

## 带预编码的六倍频矢量毫米波信号产生和探测

刘翠微<sup>1,2\*</sup>, 余建军<sup>1,2</sup>, 熊良明<sup>3</sup>, 罗杰<sup>3</sup><sup>1</sup>复旦大学信息科学与工程学院通信科学与工程系, 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;<sup>3</sup>长飞光纤光缆股份有限公司, 湖北 武汉 430073

**摘要** 提出了一种基于四波混频以及平衡预编码产生光子六倍频矢量毫米波信号的方案。该方法利用单个强度调制器的载波抑制调制以及 1 km 高非线性色散位移光纤发生四波混频以实现六倍频, 结合平衡预编码产生了 72 GHz 载频的四相相移键控(QPSK)的矢量毫米波信号, 很大程度上降低了系统的成本。通过实验演示了 2 Gbaud, 72 GHz QPSK 矢量毫米波信号的产生, 同时研究了 QPSK 信号不同波特率以及光纤传输长度分别对信号的影响。实验结果表明, 在 15 km 光纤和 1 m 的无线传输下, 当输入光电探测器的光功率大于 -6.3 dBm, QPSK 信号波特率不高于 2.5 Gbaud 时, 信号的误码率低于硬判决前向纠错门限阈值, 可实现无误码传输。

**关键词** 光通信; 毫米波; 四波混频; 预编码; 六倍频

中图分类号 TN928

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0906006

## 1 引言

随着无线通信应用的发展, 光载无线系统也渐渐地崭露头角, 在接入、本地网领域中的应用越来越多<sup>[1-5]</sup>。光载无线系统能够结合光纤通信和无线通信的优点, 实现超大容量、长距离传输和宽带融合接入。而毫米波通信的高质量传输以及极宽的带宽可以缓和目前频段越来越拥挤的状况并实现高速数据的传送<sup>[6-12]</sup>。在过去的研究中, 光子辅助毫米波的常用产生方案主要有: 直接调制技术、外部调制技术以及光外差技术<sup>[13-19]</sup>。为了克服器件的带宽限制以及满足低成本需求, 使用低射频(RF)信号和强度调制器产生矢量毫米波已经成为一大热点<sup>[20-24]</sup>。在文献[10]中, 基于马赫-曾德尔调制器(MZM)实现载波抑制调制产生了二倍频信号, 实验分别演示了 1 Gbaud, 6 GHz 四相相移键控(QPSK) QPSK/8 进制正交幅度调制(8QAM)/16 进制正交幅度调制(16QAM)的预编码 RF 信号经过二倍频产生 1 Gbaud, 12 GHz 矢量毫米波信号。同时为了解决倍频所产生的相位倍增, 该方案对射频信号进行了预编码, 信

号相位是常规相位的 1/2。为了进一步优化倍频下不同预编码对信号的影响, 在文献[11]中对平衡预编码技术和非平衡预编码技术进行了比较, 文中指出: 对于低阶 QAM 调制, 平衡预编码技术的性能比不平衡预编码技术更好<sup>[12]</sup>; 然而在高阶 QAM 调制中, 由于器件的不对称输出和有限带宽, 以及随机非对称分散的信号星座点的旋转和重叠, 平衡预编码技术的性能比不平衡预编码技术差。为了产生更高倍频的信号, 在文献[13]中, 提出了一种基于双平行马赫-曾德尔调制器(DPMZM)和高非线性光纤(HNLF)的四波混频(FWM)效应产生 24 倍频光生毫米波方案。实验通过频率为 2.5 GHz 的射频驱动信号实现 24 倍频后得到了 60 GHz 毫米波输出。然而使用 DPMZM 的成本太高, 且该方案对毫米波的传输性能以及影响因素都缺乏研究。

针对上述问题, 本文使用一个强度调制器(IM)产生了载波抑制的毫米波信号, 将产生的载波抑制矢量毫米波信号在高非线性色散位移光纤中进行四波混频, 达到了增加毫米波频率的目的。该方案不仅极大地降低了系统成本, 还可以降低对矢量射频信号频

收稿日期: 2020-09-14; 修回日期: 2020-11-18; 录用日期: 2020-12-08

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

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

率和光电器件带宽的需求。为了更好地解调信号在传输过程中产生的畸变,使用了平衡预编码算法。通过实验验证了 12 GHz 的射频信号六倍频产生 72 GHz 的 2 Gbaud QPSK 信号通过 15 km 单模光纤以及 1 m 的无线传输后,能够保持无误码稳定传输。

## 2 基本原理

图 1 展示了光子六倍频矢量毫米波信号产生的系统原理。该系统的关键器件由强度调制器(IM)与超非线性色散位移光纤(HNL-DSF)组成。首先,基于激光器(ECL)产生一路频率为  $f_m$  的连续激光接入 IM 光输入端,再通过 MATLAB 编码产生一个频率为  $f_c$ 、相位为  $\varphi_{\text{data}}$  的射频(RF)信号,输出

ECL 的简易光谱图与 RF 的简易频谱图如图 1(a)和图 1(b)所示。

需要注意的是,由于该方案输出信号的频率将变为  $6f_c$ ,其相应输出信号的相位将变为  $6\varphi_{\text{data}}$ <sup>[14]</sup>。为了使其最后输出信号的相位等于 QPSK 星座图的相位角  $\varphi$ ,即  $\frac{1}{4}\pi, \frac{3}{4}\pi, \frac{5}{4}\pi, \frac{7}{4}\pi$ ,在 MATLAB 中产生 RF 信号时,采用平衡预编码方案进行了研究<sup>[11-12]</sup>。驱动 RF 矢量信号的相位  $\varphi_{\text{data}}$  应满足

$$\varphi_{\text{data}} = \frac{1}{6} (\varphi + 2m\pi), m = 0, 1, 2, 3, 4, 5. \quad (1)$$

如图 2(a)为 QPSK 信号的星座图,图 2(b)为平衡预编码后 QPSK 信号的星座图。

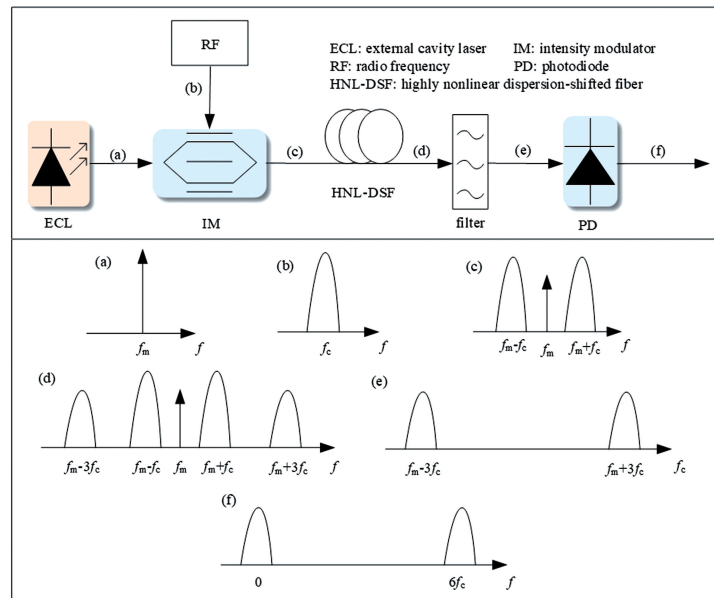


图 1 光子六倍频矢量毫米波信号产生的系统原理。(a)输出 ECL 的简易光谱图;(b)RF 的简易频谱图;(c)输出 IM 的简易光谱图;(d)输出 HNL-DSF 的简易光谱图;(e)输出滤波器的简易光谱图;(f)输出光电探测器的简易光谱图

Fig. 1 Principle diagrams of six-fold frequency vector millimeter wave signal generation. (a) Output simple spectrum of ECL; (b) simple spectrum of RF; (c) output simple spectrum of IM; (d) output simple spectrum of HNL-DSF; (e) output simple spectrum of filter; (f) output simple spectrum of PD

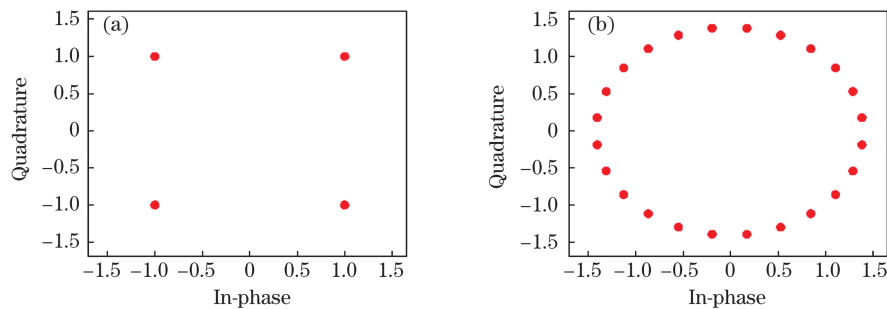


图 2 发射端原始信号以及预编码后 QPSK 信号星座图。(a)原始的 QPSK 信号星座图;(b)平衡预编码之后 QPSK 信号星座图

Fig. 2 Original and precoding QPSK signal constellation for signal at the transmitter. (a) Original QPSK signal constellation diagram; (b) QPSK signal constellation diagram after balanced precoding

将 RF 信号作为驱动信号加载到 IM 上,并调制到连续激光上,此时将 IM 偏置在功率最大的传输点上,直流电压  $V_{DC}$  置为  $1/(2V_{\pi})$ ,其中  $V_{\pi}$  为 IM 的半波电压,可实现奇数子载波调制<sup>[9]</sup>。通过雅可比-安格尔恒等式  $\exp(jx \cos \theta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n J_n(x) \times \exp(jn\theta)$ ,可将 IM 的输出转化为第一类贝塞尔级数,其中  $J_n(x)$  为第一类贝塞尔函数, $n$  为整数,表示第  $n$  阶贝塞尔函数。此时由第一类贝塞尔函数曲线  $J_n(k)$  (如图 3 所示),可以观察到当  $k \approx 1.9$  时,  $J_0(k)$ ,  $J_2(k)$ ,  $J_3(k)$ ,  $J_4(k)$  均小于  $J_1(k)$ ,此时一阶子载波非常高,由  $k = \pi V_{RF}/V_{\pi}$  可知,通过调节驱动电压  $V_{RF}$  可实现载波抑制调制<sup>[9]</sup>,并产生两个频率差为  $2f_c$  的射频源。在不考虑幅度比较小的其他阶数边带的信号情况下,信号输出 IM 的简易光谱图如图 1(c) 所示。

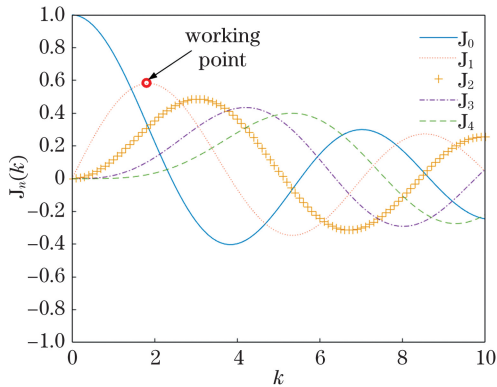


图 3 第一类贝塞尔函数曲线

Fig. 3 The first kind of Bessel function curves

将信号在 HNL-DSF 上传输实现了 FWM<sup>[15]</sup>。FWM 是非线性光学中的互调现象,即其中两个或三个波长之间的相互作用产生一个或两个新的波长。在 HNL-DSF 中产生的新波长频率可表示为

$$\nu_{idler} = \nu_{p1} + \nu_{p2} - \nu_{probe}, \quad (2)$$

式中,  $\nu_{p1}$  和  $\nu_{p2}$  是泵浦光频率,  $\nu_{probe}$  是探测光频率。为了得到一个高效的 FWM 过程,需要满足相位匹配条件,即

$$\beta(\nu_{idler}) + \beta(\nu_{probe}) = \beta(\nu_{p1}) + \beta(\nu_{p2}), \quad (3)$$

式中,  $\beta$  是传播系数。可通过选择接近光纤零色散波长的泵浦波长来满足 (3) 式的相位匹配条件。(2) 式、(3) 式分别对应能量守恒和动量守恒方程。

由于本方案只有两种不同频率的波在光纤中传播,因此会出现部分退化的 FWM,其中 (2) 式可简化为

$$\nu_{idler} = 2\nu_p - \nu_{probe}, \quad (4)$$

此时,当这两个调制的边带频率传输到 HNL-DSF

中时,其中一个要么作为泵浦波,要么作为探测光,产生的两个新的光信号表达式为

$$\nu_{idler1} = 2\nu_p - \nu_{probe} = 2(f_m + f_c) - (f_m - f_c) = f_m + 3f_c, \quad (5)$$

$$\nu_{idler2} = 2\nu_p - \nu_{probe} = 2(f_m - f_c) - (f_m + f_c) = f_m - 3f_c. \quad (6)$$

图 1(d) 为输出 HNL-DSF 的简易光谱图,由图可以观察到两个新的光信号  $\nu_{idler1}$  与  $\nu_{idler2}$  之间的频率差为  $6f_c$ 。由于两种不同频率波的功率并没有完全传输到两个新的信号上,因此将信号传入一个光滤波器(陷波滤波器)。输出滤波器的简易光谱如图 1(e) 所示,此时将滤去两个新的子载波中间的其他载波,使得两个最大功率信号的间隔为  $6f_c$ 。最后,在输入光电探测器(PD)中进行光电转换产生频率为  $6f_c$  的矢量毫米波信号,输出 PD 的简易频谱如图 1(f) 所示。在下一部分实验中,进一步通过实验验证该方案的可行性,并通过矢量毫米波的光纤无线传输验证信号的质量。

### 3 实验系统介绍

基于以上矢量毫米波产生原理搭建的实验平台如图 4 所示,展示了六倍频矢量毫米波产生及传输系统的实验装置及实验图片。其中图 4(a) 为矢量毫米波传输装置图,图 4(b) 为传输实验时的照片,图 4(c) 为发送端的照片,图 4(d) 为接收端的照片。

在发送端中,首先从一个波长可调的 ECL 产生一个功率为 13 dBm、波长为 1556.05 nm 的连续激光(CW),接着经过一个 30 GHz 带宽的 IM,该 IM 为一个半波电压为 3 V、带宽为 30 GHz 的马赫-曾德尔调制器(MZM)。实验中传输的原始信号是利用平衡预编码产生的一个 RF 信号,之后输入采样率为 24 GSa/s、型号为 Tektronix 7122C 的任意波形发生器(AWG),产生一个频率为 12 GHz、带宽为 2 Gbaud、信号长度为  $2^9 - 1$  的 QPSK 信号。RF 经过一个带宽约为 40 GHz、驱动直流电压为 8 V 的电放大器(EA)放大,之后作为驱动信号载入 MZM 产生二倍频信号,此时 MZM 偏置在其最大传输点上。信号输出 MZM 时的功率为 5 dBm,接着将信号传入到带宽为 50~100 GHz、抑制比为 30 dB 的陷波滤波器 1(IL1)中,以去除载波周围的其他谐波分量。使用一个掺铒光纤放大器(EDFA)将信号功率放大到 14 dBm 后,将光信号传入 1 km 的 HNL-DSF 中传输发生 FWM 并产生两个新的载波,该

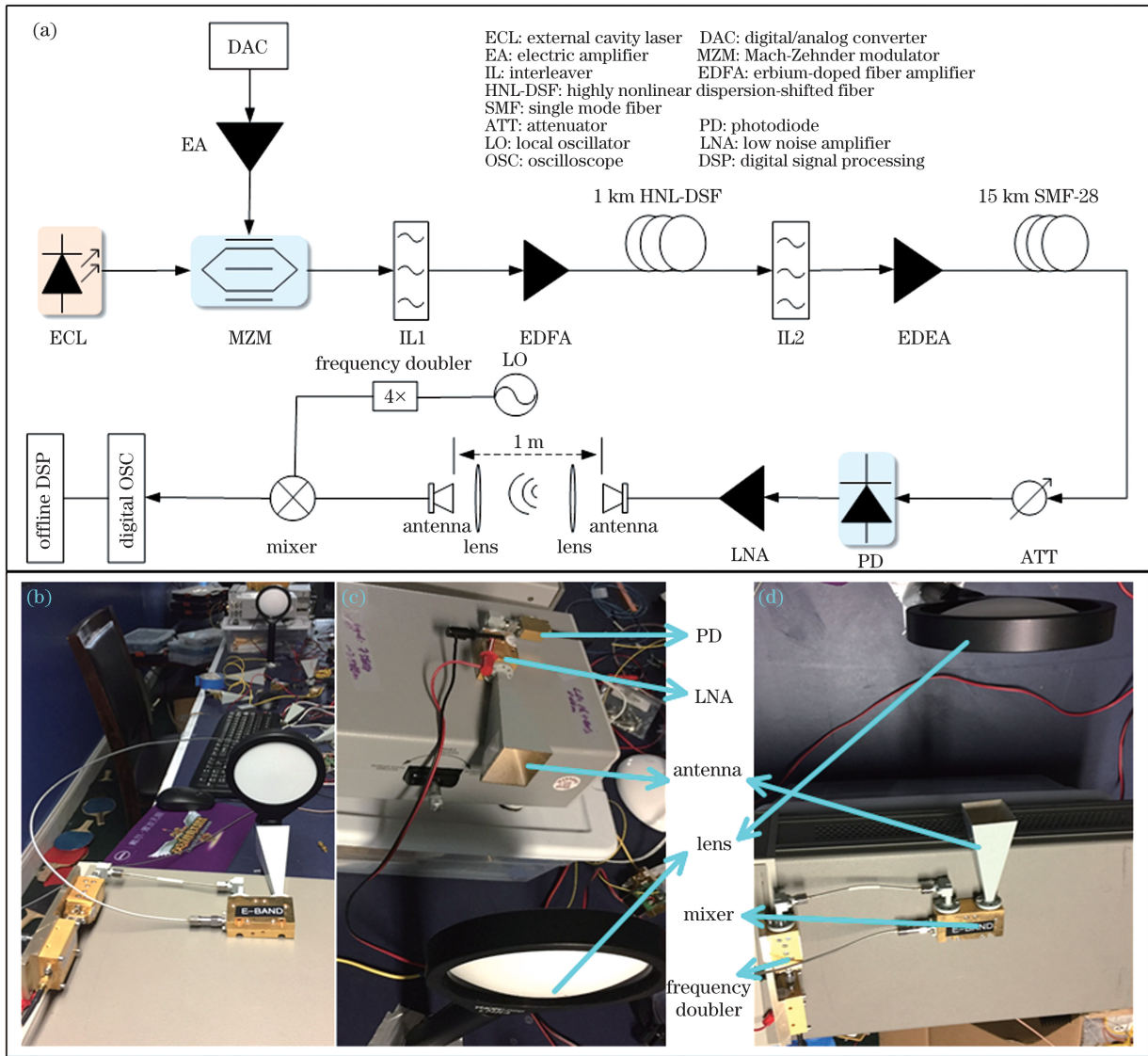


图 4 六倍频矢量毫米波产生及传输系统的实验装置及实验图片。(a) 传输装置图; (b) 传输系统照片; (c) 发射端照片; (d) 接收端照片

Fig. 4 Experimental setup and photos of the generation and transmission of six-fold frequency vector millimeter wave system. (a) Transmission setup; (b) photo of the transmission system; (c) photo of the transceiver ends; (d) photo of the receiver end

HNL-DSF 的零色散波长为 1555 nm。将光信号再次传输到一个带宽为 50 ~ 100 GHz、抑制比为 30 dB 的 IL2 中, 滤去两个新的载波中间的载波分量后产生六倍频光信号。再使用 EDFA 将信号功率放大后传入 15 km 长的单模光纤中。

在接收端中, 信号进入一个功率可调的光衰减器(ATT)以控制载入 PD 的功率大小。使用带宽为 75 GHz 的 PD 进行光电转换后产生一个六倍频矢量毫米波信号。并利用一个增益为 30 dB、带宽为 70 ~ 75 GHz 的 V 波段低噪声放大器(LNA)放大该信号。之后通过一个增益为 25 dBi 的 V 波段天线发射信号到自由空间中, 在发送与接收天

线两端分别使用两个平凸透镜, PTFE(thorlabs 公司产品, 透镜直径 10 cm, 焦距 20 cm) 凸透镜用以聚焦信号。传输 1 m 无线后使用同样的 V 波段天线接收信号。将频率为 16.5 Hz 的本地振荡器(LO) 经过一个 4 倍频器后与接收到的矢量毫米波信号同时传入混频器中进行混频, 将信号变成中频信号。接着将信号传入一个带宽为 40 GHz 的 EA 放大。最后将电信号通过采样率为 40 GSa/s、带宽为 13 GHz 的示波器(OSC) 中进行捕获。之后对捕获的信号进行离线数字信号处理(DSP), 包括下采样、恒模算法(CMA) 及后均衡, 以及载波恢复(包括载波频率和相位恢复) 后进行信号误码

率计算。

## 4 分析与讨论

本实验中的 RF 信号是频率为 12 GHz、波特率为 2 GBaud 的 QPSK 信号, 经过六倍频后产生了 72 GHz 的 V 波段矢量毫米波信号。为了更好地观察矢量毫米波信号的产生过程, 图 5 给出了实验过程中各器件输出光信号的光谱图, 其中图 5(a) 为 MZM 输出光信号的光谱图, 此时可以观察到光信号在经过调制器后产生了二倍频载波抑制信号, 且功率最高的两个载波频率之间相差 24 GHz。经过 IL1 后, 由图 5(b) 可以观察到二倍频信号两边的其他载波分量被大部分滤除, 由于滤波器的抑制比为 30 dB, 故不能将载波全部滤去。图 5(c) 为光信号经过 HNL-DSF 后的光谱图, 此时信号在 HNL-DSF 中发生 FWM 产生了两个新的光信号。再次利用 IL2 去掉中间两个原始子载波, 图 5(d) 给出了信号经过 IL2 后的光谱图, 即产生了六倍频信

号, 此时光功率谱中两个最大峰值之间的频率距离为  $6 \times 12 = 72$  GHz, 实现了光子六倍频矢量毫米波的产生。图 5(e) 为信号经过 EDFA 放大功率后的光谱图。图 6 为经过 LO 混频后中频信号的频谱图。

为了继续研究该信号在光纤无线传输系统中的信号质量, 继续分析经过光纤传输和无线传输后的信号误码率 (BER,  $R_{BE}$ )。

图 7 给出了频率为 72 GHz、带宽为 2 GBaud 的 QPSK 信号经过 1 m 的无线传输前通过不同长度光纤下 BER 与 PD 输入功率之间的关系。可以观察到光纤背靠背时与传输 15 km 光纤后的 BER 与 PD 输入功率之间的关系几乎一致, 这说明当信号经 15 km 光纤传输后信号无光纤色散代价。如图 7 可以观察到当 PD 输入功率大于  $-6.3$  dBm 时, 接收端信号的 BER 均低于硬判决前向纠错 (HD-FEC) 的门限阈值 ( $3.8 \times 10^{-3}$ )。此时信号经过 HD-FEC 算法后可实现无误码传输。因此基于

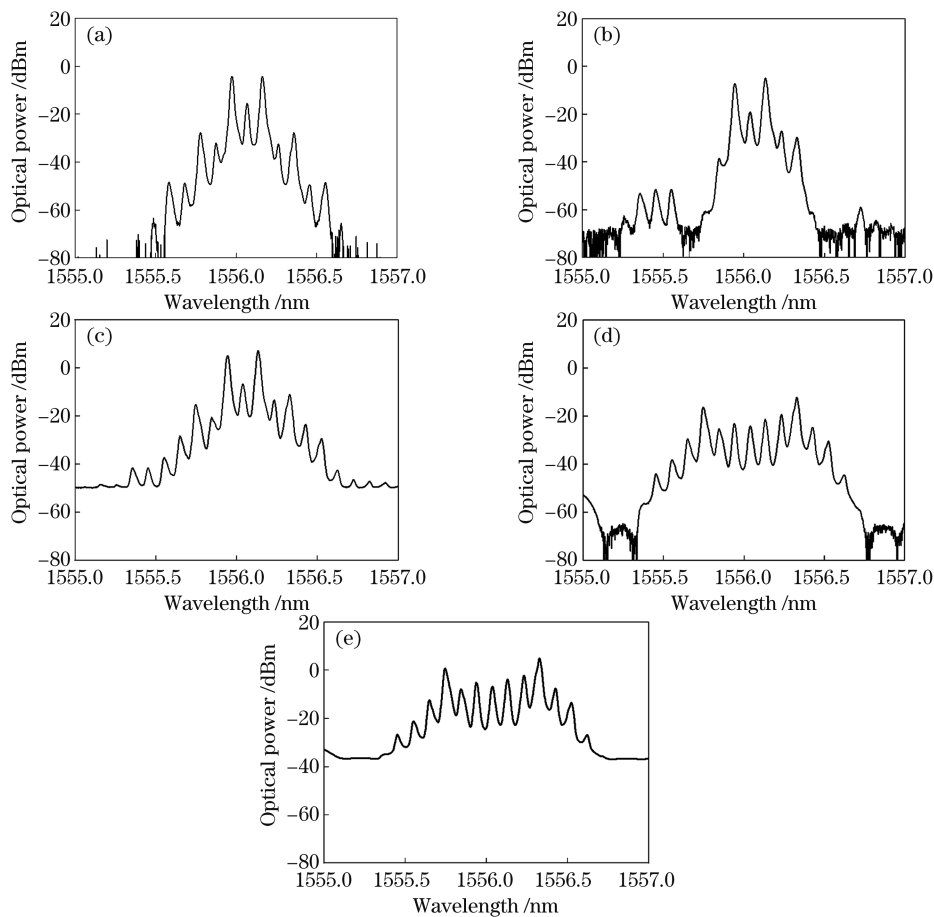


图 5 各器件输出光信号的光谱图。(a) MZM 输出光信号的光谱图; (b) IL1 输出光信号的简易光谱图; (c) HNL-DSF 输出光信号的光谱图; (d) IL2 输出光信号的光谱图; (e) EDFA 输出光信号的光谱图

Fig. 5 Optical spectra of the optical signals after optical devices. (a) Output spectrum of MZM; (b) output spectrum of IL1; (c) output spectrum of HNL-DSF; (d) output spectrum of IL2; (e) output spectrum of EDFA

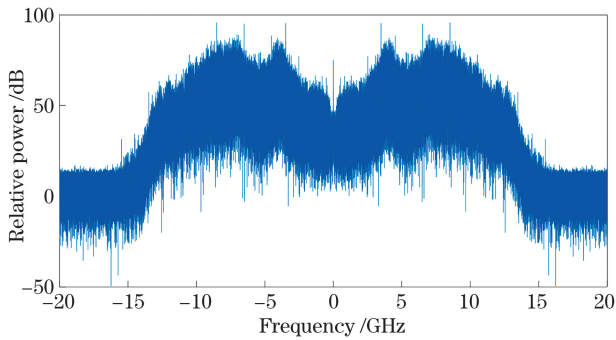


图 6 中频信号的频谱图

Fig. 6 Spectrum of the IF signal

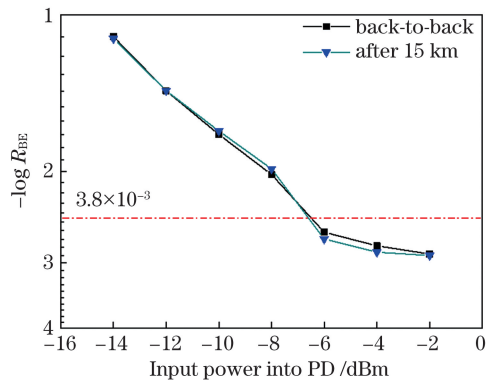


图 7 72 GHz, 2 GBaud, QPSK 信号 BER 与 PD 输入功率的曲线图

Fig. 7 BER versus input power into PD for QPSK signal with 72 GHz, 2 GBaud

该方案产生的矢量毫米波信号不仅价格低廉且拥有良好的信号质量,还降低了射频信号的频率,减小了光器件的带宽。

为了进一步观察信号在接收过程中的变化,以信号经 15 km 光纤以及 1 m 无线传输为例,当输入 PD 的光功率为 -3 dBm 时,接收到的 QPSK 信号通过 DSP 时的星座图如图 8 所示。图 8(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 8(b)为经过两倍下采样后信号的星座

图,可观察到其星座点向内收敛了一倍。图 8(c)为通过 CMA 算法及后均衡后的星座图,由于频偏和相偏的关系,星座图不清晰,并呈一个环形。图 8(d)为频率恢复后的星座图,频率恢复后的星座点逐渐收敛成 4 个点,但由于其相位有所偏移,导致形状不规则,因此对其进行了相位估计。图 8(e)即为相位恢复后的星座图,可观察到星座图已演变成界限清晰的 4 个点,此时接收到的信号可以通过 HD-FEC 算法实现无误码传输。

为了进一步探究该信号在光纤中的传输性能,实验讨论了在不同长度光纤传输下实现无误码传输所需要的最大接收机光功率。图 9 给出了基于该实验系统在不同光纤传输距离情况下,2 GBaud, 72 GHz QPSK 信号的 BER 维持在  $3.8 \times 10^{-3}$  所需要的接收机光功率,由图可以看出:在 15 km 前,为了使 BER 达到  $3.8 \times 10^{-3}$  所需要的光功率一直维持在 -6.3 dBm,基本没有功率代价;然而从 15 km 开始所需要的光功率越来越高,当传输距离为 30 km 时所需光功率达到了 3.3 dBm,具有极大的功率代价;最后实验到传输 65 km 时,由于光纤的色散走离效应,导致信号严重失真,结果发现接收到的信号无法恢复。同时,为了进一步研究信号波特率对传输实验的影响,本方案改变了 QPSK 信号的波特率,测量了在 15 km 光纤和 1 m 无线传输时不同波特率的 QPSK 信号的 BER 曲线。图 10 为在 15 km 光纤和 1 m 无线传输下,输入接收机光功率为 -2 dBm 时不同 QPSK 信号波特率的 BER 曲线,由图可以看出,波特率越小信号的误码率性能越好,当且仅当 QPSK 信号的波特率不高于 2.5 GBaud 时,BER 均低于 HD-FEC 的门限阈值 ( $3.8 \times 10^{-3}$ ),此时都可实现无误码传输。综上所述,可以说明基于该方案产生的矢量毫米波信号拥有良好的传输性能,不仅极大地降低了系统成本,还

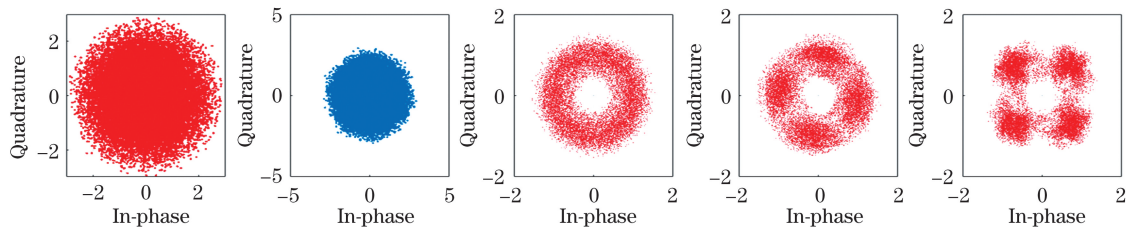


图 8 接收端 QPSK 信号经过 DSP 时的星座图。(a)接收到的信号;(b)经过两倍下采样后的信号;(c) CMA 及后均衡后的信号;(d)频偏估计后的信号;(e)相偏估计后的信号

Fig. 8 Constellations for QPSK signal after DSP at the receiver. (a) Received signal; (b) signal after two times down-sample; (c) signal after CMA and post-equalization; (d) signal after frequency offset estimation; (e) signal after carrier phase offset estimation

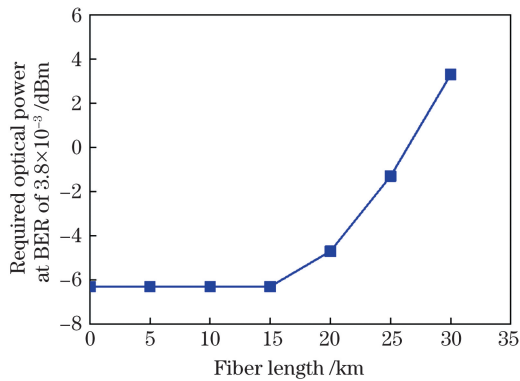


图 9 72 GHz, 2 GBaud QPSK 信号 BER 维持在  $3.8 \times 10^{-3}$  时所需的光功率与光纤长度的曲线图

Fig. 9 Required optical power at BER of  $3.8 \times 10^{-3}$  versus fiber length for QPSK signal with 72 GHz, 2 GBaud

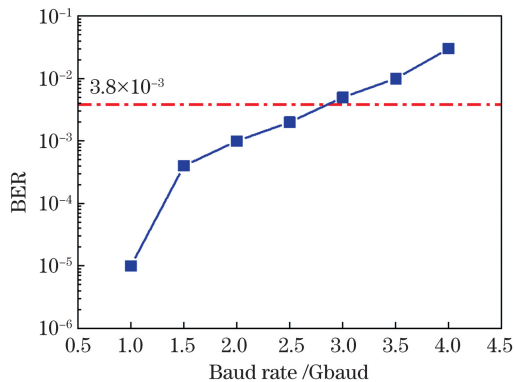


图 10 72 GHz QPSK 信号 BER 与信号波特率的曲线

Fig. 10 BER versus baud rate of QPSK signal with 72 GHz

降低了射频信号的频率,减小了光电器件的带宽。

## 5 结 论

提出一种带预编码的六倍频矢量毫米波信号产生方案。使用该方法对 12 GHz 的矢量射频信号进行适当的预编码后,通过 MZM 以及四波混频可以产生高达 72 GHz 的 V 波段矢量毫米波信号。通过实验验证了 72 GHz, 2 GBaud 的 QPSK 信号产生,并经过 15 km 光纤传输以及 1 m 的无线传输后,当 72 GHz QPSK 信号波特率不高于 2.5 GBaud 时,可通过 HD-FEC 算法实现无误码率传输。该方案不仅极大地降低了系统的成本,还降低了矢量射频信号和光电器件的带宽。笔者认为进一步增加毫米波的频率,降低矢量射频信号的频率和系统链路成本,有望将毫米波商用化。

## 参 考 文 献

[1] Zhang R B, Yu S, Jiang T W, et al. Precoding

research on vector signal 16QAM applied in the frequency doubling scheme of ROF link [C] // Asia Communications and Photonics Conference 2013, Beijing. Washington, D. C.: OSA, 2013, AF2F: AF2F.2.

- [2] Wang K H, Yu J J. Demonstration of a multiband 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] Li X Y, Xiao J N, Yu J J. W-band vector millimeter-wave signal generation based on phase modulator with photonic frequency quadrupling and precoding [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(13): 2548-2558.
- [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] Lin C T, Shih P T, Jiang W J, 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] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Qin C Y, Li X Y, Chi N, et al. Comparison between balanced and unbalanced precoding technique in high-order QAM vector mm-wave signal generation based

- on intensity modulator with photonic frequency doubling[J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 4399-4404.
- [12] Wang Y Q, Xu Y M, Li X Y, et al. Balanced precoding technique for vector signal generation based on OCS[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(23): 2469-2472.
- [13] Ying X Y, Xu T F, Liu T J, et al. Photonic generation of millimeter-wave signal via frequency 24-tupling based on dual-parallel MZM and four-wave-mixing in HNLF[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2016, 27(8): 814-818.  
应祥岳, 徐铁峰, 刘太君, 等. 基于双平行 MZM 和 HNLF 四波混频效应的 24 倍频光生毫米波技术[J]. *光电子 • 激光*, 2016, 27(8): 814-818.
- [14] Zhou W, Li X Y, Yu J J. Pre-coding assisted generation of a frequency quadrupled optical vector D-band millimeter wave with one Mach-Zehnder modulator[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 26483-26491.
- [15] Govind A. *Nonlinear fiber optics*[M]. Jia D F, Ge C F, et al. Transl. 5th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2014: 275-313.  
Govind A. 非线性光纤光学[M]. 贾东方, 葛春风, 等, 译. 5 版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 275-313.
- [16] 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, 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.
- [17] 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.
- [18] Liu C W, Yu J J. A new scheme of D-band mm-wave vector signal generation with simple architecture[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 41(4): 0406001.
- 刘翠微, 余建军. 结构简单的 D 波段矢量毫米波信号产生的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 41(4): 0406001.
- [19] 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.
- [20] Li W P, Kong M, Wang Y Y, et al. Wired and single sideband wireless service based on a single optical modulator[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(9): 71-76.  
李韦萍, 孔森, 王演祯, 等. 基于单个光调制器的有线和单边带无线服务[J]. *通信学报*, 2020, 41(9): 71-76.
- [21] Niu Y J, Liu X, Qiao L B. Fast backpropagation algorithm for millimeter-wave holographic imaging[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0909002.  
牛轶杰, 柳兴, 乔灵博. 毫米波全息成像快速反向传播算法研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0909002.
- [22] Lin Z Y, Yang Y F, Xiang Q, et al. Adaptive carrier phase recovery algorithm for probabilistically shaped signals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2306001.  
林志颖, 杨彦甫, 向前, 等. 用于概率整形信号的自适应载波相位恢复算法[J]. *光学学报*, 2020, 40(23): 2306001.
- [23] Cao M H, Zhang W, Wang H Q, et al. Point-by-point elimination adaptive pre-equalization algorithm in faster-than-Nyquist wireless optical communications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(24): 2406003.  
曹明华, 张伟, 王惠琴, 等. 超奈奎斯特无线光通信中的逐点消除自适应均衡算法[J]. *光学学报*, 2020, 40(24): 2406003.
- [24] Tian X, Zhao X F, Wang M, et al. Suppression of stimulated Brillouin scattering in fiber using the tilted fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1706001.  
田鑫, 赵晓帆, 王蒙, 等. 基于倾斜 FBG 的光纤受激布里渊散射抑制[J]. *光学学报*, 2020, 40(17): 1706001.



# Generation and Detection of Six-Fold Frequency Vector Millimeter-Wave Signal with Precoding

Liu Cuiwei<sup>1,2\*</sup>, Yu Jianjun<sup>1,2</sup>, Xiong Liangming<sup>3</sup>, Luo Jie<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Department of Communication Science and Engineering, School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China;*

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

<sup>3</sup>*Yangtze Optical Fiber and Cable Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430073, China*

## Abstract

**Objective** With the advantages of large available bandwidth and minimum interference in existing wireless services, millimeter-wave (mm-wave) technology can be widely used in future space communication or wireless communication. In previous research, the generation schemes of photon-assisted mm waves have mainly included: direct modulation technology, external modulation technology, and optical heterodyne technology. In order to overcome the bandwidth limitation of devices and meet the requirements of low-cost, the generation of vector mm waves with low radio frequency (RF) signals and intensity modulators has become a research hotspot. However, this method suffers from two main drawbacks, namely the phase multiplication and the cost of the system. To improve the above-mentioned problems, we generate a carrier suppression mm-wave signal with an intensity modulator. We also consider the carrier suppression vector mm-wave signal for achieving four-wave mixing (FWM) in a highly non-linear dispersion-shifted fiber to increase the frequency of the mm-wave. We use a balanced precoding algorithm to demodulate the distortion of the signal during transmission. That is, the complex and expensive I/Q modulator, as well as the bandwidth requirements of the optoelectronic devices is avoided. Furthermore, a single side band (SSB) vector mm-wave signal that can be delivered over relatively long fiber transmission distances is generated. Based on our scheme, we propose and experimentally demonstrate a 2-Gbaud QPSK vector mm-wave signal generation at 72 GHz by six-fold frequency. A mm-wave signal transmission over a 15-km fiber and with 1-m wireless for a bit error rate (BER) below the hard decision-forward error correction (HD-FEC) threshold of  $3.8 \times 10^{-3}$  is also realized.

**Methods** We propose a new scheme to generate a six-fold frequency vector mm-wave signal based on FWM and balanced precoding. To achieve six-fold frequency, we use carrier suppression modulation with a single intensity modulator and FWM with a 1-km highly non-linear dispersion-shifted fiber. Combined with balanced precoding, a 72-GHz carrier frequency quadrature phase shift keying (QPSK) vector mm-wave signal is generated. Maintaining the signal quality is essential for reducing the system cost. We demonstrate, via experiments, the generation of a 2-Gbaud 72-GHz QPSK vector mm-wave signal, and discuss the effects of baud rate and fiber transmission length of the QPSK signal on the signal.

**Results and Discussions** The BER versus photodetector (PD) input power curves after back-to-back (BTB) and 15-km fiber transmission are almost the same (Fig. 7), indicating a lack of dispersion penalty after the 15-km fiber transmission. To further explore the transmission performance of the signal in the fiber, we determine (via experiments) the maximum receiver optical power required for achieving the BER at  $3.8 \times 10^{-3}$  under different fiber lengths (Fig. 9). As shown in Fig. 9, the optical power is remained at  $-6.3$  dBm after  $< 15$  km of fiber transmission. However, the required optical power increases after the aforementioned transmission. After 30-km fiber transmission, the required optical power is  $3.3$  dBm with a considerable power penalty. The motivation for changing the baud rate of the QPSK signal is to further investigate the influence of the signal baud rate during the transmission experiment. We measured the BER versus the baud rate of a 72-GHz QPSK signal (Fig. 10). As shown in Fig. 10, the BER performance of the signal improves with decreasing baud rate of the signal. When the baud rate of the QPSK signal is lower than  $2.5$  Gbaud, the BER is considerably lower than the HD-FEC threshold. The result shows that after 15 km of fiber and 1 m of wireless transmission, the BER of the signal is lower than the HD-FEC threshold. This occurs when the optical power input to the photodiode is  $> -6.3$  dBm and the QPSK signal baud rate is  $\leq 2.5$  Gbaud.

**Conclusions** We demonstrate to the generation of a six-fold frequency vector mm-wave signal using precoding. In our scheme, we generate a 72-GHz V-band vector mm-wave signal with oscilloscope (OSC) and FWM using our designed electrical signals. We demonstrate (via experiments) the generation of a 72-GHz 2-Gbaud QPSK signal. After 15-km fiber transmission and 1-m wireless transmission, when the baud rate of the signal is  $\leq 2.5$  Gbaud, the HD-FEC algorithm can achieve error-free transmission. The results revealed that the vector mm-wave signal based on this scheme exhibits excellent transmission performance. As indicated above, this scheme overcomes the bandwidth limitation of devices, meets the requirements for low-cost devices, and reduces the frequency of the RF signal. Our proposed scheme with six-fold frequency combines the advantages of our two aforementioned categories of photonic vector mm-wave generation schemes. The authors believe that expensive electronics operating at high carrier frequencies with a bandwidth limitation can be avoided. That is, photonics-aided mm-wave technology has been widely applied to the generation and processing of mm waves. The millimeter ROF delivery based on highly efficient spectrum modulation will be a promising method of developing larger capacity links than currently available links.

**Key words** optical communications; millimeter wave; four-wave mixing; precoding; six-fold frequency

**OCIS codes** 060.5625; 060.4080; 060.4510; 060.2630