元以及2组平衡PD单元组成^[5]。信号传输过程为:2路信号输入到相干检测接收机,其中承载数据信号的光路被OC分离为2束光束,一束相位不变,另一束进行90°相位偏移,然后2束光束与纯净的光载波两两混频,送至平衡PD单元进行光/电转换,输出携带矢量信息的电信号。

2 仿真结果与分析

为了验证所提系统的可行性,本文进行了模拟仿真。

2.1 系统功能仿真验证

在CS发射端,LD产生中心频率为193.1 THz、线宽为100 kHz和功率为10 dBm的光载波,被注入到PDM-MZM,PDM-MZM的半波电压和消光比分别设为4 V、30 dB。内置的OC将入射光分为2束(功率相等),分别送入Sub-MZMX和Sub-MZMY。Sub-MZMX被6 Gb/s的16QAM信号和20 GHz的RF信号共同驱动,Sub-MZMY被25 GHz的LO信号驱动。旋转PR,调整Sub-MZMY出射光的偏振态,使其与Sub-MZMX的偏振光正交,2个正交偏振态的光信号经PBC组合后输入30 km的SMF进行传输。SMF的损耗系数、色散系数、色散斜率分别为0.2 dB/km、16.75 ps/(nm·km⁻¹)、0.075 ps/(nm²·km⁻¹)^[9]。

图2(a)为PDM-MZM输出信号的光域频谱图。蓝色线代表Sub-MZMX产生的携带矢量信号的SSB信号,红色线代表Sub-MZMY产生的奇数阶抑制信号。可以看出,奇数阶抑制信号光杂散抑制比等于26.62 dB,中心边带和二阶边带的边带抑制比等于20.16 dB。

在BS接收端,光信号经EDFA放大后被OC均分

成3路输出。EDFA增益为10 dB, 噪声指数为6 dB。调整PC₂和Pol₁, 使得 $\theta=45^\circ$ 和 $\alpha=140^\circ$, 以满足式(6)。此时, 2个不同偏振方向之间的载波互相抵消, Pol₁输出光域频谱图如图2(b)所示。可以看出, Pol₁输出信号的光载抑制比为39.27 dB, 再结合图2(a)中的中心边带和二阶边带的边带抑制比可得, 光载波被抑制59.43 dB, 表明上述方案具有较好的抑制效果。Pol₁输出的信号经响应度为0.8 A/W的PD₁拍频后产生中心频率分别为5 GHz、25 GHz的16QAM信号, 信号频谱如图3(a)所示。当调节 α 为0°时, 只有X偏振态上的光信号可以经由Pol₂进入PD₂拍频, 由此得到中心频率为45 GHz的16QAM信号, 频谱如图3(b)所示; 当调节 α 为90°时, 未加载矢量信号的奇数阶抑制光载波信号波长被重用, 经由Pol₃进入DPMZM。光载波信号调制16QAM信号后, 通过30 km SMF进行上行链路传输, 最终在CS进行相干解调。至此, 便完成了多频段全双工通信RoF系统的功能验证。

2.2 系统传输性能仿真

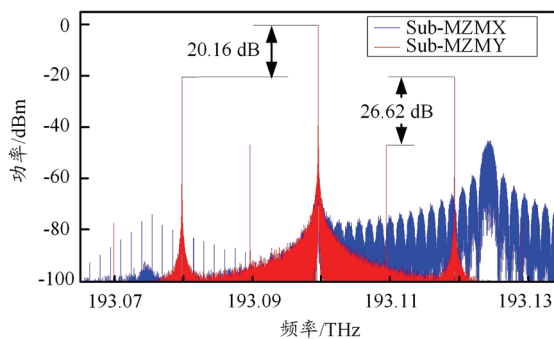
2.2.1 误差矢量幅度(EVM)性能

通信系统中, EVM和误比特率(BER)是评估高阶调制格式信号的2个重要性能指标。其中, EVM通常可从星座图获得。对于16QAM信号, 其EVM与BER之间的关系式^[16]为

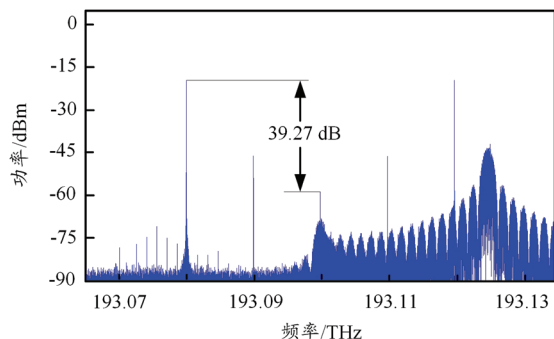
$$BER = \frac{3}{4} Q\left(\frac{1}{\sqrt{5EVM^2}}\right) \quad (12)$$

其中, $Q(\cdot)$ 为Q函数, 又称标准正态分布的右尾函数。在第三代合作伙伴计划(3GPP)标准^[17]中, 当 $EVM < 12.5\%$ 时, 对应BER(1.0×10^{-4})符合相关前向纠错码(FEC)标准规定($BER \leq 3.8 \times 10^{-3}$)^[18-19]。本系统上下行链路传输16QAM信号, 若要满足3GPP标准要求, 则接收端的EVM必须小于12.5%。

首先, 本文分析在30 km和背靠背(BTB)2种传输距离时系统下行链路的传输性能。5 GHz、45 GHz、25 GHz这3个频段的16QAM信号EVM与接收光功率的关系如图4所示。可以看出: ①不同传输距离下, 随着接收光功率不断减小, 不同频率输出信号EVM逐步增大, 其中25 GHz频段的EVM变化趋势较明显, 5 GHz频段与45 GHz频段信号的EVM增长趋势基本保持一致。这表明25 GHz频段信号的接收灵敏度比5 GHz频段、45 GHz频段的低, 5 GHz频段和45 GHz频段系统传输时稳定性较好。②当 $EVM=12.5\%$ 时, 30 km下行传输链路最大功率代价仅为0.72 dB, 信号在下行链路光纤传输中功率损耗较低。当下行链路接收光功率 > -18.87 dBm时, 对应 $EVM < 12.5\%$, 此时获得的星座图清晰可辨, 如图4中a、b、c三点处的星座图所示, c点处的星座图比a、b两点处的更清晰可辨。③当下

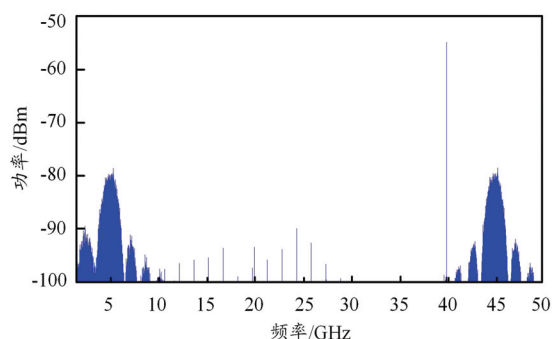


(a) PDM-MZM 输出信号频谱

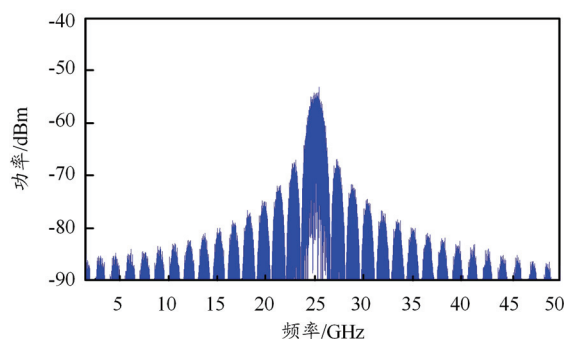


(b) Pol₁ 输出信号频谱

图2 PDM-MZM和Pol₁输出信号的光域频谱图



(a) PD₁ 输出频谱图



(b) PD₂ 输出频谱图

图3 PD₁和PD₂输出信号的电域频谱图

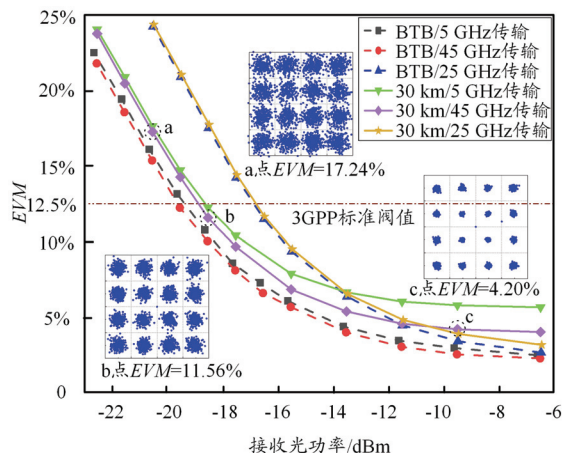


图4 下行输出各频段信号 EVM 与接收光功率变化曲线及对应星座图

行链路接收光功率 ≈ -6.5 dBm 时,30 km 下行链路中 5 GHz、45 GHz 和 25 GHz 频段输出信号的最小 EVM 分别为 5.66%、4.03%和 2.67%,满足 3GPP 标准规定。

其次,分析上行链路传输性能。本文在 BTB 和 30 km 2 种传输距离下测量输出基带信号的 EVM 与接收光功率,得到光功率变化曲线图、星座图如图 5 所示。可以看出:①上行基带信号在 BTB 和 30 km 2 种传输距离下,性能基本保持一致,当 $EVM=12.5\%$ 时,30 km 上行传输链路最大功率代价仅为 0.3 dB,信号在上行光纤链路传输的功率损耗较低。②当上行链路接收光功率 >-42.8 dBm 时,对应 $EVM<12.5\%$ (最小 EVM 为 4.01%),满足 3GPP 标准规定,获得的星座图清晰可辨。③当 $EVM=12.5\%$ 时,与图 4 相比,上行链路接收光功率比下行链路小得多,这是由于上行链路采用了相干检测技术,灵敏度远高于下行链路采用的直接检测技术^[20]。

最后,改变信号调制格式,分别测量正交相移键控

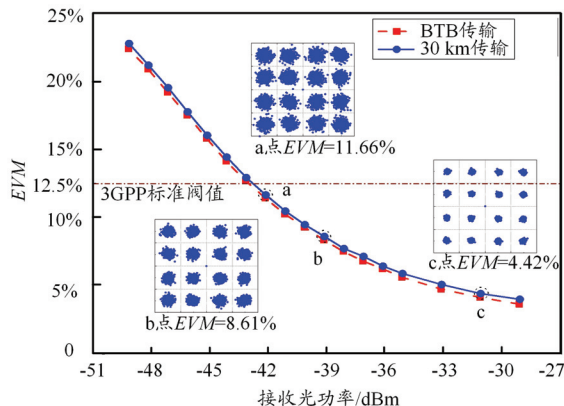


图5 上行输出基带信号 EVM 与接收光功率变化曲线及对应星座图

(QPSK)、移相键控(8PSK)、32QAM 和 64QAM 在该系统中的下行 30 km 传输性能。当 PD 接收的光功率为 -9.6 dBm 时,在接收端测得的 EVM 分别为 3.47%、4.09%、4.57%和 4.96%,对应调制格式的星座图如图 6 所示,图形全部清晰可辨。根据上述分析可知,本系统能够很好地适用于各种调制格式信号的远距离传输。

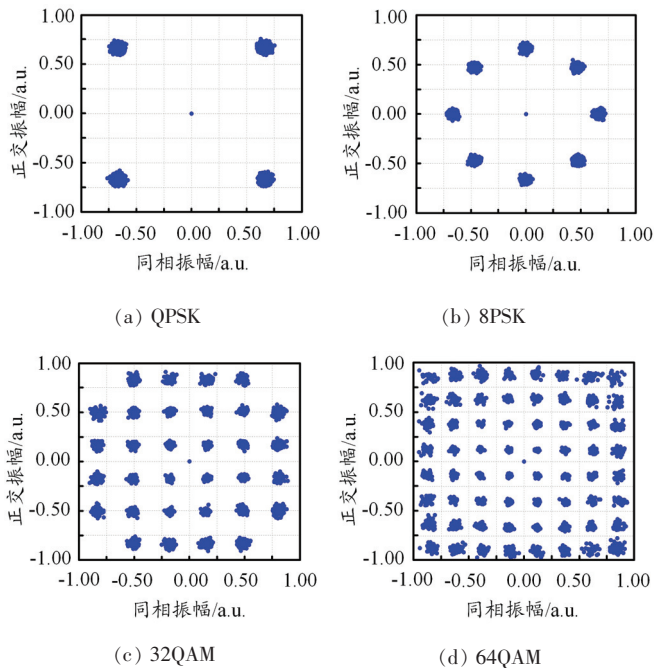


图6 不同调制格式的星座图

2.2.2 2 种方案性能对比

与传统的单边带(DSB)调制方案^[21]相比,为了验证所提系统具有消除光纤色散引起的功率周期性衰落效应的独特性能,本文改变输入的 RF 频率,测量经过色散系数为 $16.75 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km}^{-1})$ 的 30 km 标准 SMF 传输后 2 种方案输出信号的功率随频率变化曲线图,结果如图 7 所示。可以看出,对于 DSB 调制方案,输出信

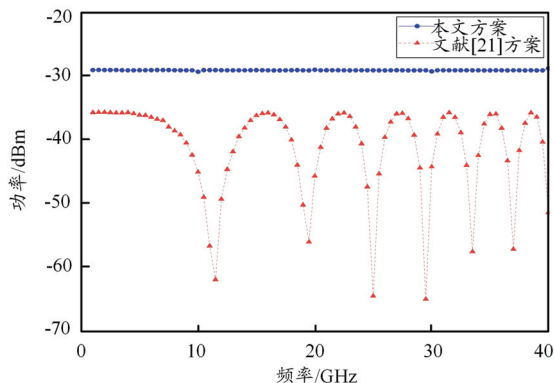


图7 经 30 km 光纤传输后 2 种方案输出信号的功率随频率变化曲线图

号的功率会发生周期性下降, 而本文所提方案输出信号的功率在整个频率范围内几乎保持不变, 能消除光纤色散引起的功率周期性衰落效应, 适用于远距离传输应用。

3 结束语

本文提出了一种多波段信号输出的全双工 RoF 通信系统。仿真结果表明: 针对 6 Gb/s 16QAM 信号, 经过 30 km 光纤传输后, 系统下行链路各频段信号的最小 EVM 在 2.67%~5.66% 之间; 上行链路输出信号的最小 EVM 为 4.01%。这表明所提系统的双向传输性能良好。该系统将信号处理单元与相干检测单元集中在 CS 中, 并且复用下行光边带用于上行传输(波长重用), 降低了 BS 复杂度和系统建设成本, 提升了系统灵活度, 扩大了应用范围。除此之外, 该系统还可以选择多种调制格式的信号进行传输, 能够应用于蜂窝通信系统, 为用户提供多频段信号接入服务。

参考文献:

- [1] CHEN N, OKADA M. Toward 6G internet of things and the convergence with RoF system[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(11): 8719–8733.
- [2] LIM C, TIAN Y, RANAWEERA C, et al. Evolution of radio-over-fiber technology[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(6): 1647–1656.
- [3] WU B, SUNG J, YAN J, et al. Polarization-insensitive remote access unit for radio-over-fiber mobile fronthaul system by reusing polarization orthogonal light waves[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1–8.
- [4] MA J. Full-duplex radio over fiber link with colorless source-free base station based on single sideband optical mm-wave signal with polarization rotated optical carrier[J]. Optical Fiber Technology, 2016, 30: 163–166.
- [5] WU Z, CAO C, ZENG X, et al. Filterless radio-over-fiber system based on polarization multiplexing to generate an 80 GHz millimeter wave[J]. Applied optics, 2020, 59(24): 7455–7461.
- [6] FAN S, CAO C, ZENG X, et al. A RoF system based on polarization multiplexing and carrier suppression to generate frequency eightfold millimeter-wave[J]. Results in Physics, 2019, 12: 1450–1454.
- [7] XU W, GAO X, ZHAO M, et al. Full duplex radio over fiber system with frequency quadrupled millimeter-wave signal generation based on polarization multiplexing [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 103: 267–271.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] NOR M H M, KANESAN T, MASKURIY F, et al. Experimental demonstration of all-optical PolMux RoF system with multiservice transmission[J]. Optics Communications, 2020, 475: 126293.1–126293.6.
- [11] ZHANG W, WEN A, LI Y, et al. A high spectral efficiency microwave photonic link with optimization of chromatic-dispersion-induced power fading[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 37(4): 1123–1132.
- [12] LIU Y, GAO H, CHEN Y, et al. Full-duplex WDM-RoF system based on OFC with dual frequency microwave signal generation and wavelength reuse[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 58(8): 102252.1–102252.7.
- [13] KONG M, ZHOU W, DING J, et al. Simultaneous generation of wired and wireless signals using a DP-MZM in a RoF system [J]. IEEE photonics technology letters, 2020, 32(15): 905–908.
- [14] HUANG L, HE J, CHEN Y, et al. Simple multi-RAT RoF system with 2×2 MIMO wireless transmission [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(13): 1025–1028.
- [15] LI Y, YANG A, GUO P, et al. Chromatic dispersion estimation based on heterodyne detection for coherent optical communication systems [J]. Optical Engineering, 2018, 57(1): 16105-1–16105-8.
- [16] FATADIN I. Estimation of BER from error vector magnitude for optical coherent systems[J]. Photonics, 2016, 3(2): 21-1–21-6.
- [17] ZHANG H, XU M, JIA Z, et al. Quantum dot coherent comb laser source for converged optical-wireless access networks [J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(3): 1–9.
- [18] ZHAO M, ZHOU W, ZHAO L, et al. A new scheme to generate multi-frequency mm-wave signals based on cascaded phase modulator and I/Q modulator[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(5): 1–8.
- [19] HOANG T M, SOWAILEM M Y S, MORSY-OSMAN M, et al. Transmission of 344 Gb/s 16-QAM using a simplified coherent receiver based on single-ended detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(3): 1–8.
- [20] ZHU Y, YI L, YANG B, et al. Comparative study of cost-effective coherent and direct detection schemes for 100 Gb/s/λ PON [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(9): D36–D47.
- [21] ZHAI W, WEN A, SHAN D. Multidimensional optimization of a radio-over-fiber link [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2021, 69(1): 210–221.
- [22] ZHAI W, WEN A, SHAN D. Linearized photonic microwave and mm-wave mixer with dispersion-induced power fading compensation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(12): 5335–5346.