

基于偏振复用光调制器产生 PDM-16QAM 射频信号

李韦萍^{1,2*}, 孔淼^{1,2}, 余建军^{1,2}

¹复旦大学通信科学与工程系和电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433;

²复旦大学上海先进通信与数据科学研究院, 上海 200433

摘要 提出了一种采用单个光调制器产生频率稳定、偏振复用的矢量毫米波信号新方案。通过将双极化马赫-曾德尔调制(DP-MZM)和偏振复用 16 阶正交幅度调制(PDM-16QAM)相结合, 实现了 PDM-16QAM 信号在系统链路中的有效传输, 传输速率为 64 Gbit/s@28 GHz, 误码率被控制在 4.2×10^{-2} 以内。系统结构简单, 频谱效率高, 传输速率大幅提升, 在未来光载无线通信网络中具有巨大的应用价值。

关键词 光通信; 偏振复用; 双极化马赫-曾德尔调制器; 偏振复用 16 阶正交幅度调制; 光载无线

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2306002

Generation of PDM-16QAM Radio Frequency Signal Based on a Polarization Multiplexing Optical Modulator

Li Weiping^{1,2*}, Kong Miao^{1,2}, Yu Jianjun^{1,2}

¹Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves, Ministry of Education,

Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;

²Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract In this paper, we proposed a new scheme of generating vector millimeter-wave signals with stable frequency and polarization multiplexing by a single optical modulator. We have experimentally demonstrated the delivery of 64 Gbit/s@28 GHz PDM-16QAM signals in the system link with a bit error ratio smaller than 4.2×10^{-2} based on a dual-polarization Mach-Zehnder modulation (DP-MZM) and polarization-division-multiplexing 16-ary quadrature amplitude modulation (PDM-16QAM). In summary, the system has a simple structure, a high spectrum efficiency, and a greatly enhanced transmission rate, which has great application value in the future communication network of radio over fiber.

Key words optical communications; polarization multiplexing; dual-polarization Mach-Zehnder modulator; polarization-division-multiplexing 16-ary quadrature amplitude modulation; radio over fiber

OCIS codes 060.4080; 060.5625; 060.2360

1 引 言

随着云计算、交互式游戏和 4K/8K 超清视频服务等新型应用的飞速发展, 人们对于通信网络带宽和容量的需求近几年快速增长。在此背景下, 光子辅助毫米波产生技术^[1-19]拥有大带宽的优势, 可以克服传统电信号产生方式中电子器件的带宽瓶颈, 同时结合先进矢量调制等技术, 可以有效提高系统的频谱效率和接收机灵敏度, 解决频谱资源不足的问题, 将是未来宽带通信网络中重要的备选技术方案。

光子辅助毫米波常用的产生方案主要有: 外差拍频方案^[11-14]和外部调制器方案^[15-19]。外差拍频方案是将矢量调制信号通过调制器调制到光载波上, 然后与另外一路具有不同频率且未经调制的光波拍频产生毫米波。该方案中虽然产生的信号具有较高的信噪比, 但是系统中用于拍频的独立激光器难以锁频和锁相, 会出现“漂移”现象。与此对比, 外部调制器方案则是利用两个同源光边带拍频而产生频率稳定的矢量毫米波, 并不会受到频率和相位抖动的影响。在文献[15]中, 数据首先通过第一个调制器生成基带信号, 而后利用射频驱动后面的调制

收稿日期: 2020-07-17; 修回日期: 2020-08-11; 录用日期: 2020-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(61527801, 61675048, 61720106015)

* E-mail: lwping@fudan.edu.cn

器产生携带数据的光学边带,这种使用多个调制器级联来产生毫米波的方法虽能产生频率稳定的毫米波,但是系统结构复杂。而在一些利用单个调制器传输矢量信号的系统中^[16-19],如文献[16]所述,利用 6 GHz 的预编码信号驱动马赫-曾德尔调制器(MZM),通过控制 MZM 的直流偏压和射频信号的相位差,实现了载波的抑制调制,并在 80 km 单模光纤中实现了 2 Gbaud PDM-QPSK 信号的传输。通过使用单个调制器,可以实现矢量调制格式为 PDM-QPSK 的信号传输,但是该方案下的数据传输速率和频谱效率却有待进一步提升。

针对上述问题,本文提出了一种采用单个光调制器产生频率稳定、偏振复用的矢量毫米波信号新方案。通过结合光子毫米波生成技术、光偏振复用、副载波复用、无线 2×2 多输入多输出(MIMO)技术以及先进的矢量调制格式和数字信号处理(DSP),搭建基于双极化马赫-曾德尔调制器(DP-MZM)的 PDM-16QAM 光纤-无线融合通信系统,通过实验成功实现 64 Gbit/s@28 GHz PDM-16QAM 信号的有效传输,并将误码率(BER, R_{BE})控制在 4.2×10^{-2} 以内。

2 系统原理

图 1 展示了采用 DP-MZM 产生偏振复用毫米波信号的系统原理。该系统关键器件 DP-MZM 由偏振分束器(PBS)、偏振合束器(PBC)和两个子调制器(MZM1、MZM2)封装集成。首先,在中心站(CO)中激光器(LD)产生频率为 f_c 的连续波,接入 DP-MZM 的光输入端,随后经 PBS 分为两个相互正交的偏振方向(X、Y):X 偏振方向上,频率为 f 的射频矢量信号 1 通过 MZM1 被调制到中心频率为 f_c 的光载波上,控制 MZM1 的直流偏压,使其在正交点偏置,实现带有光载波的双边带调制(ODSB+C),此时信号包括一个中心频率为 f_c 的光载波和两个频率为 $f_c \pm f$ 的已调信号边带;Y 偏振方向上,射频矢量信号 2 与射频矢量信号 1 同频,且 MZM2 的工作情况同上。这样,即可把射频矢量信号 1、2 分别调制到两个相互正交的偏振方向上。简易的光频谱图如图 1 中插图(a)、(b)所示。然后两路已调光信号经 PBC 耦合输出,简易的光频谱图如插图(c)所示。经过一定长度的光纤传输后,进入基站(BS)。

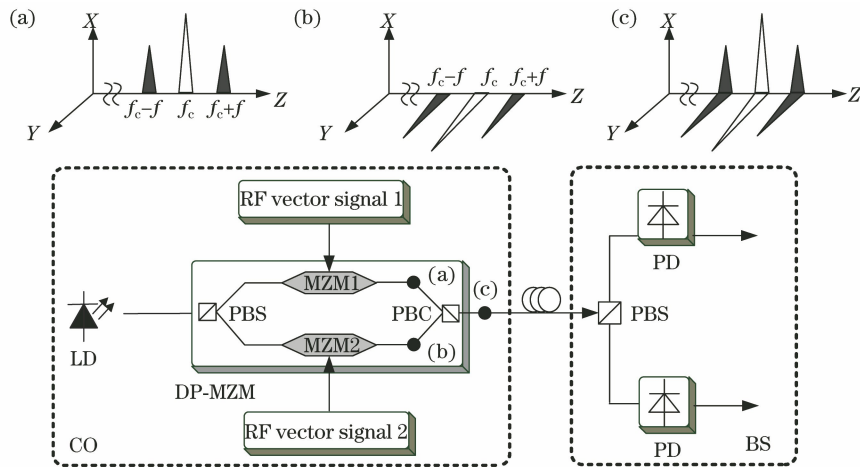


图 1 基于双极化马赫-曾德尔调制器产生偏振复用毫米波信号的产生原理,其中插图(a)-(c)为简化的频谱

Fig. 1 Principle of generation of polarization multiplexing millimeter-wave signal based on a dual-polarization Mach-Zehnder modulator, in which illustrations (a)-(c) are simplified spectra

在 BS 中,PBS 将偏振复用信号进行偏振分集,以获得两个相互正交的偏振分量(X、Y),随后该偏振分量分别进入各自链路中的 PD。携带信息的 $f_c \pm f$ 一阶边带与中心频率为 f_c 的光载波在 PD 中进行拍频生成频率为 f 的电矢量射频信号。

需要注意的是,从 DP-MZM 耦合输出后的偏振复用信号在光纤中的传输会带来一定程度的偏振旋转,而且光信号在 PBS 输入端的偏振态具有任意

性,所以 PBS 的两个输出端其实是将 X 和 Y 偏振方向上的数据信号混合,但为了方便表述,在本研究分别用 X 偏振分量以及 Y 偏振分量来定义 PBS 的两个输出端。

在光传输系统中,人们对先进的矢量调制格式进行了广泛的研究,而单个符号能携带 4 bit 信息的 16QAM 作为一种联合幅度和相位的调制格式,受到了越来越多的关注。在下一部分的实验中,本研

究采用 16QAM 高阶调制格式,并结合副载波复用、无线 2×2 MIMO 技术以及先进的 DSP 算法,搭建基于 DP-MZM 的 PDM-16QAM 光纤-无线融合通信系统,以进一步提高系统的频谱利用率和器件带宽效率。

3 实验装置及结果

图 2 展示了 PDM-16QAM 射频矢量信号光纤-无线融合传输实验系统装置。实验装置的关键器件参数如表 1 所示。

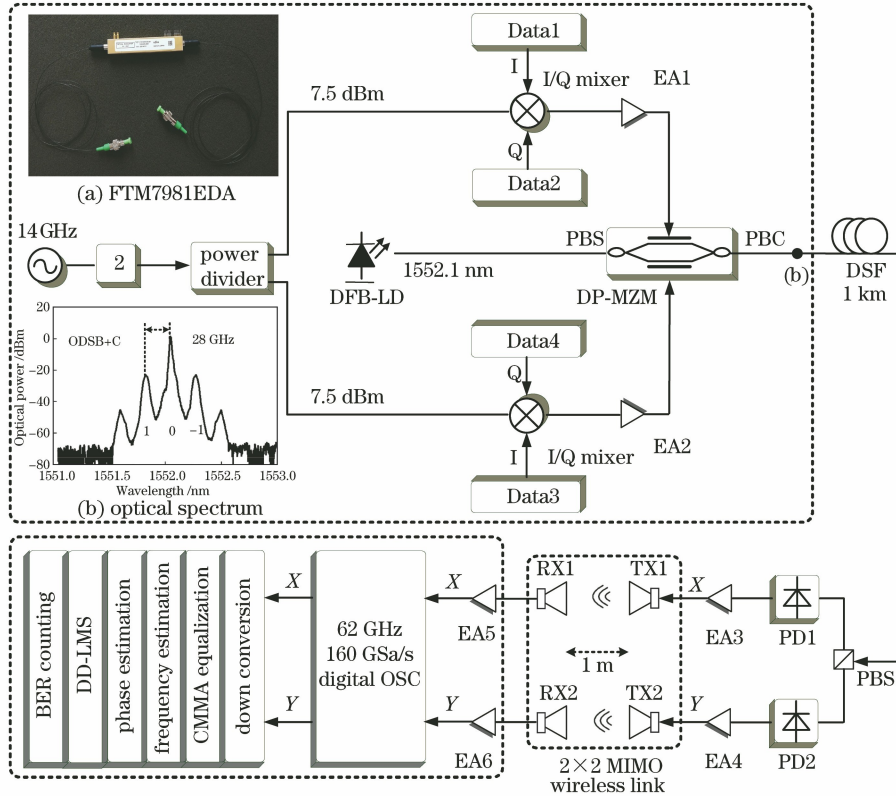


图 2 PDM-16QAM 射频矢量信号光纤-无线融合传输实验系统装置,其中插图(a)为 FTM7981EDA,(b)为光谱图
Fig. 2 Experimental setup for fiber-wireless integration transmission of PDM-16QAM vector RF signal, in which illustrations (a) and (b) are FTM7981EDA and optical spectrum, respectively

表 1 实验装置关键器件参数表

Table 1 List of key device parameters in the experimental setup

Device	Parameter	Device	Parameter
DFB-LD	Wavelength: 1552.1 nm	PD1, PD2	3 dB bandwidth: 75 GHz
FTM7981EDA	3 dB bandwidth: 30 GHz Insertion loss: 6 dB	EA1, EA2	DC~40 GHz Gain: 20 dB
LO	Output frequency: 14 GHz	EA3, EA4	DC~50 GHz Gain: 30 dB
I/Q mixer	Operated at 24~37 GHz, Insertion loss: 9 dB	EA5, EA6	DC~60 GHz Gain: 30 dB
AWG	Pattern length: $2^{10} - 1$ Amplitude: 1 V _{pp}	Horn antenna	Gain: 25 dBi Operated at: 26.5~40.0 GHz
DSF	Dispersion: $1 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ @ 1552 nm Insertion loss: 1 dB	OSC	3 dB bandwidth: 62 GHz Sampling rate: 160 GSa/s

将分布反馈式布拉格半导体激光器(DFB-LD)产生的波长为 1552.1 nm 的连续波输入至 DP-MZM(FTM7981EDA)进行调制。该调制器的 3 dB

带宽为 30 GHz,插入损耗为 6 dB,实物如图 2 中插图(a)所示。在射频信号发送端:首先,本地振荡器(LO)产生频率为 14 GHz 的正弦波,经倍频器($\times 2$)

输出 28 GHz 的正弦波,随后该正弦波被功分器分为两路功率均为 7.5 dBm 的信号后,进入各自链路中的 I/Q 混频器。以其中一条链路为例,利用任意波形发生器(AWG)生成长度为 $2^{10} - 1$ 、幅值为 $1 V_{pp}$ 的四阶脉冲幅度调制(PAM4)信号,分为同相和正交两路(I、Q)进入 I/Q 混频器中与 28 GHz 的正弦波发生混频,从而产生 16QAM 信号,并将其调制到副载波上。副载波信号经过增益为 20 dB、工作在直流 40 GHz 的电放大器 EA1 后驱动 MZM1,设置 MZM1 偏置点位于正交点,工作调制格式为 ODSB+C,最终将 16QAM 信号加载到一阶边带上。另外一条链路的工作情况同上。PBC 耦合输出后的信号即为 PDM-16QAM 信号,光谱如图 2 中插图(b)所示(对应的数据速率为 6 Gbaud),从光谱图中可以看到,信号在 ODSB+C 调制格式下,中心载波和两个一阶边带都被保留,并且 ± 1 阶边带的功率大小一样,两者与中心载波的频率间隔都为 28 GHz。DP-MZM 输出的信号经背靠背(BTB)或 1 km 色散位移光纤(DSF)传输后进入 PBS。PBS 将偏振复用的光信号分为正交的 X、Y 两路,分别进入 PD 中完成光电转换,得到电矢量射频信号。为了确保接收端收到的信号功率足够大,两路电矢量射频信号分别经过增益为 30 dB、工作在直流 50 GHz 的电放大器 EA3 和 EA4 进行放大,最后同时被送入后续的 2×2 MIMO 无线链路中传输。

本实验中的 2×2 MIMO 无线链路是由两对同极化状态(水平极化或垂直极化)的喇叭天线(TX1、RX1 和 TX2、RX2)组成。喇叭天线的频率工作范

围为 26.5~40.0 GHz,增益为 25 dBi,将 X 偏振方向和 Y 偏振方向中的无线链路设置为并行结构,并将发射天线到接收天线之间的无线传输距离调整为 1 m。

在接收端,同极化的喇叭接收天线(RX1、RX2)用于同时接收来自发射天线(TX1、TX2)的 X、Y 偏振分量,随后信号经过增益为 30 dB、工作在直流 60 GHz 的电放大器 EA5 和 EA6 放大后被一个 3 dB 带宽为 62 GHz、采样率为 160 GSa/s 的示波器(OSC)捕获,从模拟域转化为数字域,最后离散数字信号进入离线 DSP 模块,以恢复出原始的数据信号。

离线 DSP 模块的主要流程为:下变频、级联多模算法(CMMA)均衡^[20]、频偏估计、相位估计、判决反馈-最小均方误差算法(DD-LMS)均衡^[21]和 BER 计算。其中,CMMA 模块和 DD-LMS 模块采用 2×2 多输入多输出(MIMO)结构,抽头数分别设置为 25 和 155。在偏振敏感的系统,通常需要利用偏振追踪子系统来解偏振复用^[22],因为本系统发射端产生的是幅值不唯一的方形 16QAM,故在 DSP 模块中利用 CMMA 来代替偏振追踪子系统,以实现 PDM-16QAM 信号的偏振解复用、调制信号的多模恢复和两对喇叭天线间多径效应的抑制^[23],简化了实验结构。图 3(a)~(d)分别给出了在基于 DP-MZM 的光纤-无线融合传输系统中 6 Gbaud PDM-16QAM 信号经 BTB 和 1 m 2×2 MIMO 无线链路传输时,在接收端经过下变频后、CMMA 均衡后、频偏估计后和相偏估计后的 X 偏振方向上的星座图,而图 3(e)~(h)给出了对应的 Y 偏振方向上的星座图。

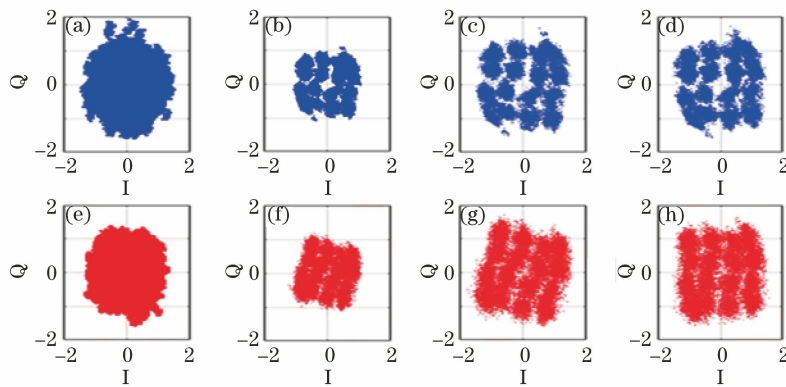


图 3 接收到的 6 Gbaud PDM-16QAM 星座图。X 偏振:(a)下变频后;(b) CMMA 均衡后;(c)频偏估计后;

(d)相偏估计后。Y 偏振:(e)下变频后;(f) CMMA 均衡后;(g)频偏估计后;(h)相偏估计后

Fig. 3 Received PDM-16QAM constellations at the baud rate of 6 Gbaud. X-polarization: (a) After down conversion; (b) after CMMA equalization; (c) after frequency-offset estimation; (d) after carrier phase estimation. Y-polarization: (e) after down conversion; (f) after CMMA equalization; (g) after frequency-offset estimation; (h) after carrier phase estimation

图 4 显示了 4 种不同情况下, 6 Gbaud PDM-16QAM 信号 BER 与 PD 输入功率的关系曲线。方框表示 PDM-16QAM 信号经过 BTB 和 1 m 无线链路传输, X 方向上解得的 BER; 下三角表示 PDM-16QAM 信号经过 BTB 和 1 m 无线链路传输, Y 方向上解得的 BER; 圆点表示 PDM-16QAM 信号经过 BTB 和 1 m 无线链路传输, X、Y 方向上解得 BER 的算术平均值; 上三角表示 PDM-16QAM 信号依次经过 1 km DSF 和 1 m 无线链路传输后, X、Y 方向上解得 BER 的算术平均值。其中, PDM-16QAM 信号的波特率为 6 Gbaud 时, 对应的信息速率为 48 Gbit/s。由图 4 可以看出, 当 PD 输入功率高于 -8 dBm 时, 48 Gbit/s @ 28 GHz PDM-16QAM 信号经过 BTB 和 1 m 无线链路传输后, BER 仍可低于 4.2×10^{-2} , 并且 1 km DSF 的加入几乎并未引入任何功率代价。这是因为系统中的入纤光功率相对较小, 光纤的传输距离也很短, 故可以忽略光纤传输的非线性效应, 而光纤传输中诸如偏振模色散等线性效应均可被 DSF 和接线端的离线 DSP 模块很好地补偿。图 5(a) 显示了当 PD 的入射功率为 -12 dBm, 无线传输 1 m, 捕获的 28 GHz 矢量射频信号的频谱, 图 5(b)、(c) 分别给出了相同情况下信号经 DD-LMS 均衡后, 在 X、Y 方向上解调出的信号星座图。

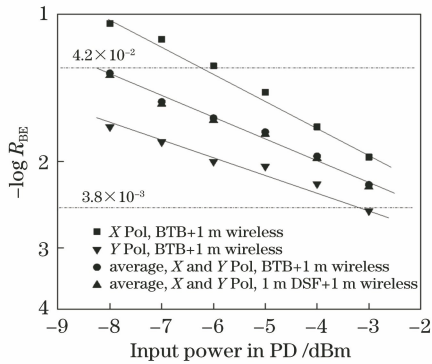


图 4 6 Gbaud PDM-16QAM 信号 BER 与 PD 输入功率的关系曲线

Fig. 4 BER of 6 Gbaud PDM-16QAM signal at different input powers into PD

图 6 显示了 PD 输入功率为 -5 dBm 时, PDM-16QAM 矢量射频信号 BER 与波特率的关系曲线。接着, 在发射端通过设置 AWG 产生的 PAM4 信号的波特率, 观察接收端 DSP 模块的 BER 变化情况, 即从 3 Gbaud 开始, 以 1 Gbaud 间隔依次改变信号波特率。由于信号波特率的提高, 对系统光信噪比和 DP-MZM、EA 等光电器件的带宽提出了更高的

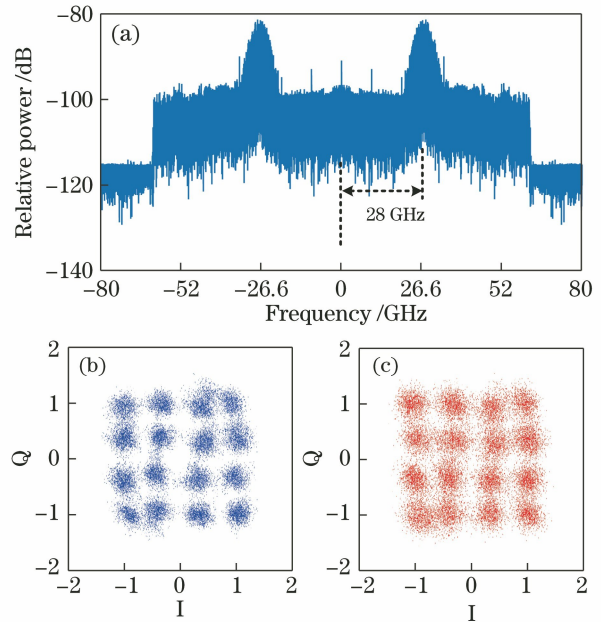


图 5 频谱及星座图。(a) 28 GHz 矢量射频信号的频谱; (b) DD-LMS 均衡后, 在 X 方向上解调出的信号星座图; (c) DD-LMS 均衡后, 在 Y 方向上解调出的信号星座图

Fig. 5 Frequency spectrum and constellations. (a) Frequency spectrum of 28 GHz vector RF signal; (b) demodulated constellation in X-polarization after DD-LMS equalization; (c) demodulated constellation in Y-polarization after DD-LMS equalization

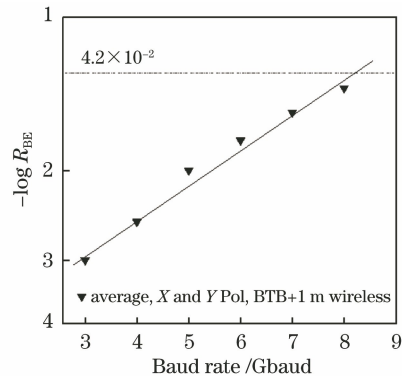


图 6 PDM-16QAM 信号 BER 与波特率的关系曲线

要求, 受此限制, 系统 BER 性能随着信号波特率的提高而恶化。尽管如此, 本研究依然实现了波特率为 8 Gbaud, 总传输速率为 64 Gbit/s 的 PDM-16QAM 信号在 1 m 无线链路上的传输, 并将系统的最大 BER 控制在 4.2×10^{-2} 以内。图 7 显示了 PD 的输入功率为 -5 dBm 时, 6 Gbaud PDM-16QAM 矢量射频信号 BER 与 DD-LMS 抽头数的关系曲线。从图中可以看到: 在 3~133 范围内调整

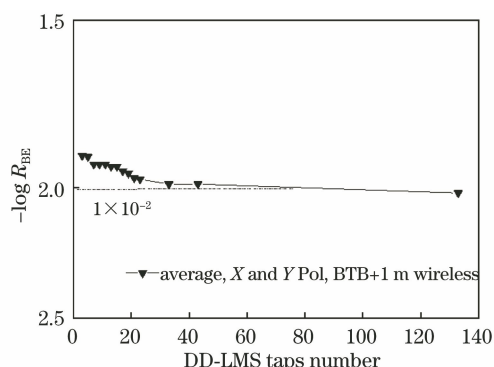


图7 PDM-16QAM信号BER与DD-LMS抽头数的关系曲线

Fig. 7 BER of PDM-16QAM signal versus DD-LMS taps number

DD-LMS抽头数,随着抽头数的增加,BER呈现下降趋势,并且当抽头数为133时,此时解得的BER接近 1×10^{-2} 。

4 结 论

在光载无线通信网络中实现结构简单、高谱效率的毫米波系统是十分重要的。本研究通过实验证明在光纤无线系统中仅使用偏振复用光调制器可以生成频率稳定、偏振复用的矢量毫米波信号。结合多种先进技术,创新性地基于DP-MZM的光纤-无线融合链路,使用PDM-16QAM信号调制技术,在BTB和1 m 2×2 MIMO无线链路中实现了信号的有效传输,并且证明1 km DSF光纤的加入,几乎没有引入任何功率代价。通过改变信号波特率,实现了最大速率为64 Gbit/s的PDM-16QAM信号在1 m无线链路上的传输,最大误码率控制在 4.2×10^{-2} 以内。

参 考 文 献

- [1] Liu A L, Yin H X, Wu B, et al. Phase-shift characteristics of radio frequency signals for radio over fiber transmission systems [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0506003.
刘安良, 殷洪玺, 吴宾, 等. 光载无线通信系统射频信号相移特性研究 [J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0506003.
- [2] Guo J C, Lu L, Wu C X, et al. Time delay measurement scheme for radio-over-fiber link based on time-frequency signal subcarrier modulation [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1206005.
郭俊成, 卢麟, 吴传信, 等. 基于时频信号副载波调制的光载无线通信链路时延测量方案 [J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1206005.
- [3] Li W P, Kong M, Shi J T, et al. Multiple radio frequency operation based on a modulator for ROF system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 37(11): 1106002.
李韦萍, 孔森, 石俊婷, 等. ROF系统中基于单个调制器的多射频操作 [J]. 中国激光, 2020, 37(11): 1106002.
- [4] Li W P, Kong M, Shi J T, et al. Generation of multiple path wireless and wireline signals based on a single optical modulator [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(19): 1906001.
李韦萍, 孔森, 石俊婷, 等. 基于单个光调制器产生多路无线和有线信号 [J]. 光学学报, 2020, 40(19): 1906001.
- [5] Hu Z Y, Qiu Y, Li W T, et al. Experimental demonstration of direct re-modulation for an IM/DD OFDM-WDM-PON with symmetrical bi-directional transmission [J]. Optics Communications, 2020, 460: 125123.
- [6] Xiang Y, Chen C, Zhang C F, et al. Wired/wireless access integrated RoF-PON with scalable generation of multi-frequency MMWs enabled by polarization multiplexed FWM in SOA [J]. Optics Express, 2013, 21(1): 1218-1225.
- [7] Chen L, Shao Y F, Lei X Y, et al. A novel radio-over-fiber system with wavelength reuse for upstream data connection [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(6): 387-389.
- [8] Chen D Y, Sun W M, Qin S C, et al. A fully integrated CMOS limiter and RSSI circuits for modem optical communications [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2007, 18(2): 167-170, 174.
陈殿玉, 孙伟明, 秦世才, 等. 现代光通讯中的全集成 CMOS 限幅器及场强指示电路 [J]. 光电子·激光, 2007, 18(2): 167-170, 174.
- [9] Li X Y, Yu J J, Zhao L, et al. 1-Tb/s photonics-aided vector millimeter-wave signal wireless delivery at D-band [C] // 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018: 1-3.
- [10] Wang Y Y, Yang C, Chi N, et al. Photonic frequency-quadrupling and balanced pre-coding technologies for W-band QPSK vector mm-wave signal generation based on a single DML [J]. Optics Communications, 2016, 367: 239-243.
- [11] Li X, Yu J, Zhang J, et al. A 400G optical wireless integration delivery system [J]. Optics Express, 2013, 21(16): 18812-18819.
- [12] Li X Y, Xu Y M, Yu J J. Over 100-Gb/s V-band single-carrier PDM-64QAM fiber-wireless-integration system [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(5): 1-7.

- [13] Li X Y, Yu J J. Generation and heterodyne detection of >100 -Gb/s Q-band PDM-64QAM mm-wave signal [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(1): 27-30.
- [14] Li X Y, Yu J J. Photonics-aided 32-Gb/s wireless signal transmission over 1 km at K-band [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(13): 1120-1123.
- [15] Yu J J, Jia Z S, Yi L, et al. Optical millimeter-wave generation or up-conversion using external modulators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(1): 265-267.
- [16] Li X Y, Yu J J, Xiao J N, et al. PDM-QPSK vector signal generation by MZM-based optical carrier suppression and direct detection[J]. Optics Communications, 2015, 355: 538-542.
- [17] Li X, Xu Y, Yu J. Single-sideband W-band photonic vector millimeter-wave signal generation by one single I/Q modulator [J]. Optics Letters, 2016, 41(18): 4162-4165.
- [18] Li X Y, Xu Y M, Xiao J N, et al. W-band millimeter-wave vector signal generation based on precoding-assisted random photonic frequency tripling scheme enabled by phase modulator[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(2): 1-10.
- [19] Li X, Yu J. 2×2 multiple-input multiple-output optical-wireless integration system based on optical independent-sideband modulation enabled by an in-phase/quadrature modulator[J]. Optics Letters, 2016, 41(13): 3138-3141.
- [20] Zhou X, Yu J J. Multi-level, multi-dimensional coding for high-speed and high-spectral-efficiency optical transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(16): 3641-3653.
- [21] Winzer P J. High-spectral-efficiency optical modulation formats[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(24): 3824-3835.
- [22] Li X, Dong Z, Yu J, et al. Fiber-wireless transmission system of 108 Gb/s data over 80 km fiber and 2×2 multiple-input multiple-output wireless links at 100 GHz W-band frequency[J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5106-5108.
- [23] Li X Y, Dong Z, Yu J J, et al. Performance improvement by pre-equalization in W-band (75–110 GHz) RoF system[C]//Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013, Anaheim, California. Washington, D.C.: OSA, 2013: OW1D.3.