

## 结构简单的 D 波段矢量毫米波信号产生的方法

刘翠微<sup>1,2\*</sup>, 余建军<sup>1,2</sup><sup>1</sup>复旦大学信息科学与工程学院电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433;<sup>2</sup>复旦大学上海先进通信与数据科学研究院, 上海 200433

**摘要** 提出一种新的基于单个强度调制器的 D 波段矢量毫米波产生方法。研究基于强度调制器, 通过预编码技术, 产生了八倍频 D 波段矢量毫米波信号, 信号经过一定距离的无线传输之后输入接收端, 最后对信号进行解调和误码分析。该方法具有一定的中心载波抑制功能, 在无光学滤波器下成功传输了信号, 降低了光载无线系统的链路成本。实验验证了 152 GHz 4 GBaud 正交相移编码(QPSK)信号的产生和传输, 经过 1 m 的无线传输后, 接收到的 QPSK 信号的误码率低于软判决前向纠错门限阈值( $1.0 \times 10^{-2}$ )。

**关键词** 光通信; D 波段; 光载无线; 八倍频; 预编码; 强度调制器

中图分类号 TN928

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0406001

## A New Scheme of D-Band mm-Wave Vector Signal Generation with Simple Structure

Liu Cuiwei<sup>1,2\*</sup>, Yu Jianjun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information, Education of Ministry, School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;

<sup>2</sup>Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Fudan University, Shanghai 200433, China

**Abstract** In this paper, we proposed a new scheme to generate D-band mm-wave vector signals based on an intensity modulator. With this scheme, the eight-fold-frequency D-band mm-wave vector signals were generated based on an intensity modulator and the precoding technology. After wireless transmission for a certain distance, the signals were input to the receiving end, and then were demodulated and analyzed for error. Due to the center-carrier suppression of the scheme, the signals were successfully transmitted without the assistance of any optical filter, greatly reducing the link cost of the radio-over-fiber system. Furthermore, we experimentally demonstrated the generation and transmission of 152 GHz 4 GBaud quadrature phase shift keying (QPSK) signals, and the bit error rate of the QPSK signals received after 1 m wireless transmission was lower than the threshold of soft-decision forward error correction ( $1.0 \times 10^{-2}$ ).

**Key words** optical communications; D-band; radio-over-fiber; eight-fold frequency; precoding; intensity modulator

**OCIS codes** 060.5625; 060.4510; 140.3515; 010.5060; 060.4080

## 1 引言

随着无线通信的高速发展, 宽带无线通信系统由于其成本低廉以及适应性和拓展性良好等特点在接入网以及室内网等场景中得到了广泛的应

用<sup>[1-14]</sup>。光纤通信则具有传输频带宽、通信容量大、损耗低等优点, 而光载无线(ROF)系统能够更好地将光纤通信和无线通信的优点融合在一起, 实现高质量信号的长距离传输<sup>[3-6, 10-14]</sup>。相比于传统无线传输的有限带宽资源, 毫米波拥有较宽的带宽(高达

收稿日期: 2020-06-11; 修回日期: 2020-08-17; 录用日期: 2020-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(61527801, 61720106015, 61835002, 61805043, 61675048)

\* E-mail: 18110720069@fudan.edu.cn

273.5 GHz),能更好地支持 ROF 系统<sup>[2-5,10]</sup>。D 波段的频率范围在 110~170 GHz,在毫米波段中频率较高并支持较大的传输速率和带宽,在军事以及空间通信等方面都有良好的发展空间<sup>[2,9-19]</sup>。在以前的研究中,光生毫米波的方法因实现简单而备受关注。其中基本方法主要有直接调制技术、外部调制技术以及光外差技术<sup>[16]</sup>。然而由于光生毫米波方法成本高且受器件的带宽限制,近几年来利用外部调制器和低射频信号产生倍频毫米波信号的方法成为了研究热点<sup>[6-9]</sup>。在文献[6]中采用了级联马赫-曾德尔(MZM)调制器进行八倍频,其中双调制器分别用于倍频以及调制信号,最终利用 9 GHz 低射频信号产生了 72 GHz 的矢量毫米波。此方案采用另一个独立的强度调制器(IM)产生强度调制信号,且没有采用更高频谱效率的矢量信号调制<sup>[7]</sup>。这种利用强度调制器的频率倍频来产生高频毫米波矢量信号的方法会出现倍频和相位倍增,故会不可避免地引起星座畸变或相位简并<sup>[8]</sup>。因此,需要在

发送信号前对矢量信号进行预编码,文献[8]中使用预编码技术,产生了光子二倍频的正交相移键控(QPSK)信号,然而该方案并未产生更高倍频的信号。为了进一步优化系统,降低 ROF 系统的链路成本,产生更高频率的信号,本文通过预编码技术,产生八倍频 D 波段矢量毫米波信号。同时实现了一定距离的无线传输,并对接收端的数据进行了信号恢复。由于该方案产生的信号具有一定的中心载波抑制效果,故本研究未使用光滤波器。最后通过实验实现了 1 m 的无线距离传输,得到的 152 GHz 4 GBaud(GBaud 是波特率单位) QPSK 信号的误码率(BER,  $R_{BE}$ ) 低于前向纠错码软判决门限阈值<sup>[20]</sup>。

## 2 基本原理

图 1 为基于强度调制器产生 D 波段矢量毫米波信号的原理图。图 1(a)为矢量毫米波信号产生的原理。

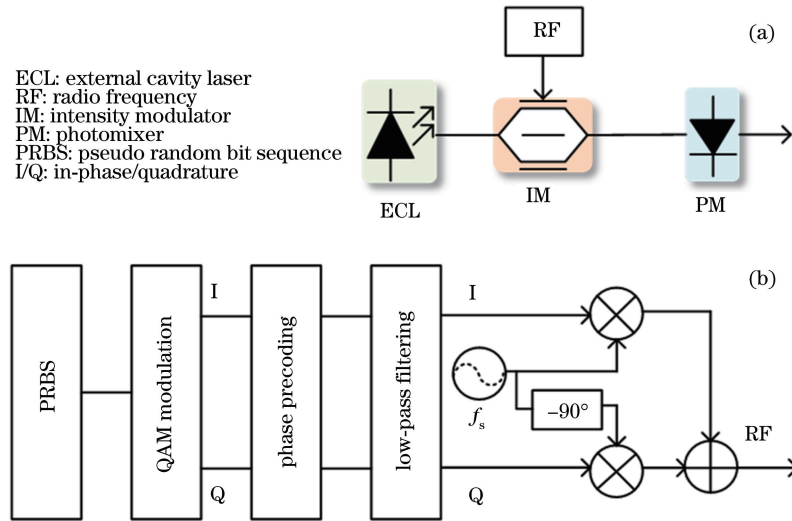


图 1 基于 IM 产生 D 波段矢量毫米波信号的原理。(a)矢量毫米波产生的原理;(b)预编码的射频信号生成原理

Fig. 1 Principle of D-band mm-wave vector signal generation based on an intensity modulator.

(a) Principle of mm-wave vector signal generation; (b) precoding RF signal generation

首先,激光器输出一个频率为  $f_c$  的连续波,并由一个频率为  $f_s$  的射频信号驱动强度调制器(IM),该 IM 为 MZM。图 1(b)为产生频率为  $f_s$  的预编码射频信号的过程,该信号由 MATLAB 编程实现。伪随机二进制序列(PRBS)首先经过正交振幅调制(QAM)来调制,接着进行相位预编码,最后通过上变频到射频频段。假设在频率  $f_c$  处的连续光输出与在频率为  $f_s$  处的驱动射频信号分别为

$$E_{CW}(t) = K_1 \exp(j2\pi f_c t), \quad (1)$$

$$E_{RF}(t) = K_2(t) \sin[2\pi f_s t + \varphi(t)], \quad (2)$$

其中  $K_1$  为连续波恒定的幅度,  $K_2$  和  $\varphi$  分别表示驱动射频信号的幅度和相位。当信号为恒定幅度矢量调制(例如 QPSK)时,  $K_2$  随时间不变;当采用 8QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 和 16QAM 等高阶 QAM 调制时,  $K_2$  具有几个不同的值。为了简化系统,假设调制器有无限消光比,此时  $K_2$  不变。

MZM 的外加调制电压由信号驱动电压  $V_{driver}$  和直流偏置电压  $V_{DC}$  组成。在理想状态下,忽视 MZM 的插入损耗,则 MZM 输出的光信号表达式为

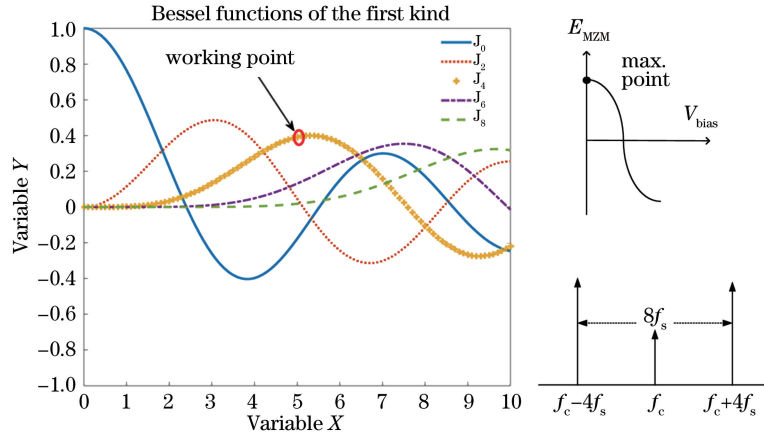


图 2 偶数阶贝塞尔函数曲线(右上图给出 MZM 的功率点,右下图表明经过光子混合器(PM)之后 D 波段毫米波信号产生)  
Fig. 2 Even-order Bessel function curves (The upper right diagram shows the power points of the MZM, and the lower right diagram shows the D-band millimeter wave signal generation after passing through the photon mixer)

$$E_{out}(t) = \frac{1}{2} E_{in}(t) \times \left[ \exp\left(j\pi \frac{V_{driver} + V_{DC}}{V_{\pi}}\right) + \exp\left(-j\pi \frac{V_{driver} + V_{DC}}{V_{\pi}}\right) \right] = E_{in}(t) \cos\left(\pi \frac{V_{driver}}{V_{\pi}} + \pi \frac{V_{DC}}{V_{\pi}}\right), \quad (3)$$

通过雅可比-安格尔恒等式

$$\exp(jx \cos \theta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n J_n(x) \exp(jn\theta), \quad (4)$$

可以将 MZM 的输出信号展开为贝塞尔级数,其中  $J_n(x)$  为第一类整数阶贝塞尔(Bessel)函数。通过调整 MZM 的偏置电压来抑制奇阶边带。当 MZM 功率点偏置在其最大传输点时,奇数阶光边带被抑制。此时偶阶贝塞尔函数曲线如图 2 所示,当  $x \approx 5$ ,  $J_0(x)$ ,  $J_2(x)$ ,  $J_6(x)$ ,  $J_8(x)$  均小于  $J_4(x)$  时,可实现载波抑制调制<sup>[21]</sup>,并产生两个频率相差为  $8f_s$  的射频源。在不考虑幅度比较小的其他阶数边带的信号后,MZM 的输出可以表示为

$$E_{MZM}(t) \approx 2jK_1 \{ J_{-4}(k) \exp[j2\pi(f_c - 4f_s)t - j4\varphi(t)] + J_{+4}(k) \exp[j2\pi(f_c + 4f_s)t + j4\varphi(t)] \}, \quad (5)$$

其中  $k = \pi \frac{V_{drive} K_2}{V_{\pi}}$ ,  $V_{\pi}$  为 MZM 的半波电压。当生成的载波在光子混合器(PM)中进行外差混合后,两个频率相距  $8f_s$  的毫米波产生。经过 PM 之后输出的信号可表示为

$$i_{RF}(t) = \frac{1}{2} R J_4^2(k) \cos[2\pi 8f_s t + 8\varphi(t)], \quad (6)$$

其中  $R$  表示 PM 的灵敏度。从(6)式可以看到输出的射频信号频率  $8f_s$  是驱动射频信号频率  $f_s$  的

8 倍。

通过上述分析,基于本研究提出的方案实现了射频信号的倍频,并且减少了发射端对电子组件的带宽需求。由于信号在经过 PM 之后倍频会导致相位多倍增加,为了直接获得 PM 转换后的 QPSK 信号的相位信息,需要在发送端对驱动射频信号的相位进行预编码。驱动射频信号的相位应满足  $\varphi_{date} = 8\varphi$ , 其中  $\varphi$  表示原始信号的相位。

### 3 实验系统介绍

本文搭建的 D 波段矢量毫米波传输系统的实验装置如图 3(a)所示。图 3(b)为实验中的照片,图 3(c)为实验时发射端的照片,图 3(d)为实验时接收端的照片。在发射端,首先由一个线宽小于 100 kHz 的外腔激光器(ECL)产生功率为 10 dBm、波长为 1526.316 nm 的连续光(CW)作为光载波。之后经过一个 IM,该 IM 为一个具有 30 GHz,3 dB 带宽的 MZM。MZM 的插入损耗为 3.9 dB,消光比为 31 dB,半波电压为 2.8 V。

在实验中,传输的原始信号通过 MATLAB 产生一个频率为 19 GHz 的 QPSK 信号。对于该 QPSK 信号,采用预编码使其相位为常规 QPSK 符号的相位的 1/8。图 4 给出了传输过程中原始信号以及预编码后的星座图,其中图 4(a)为原始 QPSK 信号的星座图,图 4(b)为预编码之后 QPSK 信号的星座图,从中可观察到预编码后相位满足原始信号相位的 1/8。该信号由数模转换器(DAC)以 80 GSa/s 的采样率转换为模拟信号。射频信号(RF)完成数模转换后,使用带宽为 17~27 GHz 的放大器(EA)放大。EA 的饱和输出功率为

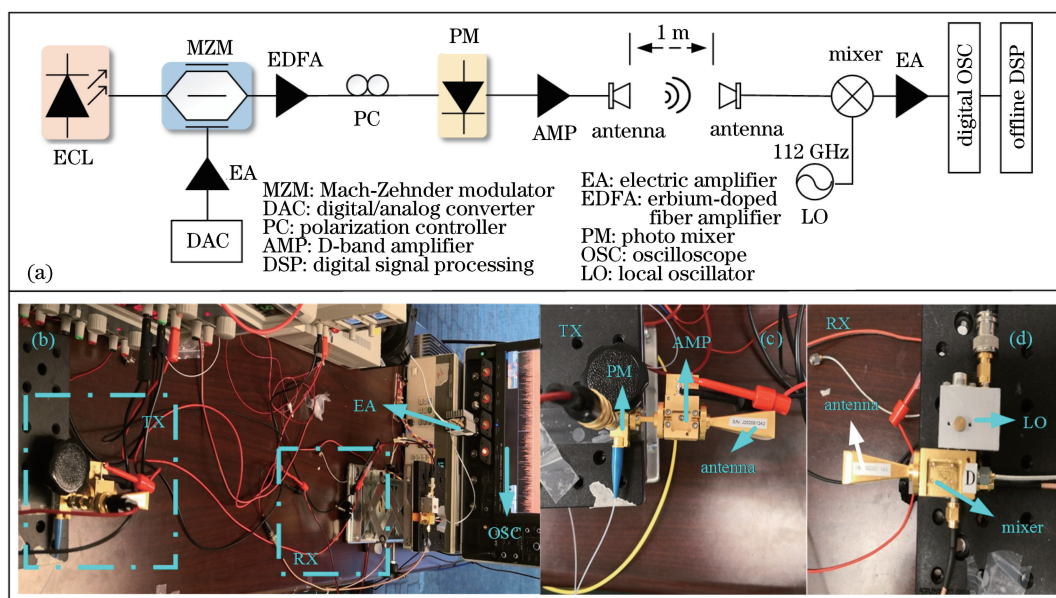


图 3 基于 IM 的 D 波段矢量毫米波系统的实验装置及实验图片。(a) 系统装置图；  
(b) 整个系统传输照片；(c) 发射端照片；(d) 接收端照片

Fig. 3 Experimental setup and photos of the D-band signal based on IM. (a) Experimental setup;  
(b) photo of the transmission system; (c) photo of the transmitter ends; (d) photo of the receiver end

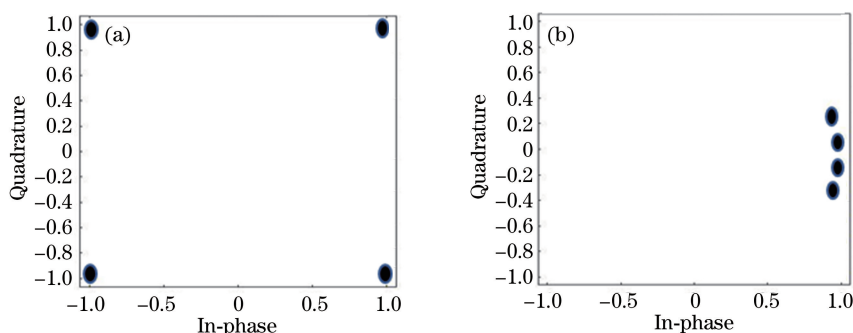


图 4 发射端原始信号以及预编码后的星座图。(a) 原始信号的星座图；(b) 预编码之后的星座图

Fig. 4 Original and precoded constellations for signal at the transmitter. (a) Original constellation;  
(b) constellation after precoding

31 dBm, 以驱动 MZM 偏置在其最大传输点。此时, 输出 MZM 的信号的光功率为 -2 dBm。接着将信号使用掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大光功率, 由于光电接收机对于偏振敏感, 故利用偏振控制器 (PC) 来调整光信号的偏振状态, 使光电接收机产生最大的毫米波信号。最终, 光信号通过带宽为 110~170 GHz 的 PM 光电转换为 D 波段毫米波信号<sup>[2]</sup>, 并由增益为 30 dB 的低噪声放大器 (AMP) 放大。该 AMP 在整个 D 波段都有大于 25 dB 增益, 其噪声系数小于 6 dB。毫米波信号通过 D 波段天线 (25dBi 增益) 传输到自由空间中<sup>[2]</sup>。在发送与接收的天线两端, 均采用了平凸透镜, PTFE (thorlabs 公司产品, 透镜直径为 10 cm, 焦距为 20 cm) 凸透镜用以聚焦信号, 并经过 1 m 的无线距离传送。

在接收端收集毫米波信号后, 将 112 GHz 的 RF 电源用作本地振荡器 (LO) 并对信号进行下变频<sup>[2]</sup>。此时信号的中频为  $(19 \times 8) - 112 = 40$  GHz, 由具有直流约 50 GHz 带宽的 EA 放大, 最终由带宽为 45 GHz, 采样率为 120 GSa/s 的示波器 (OSC) 捕获。捕获的信号通过离线数字信号处理 (DSP) 后进行误码计算, 其中 DSP 包括下变频、恒模算法 (CMA) 及后均衡、载波恢复 (包括载波频率和相位恢复)<sup>[2,10]</sup>。

## 4 分析与讨论

本实验中的 QPSK 信号其波特率为 4 GBaud, 经过八倍频后产生了 152 GHz 的 D 波段矢量毫米波信号。图 5 为信号输出 MZM 时的光谱图, 从中

可观察到 MZM 生成了几个具有固定频率的光载波,而两个光功率最大峰值之间(四阶谐波)的频率距离为  $8 \times 19 = 152$  GHz,其中心光载波抑制比为 8 dB。接着 2 个四阶谐波通过 PM 拍频后产生 152 GHz 的矢量毫米波信号。由于其他阶谐波分量对于信号有一定的影响,通常使用光学滤波器滤除中心载波和其他谐波分量来提高系统性能。然而光学滤波器的价格比较昂贵且波长不透明,很大

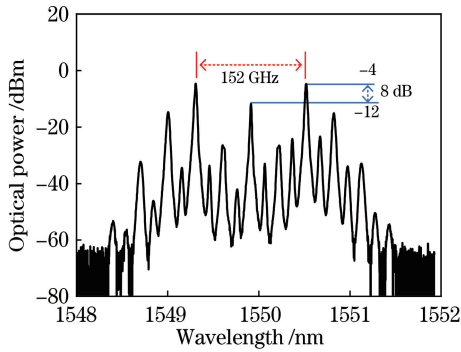


图 5 光信号输出 MZM 时的光谱图

Fig. 5 Optical spectrum of the optical signals after MZM

程度上提高了成本且牺牲了系统的灵活度。为了研究该信号在不使用滤波器的情况下是否能够成功解调,本文分析了接收端信号的误码率。

图 6(a)给出频率为 152 GHz,带宽为 4 GBaud 的 QPSK 信号通过 1 m 的无线传输时,BER 与 PM 输入功率之间的关系。图 6(b)给出 40 GHz 中频信号的频谱图。由图 6 可知,当输入功率增加时,信噪比增加,同时 BER 降低。受 PM 和低噪声放大器饱和效应的影响,BER 在输入 PM 功率超过 4 dBm 后增大。同时可观察到信号的 BER 虽然无法满足硬判决前向纠错(FEC)门限阈值( $3.8 \times 10^{-3}$ ),但是当输入功率为 4 dBm 时,接收端信号的 BER 低于软判决 FEC 门限阈值( $1.0 \times 10^{-2}$ )。即经过软判决 FEC 算法后(去除 20%软判决开销后)可实现无误码传输<sup>[20]</sup>,这说明本方案产生的毫米波具有的中心载波抑制功能,起到了光学滤波的作用,且并不影响信号的解调。该方案不仅节省了使用滤波器器件的成本,同样也增加了系统的灵活度。

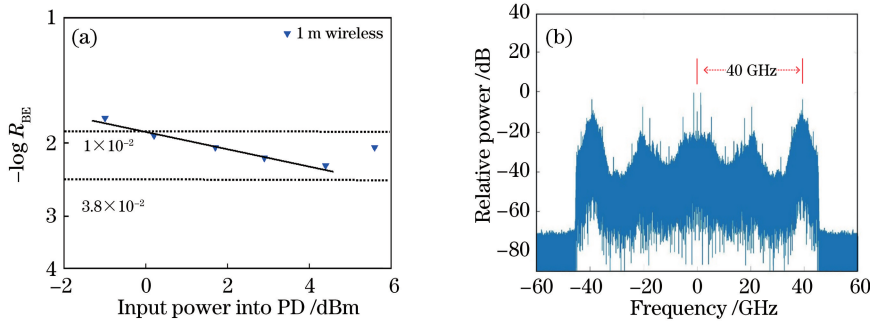


图 6 152 GHz 4 GBaud QPSK 信号误码率与 PM 输入功率的曲线图和 40 GHz 中频信号的频谱图。

(a) QPSK 信号误码率与 PM 输入功率的曲线图;(b) 40 GHz 中频信号的频谱图

Fig. 6 BER change with input power into PM for 152 GHz 4 GBaud QPSK signal and spectrum of the 40 GHz IF signal.

(a) BER of QPSK signal versus input power into PM; (b) spectrum of the 40 GHz IF signal

图 7 给出了当 PM 输入功率为 4 dBm 时,4 GBaud 的 QPSK 信号经过 1 m 的无线传输后,接收到的信号通过 DSP 时的星座图。其中,图 7(a)为

接收到的信号星座图,接着经过一系列算法完成解调恢复信号。图 7(b)为经过两倍过采样后信号的星座图,从中可观察到其星座点向外发散。图 7(c)

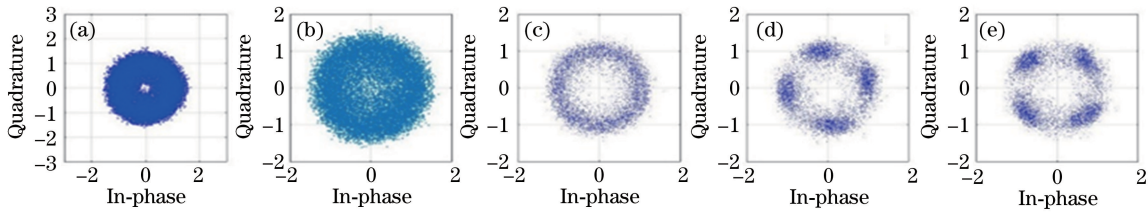


图 7 QPSK 信号经过 DSP 时的星座图。(a)接收到的信号;(b) 经过两倍采样后的信号;

(c) CMA 及后均衡后的信号;(d) 频偏估计后的信号;(e) 相偏估计后的信号

Fig. 7 Constellations for QPSK signal at the receiver. (a) Received signal; (b) signal after double oversampling; (c) signal after CMA and post-equalization; (d) signal after frequency offset estimation; (e) signal after carrier phase estimation

为通过 CMA 及后均衡算法后的星座图。与图 7(b)相比,图 7(c)的星座点更收敛、更稳定。图 7(d)为频率恢复后的星座图,可观察到经过频率恢复后的星座点明显收敛为 4 个点,但相位有所偏移导致形状不规则。随后进行了相位估计,图 7(e)即为相位恢复后的星座图,从中可观察到星座图演变成界限清晰的 4 个点。此时,接收到的信号可通过软判决 FEC 算法实现无误码解调。因此该系统没有使用光滤波器来抑制其他阶数谐波分量,在不影响系统性能的前提下减少了系统链路成本。

## 5 结 论

提出了一种基于单个强度调制器实现光子八倍频产生 D 波段矢量毫米波的新方法。该方法可以产生高达 152 GHz 的 D 波段矢量毫米波信号,对 19 GHz 的矢量射频信号进行适当的预编码后,通过实验验证了 152 GHz 4 GBaud 的 QPSK 信号的产生和传输。在经过 1 m 的无线传输后,接收到 QPSK 信号的误码率低于软判决 FEC 门限阈值 ( $1.0 \times 10^{-2}$ )。此外,该方案的中心载波抑制功能,起到了光学滤波的作用,不但降低了系统的成本,而且增加了灵活度。在光载无线通信的热潮下,作者相信为了进一步降低 ROF 系统链路成本并产生更高频的信号,该方法在数字信号处理算法方面还有很大的发展空间。

## 参 考 文 献

- [1] Ruanbin Z, Song Y, Tianwei J, et al. Precoding research on vector signal 16QAM applied in the frequency doubling scheme of ROF link [C] // Asia Communications & Photonics Conference, Beijing, China, Washington, D. C.: Optical Society of America, 2013, AF2F: AF2F.2.
- [2] Wang K H, Yu J J. Demonstration of a multi band millimetre wave system at D band [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(5): 798-802.  
王凯辉, 余建军. 多频带的 D 波段毫米波通信 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(5): 798-802.
- [3] Lannoo B, Colle D, Pickavet M, et al. Radio-over-fiber-based solution to provide broadband Internet access to train passengers [J]. IEEE Communications Magazine, 2007, 45(2): 56-62.
- [4] Li X Y, Xiao J N, Xu Y M, et al. Frequency-doubling photonic vector millimeter-wave signal generation from one DML [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 1-7.
- [5] Zhao L, Yu J G, Chen L, et al. 16QAM vector millimeter-wave signal generation based on phase modulator with photonic frequency doubling and precoding [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(2): 1-8.
- [6] Zhang H Z, Cai L, Xie S X, et al. A novel radio-over-fiber system based on carrier suppressed frequency eightfold millimeter wave generation [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(5): 1-6.
- [7] Chun-Ting Lin, Po-Tsung Shih, Wen-Jr Jiang, et al. Photonic vector signal generation at microwave/millimeter-wave bands employing an optical frequency quadrupling scheme [J]. Optics Letters, 2009, 34(14): 2171-2173.
- [8] Li X Y, Yu J J, Zhang J W, et al. QAM vector signal generation by optical carrier suppression and precoding techniques [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(18): 1977-1980.
- [9] Wells J. Faster than fiber: the future of multi-G/s wireless [J]. IEEE Microwave Magazine, 2009, 10(3): 104-112.
- [10] Yu J J. Millimeter wave communication technology based on photon assistance [M]. Beijing: Science Press, 2018: 28-65.  
余建军. 光子辅助的毫米波通信技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2018: 28-65.
- [11] Liu L M, Dong Z, Pi Y Z, et al. Radio-over-fiber system for frequency-quadrupled millimeter-wave generation by external modulator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(1): 148-153.  
刘丽敏, 董泽, 皮雅稚, 等. 采用外调制器产生四倍频的光载毫米波光纤无线通信系统 [J]. 中国激光, 2009, 36(1): 148-153.
- [12] Chen L X, Lu J, Dong Z, et al. A radio over fiber system based on two external modulator for optical millimeter generation with photonic frequency quadruple [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(12): 1910-1913.  
陈罗湘, 卢嘉, 董泽, 等. 采用两个级联外部调制器产生四倍频光载毫米波的光纤无线通信系统 [J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1910-1913.
- [13] Zhu Z H, Zhao S H, Yao Z S, et al. Generation of frequency quadruple optical millimeter-wave signal to overcome chromatic dispersion [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(4): 0405004.  
朱子行, 赵尚弘, 么周石, 等. 一种克服色度色散影响的四倍频光毫米波信号产生方法 [J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0405004.
- [14] Xu G, Zheng X P, Zhang H Y. Frequency quadrupling for single-sideband optical millimeter-wave up conversion [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30

- (12): 3386-3390.
- 徐刚, 郑小平, 张汉一. 基于四倍频技术的单边带光载毫米波上变频[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3386-3390.
- [15] You H D, Ning T G, Li J, et al. Optical single sideband modulation radio over fiber system with tunable carrier-to-sideband ratio based on long period fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706008.
- 油海东, 宁提纲, 李晶, 等. 基于长周期光纤光栅载边比连续可调的单边带调制光载无线通信系统[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706008.
- [16] Jia Z N, Ning T G, Li J. Millimeter-wave optical generation in ROF system [J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2011(5): 35-38.
- 贾照娜, 宁提纲, 李晶. ROF 系统中毫米波光学生成方法的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2011(5): 35-38.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Xue Z Z, Pei L, Xie Y H, et al. Filterless 24-tupling frequency millimeter-wave generator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1006001.
- 薛壮壮, 裴丽, 解宇恒, 等. 无滤波 24 倍频光载毫米波发生器[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1006001.
- [20] Chang D Y, Yu F, Xiao Z Y, et al. LDPC convolutional codes using layered decoding algorithm for high speed coherent optical transmission [C] // OFC/NFOEC, March 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012: 1-3.
- [21] 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.