

DOI:10.16136/j.joel.2022.12.0153

基于偏振复用的单边带光生毫米波传输系统的研究

马紫健, 赵 峰*, 田晷瑶, 孟 昭, 杨雄伟, 赵林仙

(西安邮电大学 电子工程学院, 陕西 西安 710121)

摘要:光子辅助的毫米波通信因其超带宽优势在下一代宽带无线接入网中有着广泛的应用前景, 本文基于单个激光源和一个双极化马赫-曾德尔调制器(dual-polarization Mach-Zehnder modulator, DP-MZM)的光路结构产生了频率稳定的偏振复用毫米波信号, 联合 VPI 与 MATLAB 仿真环境对单边带(single sideband, SSB)偏振复用四相相移键控(polarization-division-multiplexing, PDM) quadrature phase shift keying, QPSK、16 阶正交幅度调制(16-ary quadrature amplitude modulation, 16QAM)和 32 阶正交幅度调制(32-ary quadrature amplitude modulation, 32QAM)信号分别实现了 70 km、65 km 与 50 km 的有效传输, 并结合概率整形(probability shaping, PS)技术在 28 GHz 波段上, 以相同净比特传输速率对比分析了均匀 16QAM 与 PS-16QAM、均匀 32QAM 与 PS-32QAM 的 SSB 矢量毫米波(millimeter wave, MMW)信号在光纤传输条件下的误码率(bit error rate, BER)性能。仿真结果表明:在相同净比特速率, 以硬判决阈值 3.8×10^{-3} 为判断条件, 在普通单模光纤(single-mode fiber, SMF)传输系统中, PS-16QAM/32QAM 信号光功率约有 0.3 dBm 的提升, 非线性光纤(nonlinear fiber NLF)传输系统中, PS-16QAM 信号光功率约有 0.8 dBm 的提升, PS-32QAM 信号光功率约有 0.5 dBm 的提升, 结果表明:经过 PS 后的 MMW 信号光纤传输性能有明显改善。

关键词:双极化马赫-曾德尔调制器(DP-MZM); 单边带(SSB)偏振复用(PDM); 四相相移键控(QPSK); 正交幅度调制(QAM); 概率整形(PS)

中图分类号:O436 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2022)12-1329-09

Research on single-sideband optical millimeter-wave transmission system based on polarization multiplexing

MA Zijian, ZHAO Feng*, TIAN Bingyao, MENG Zhao, YANG Xiongwei, ZHAO Linxian

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China)

Abstract: Photonic assisted millimeter-wave communication has a wide application prospect in the next generation broadband wireless access network due to its super-bandwidth advantage. In this paper, polarization multiplexed millimeter-wave signals with stable frequency are generated based on the optical path structure of a single laser source and a dual-polarization Mach-Zehnder modulator (DP-MZM). Combined with VPI and MATLAB simulation environment, the effective transmission of single sideband (SSB) polarization-division-multiplexing (PDM) quadrature phase shift keying (QPSK), 16-ary quadrature amplitude modulation (16QAM) and 32-ary quadrature amplitude modulation (32QAM) signals is achieved at 70 km, 65 km and 50 km, respectively. The bit error rate (BER) performance of uniform 16QAM and probability shaping (PS) 16QAM, uniform 32QAM and PS-32QAM vector millimeter wave (MMW) signals in optical fiber transmission is compared and analyzed with the same net bit transmission rate. The simulation results show that at the same net bit rate, the optical power of PS-16QAM/32QAM signal in the common single-mode fiber (SMF) transmission system is about 0.3 dBm with the

* E-mail: hfengzhao@xupt.edu.cn

收稿日期: 2022-03-25 修订日期: 2022-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(61875164)和陕西省创新能力支撑计划(2021TD-09)资助项目

hard-decision threshold 3.8×10^{-3} . In nonlinear fiber (NLF) transmission system, the optical power of PS-16QAM signal is increased by 0.8 dBm, and the optical power of PS-32QAM signal is increased by 0.5 dBm. The results show that the transmission performance of MMW signal is improved obviously after PS.

Key words: dual-polarized Mach-Zehnder modulator (DP-MZM); single sideband (SSB) polarization-division-multiplexing (PDM); quadrature phase shift keying (QPSK); quadrature amplitude modulation (QAM); probability shaping (PS)

1 引言

近年来,云计算、大数据和元宇宙等现代互联网技术的兴起,这些技术对于通信容量的需求日益增长。光子辅助毫米波(millimeter wave, MMW)产生技术因其超带宽的优势已经成为未来宽带无线通信的重要备选技术^[1-5]。配合搭载新型矢量调制技术可高效地提升系统的频谱效率,缓解现有频谱资源使用紧张的困难。光子辅助MMW生成技术主流方案有外差拍频方案^[6,7]和外部调制器方案^[8,9]。外差拍频方案需要有两路相互独立的光信号,对其中一路进行调制,另一路不经调制直接送入光电二极管中,根据平方律特性原理,两路光信号会相互拍频产生电矢量MMW信号,其生成信号频率即为两路光信号频率之间的差。该方案系统结构简单,但系统中两个独立的激光器难以同频,产生的MMW信号频率不稳定。外部调制器方案采用不受频率和相位抖动影响的两个同源光边带拍频来产生频率稳定的矢量MMW。然而,此方案通常使用级联调制器产生MMW,系统结构不仅复杂而且光电转换器件的物理特性使其本身存在带宽限制,光纤色散和非线性效应等因素也会使得信号失真,降低系统传输性能,并且伴随着传输速率的不断提高,这种方案的缺陷会更加明显。

2020年,李韦萍等^[10]针对此问题提出了一种采用单个光调制器的光学对称双边带(double-sideband, DSB)调制方案,实现了偏振复用16阶正交幅度调制(polarization-division-multiplexing 16-ary quadrature amplitude modulation, PDM-16QAM)信号在28 GHz频段上的有效传输。本文在此基础上采用双极化马赫-曾德尔调制器(dual-polarization Mach-Zehnder modulator, DP-MZM)产生偏振复用MMW信号,通过控制调制器的直流偏置电压和射频信号的相位差,实现矢量调制格式为偏振复用四相相移键控(polarization-division-multiplexing quadrature phase shift keying, PDM-QPSK)、16QAM和32阶正交幅度调制(32-ary quadrature amplitude modulation, 32QAM)带

有光载波的单边带(single sideband, SSB)调制信号传输,与文献[10]不同的是本实验采用SSB调制与直接解偏振复用的方式极大地增加了系统的传输距离,SSB调制可有效减弱光纤色散带来的走离效应^[11]。并结合概率整形(probability shaping, PS)技术完成了整形前后正交幅度调制(quadrature amplitude modulation, QAM)信号的对比研究,优化了系统传输方案。将PS技术应用于多电平QAM格式作为一种提高光纤通信系统容量和灵活性的解决方案得到了广泛的研究^[12-14],经过PS的信号可有效提升在光纤传输中的抗非线性性能,延长传输距离和增加系统传输容量,系统采用一个调制器和一个光载波即可将一路射频信号加载到同频率不同偏振态的光副载波上。系统中使用偏振恢复器来直解偏振复用,总体结构简单,使用的电光器件少,有效降低了成本,将在未来光纤无线接入网中有着巨大的商用价值,整个实验研究过程均在VPI与MATLAB仿真环境下进行。

2 原理分析

2.1 PS原理

PS技术是用一种用先进算法来提升传输容量和传输距离的信号整形技术。其核心思想是在不改变原有星座点间隔的情况下,让能量低的符号比能量高的符号出现的次数更多,使低能量星座点出现概率更大,赋予星座点新的概率分布。外圈在低信噪比环境中误码率较高,使用PS技术能够减小外圈误码性能差的星座点发生概率,增加内圈误码性能好的星座点发生概率。此外,在总传输容量不变的情况下,能够有效降低平均发射功率,可以使系统容量接近香农极限,提高系统抗非线性性能改善误码性能。

麦克斯韦-波尔兹曼(Maxwell-Boltzmann, M-B)分布^[15]为PS技术常用的概率分布,公式如下:

$$P_X(x_i) = \frac{\exp(-v |x_i|^2)}{\sum_{k=1}^M \exp(-v |x_k|^2)}, \quad (1)$$

式中, M 表示不同幅值星座点个数, X 表示复平面星座图上点的坐标, v 是M-B分布的整形因子,决定着

整个星座图的概率分布,一般来说 v 越大,则整形效果越明显, v 的取值范围在0—1之间,通过PS的高阶QAM信号符号熵会显著降低。本文实验使用 $v=0.12054$ 的整形因子对16QAM进行PS, $v=0.04812$ 的整形因子对32QAM进行PS,此时PS-16QAM与PS-32QAM的符号熵分别为3.7 bit/symbol与4.8 bit/symbol。

2.2 偏振复用SSB矢量波生成

图1为基于DP-MZM经SSB调制产生偏振复用矢量MMW信号的系统原理图。DP-MZM由一个偏振分束器(polarization beam splitter, PBS)、两个子调制器(intensity modulator, IM)和一个偏振合束器(polarization beam coupler, PBC)封装集成。首先,激光器产生频率为 f_c 的连续波入射进DP-MZM,经PBS将光信号分成X偏振方向与Y偏振方向上两路相互正交的偏振光信号,两路光信号分别作用于两个均工作在SSB调制模式下的子调制器IM1与IM2,IM1将频率为 f_s 的射频信号RF1调制到中心频率为 f_c 的光载波上,通过调控直流偏置和

驱动IM1上下臂矢量信号的相位差,使得IM1在正交点偏置且工作在抑制下边带调制模式,此时信号包括一个中心频率为 f_c 的光载波和一个频率为 $f_c + f_s$ 的已调信号,如图1(a)所示。IM2将频率为 f_s 的射频矢量信号RF2调制到中心频率为 f_c 的光载波上,通过控制直流偏置和驱动IM2上下臂矢量信号的相位差,使得IM2在正交点偏置且工作在抑制上边带调制模式,然后两路已调信号经过PBC耦合输出,输出信号包含一个中心频率为 f_c 的光载波和一个X、Y偏振方向频率分别为 $f_c + f_s$ 与 $f_c - f_s$ 的已调信号如图1(b)所示。在经过光纤传输后,通过一个偏振分束器,获得两路相互正交的偏振信号,并各自进行拍频,生成如图1(c)与(d)所示的两路电矢量射频信号。

此MMW传输系统生成的偏振复用SSB QAM信号的原理推导如下:

外腔激光器(external cavity laser, ECL)生成中心频率为 f_c ,振幅为 E_0 的连续光波,则电场强度为:

$$E_{in}(t) = E_0 \exp(j2\pi f_c t). \quad (2)$$

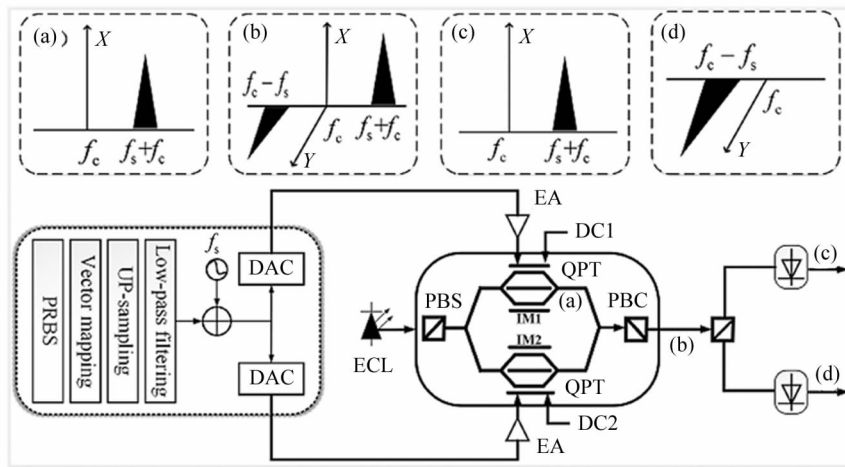


图1 基于DP-MZM产生偏振复用矢量MMW信号原理图:(a)—(d)简化频谱图

Fig. 1 Principle of generation of polarization multiplexing vector MMW signal based on a DP-MZM, where (a)—(d) are the simplified spectra

在基带调制阶段,将一定长度的伪随机二进制序列(pseudo random binary sequence, PRBS)作为要发送的信息,然后进行矢量调制,经过低通滤波器滤波后,产生频率为 f_s 的基带SSB QAM信号,随后将QAM信号的I、Q两路分别用于驱动子调制器IM1与IM2。驱动射频矢量信号可以表示为:

$$V_s(t) = V_{RF} \cos(2\pi f_s t + \varphi), \quad (3)$$

式中, V_{RF} 为IM的射频驱动电压,IM的两个Y型分支,具有3 dB理想特性,忽略器件的插入损耗,则IM输出的光场为:

$$E_{out}(t) = \frac{1}{2} E_{in} [\exp(j\pi(V_{dc1} + V_{s1}(t))/V_\pi) + \exp(j\pi(V_{dc2} + V_{s2}(t))/V_\pi)], \quad (4)$$

式中, V_{dc1} 和 V_{dc2} 分别为IM两臂直流偏置电压, $V_{s1}(t)$ 与 $V_{s2}(t)$ 为IM两臂射频驱动信号, V_π 为半波电压。

$$\text{令 } \phi_1 = \pi V_{dc1}/V_\pi, \phi_2 = \pi V_{dc2}/V_\pi, \beta = \pi V_{RF}/V_\pi,$$

$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ 时,有:

$$E_{out}(t) =$$

$$\frac{1}{2}E_{\text{in}}[\exp(j\phi_2)[\exp(\Delta\phi + j\beta\sin(2\pi f_s t + \phi_1)) + \exp(j\beta\sin(2\pi f_s t + \phi_2))]. \quad (5)$$

系统中 IM1 与 IM2 皆工作在正交点偏置点上实现 SSB 调制模式。其中 IM1 为上边带调制模式, IM2 为下边带调制模式。当 IM1 工作在上边带调制模式时,有 $V_{\text{dc1}} - V_{\text{dc2}} = V_{\pi}/2$, 即 $\Delta\phi = \pi/2$, 上下臂信号的相位差 $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = -\pi/2$, IM1 的输出为:

$$E_{\text{Xout}}(t) = \frac{1}{2}E_{\text{in}}\exp(j\phi_2)\left[\exp\left(\frac{\pi}{2} + j\beta\sin(2\pi f_s t)\right) + \exp\left(j\beta\sin\left(2\pi f_s t + \frac{\pi}{2}\right)\right)\right]. \quad (6)$$

当光载波以 45° 角入射 DP-MZM, 且在小信号调制状态下, 即 $\beta \ll 1$, 将上式第一类贝塞尔函数展开为:

$$E_{\text{Xout}}(t) = \frac{\sqrt{2}}{4}E_{\text{in}}\exp(j\phi_2)[(J_0(\beta) + jJ_1(\beta))\exp(j2\pi f_c t) + 2jJ_1(\beta)\exp(j2\pi(f_c + f_s)t)]. \quad (7)$$

当 IM2 工作在下边带调制模式时, 有 $V_{\text{dc1}} - V_{\text{dc2}} = V_{\pi}/2$, 即 $\Delta\phi = \pi/2$, 上下臂信号的相位差 $\Delta\varphi = \pi/2$, IM2 的输出为:

$$E_{\text{Yout}}(t) = \frac{1}{2}E_{\text{in}}\exp(j\phi_2)\left[\exp\left(\frac{\pi}{2} + j\beta\sin(2\pi f_s t)\right) + \exp\left(j\beta\sin\left(2\pi f_s t - \frac{\pi}{2}\right)\right)\right] = \frac{\sqrt{2}}{4}E_0\exp(j\phi_2)[(J_0(\beta) + jJ_1(\beta))\exp(j2\pi f_c t) - 2jJ_1(\beta)\exp(j2\pi(f_c - f_s)t)], \quad (8)$$

两路调制后的光信号经过 PBC 耦合输出为:

$$E_{\text{out}}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2}E_0\exp(j\phi_2)[(J_0(\beta) + jJ_1(\beta))\exp(j2\pi f_c t) + jJ_1(\beta)\exp(j2\pi(f_c + f_s)t) - jJ_1(\beta)\exp(j2\pi(f_c - f_s)t)]. \quad (9)$$

根据 PD 的平方检测定律 $i_{\text{PD}}(t) = RE_{\text{out}}(t)E_{\text{out}}^*(t)$, 式中, R 为 PD 的响应度。当信号经偏振分集后, X 偏振方向上频率为 f_c 和 f_s 的两束光载波经 PD 拍频后输出电流可表示为:

$$I_{\text{XPD}}(t) = \frac{1}{4}RE_0^2\exp(j2\phi_2) \cdot$$

$$[(J_0(\beta) + jJ_1(\beta))^2 + 2jJ_1(\beta) + 2jJ_1(\beta)(J_0(\beta) + jJ_1(\beta))\exp(j2\pi f_s t) + 2jJ_1(\beta)(J_0(\beta) + jJ_1(\beta))\exp(-j2\pi f_s t)], \quad (10)$$

Y 偏振方向上频率为 f_c 和 $-f_s$ 的两束光载波经 PD 拍频后输出电流可表示为:

$$I_{\text{YPD}}(t) = \frac{1}{4}RE_0^2\exp(j2\phi_2) \cdot [(J_0(\beta) + jJ_1(\beta))^2 + 2jJ_1(\beta) - 2jJ_1(\beta)(J_0(\beta) + jJ_1(\beta))\exp(j2\pi f_s t) - 2jJ_1(\beta)(J_0(\beta) + jJ_1(\beta))\exp(-j2\pi f_s t)]. \quad (11)$$

3 仿真分析

3.1 系统仿真

图 2 给出了基于 DP-MZM 的矢量 MMW 信号产生与光纤传输仿真系统。本实验利用 MATLAB 与 VPI 仿真系统进行联合仿真对所搭建的光纤传输系统进行性能研究, 数模转换器 (digital-to-analog converter, DAC) 之前的基带射频生成部分与离线数字信号处理部分 (digital signal processing, DSP) 均由 MATLAB 编程实现, 实验选取四相相移键控 (quadrature phase shift keying, QPSK)、16QAM、PS-16QAM、32QAM 和 PS-32QAM 作为基带传输信号, 得到 X 偏振态与 Y 偏振态中心载波分别为 28 GHz 和 -28 GHz 的信号。基带信号经过 DAC 后由射频矢量信号转变为模拟电压信号, 接着由电放大器 (power amplifier, EA) 放大驱动调制器 IM1 与 IM2, 半导体激光器以 45° 角发射频率为 193.1×10^{12} 、光功率为 10 dBm 的连续相干光, 经过 PBS 后分为相互正交的 X 偏振方向和 Y 偏振方向的光载波, 实验选取的 IM1 与 IM2 均为差分马赫-曾德尔调制器 (Mach-Zehnder modulator, MZM), 其插入损耗和消光比设置相同分别为 3.3 dB 和 30 dB, 半波电压设置为 4 V, 两者的 DC 偏置电压均工作在正交偏置点, IM1 为上边带调制模式, IM2 为下边带调制模式, 表 1 为仿真系统中主要器件的参数设置。调制后两个偏振方向上的 SSB 信号经 PBC 耦合输出。为了补偿因在光纤传输过程中所造成的功率损耗, 使用了一个掺铒光纤放大器 (erbium doped fiber amplifier, EDFA) 用来放大光纤传输后的光功率。经过调制器耦合输出后的偏振复用信号在光纤中传输后会带来一定程度的偏振旋转, 因而还需要通过一个偏振恢复器自动调整偏振态接近参考偏振态, 抵消连续输入的偏振态变化, 然后由 PBC 解偏振分离出两个不同偏振态的 SSB 光信号。两个光学边带

信号分别经过响应度为 0.4 A/W 的 PD 拍频,得到 28 GHz 电矢量 MMW 信号。最后,由 MATLAB 完成离线 DSP 处理,解调出初始的发送数据信号,实验使用的离线 DSP 算法主要包括:下变频、重采样、时钟恢复、级联多模均衡算法、频偏估计、相位估计和

误码率(bit error rate,BER)计算。其中在接收端,实验使用了一个可变光衰减器(variable optical attenuator,VOA)用来调整两路信号进入光电探测器(photoelectric detector,PD)的光功率以方便实验测量。

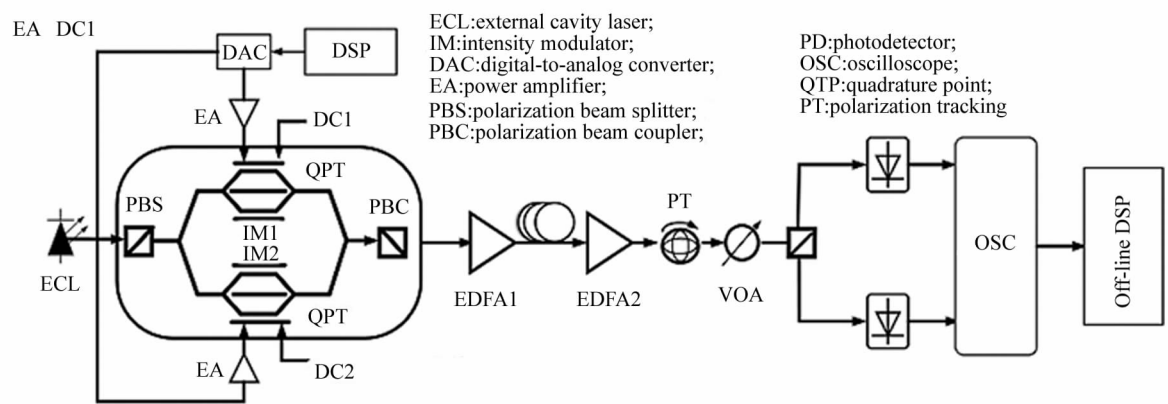


图 2 PDM-SSB 矢量 MMW 信号生成和光纤传输仿真系统

Fig. 2 PDM-SSB vector MMW signal generation and optical fiber transmission simulation system

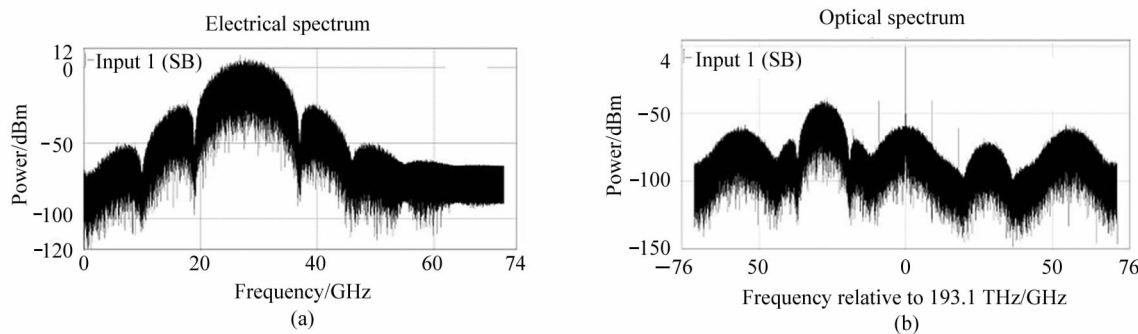
表 1 仿真系统关键器件参数表

Tab. 1 Parameters table of key devices of simulation system

Device	Parameters
ECL	Emission frequency: 193.1×10^{12} Hz; Linewidth: 1×10^5 Hz; Average power: 0.01 W
IM1,IM2	Insertion loss: 3.3 dB; Extinction ratio: 30 dB Half-wave voltage: 4 V
EDFA	Noise figure: 5.0 dB
SMF	NLF attenuation: 0.2×10^{-3} dB/m; Dispersion: 16×10^{-6} s/m ³
FiberNLS_PMD	Non linear index: 3.5×10^{-20} m ² /W
PD	Responsivity: 0.4 A/W Thermal noise: 10.0×10^{-12} A/Hz ^{1/2}

图 3 以 PS-16QAM 传输信号为例,展示了其在 VPI 系统仿真中经过不同器件后的信号频谱图:(a)为在 MATLAB 中进行基带调制产生的数字信号经 DAC 转换后的频谱图;(b)为经过一个 IM 调制器后

的信号光谱图;(c)为经过 PBC 耦合输出后的信号光谱图;(d)为经过 65 km 单模光纤(single-mode fiber,SMF)传输后经 PD 拍频后得到 28 GHz 电矢量 MMW 信号的频谱图。



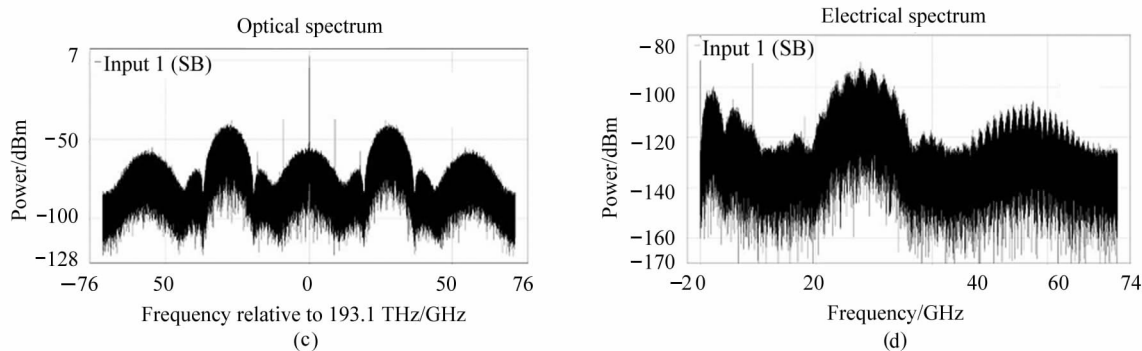


图3 仿真频谱图:(a)输入信号频谱图;(b)经过IM后的光谱图;(c)PBC耦合输出光谱图;(d)经过PD拍频后的频谱图

Fig. 3 Simulation spectrum diagram: (a) Input signal spectrumgram; (b) Signal optical spectrogram after IM; (c) PBC coupled output optical spectrogram; (d) Signal spectrumgram after PD beat frequency

3.2 测试结果及分析

图4(a)显示了当PD输入功率为 -13 dBm,离线恢复CMMA抽头系数为27时,PDM-QPSK矢量射频信号经过70 km光纤传输后BER随信号波特率变化曲线,(a)中内嵌的小图为X、Y偏振恢复出的10 Gbaud PDM-QPSK信号的星座图。实验通过在发射端以1 Gbaud间隔依次改变信号波特率获得范围从10—15 Gbaud的信号经离线DSP处理后的BER,通过实验可以看到,在系统光信噪比和DP-MZM、EA等仿真器件参数不变的情况下,随着信号波特率的提高,BER也随之变大,且在13 Gbaud及以下时,控制信号的BER仍低于硬判决阈值 3.8×10^{-3} 。

10^{-3} 。图4(b)显示了两种不同情况下,12 Gbaud PDM-QPSK信号在X、Y偏振方向上所解得BER的算术平均值与输入光功率的曲线,方框表示PDM-QPSK信号在背靠背(back to back,BTB)系统中所解得BER算术平均值;圆圈表示PDM-QPSK信号在经过70 km光纤传输后,在X、Y偏振方向上所解得BER的算术平均值。根据BER曲线图可看出,在BTB系统中PD输入功率高于 -17.3 dBm时,BER低于软判决阈值 4.2×10^{-2} ,且当PD输入功率高于 -15.5 dBm时,BER低于硬判决阈值 3.8×10^{-3} 。在经70 km光纤传输后PDM-QPSK信号BER仍然可以在较低输入PD光功率下满足硬判决阈值条件。

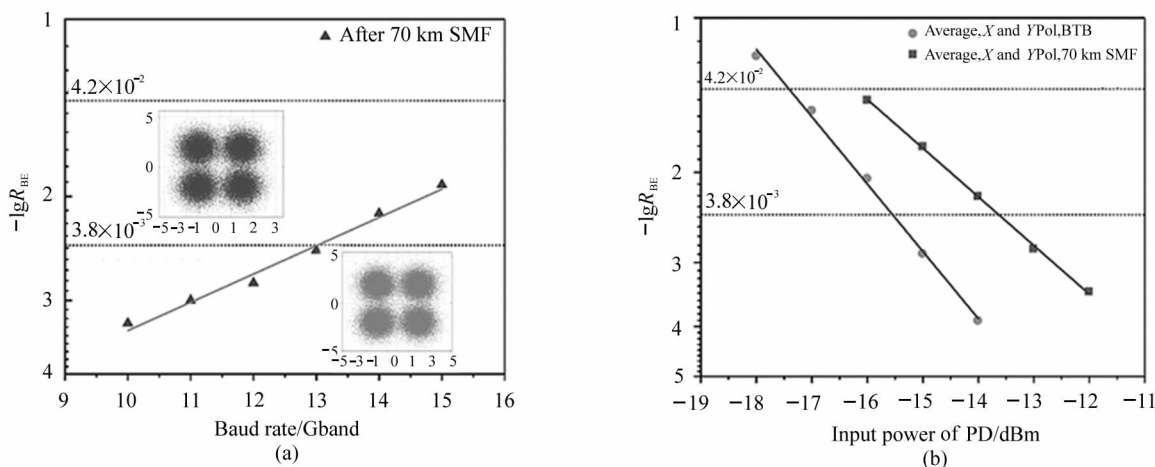


图4 (a) PDM-QPSK信号BER随波特率变化关系图;(b)12 Gbaud PDM-QPSK BER随PD输入功率变化曲线图

Fig. 4 (a) BER of PDM-QPSK signal at different baud rates; (b) BER of 12 Gbaud PDM-QPSK signal at different input powers of PD

图5(a)显示了当输入PD的光功率为 -16 dBm,离线恢复CMMA抽头系数为29时,PDM-16QAM信号经65 km光纤传输后,在X、Y偏

振方向上所解得BER的算术平均值与波特率关系曲线图,(a)中内嵌的小图给出了恢复出的11 Gbaud PDM-16QAM信号的星座图。与PDM-QPSK信号

在发射端处理方式一样,通过设置信号的不同波特率,得到速率相异的 PDM-16QAM 信号,将波特率变化范围设置在 6—11 Gbaud 之间,实验发现,即使传输速率达到 11 Gbaud 时,控制信号 BER 仍然低于软判决阈值。图 5(b)为 12 Gbaud PDM-16QAM 信号在 BTB 系统和在经过 65 km 光纤传输后,在 X、Y 偏振方向上所解得 BER 算术平均值与输入光功率的曲线。在 BTB 系统中,当 PD 输入功率高于 -14 dBm 时,BER 低于硬判决阈值;在 SMF 系统中当 PD 输入功率高于 -12.5 dBm 时,BER 低于硬判决阈值。

图 6(a)为 PDM-32QAM 在输入 PD 的光功率为 -12 dBm 的条件下,信号经 50 km 光纤传输后,在 X、Y 偏振方向上所解得 BER 的算术平均值与波特率的关系曲线图,与 16QAM 信号相同,在较高传输速率下依然可达到软判决阈值。(a)中内嵌的小图

给出了恢复 11 Gbaud PDM-32QAM 信号的星座图。图 6(b)显示了 12 Gbaud PDM-32QAM 信号在 BTB 系统和在经过 50 km 光纤传输后,在 X、Y 偏振方向上所解得 BER 算术平均值与输入光功率的曲线,在 BTB 系统中,当 PD 输入功率高于 -10.5 dBm 时,BER 低于硬判决阈值;在 SMF 系统中,当 PD 输入功率高于 -9 dBm 时,BER 低于硬判决阈值。从仿真结果可知,三种不同调制格式的信号在该实验系统中有不错的传输性能,但相较于 PDM-QPSK 信号,能够传输 70 km 光纤不同的是 PDM-16QAM 信号在光纤中有着更强的走离效应,在 65 km 传输距离下可达到硬判决门限阈值,但是当传输距离继续增加时,信号传输性能会极速下降,同理本实验中的 PDM-32QAM 最远传输距离为 50 km。下面,将在此基础上进一步研究 16QAM 与 32QAM 信号经过 PS 后的传输性能。

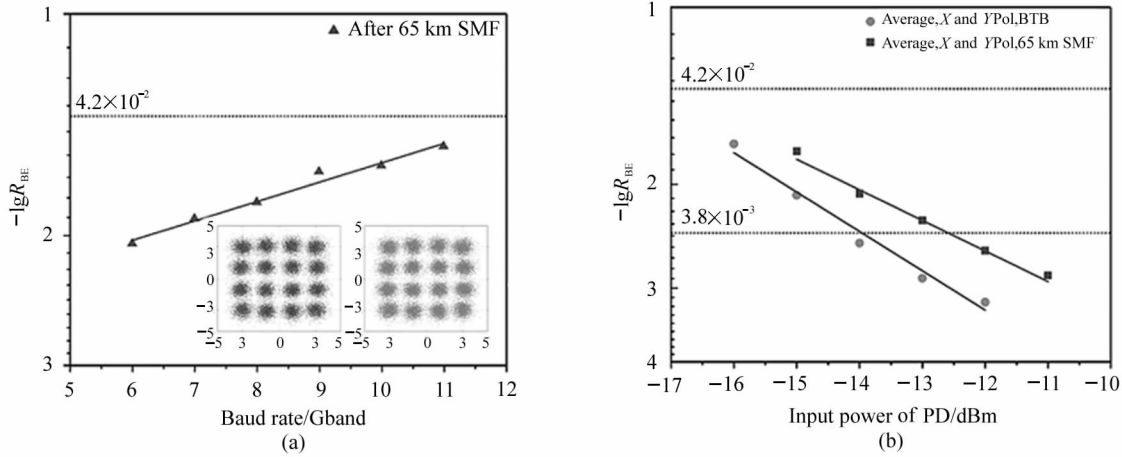


图 5 (a) PDM-16QAM 信号 BER 随波特率变化关系图; (b) 12 Gbaud PDM-16QAM 接收信号 BER 随 PD 输入功率变化曲线图
Fig. 5 (a) BER of PDM-16QAM signal at different baud rates;
(b) BER of 12 Gbaud PDM-16QAM receiving signal at different input powers of PD

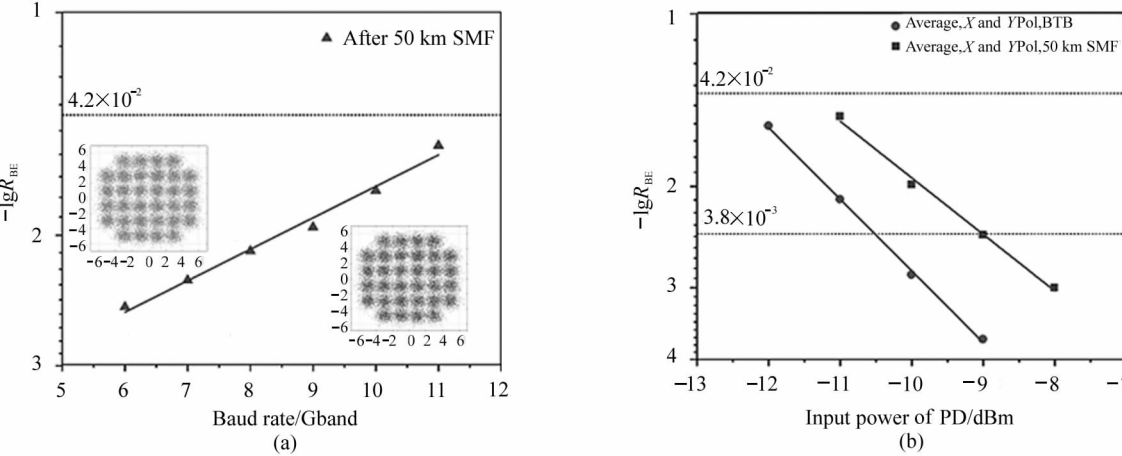


图 6 (a) PDM-32QAM 信号 BER 随波特率变化关系图; (b) 12 Gbaud PDM-32QAM 接收信号 BER 随 PD 输入功率变化曲线图
Fig. 6 (a) BER of PDM-32QAM signal at different baud rates;
(b) BER of 12 Gbaud PDM-32QAM receiving signal at different input powers of PD

鉴于 PS 技术的开销,如果在相同波特率情况下对比整形前后的 SSB 信号误码性能显然不公平,故需要实验保持均匀 QAM 信号波特率不变的情况下,将整形后符号熵为 3.7 bit/symbol 的 PS-16QAM 信号的波特率设置为 9.729 Gbaud,符号熵为 4.8 bit/symbol 的 PS-32QAM 信号的波特率设置为 9.375 Gbaud,确保整形前后信号的净比特速率相同(实验所取的传输速率,在较低光信噪比条件下信号的误码依然可以达到硬判决阈值),图7(a)显示了载频 28GHz 均匀 16QAM、PS-16QAM 信号分别经过 65 km 未引入非线性效应的 SMF 和非线性指数为 $3.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{M}$ 的非线性光纤(nonlinear fiber, NLF)传输之后的 BER 性能。如 BER 曲线所示,经过 65 km SMF BER 和 NLF 传输后 PS-16QAM 信号性能比均匀 16QAM 信号有了明显提升,在 SMF 传输系统中,PS-16QAM 信号在 -13.5 dBm 达到硬判决阈值,均匀 16QAM 信号在 -13.2 dBm 达到硬判决阈值,PS 技术带来了大约 0.3 dB 的功率增益,

且在 SMF 系统中,随着输入 PD 功率的增加,整形带来的增益效果更加明显。在 NLF 传输系统中,PS-16QAM 信号在 -12.3 dBm 左右达到硬判决阈值,相较于均匀 16QAM 信号,PS 技术提升了大约 0.8 dB 左右的功率增益。图 7(b)为 32QAM 整形前后 BER 曲线图,显然,整形后的传输性能也有了明显的提升。在 SMF 传输系统中,PS-32QAM 信号在 -11.3 dBm 达到硬判决阈值,相比均匀 32QAM 大约有 0.3 dB 的功率增益;在 NLF 传输系统中,PS-32QAM 信号在 -8.3 dBm 左右达到硬判决阈值,相比均匀 32QAM 大约有 0.5 dB 的功率增益。图(a)与(b)中的内嵌小图为经 PS 后的星座恢复图,由于光纤非线性效应对星座外围能量较高的点有着更大的影响,使用 PS 技术可以有效降低外围能量较高星座点的发送概率,从而提高了信号的抗非线性性能,因此,在净比特速率和算法相同的情况下,PS 技术在 NLF 系统中传输比 SMF 传输具有更大的功率增益,通过 BER 曲线图还发现,随着输入 PD 功率的增加,

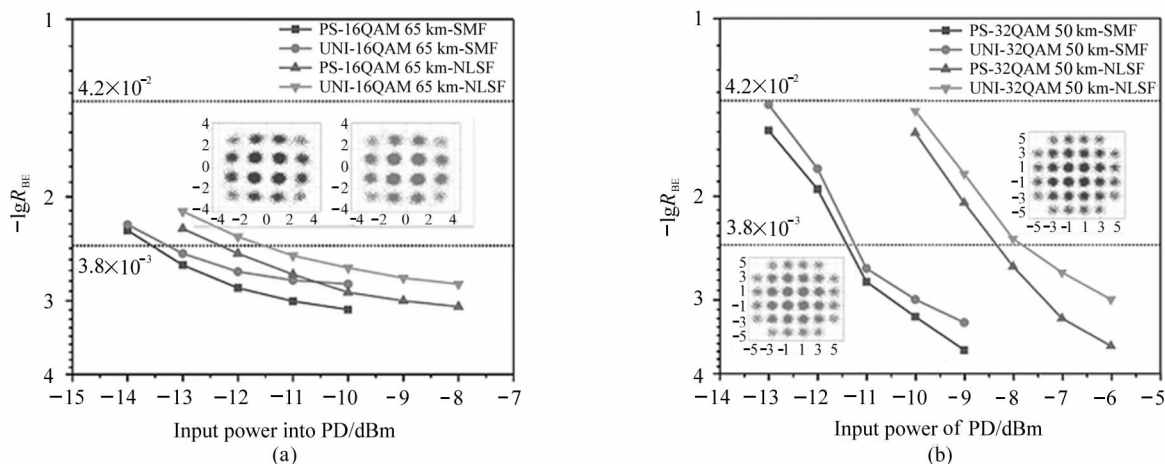


图 7 (a) 均匀 16QAM 和 PS-16QAM 信号误码率曲线图; (b) 均匀 32QAM 和 PS-32QAM 信号误码率曲线图

Fig. 7 (a) BER of Uni-16QAM and PS-16QAM signal; (b) BER of Uni-32QAM and PS-32QAM signal

PS 技术带来的增益效果会更加明显。

4 结 论

提出了一种基于单个激光源和一个 DP-MZM 构成的光路结构产生频率稳定的 MMW 信号传输方案,调制器输出的是具有相等频率间隔的偏振复用 SSB 信号,经 PD 拍频后生成 28 GHz 的电信号。该方案无需光学滤波器分离复用信号,使用的 SSB 调制具有良好的抗色散性能。基于此系统,通过仿真分析,实验验证了 QPSK、16QAM 和 32QAM 信号在系统中优良的传输性能并对比了均匀 16QAM/

PS-16QAM、均匀 32QAM/PS-32QAM 调制信号在该系统中的 BER 性能,证明了非均匀调制格式 PS 对于此系统有着不错的性能提升效果。仿真结果表明:当输入 PD 功率保持在较低值且 BER 控制在软判决阈值以内时,通过改变信号波特率依然可实现速率为 33 Gbit/s 的 SSB PDM-QPSK 信号在 70 km 光纤上的有效传输、44 Gbit/s 的 SSB PDM-16QAM 信号在 65 km 光纤上的有效传输和 55 Gbit/s 的 SSB PDM-32QAM 信号在 50 km 光纤上的有效传输。在相同净比特速率,BER 控制在硬判决阈值以内时,SMF 传输系统中 PS-16QAM 相较于均匀

16QAM 有 0.3 dB 的功率增益,PS-32QAM 相较于均匀 32QAM 有 0.3 dB 的功率增益;NLF 传输系统,PS-16QAM 相较于均匀 16QAM 有 0.8 dB 的功率增益,PS-32QAM 相较于均匀 32QAM 有 0.5 dB 的功率增益;PS 技术在 NLF 系统中的优势更大。由于仿真中使用的器件不受热噪声的影响,信号质量效果比实际中要好,所以实验结果较理想,如何贴近实际研究也是下一步需要考虑的问题。仿真中 PS 的信号表现出的良好抗非线性性能,有理由相信,PS 技术在工程运用中相较于传统调制格式优势会更加明显。

参考文献:

- [1] LI W P, KONG M, SHI J T, et al. Multiple radio frequency operation based on a modulator in a radio-over-fiber 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.
- [2] WANG X B, YANG J, GAO Y Y, et al. Frequency 16-tupling RoF system based on cascaded Mach-Zehnder modulators[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2020, 31(12): 1262-1269.
王现彬,杨洁,高彦彦,等. 基于级联马赫曾德尔调制器 16 倍频 RoF 系统[J]. 光电子 • 激光, 2020, 31(12): 1262-1269.
- [3] LI X, ZHANG C L, WANG H. W-band RoF-WDM-PON system based on polarization division multiplexing[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2020, 31(9): 902-908.
李汐,张春蕾,王欢. 基于偏振复用的 W 波段 RoF-WDM-PON 系统[J]. 光电子 • 激光, 2020, 31(9): 902-908.
- [4] WANG D F, TANG X F, XI L X, et al. A scheme to generate 16QAM-OFDM vector mm-wave signal based on a single MZM without optical filter and precoding[J]. Optics Communications, 2020, 475: 126227.
- [5] ZHAO F, LI J L, GONG J M, et al. 80-GHz RoF based on push-pull Modulator[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(5): 1-6.
- [6] LI X, YU J. Over 100Gb/s ultrabroadband MIMO wireless signal delivery system at the D-Band[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(5): 1-10.
- [7] XIAO J N, LI X Y, YU J J, et al. 40Gbit/s PDM-QPSK signal transmission over 160m wireless distance at W-band[J]. Optics Letters, 2015, 40(6): 998-1001.
- [8] CHEN L, XIAO J N, YU J J. Application of volterra nonlinear compensation in 75 GHz mmwave fiber-wireless system[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(1): 5500507.
- [9] LI J L, ZHAO F, YU J J. D-band millimeter wave generation and transmission through radio-over-fiber System[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, PP(99): 1-1.
- [10] LI W P, KONG M, YU J J. Generation of PDM-16QAM radio frequency signal based on a polarization multiplexing optical modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2306002.
李韦萍,孔森,余建军. 基于偏振复用光调制器产生 PDM-16QAM 射频信号[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2306002.
- [11] MA J X, YU J, YU C X, 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.
- [12] MA J, HE J, CHEN M, et al. Performance enhancement of probabilistically shaped OFDM enabled by precoding technique in an IM-DD system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(24): 6061-6071.
- [13] PAN C, Kschischang F R. Probabilistic 16-QAM shaping in WDM systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(18): 4285-4292.
- [14] WANG K H, LI X Y, KONG M, et al. Probabilistically shaped 16QAM signal transmission in a photonics-aided wireless terahertz-wave system [C]//Optical Fiber Communication Conference. March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE, 2018.
- [15] KSCHISCHANG F R, PASUPATHY S. Optimal nonuniform signaling for Gaussian channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1993, 39(3): 913-929.

作者简介:

赵 峰 (1979—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事宽带光纤传输技术、光子辅助毫米波、太赫兹通信技术、光与无线融合通信技术方面的研究。