

# 激光与光电子学进展

## 一种多波段矢量毫米波信号概率整形性能分析

姜长鹏<sup>1</sup>, 赵峰<sup>2\*</sup>, 魏怡<sup>2</sup>, 王凡允<sup>1</sup>, 孟佳欣<sup>2</sup>, 刘君<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121;

<sup>2</sup>西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710121

**摘要** 光子辅助方法易于产生和调制宽带矢量毫米波或太赫兹信号。基于强度调制器与同相/正交(I/Q)调制器级联的相干光路结构,结合概率整形技术,在VPI和MATLAB环境下对其多波段矢量毫米波信号的产生和传输性能进行了联合仿真分析。在载波频率分别为70 GHz和130 GHz的两个波段上,针对净比特速率为32 Gbit/s的均匀16阶正交幅度调制(16QAM)格式与概率整形16QAM格式的单边带矢量毫米波信号,分析对比了两者产生与传输性能。研究表明:概率整形16QAM毫米波信号的光纤传输性能均优于均匀16QAM毫米波信号,且发现在考虑光纤非线性效应时其概率整形的矢量信号具有更大的传输优势。

**关键词** 光通信; 单边带矢量毫米波信号; 概率整形; 16阶正交幅度调制; 非线性效应

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2106002

## Performance Analysis of a Multi-Band Vector Millimetre-Wave Signal Probability Shaping

Jiang Changpeng<sup>1</sup>, Zhao Feng<sup>2\*</sup>, Wei Yi<sup>2</sup>, Wang Fanyun<sup>1</sup>, Meng Jiaxin<sup>2</sup>, Liu Jun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China;

<sup>2</sup>School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China

**Abstract** The photon-assisted method easily generates and modulates broadband vector millimetre-wave or terahertz signals. The generation and transmission performance of its multi-band vector millimetre-wave signal is analysed in VPI and MATLAB environments using the coherent optical path structure of the cascade of the intensity modulator and the in-phase/quadrature (I/Q) modulator, combined with the probabilistic shaping technology. The transmission performance of two single-sideband vector signals with a net bit rate of 32 Gbit/s in uniform 16-ary quadrature amplitude modulation (16QAM) format and in a probability-shaping 16QAM format is compared and studied on the carrier frequencies about 70 GHz and 130 GHz, respectively. The simulation results show that the probabilistically shaped 16QAM millimetre-wave signal outperforms the uniform 16QAM millimetre-wave signal in optical fibre transmission. When the nonlinear effect of the fiber is considered, the probabilistically shaped signal has greater transmission advantages.

**Key words** optical communications; single-sideband vector millimeter wave signal; probability shaping; 16-ary quadrature amplitude modulation; nonlinear effects

**OCIS codes** 060.4080; 060.5625; 060.2360

收稿日期: 2021-02-14; 修回日期: 2021-02-25; 录用日期: 2021-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(61875164)

通信作者: \*hfengzhao@xupt.edu.cn

## 1 引言

毫米波(30~300 GHz)和太赫兹波(0.1~1 THz)具有较大的频谱带宽和相对较低的大气衰减系数,在下一代无线通信中有着广泛的应用前景<sup>[1-4]</sup>。光载射频(RoF)结合了光纤传输和无线传输的优点,具有大的调制带宽和低的传输损耗,被视为未来宽带无线接入网络系统中极有前途的技术<sup>[5-10]</sup>。虽然结合高阶正交幅度调制的 RoF 系统可以提供远距离和大容量的无线接入数据服务,但其性能易受到传输链路的非线性因素的限制。

已有的实验研究结果表明<sup>[11-13]</sup>:概率整形(PS)技术在无需增加系统硬件成本的条件下,能够有效提升光纤传输信号的抗非线性性能,可有效延长传输距离或增加系统传输容量,这是由于经过概率整形的矢量毫米波信号具有频谱效率高、传输容量大、额外计算复杂度低等特点<sup>[14-18]</sup>。同时,PS技术考虑了星座内各点能量消耗不同的特性,其中能量较低的内部星座点比能量较大的外部星座点的传输频率更高,故采用这种非均匀信号可以有效降低平均传输能量。此外,由于能量较低的内部星座点具有较高的信噪比,故发送大能量传输点可以降低光通信系统的非线性影响。目前在相干光高速传输系统中,基于PS技术增强系统传输性能已经得到了充分的验证,但是在光子辅助毫米波或太赫兹通信系统中,如何将PS技术与矢量毫米波或太赫兹信号产生与传输的光路系统结合,从而提升其传输性能还需进一步研究。

本文基于强度调制器和I/Q调制器级联的多波段矢量毫米波调制方案,结合PS技术,利用VPI和MATLAB软件对其性能进行联合仿真分析,分析了在该系统中各波段信号的传输性能特点,实现了PS-16QAM信号与均匀16QAM信号的比较研究,进一步优化并提升了单边带矢量毫米波信号的产生方案。

## 2 概率整形

众所周知,大多数光纤通信系统实际上都是功率受限的,特别是低成本的光纤通信系统。概率整形技术可利用非均匀概率发送不同的电平信号,使能量较低的星座内圈低电平信号比能量较高的星座外圈高电平信号具有更高的发送频率,能够实现更好的信号成形增益和抗非线性性能。概率整形技术不必改变均匀分布星座点的位置,只需通过将输入符号分布整形为服从信道的最佳分布来逼近香农极限<sup>[19]</sup>。文献<sup>[19]</sup>证明了在加性高斯白噪声信道中,采用麦克斯韦-玻尔兹曼(M-B)分布特点调整星座点的传输频率,可以得到1.53 dB的成形增益。M-B分布公式为

$$P_x(x_i) = \frac{\exp(-\lambda|x_i|^2)}{\sum_{i=1}^M \exp(-\lambda|x_i|^2)}, \quad (1)$$

式中: $x$ 表示复平面星座点坐标 $a + bj$ ; $\lambda$ 是M-B分布的关键参数,增加 $\lambda$ 会增加应用于星座的“成形”量,从而降低信号符号熵及其在特定信噪比范围内的误码率(BER,  $R_{BE}$ )。以16QAM格式的概率整形为例,PS映射和去映射的过程如图1所示,其中最为关键的过程是恒定组成分布匹配(CCDM)器<sup>[11]</sup>。首先生成一定长度的二进制比特序列,在CCDM中进行处理,得到具有期望概率分布的符号序列;其次将CCDM输出的符号序列作均匀分布的二进制映射;然后结合现有的前向纠错码(FEC)编码方案,进行对应的高阶调制编码;在通过光信道之后,依次进行高阶调制解码、FEC解码、二进制转符号映射,最后通过恒定组成分布解匹配(Inv-CCDM)从符号中恢复数据比特。

在本实验中,PS-16QAM实现的脉冲幅度调制电平分布为 $[0.5728, 0.368, 0.0592]$ ,可实现的信息速率 $v$ 可达3.6 bit/symbol。此外,经过概率整形后的信号的平均功率也由均匀分布的10降至5.889。

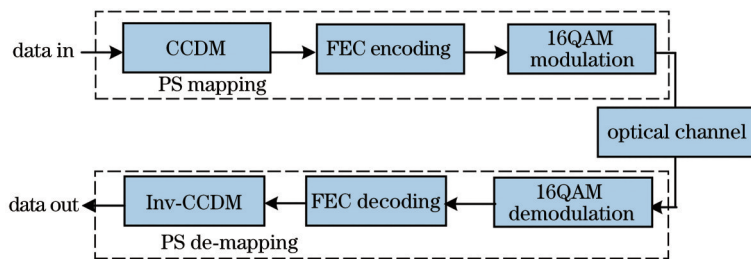


图1 基于CCDM的16QAM概率成形系统框图

Fig. 1 Block diagram of a 16QAM probabilistic shaping system based on CCDM

为了保持 PS-16QAM 信号的平均功率不变,符号幅度应增加 1.3031 倍。图 2(a)显示了具有 M-B 分布的 PS-16QAM 信号点的概率分布,从中可以清晰地看出,PS-16QAM 星座中越靠近中心位置且能量低、误码率低的星座点,其发送概率越大。图 2(b)

显示均匀星座和 PS-16QAM 星座,其中较大的点表示 PS-16QAM 星座,较小的点表示均匀 16QAM 星座,可以看出 PS-16QAM 星座具有更大的欧氏距离。此外由于本系统主要侧重于比较概率整形对信号在信道传输前后的影响,故没有加入 FEC。

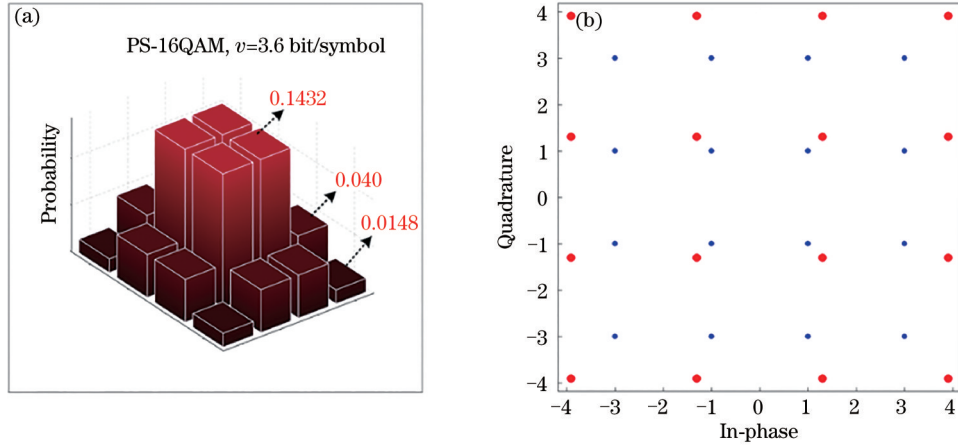


图 2 概率分布及信号星座。(a) PS-16QAM 的概率分布;(b) PS/均匀 16QAM 信号的星座

Fig. 2 Probability distribution and signal constellation. (a) PS-16QAM probability distribution; (b) PS/uniform 16QAM signal constellation

### 3 系统仿真及结果

图 3 为基于概率整形的多波段矢量毫米波信号产生系统,表 1 为系统仿真关键器件的参数表。

如图 3 所示,在发射端,外腔激光器(ECL)发射

出一定波长的连续相干光(其参数详见表 1),随后入射至强度调制器(IM)。IM 直流偏置设在最小传输点,即工作在载波抑制(OCS)模式。本地振荡器产生频率为 50 GHz 的余弦射频信号(RF),其信号功率与 IM 驱动需求相匹配。由于 IM 工作在 OCS

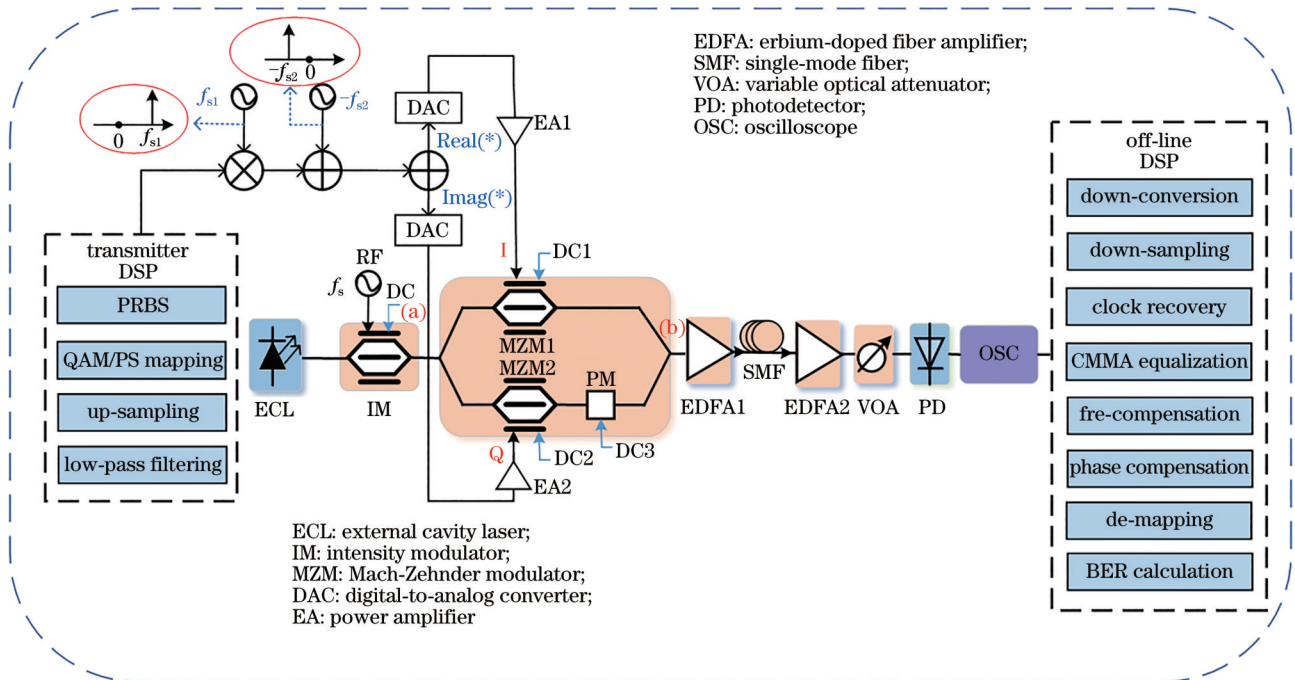


图 3 基于概率整形的多波段矢量毫米波信号生成系统

Fig. 3 A multi-band millimeter wave vector signals' generation system based on probability shaping

表 1 仿真系统关键器件参数表

Table 1 Key device parameters of the simulation system

Device	Parameter
ECL	Emission frequency of $193.1 \times 10^{12}$ Hz;
	Line-width of $1 \times 10^5$ Hz; average power of 0.01 W
IM, MZM1, MZM2	Insertion loss of 3.9 dB; extinction ratio of 33 dB
	Half-wave voltage of 4 V
EDFA	Noise figure of 3.0 dB
SMF	Attenuation of $0.2 \times 10^{-3}$ dB/m;
	dispersion of $16 \times 10^{-6}$ s/m <sup>3</sup>
PD	Responsivity of 0.4 A/W
OSC	Sampling rate of 160 GSa/s

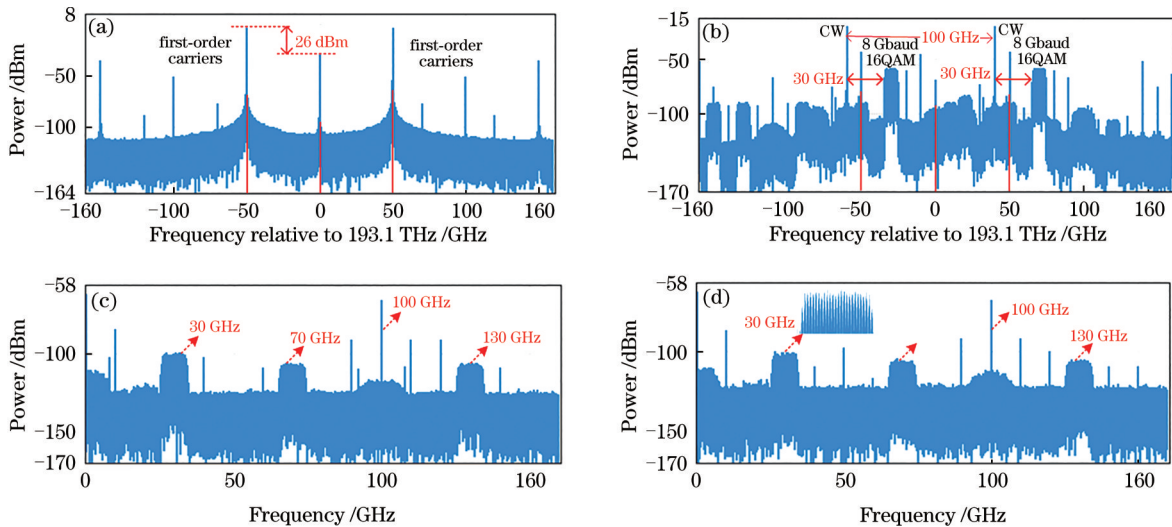


图 4 矢量毫米波信号的光谱和电谱 (8 Gbaud 均匀 16QAM, -12 dBm)。(a) IM 输出光谱; (b) IQ 调制器输出光谱; (c) 经背靠背传输和拍频后产生的毫米波电谱; (d) 经 180 km 单模光纤 (SMF) 传输和拍频后产生的电谱

Fig. 4 Vector millimeter wave signal's optical spectra and electrical spectra (8 Gbaud uniform 16QAM, -12 dBm).

(a) After IM; (b) after IQ modulator; (c) after BTB; (d) after 180 km SMF

图 3 所示的基带射频信号的产生过程,即数模转换器(DAC)之前的部分均是通过 MATLAB 编程来实现的。其均匀 16QAM 信号的生成过程如下:将长度为 40000 的原始二进制数据转换成符号数据后直接用于均匀 16QAM 信号映射,若生成 PS-16QAM 信号则需将原始二进制数据经过 CCDDM 生成期望概率分布的符号序列后进行非均匀 16QAM 信号映射。一个实正弦波射频源可以表示为

$$E_{RF} = \cos(2\pi f_{RF} t), \quad (2)$$

其中  $f_{RF}$  表示射频信号的频率。众所周知,实射频信号对应的频谱有两种频率成分。根据希尔伯特变换<sup>[20]</sup>,可以得到单侧频谱的复正弦信号。首先,实

模式下,因此,入射光经过 IM 调制器后,其中心载波和偶数阶子载波均被抑制,在 IM 的输出端口,产生了一系列奇数阶子载波。这些光学边带信号的光谱如图 4(a)所示,其中正负一阶边带信号的频率间隔为 100 GHz,一阶边带信号与中心载波的功率抑制比约为 26 dB。同时,光谱中部分高阶奇数子载波没有被完全抑制,这是因为 RF 信号的电压大小会直接影响高阶边带信号的抑制效果,电压越大(大信号调制),抑制效果越差。在系统仿真中,若进一步降低 RF 信号的峰值电压幅度,虽然可以改善高阶奇数子载波的抑制效果,但是一阶边带信号与中心载波的功率抑制比也会随之降低,不利于后续矢量信号的产生。因此,将 RF 信号的峰值电压设置为 1 V 时,可以得到一个相对合适的效果。

射频信号经过希尔伯特变换 90° 相位后变为虚信号  $j\sin(2\pi f_{RF} t)$ 。然后将实射频信号与虚信号结合,得到复正弦信号,复正弦信号可表示为

$$E_{RF} = \cos(2\pi f_{RF} t) + j\sin(2\pi f_{RF} t) = \exp(j2\pi f_{RF} t). \quad (3)$$

映射变换后的数据在经过低通滤波后与频率为  $f_{s1} = 20$  GHz 的复正弦射频信号混合,此时基带数据将以复正弦的形式调制射频载波,基带矢量信号上变频为 20 GHz 处的单边带矢量信号。接下来与另一个频率为  $f_{s2} = -10$  GHz 的未调制的复正弦射频信号进行线性叠加,最终得到一对非对称的单边带射频矢量信号。最后利用数模转换器(DAC)将

射频矢量信号的实部和虚部分别转换为模拟电压信号,经电压放大器(EA)放大至 $2V_{pp}$ 后驱动I/Q调制器。

在I/Q调制器中有3个独立的直流电压(DC)偏置点。为了确保I/Q调制器工作在精确的OCS模式下,首先需要调整两个子马赫-曾德尔调制器(MZM)的DC偏置来确保两个MZM均工作在最小传输点,并将相位调制器(PM)的相移设置为 $90^\circ$ 。因此,经I/Q调制器的OCS调制后,入射到I/Q调制器的两个一阶边带信号再一次被抑制,在I/Q调制器的输出端口,被抑制的这两个一阶光边带的两侧分别又产生了一对光学单边带信号。图4(b)展示了I/Q调制器输出端产生的一对光学边带信号的光谱,其中一个为上边带载波为20 GHz的8 Gbaud 16QAM信号,另一个为下边带载波为 $-10$  GHz的未调制信号。接下来,采用掺铒光纤放大器(EDFA)将这些光学边带信号的功率提升至10 dBm,然后利用普通单模光纤(SMF)进行传输。由于长距离的光纤传输会带来大量的功率损耗,因此在SMF后又增加了另一个EDFA用以补偿光纤传输中带来的功率损失。

在接收端,为了方便测试,利用一个可调谐光衰减器(VOA)来调整进入光电探测器(PD)的光功率。图4(c)和图4(d)分别为经背靠背(BTB)传输和单模光纤(SMF)传输后,再利用光电探测器(PD)对光学边带信号进行拍频,产生的矢量毫米波信号电谱,所有光学边带信号经PD拍频后生成的电毫米波信号主要在4个频段产生了矢量毫米波信号,其中心频率分别位于30, 70, 100, 130 GHz处。其中频率为100 GHz处既有不携带振幅或相位信息的载波,也有携带信息的信号与其他信号拍频产生的载波,因此该频段的信号无法进行载波恢复。由于在仿真中示波器没有带宽限制,因此我们无需在系统中进行下变频,只需设置足够大的采样率便可捕获需要的毫米波信号。之后将捕获的电毫米波信号转化为离散数字信号进入离线DSP处理,从而恢复出原始的数据信号。离线DSP主要包括:下变频、下采样、时钟恢复、级联多模算法(CMMA)、频偏估计、相位估计和误码率计算等<sup>[21]</sup>。其中为了尽量降低剩余误差,我们使用了三次步长因子分别为0.002, 0.001和0.0001的CMMA算法。

图4(d)为经180 km SMF传输和光功率放大后产生的矢量毫米波电谱。在BTB系统中,仅使用

一个EDFA和VOA来改变信号输入PD的光功率,以此控制信道的光信噪比(OSNR)。分析每个频段的信号发现,经180 km SMF传输后的30 GHz处信号出现了严重的失真。这主要有两个原因:一是I/Q调制器产生的两对非对称一阶边带信号经光纤传输后在拍频时发生相互串扰;二是其他间隔为30 GHz的能量较低且未携带信息的边带信号在PD处互相拍频,同时在光纤传输中易受光纤色散的影响而产生走离。因此30 GHz处的信号无法被使用。下面,对70 GHz和130 GHz处的信号进行进一步的仿真分析。

图5分别为在BTB传输和180 km SMF传输条件下,70 GHz和130 GHz载频上的8 Gbaud 16QAM信号输入PD光功率与BER的变化关系曲线及其接收信号的星座图。图5(a)和图5(b)分别为经BTB和经180 km SMF传输后,进入PD功率为 $-12$  dBm时,在接收端恢复出的星座图。根据误码率曲线显示,130 GHz处信号BER性能要略优于70 GHz处信号。这是因为在I/Q调制器后的光谱中存在部分幅度较低、信号间隔为70 GHz左右的高阶副载波,这影响了该波段信号的传输性能。虽然70 GHz和130 GHz处信号在经过180 km SMF传输后较BTB传输相比误码性能有所下降,但是依然可以在较长距离的光纤传输中保持良好的传输性能。这是由于70 GHz和130 GHz处的毫米波信号是单边带信号,对光纤色散不敏感,在光纤中传输

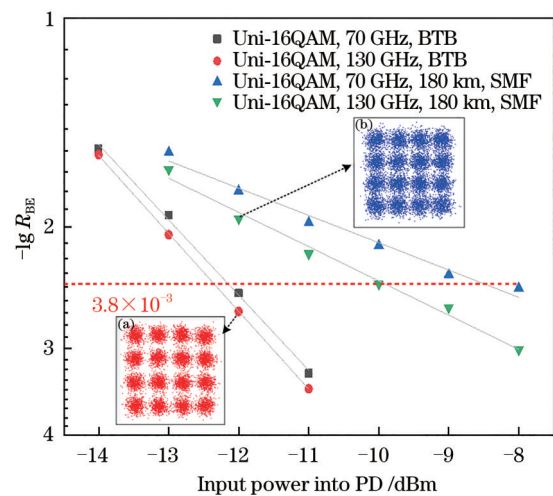


图5 载频70 GHz和130 GHz信号上的8 Gbaud 16QAM信号误码率曲线及其星座图( $-12$  dBm)

Fig. 5 Bit error rate curves and constellation diagrams ( $-12$  dBm) on 70 GHz and 130 GHz carriers for 8 Gbaud 16QAM signal

不会产生明显的走离效应,因此后续选择位于 70 GHz 与 130 GHz 处的矢量毫米波信号开展 PS 仿真。

考虑到 PS 技术的开销,如果比较同一波特率下的 PS-16QAM 信号与均匀 16QAM 信号的误码率情况,则并不具有绝对的说服力。因此固定均匀 16QAM 信号的波特率,设定符号熵为 3.6 bit/symbol 的 PS-16QAM 信号的波特率为 8.889 Gbaud,使两者净比特速率均保持在 32 Gbit/s。测量 8.889 Gbaud PS-16QAM 信号和 8 Gbaud 均匀 16QAM 信号分别经过 BTB 传输、180 km 未加入非线性因素的普通 SMF 传输和 180 km 非线性指数为  $2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$  的非线性光纤(该光纤为 VPI 仿真软件中的一种光纤类型,可在其中添加一定的非线性指数来模拟信号在光纤传输中受到的非线性影响,其余参数与 SMF 基本相同,其简称为 NLSF)传输后的误码率性能。在该系统中,选择传输距离为 180 km 的两种光纤,是因为在该距离下经过概率整形后的 70 GHz 与 130 GHz 信号基本均可达到硬判决门限(HD-FEC)阈值,但是当传输距离继续增加时,信号传输性能会明显降低。

图 6 显示了多种传输情况下,符号熵为 3.6 bit/symbol、载频为 70 GHz 的 8.889 Gbaud PS-16QAM 信号与 8 Gbaud 均匀 16QAM 信号的输入 PD 光功率与信号 BER 的关系曲线。图 6(a)和图 6(b)分别展示了经 180 km 普通 SMF 传输后的输入 PD 功率为 -10 dBm 时接收端恢复后的信号星座图,图 6(c)和图 6(d)分别为经过 180 km NLSF 传输后,输入 PD 功率为 -10 dBm 时,接收端恢复出的信号星座图。如图 6 中误码率曲线所示,虽然 70 GHz 处信号传输性能会受到多余高阶副载波的影响,但是在经过 180 km SMF 传输后误码率依然可以达到 HD-FEC 阈值,经过 180 km NLSF 传输后误码率也可达  $2.0 \times 10^{-2}$ 。其中经 SMF 传输的信号误码率性能要优于经 NLSF 传输的信号,这主要由于 NLSF 中非线性因素对信号传输性能产生了影响。此外,70 GHz 载频上 PS-16QAM 信号分别经 BTB 传输、180 km SMF 传输和 180 km NLSF 传输后的误码率性能均优于均匀 16QAM 信号,且不同传输方式按照误码率性能提升程度从大到小排序,依次为 NLSF, SMF, BTB。

图 7 显示了多种传输情况下,符号熵为 3.6 bit/symbol、载频为 130 GHz 的 8.889 Gbaud

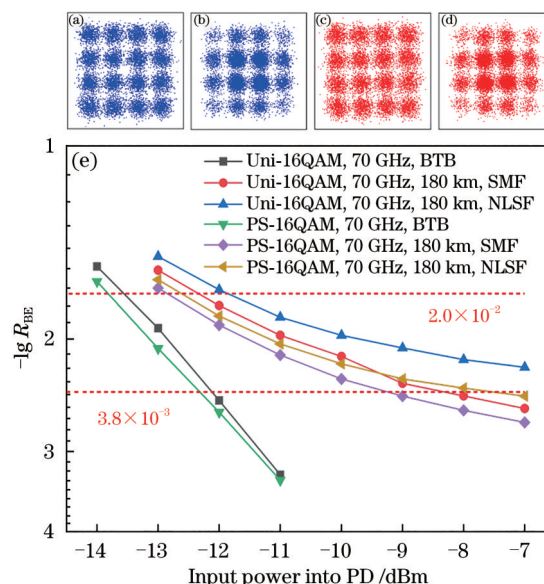


图 6 载频 70 GHz 上的 8.889 Gbaud PS-16QAM 和 8 Gbaud 均匀 16QAM 信号误码率曲线及星座图 (-10 dBm)。(a) Uni-16QAM, 经 180 km SMF 传输后的星座图; (b) PS-16QAM, 经 180 km SMF 传输后的星座图; (c) Uni-16QAM, 经 180 km NLSF 传输后的星座图; (d) PS-16QAM, 经 180 km NLSF 传输后的星座图; (e) 两种信号的误码率曲线

Fig. 6 8.889 Gbaud PS-16QAM and 8 Gbaud uniform 16QAM signal's bit error rate curves and constellation diagrams (-10 dBm) on 70 GHz. (a) Constellation diagram of uni-16QAM, after 180 km SMF; (b) constellation diagram of PS-16QAM, after 180 km SMF; (c) constellation diagram of uni-16QAM, after 180 km NLSF; (d) constellation diagram of PS-16QAM, after 180 km NLSF; (e) PS-16QAM and uniform 16QAM signal's bit error rate curves

PS-16QAM 信号与相同比特速率下均匀 16QAM 信号的输入 PD 光功率与信号 BER 的关系曲线以及接收信号的星座图。图 7(a)和图 7(b)为经 180 km 普通 SMF 传输后的输入 PD 功率为 -10 dBm 时的接收端恢复后的信号星座图,图 7(c)和图 7(d)为经 180 km NLSF 传输后,输入 PD 功率为 -10 dBm 时,接收端恢复出的信号星座图。据图 7 显示,130 GHz PS-16QAM 信号分别经 BTB 传输、180 km SMF 传输和 180 km NLSF 传输后的误码率性能较均匀 16QAM 均有一定程度的提升。其中在 BTB 系统中,PS-16QAM 在 -12.5 dBm 达到 HD-FEC 阈值,相比均匀 16QAM 约有 0.2 dB 的增益。在 SMF 传输系统中,PS-16QAM 在 -10.8 dBm 左右达到 HD-FEC 阈值,比均匀 16QAM 约有 0.8 dB

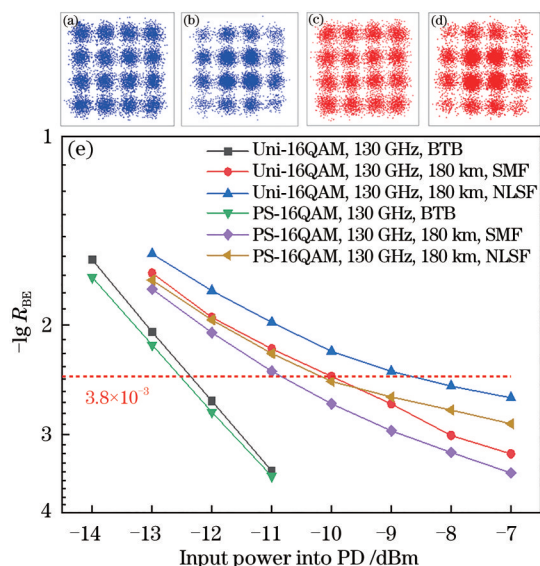


图7 载频 130 GHz 上的 8.889 Gbaud PS-16QAM 和 8 Gbaud 均匀 16QAM 信号误码率曲线及星座图 ( $-10$  dBm)。(a) Uni-16QAM, 经 180 km SMF 传输后的星座图; (b) PS-16QAM, 经 180 km SMF 传输后的星座图; (c) Uni-16QAM, 经 180 km NLSF 传输后的星座图; (d) PS-16QAM, 经 180 km NLSF 传输后的星座图; (e) 两种信号的误码率曲线

Fig. 7 8.889 Gbaud PS-16QAM and 8 Gbaud uniform 16QAM signal's bit error rate curves and constellation diagrams ( $-10$  dBm) on 130 GHz. (a) Constellation diagram of uni-16QAM, after 180 km SMF; (b) constellation diagram of PS-16QAM, after 180 km SMF; (c) constellation diagram of uni-16QAM, after 180 km NLSF; (d) constellation diagram of PS-16QAM, after 180 km NLSF; (e) PS-16QAM and uniform 16QAM signal's bit error rate curves

的增益。在 NLSF 传输系统中, PS-16QAM 在  $-10.1$  dBm 左右达到 HD-FEC 阈值, 均匀 16QAM 则在  $-8.6$  dBm 左右达到该阈值, PS 技术提升了 1.5 dB 左右的功率增益。该结果与图 6 中 70 GHz 的信号误码率曲线相似, PS 技术在 NLSF 传输中具有最大的功率增益。这是因为受光纤非线性影响的主要是星座外围能量较高的点, 使用 PS 技术则可以降低外围能量较高星座点的发送概率, 从而提升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, 承载 PS-16QAM 的 70 GHz 和 130 GHz 信号在光纤传输中比承载均匀 16QAM 的 70 GHz 和 130 GHz 信号具有更好的误码率性能。

## 4 结 论

分析了基于 IM 和 I/Q 调制器级联的多波段矢

量毫米波信号产生与传输方案, 并通过仿真分析, 分别验证了 8 Gbaud 均匀 16QAM 和 8.889 Gbaud PS-16QAM 信号在系统中的有效传输, 验证了在目前的技术条件下, 使用该方案产生多波段毫米波矢量信号是一种实用、经济的方法。实验中使用希尔伯特变换技术在基带处实现单边带调制, 并使调制器工作在 OCS 模式, 无须使用光学滤波器来滤除不需要的边带。产生的单边带信号在光纤传输中具有很好的抗色散性能, 避免了走离效应的影响。仿真结果表明, 在 32 Gbit/s 的净比特速率下, 承载 PS-16QAM 的 70 GHz 和 130 GHz 的信号分别经 BTB 传输、180 km SMF 传输和 180 km NLSF 传输后的 BER 性能均优于承载均匀 16QAM 的 70 GHz 和 130 GHz 信号, 其中在 NLSF 传输中 PS 技术优势更加明显。由于仿真中器件趋于理想, 而实际实验中受器件引入的噪声及非线性的影响, 信号质量必然会更差, 而经过概率整形的信号则具有更好的抗非线性性能。因此我们有理由相信在实际实验中, PS 技术在长距离传输中的优势将更加明显。

## 参 考 文 献

- [1] Fice M J, Rouvalis E, van Dijk F, et al. 146-GHz millimeter-wave radio-over-fiber photonic wireless transmission system[J]. Optics Express, 2012, 20(2): 1769-1774.
- [2] Yu J J. Photonics-assisted millimeter-wave wireless communication[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2017, 53(6): 1-17.
- [3] Li X Y, Yu J J, Chang G K. Photonics-assisted technologies for extreme broadband 5G wireless communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(12): 2851-2865.
- [4] 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, 12(2): 1-8.
- [5] 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, 47(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, 47(11): 1106002.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Huang X D, Lu J, Wang Y, et al. Influence of high-order sideband on high-frequency millimeter wave system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 040603.  
黄馨茹, 卢嘉, 王杨, 等. 高阶边带对高倍频光毫米波系统的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 040603.
- [9] Zhao F, Cai W T, Zhang L L, et al. Linearization analysis of microwave photonic link based on balanced detection[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1104001.  
赵峰, 蔡卫童, 张龙龙, 等. 基于平衡探测的微波光子链路线性化分析[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1104001.
- [10] 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.
- [11] Schulte P, Böcherer G. Constant composition distribution matching[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2016, 62(1): 430-434.
- [12] Pan C P, Kschischang F R. Probabilistic 16-QAM shaping in WDM systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(18): 4285-4292.
- [13] Buchali F, Steiner F, Böcherer G, et al. Rate adaptation and reach increase by probabilistically shaped 64-QAM: an experimental demonstration[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(7): 1599-1609.
- [14] Böcherer G, Steiner F, Schulte P. Bandwidth efficient and rate-matched low-density parity-check coded modulation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(12): 4651-4665.
- [15] Forney G, Gallager R, Lang G, et al. Efficient modulation for band-limited channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1984, 2(5): 632-647.
- [16] Fehenberger T, Böcherer G, Alvarado A, et al. LDPC coded modulation with probabilistic shaping for optical fiber systems[C]//Optical Fiber Communication Conference 2015, March 22-26, 2015, Los Angeles, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2015: Th2A.23.
- [17] Buchali F, Böcherer G, Idler W, et al. Experimental demonstration of capacity increase and rate-adaptation by probabilistically shaped 64-QAM[C]//2015 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 27-October 1, 2015, Valencia, Spain. New York: IEEE Press, 2015: 1-3.
- [18] Wang K H, Li X Y, Kong M, et al. Probabilistically shaped 16QAM signal transmission in a photonics-aided wireless terahertz-wave system[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018: 1-3.
- [19] Kschischang F R, Pasupathy S. Optimal nonuniform signaling for Gaussian channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1993, 39(3): 913-929.
- [20] Li X Y, Xu Y M, Yu J 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.
- [21] 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.