

# 基于两个并行相位调制器的正交频分复用矢量毫米波产生

王东飞, 唐先锋, 席丽霞\*, 张晓光

北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

**摘要** 提出了一种基于两个并行相位调制器产生正交频分复用 (OFDM) 矢量毫米波信号的实现方案。与已有的方案相比, 所提方案仅需要两个相位调制器, 既不需要复杂的电路来控制调制器的直流偏置, 也无需采用预编码技术, 大幅降低了发射机的复杂度和系统成本。OFDM 矢量信号和射频 (RF) 信号均采用数字信号处理 (DSP) 模块产生, 以保证 RF 信号频率的灵活调节。在 DSP 模块中, 通过对上变频后的 OFDM 矢量信号和无调制 RF 信号进行希尔伯特变换得到双单边带电信号, 并将其加载到相位调制器上。采用光交错滤波器滤除光载波, 在接收端用一个高速的光电探测器通过拍频得到 OFDM 矢量毫米波信号。基于所提方案, 采用 MATLAB 和商业光通信仿真软件搭建了仿真平台, 得到了 50 GHz 正交相移键控调制的 OFDM 矢量毫米波信号, 并分析了测量结果与接收光功率和相位差偏移的关系。结果表明, 该传输系统的误码率小于硬判决前向纠错门限 ( $3.8 \times 10^{-3}$ ), 这说明 OFDM 矢量毫米波信号的产生方案是可行的。

**关键词** 光通信; 矢量毫米波产生; 正交频分复用; 相位调制器; 希尔伯特变换; 单边带调制

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1806006

## Orthogonal Frequency Division Multiplexing Vector Millimeter-Wave Generation Based on Two Parallel Phase Modulators

Wang Dongfei, Tang Xianfeng, Xi Lixia\*, Zhang Xiaoguang

State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract** We propose an implementation scheme for generating orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) vector millimeter-wave (mm-wave) based on two parallel phase modulators (PMs). Compared with previous schemes, the proposed scheme only needs two PMs without complex circuits to control the direct current bias of the modulator and precoding technology, which greatly reduces the complexity of the transmitter and the system cost. The OFDM vector signal and radio frequency (RF) signal are generated by digital signal processing (DSP) module to ensure the flexible adjustment of RF signal frequency. In the DSP module, one up-converted OFDM vector signal and the unmodulated radio frequency signal are transformed by Hilbert transform to obtain the dual single sideband (SSB) signals, respectively, which drive phase modulators. An optical interleaver is used to filter out optical carriers, and a high-speed photodetector is used to obtain the OFDM vector mm-wave signal through beat frequency. Based on the proposed scheme, we demonstrate the generation of a 50-GHz quadrature phase-shift keying (QPSK)-modulated OFDM vector mm-wave signal by simulation with the MATLAB and the optical communication commercial software. The measured results versus received optical power and phase deviation drift are analyzed. The results show that the bit error rate of the transmission system is less than the hard decision forward error correction threshold of  $3.8 \times 10^{-3}$ , which shows that the scheme of OFDM vector mm-wave signal generation is feasible.

**Key words** optical communications; vector millimeter-wave generation; orthogonal frequency division multiplexing; phase modulator; Hilbert transform; single sideband modulation

**OCIS codes** 060.2310; 060.2330; 060.5625

收稿日期: 2020-03-23; 修回日期: 2020-05-20; 录用日期: 2020-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(61571057, 61527820, 61575082, 61875247)、信息光子学与光通信国家重点实验室(北京邮电大学)基金(IPOC2019ZZ02)

\* E-mail: xilixia@bupt.edu.cn

# 1 引 言

随着人们对高速率、大容量、高频谱效率无线通信系统的需求愈发迫切,毫米波段光载射频(ROF)系统由于具有大的带宽和容量的优势受到越来越多的关注<sup>[1-10]</sup>。此外,毫米波段 ROF 系统在克服传统无线通信带宽瓶颈的同时,还扩大了无线通信的覆盖范围<sup>[11-20]</sup>。正交频分复用(OFDM)技术以其高频谱效率、抗码间干扰(ISI)以及抗多径衰落的优势而被广泛研究<sup>[14-15,17-18]</sup>。OFDM 矢量毫米波结合了 OFDM 和毫米波两者的优势,将成为未来高速无线通信非常理想的候选波段。目前学者们提出了一些光子辅助的 OFDM 毫米波信号产生方案并进行了相关实验验证。Wang 等<sup>[16-17]</sup>利用强度调制器产生了幅度调制的 OFDM 毫米波信号。Xiao 等<sup>[18-19]</sup>提出了一种基于预编码辅助技术的 OFDM 毫米波产生技术,该技术可以同时调制幅度信息和相位信息,使得如正交相移键控(QPSK)调制和 16 正交幅相调制(16QAM)的 OFDM 矢量毫米波信号产生成为可能,进而提升了系统的频谱效率。然而,随着调制格式阶数的增加,基于预编码辅助技术的矢量毫米波信号产生方案将会变得异常复杂,而且很难达到理想效果。为了避开复杂度高的预编码技术,文献<sup>[20]</sup>报道了基于单边带(SSB)调制的 OFDM 矢量信号产生方案。目前单边带 OFDM 矢量信号的产生主要是在数字域完成,即通过数字信号处理(DSP)模块对数字的 OFDM 矢量数据进行上变频,产生射频(RF)信号,然后经数模转换(DAC)信号驱动的同相正交(IQ)调制器实现高阶 OFDM 矢量信号的产生。

本文提出了一种基于双相位调制器的 OFDM 矢量毫米波产生方案。该方案仅需两个相位调制器

并联来实现光的双单边带调制,无需采用预编码辅助技术,这样不仅可以大大降低发射端的复杂度,还有效地降低了系统成本。在发射端 DSP 模块中,先将 OFDM 矢量数据上变频到  $f_1$ ,并对上变频后的 OFDM 矢量信号进行希尔伯特变换得到只有一个边带的 OFDM 信号;再将单边带的电 OFDM 矢量信号的实部和虚部与经希尔伯特变换得到的频率为  $-f_2$  的射频信号的实部和虚部分别相加。使用相加后的两路信号分别驱动两个相位调制器,得到光的双单边带信号。一个边带携带数据,另一个边带不携带数据,这样两个非对称的光边带经光电探测器(PD)可以拍频出频率为  $f_1 + f_2$  的 OFDM 矢量毫米波信号。

## 2 系统设计与原理

本文所提方案由 3 部分组成:1)上变频后的 OFDM 矢量信号和未调制的射频信号经希尔伯特变换得到电的单边带信号;2)通过控制两个相位调制器的偏置电压来实现光的双单边带信号;3)非对称光单边带信号在光电探测器中拍频得到所需要的矢量毫米波信号。其中前两部分在发射端完成,第 3 部分在接收端完成。

### 2.1 电单边带信号产生

解析信号可以定义为

$$s(t) = I + jQ, \quad (1)$$

式中:  $I$  为解析信号的实部;  $Q$  为解析信号的虚部,  $t$  为时间。将解析信号上变频到频率为  $f_{RF}$  的射频域,其可以表示为

$$m(t) = I \cos(2\pi f_{RF} t) + Q \sin(2\pi f_{RF} t), \quad (2)$$

它包含正频和负频两个边带。单边带信号可以通过将上变频的射频信号与单边带信号经过希尔伯特变换后的信号相加来实现,可以表示为

$$\begin{aligned} s_{SSB} &= m(t) + iH[m(t)] = I \cos(2\pi f_{RF} t) + Q \sin(2\pi f_{RF} t) + i[I \sin(2\pi f_{RF} t) - Q \cos(2\pi f_{RF} t)] = \\ &= I[\cos(2\pi f_{RF} t) + i \sin(2\pi f_{RF} t)] + iQ[\cos(2\pi f_{RF} t) + i \sin(2\pi f_{RF} t)] = \\ &= (I + jQ) \exp(i2\pi f_{RF} t), \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $H[\cdot]$  为希尔伯特运算符。从(3)式可以看出,经希尔伯特变换后的信号只包含一个边带。数字基带 OFDM 矢量信号的表达式可以描述为

$$S_{BB\_OFDM}(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^N a_n \exp\left(j2\pi \frac{n}{T} t + j\varphi_n\right), \quad (4)$$

式中:  $N$  和  $T$  分别为 OFDM 的子载波个数和符号周期;  $a_n$  和  $\varphi_n$  分别为基带信号的幅度和相位;  $n$  为基带

序号。对基带 OFDM 矢量信号进行上变频得到射频 OFDM 矢量信号,再经希尔伯特变换产生的上单边带(USB)OFDM 矢量信号如图 1(a)所示,可表示为

$$\begin{aligned} S_{OFDM\_RF}(t) &= S_{BB\_OFDM}(t) V_1 \exp(j2\pi f_1 t) = \\ &= \frac{V_1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^N a_n \exp\left[j2\pi \left(\frac{n}{T} + f_1\right) t + j\varphi_n\right], \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $V_1$  为射频 OFDM 矢量信号的幅度。图 1(b) 为将频率为  $-f_2$ 、幅度为  $V_2$  的射频源信号  $V_2 \cos(-2\pi f_2 t)$  进行希尔伯特变换后得到的未调

制信号的下单边带信号(LSB)。将两路单边带信号的实部与实部、虚部与虚部分别相加得到双单边带信号:

$$S_{\text{real}} = \frac{V_1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^N a_n \cos \left[ 2\pi \left( \frac{n}{T} + f_1 \right) t + \varphi_n \right] + V_2 \cos(-2\pi f_2 t), \quad (6)$$

$$S_{\text{imag}} = \frac{V_1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^N a_n \sin \left[ 2\pi \left( \frac{n}{T} + f_1 \right) t + \varphi_n \right] + V_2 \sin(-2\pi f_2 t). \quad (7)$$

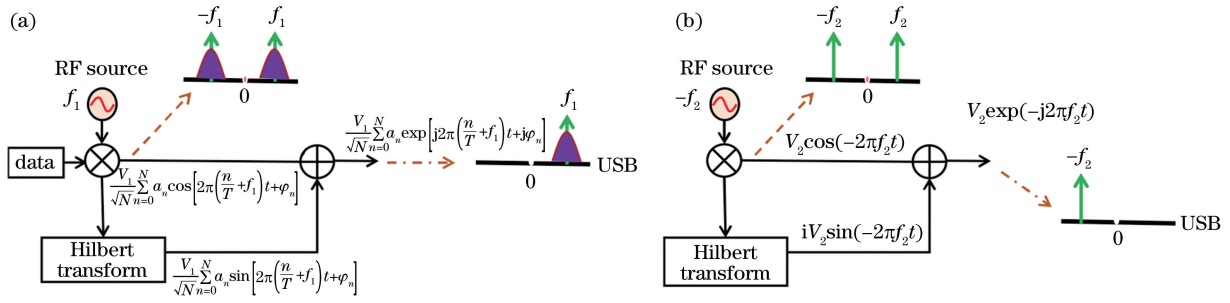


图 1 经希尔伯特变换产生单边带信号过程的示意图。(a) USB;(b) LSB

Fig. 1 Schematic diagrams of generating single sideband signal by Hilbert transform. (a) USB; (b) LSB

## 2.2 光单边带信号产生

激光器发出的光波可以表示为  $E_{\text{in}} = E_c \cdot \exp(j2\pi f_c t)$ , 其中  $E_c$ 、 $f_c$  分别为光波的幅度和频率。光波经光分束器分成两路, 一路注入相位调制器 PM-a, 另一路注入相位调制器 PM-b。相位调制器的传输函数可以表示为

$$E_{\text{PM-a(PM-b)}} = E_{\text{in}} \exp(j\varphi), \quad (8)$$

式中:  $\varphi = \exp\left(j\pi \frac{V_{\text{DC}} + V_{\text{RF}}}{V_\pi}\right)$  为调制系数, 其中  $V_{\text{DC}}$

为直流偏置电压,  $V_{\text{RF}}$  为射频信号电压;  $V_\pi$  为调制器的半波电压。

通过调节两相位调制器的相位差, 使相位调制器 PM-a 的相位差为  $\pi/2$ , 相位调制器 PM-b 的相位差为  $-\pi/2$ , 输出信号可以表示为

$$E_{\text{out}} = E_{\text{PM-a}} + E_{\text{PM-b}} = \frac{\sqrt{2} E_{\text{in}}}{2} \exp\left(j \frac{\pi}{2} S_{\text{real}}\right) + \frac{\sqrt{2} E_{\text{in}}}{2} \exp\left(-j \frac{\pi}{2} S_{\text{imag}}\right). \quad (9)$$

根据雅可比角度公式展开, (9)式可以简化为

$$E_{\text{out}} = \frac{\sqrt{2} E_{\text{in}}}{2} \left\{ (i+1) \left[ \sum_{n=0}^N J_0\left(\frac{\pi}{2} a_n\right) + J_0(\beta_2) \right] - \sum_{n=0}^N J_1\left(\frac{\pi}{2} a_n\right) \exp\left\{j \left[ 2\pi \left( \frac{n}{T} + f_1 \right) t + \theta_n \right] \right\} - J_1\left(\frac{\pi}{2}\right) \exp(-j2\pi f_2 t) \right\}, \quad (10)$$

式中:  $J_n(\beta)$  为第一类  $n$  阶贝塞尔函数。从(10)式可以看出, 经平行的双相位调制器输出的信号包含 0 阶光载波、携带矢量信号的 +1 阶边带和未调制信

号的 -1 阶边带。光交错滤波器(IL)可以把非对称的  $\pm 1$  阶光边带筛选出来, 筛选出的信号可以表示为

$$E_s = \frac{\sqrt{2} E_{\text{in}}}{2} \left\{ - \sum_{n=0}^N J_1\left(\frac{\pi}{2} a_n\right) \exp\left\{j \left[ 2\pi \left( \frac{n}{T} + f_1 \right) t + \varphi_n \right] \right\} \right\} = -J_1\left(\frac{\pi}{2}\right) \exp(-j2\pi f_2 t). \quad (11)$$

## 2.3 电 OFDM 矢量信号的产生

经光交错滤波器选出的两个光边带经光电探测器拍频得到频率为  $f_1 + f_2$  的 OFDM 矢量毫米波信号, 其可以表述为

$$I = \Re E_s \times E_s^* = \frac{\Re E_c^2}{2} \sum_{n=0}^N J_1\left(\frac{\pi}{2} a_n\right) J_1\left(\frac{\pi}{2}\right) \cos[2\pi(f_1 + f_2)t + \varphi_n], \quad (12)$$

式中： $\mathfrak{R}$ 为光电探测器的响应度，单位为  $A/W$ ， $\mathfrak{R} = \frac{e\eta}{hf}$ ，其中  $e$  为电子电量， $\eta$  为光电探测器的量子效率， $h$  为普朗克常量， $f$  为 PD 探测到的光载波中心频率值； $E_s^*$  为  $E_s$  的共轭。

### 3 仿真验证及结果分析

图 2 为基于双相位调制器来产生 OFDM 矢量

毫米波的方案原理示意图，其中 OFDM 信号、上变频以及经上变频后的 OFDM 信号与 RF 信号的叠加均通过 MATLAB 离线产生。光调制、传输以及接收均通过光通信商用模拟软件完成。

本方案按照真实实验环境进行模拟仿真。将符号长度为  $2^{15}$  的伪随机序列映射为 QPSK 信号，然后通过快速傅里叶逆变换 (IFFT) 和添加保护间隔实现 OFDM 信号。OFDM 信号有 256 个子载波，

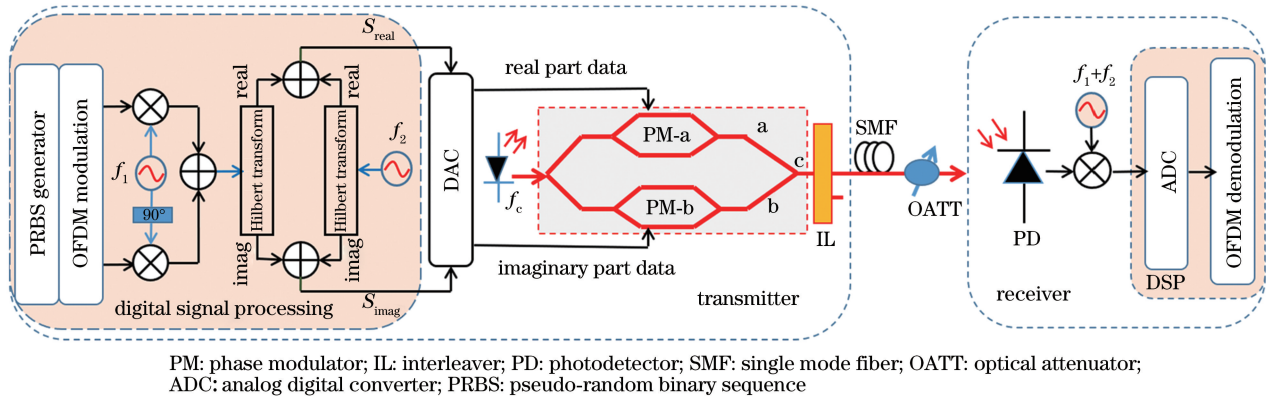


图 2 基于双相位调制器的 OFDM 矢量毫米波产生方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of OFDM vector mm-wave generation based on two-phase modulator

每个子载波携带 128 个符号。激光器的中心频率为 193.1 THz，发射功率为 20 dBm，线宽为 100 kHz，两射频信号的频率分别为  $f_1 = 30$  GHz 和  $f_2 = 20$  GHz。相位调制器 PM-a 的相位偏移设置为  $\pi/2$ ，相位调制器 PM-b 的相位偏移设置为  $-\pi/2$ 。光交错滤波器的频率为 193.08 THz，带宽为 5 GHz，频率间隔为 50 GHz。光电探测器的响应度为 1 A/W。

基带 OFDM 矢量信号与频率为 30 GHz 的 RF 信号混频，产生 RF 的 OFDM 矢量信号，其频谱图如图 3(a) 所示；对上变频后的 OFDM 矢量信号和频率为 20 GHz 的射频信号分别进行希尔伯特变换得到电单边带信号，然后将其实部和虚部分别相加，叠加后的频谱图如图 3(b) 所示；图 3(c) 表示激光器输出光波信号的光谱图；图 3(d)、(e) 分别表示相位调制器 PM-a 和 PM-b 输出信号的光谱图。从图 3(d)、(e) 中可以看出，光谱图中均包含了 0 阶光载波、携带 OFDM 矢量信号的  $\pm 1$  阶光边带和未调制信号的  $\pm 1$  阶光边带。两相位调制器输出的信号经耦合器相干输出，信号的光谱中仅包含了 0 阶光载波、 $-1$  阶未调制信号的光边带和  $+1$  阶携带信号的光边带，如图 3(f) 所示。然后经 IL 把 0 阶光载波滤除，如图 3(g) 所示。图 3(h) 显示的是信号经光电探测器拍频后的频谱图，从图 3(h) 可以看出，信号中除了含有 50 GHz 的 OFDM 矢量毫米波信号之外，

还有 30 GHz 的谐波，这是由携带 OFDM 矢量信号的  $+1$  阶信号与残余的光载波拍频得到。最终在接收端通过 DSP 模块把 OFDM 矢量毫米波信号解调出来。

为了分析本方案所产生 OFDM 矢量毫米波的性能，从误码率 (BER) 和星座图等方面进行判定。图 4 为接收端光电探测器的接收光功率对所产生的毫米波信号误码率的影响。从图中可以看到，在背靠背 (BTB) 传输中，符号速率为 2.5 GBaud/s、接收光功率为  $-21.37$  dBm，以及符号速率为 5 GBaud/s、接收光功率为  $-21.25$  dBm 时，系统的误码率均能达到硬判决前向纠错 (HD-FEC) 门限。随着接收光功率的增大，信号的性能会越来越好。与波特率为 2.5 GBaud/s 的背靠背传输相比，波特率为 5 GBaud/s 的背靠背传输造成了 0.12 dB 的误码率损失。经过 10 km 的光纤传输，2.5 GBaud/s 的 OFDM 矢量信号性能下降可以忽略，5 GBaud/s 的 OFDM 矢量信号引起了 0.38 dB 的误码率损失。经过仿真分析可得，随着信号波特率的增加以及光纤的传输，信号的性能变差，这主要是由电子器件和光器件带宽的限制以及光纤色散的影响造成的。

图 5 为在背靠背传输、符号速率为 5 GBaud/s、接收光功率为  $-20.27$  dBm 时，相位调制器 PM-a 的相位差发生偏移对接收到的 OFDM 矢量毫米波

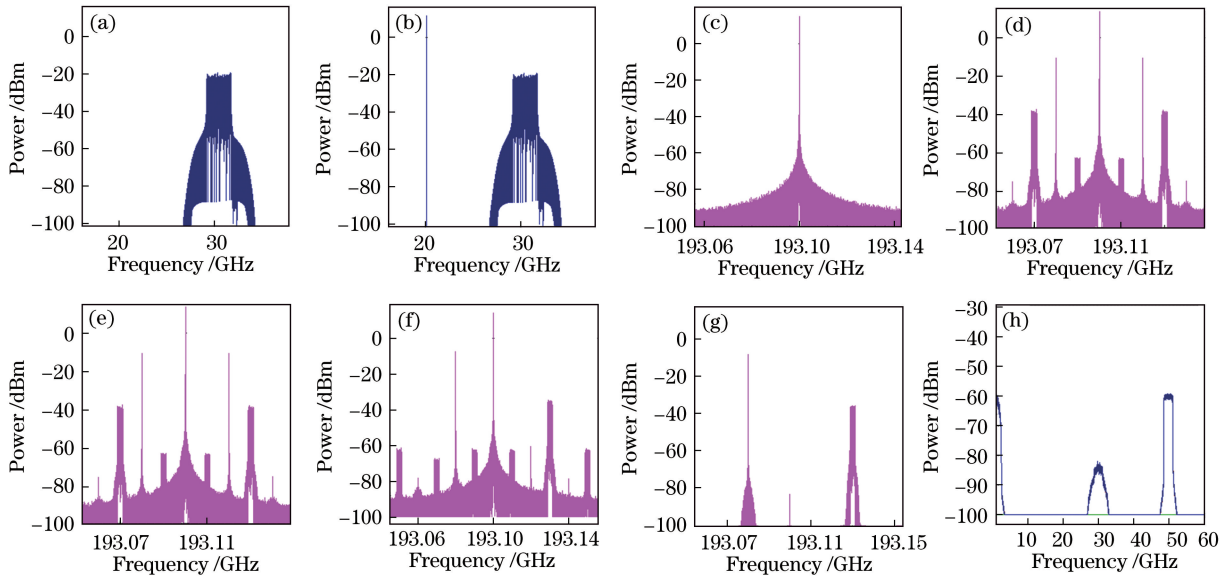


图 3 矢量毫米波产生过程中不同位置的频谱。(a) 上变频后所得到射频 OFDM 矢量信号的频谱图;(b) 两路射频信号叠加后的信号频谱图;(c) 激光器输出信号的光谱图;(d) 相位调制器 PM-a 输出信号的光谱图;(e) 相位调制器 PM-b 输出信号的光谱图;(f) 两相位调制器输出信号相干叠加后所得信号的光谱图;(g) 经 IL 选择出的  $\pm 1$  阶光边带;(h) 经光电探测器拍频后得到的 OFDM 矢量毫米波信号

Fig. 3 Spectra at various locations in process of generating vector millimeter waves. (a) Electrical spectrum of RF OFDM vector signal after up conversion; (b) electrical spectrum after superposition of two RF signals; (c) optical spectrum of output signal of laser; (d) optical spectrum of output signal of phase modulator PM-a; (e) optical spectrum of output signal of phase modulator PM-b; (f) optical spectrum after coherent superposition of output signals from two phase modulators; (g) selected  $\pm 1$ st order optical sidebands after IL; (h) received OFDM vector signal after beat frequency of PD

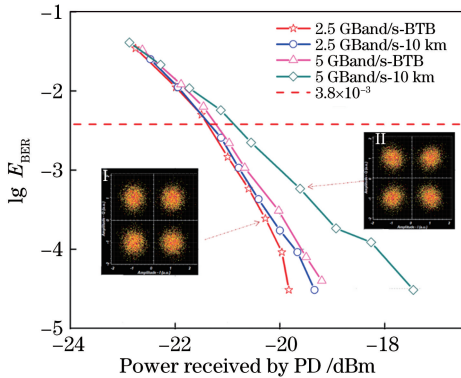


图 4 在背靠背/单模光纤传输 10 km 情况下 2.5/5 Gbaud/s-QPSK 调制的 OFDM 矢量毫米波信号的误码率测量结果与接收光功率的关系。插图 I 和 II 为接收光功率分别为  $-21.5$  dBm 和  $-19.6$  dBm 时的 QPSK 星座图

Fig. 4 Measured BER versus received optical power for 2.5/5-Gbaud/s QPSK modulated OFDM vector mm-wave signals in BTB and after 10-km SMF transmission. Inserts I and II are received QPSK constellations when received optical powers are  $-21.5$  dBm and  $-19.6$  dBm, respectively

信号误码率的影响。相位调制器的相位差无偏移时,即相位差为  $\pi/2$ ,随着相位调制器产生的相位差偏移越来越大,接收信号的误码率也逐渐变大,其主要原因是相位调制器的相位差和调制系数是相关的。根据 Jacobi-Anger expansion 公式,调制器的调制系数影响着各阶次谐波的幅度,当相位调制器的相位差发生偏移时,并行的两相位调制器输出的信号幅度不均衡。同时还可以发现,相位差偏移范围在  $-0.16 \sim 0.42$  rad 时,接收信号的误码率低于 HD-FEC,即低于  $3.8 \times 10^{-3}$ 。

## 4 结 论

提出了一种基于双相位调制器产生 OFDM 矢量毫米波信号的方案。在本方案中,仅需采用两个相位调制器来产生 OFDM 的矢量毫米波信号,同时无需采用预编码辅助技术,这大幅降低了系统的复杂度和成本。受实验条件的限制,在详细数学理论推导的基础上,基于 MATLAB 和 OptiSystem 联合仿真产生了 QPSK 调制的频率为 50 GHz 的 OFDM 矢量毫米波信号。为了对该方案的可行性

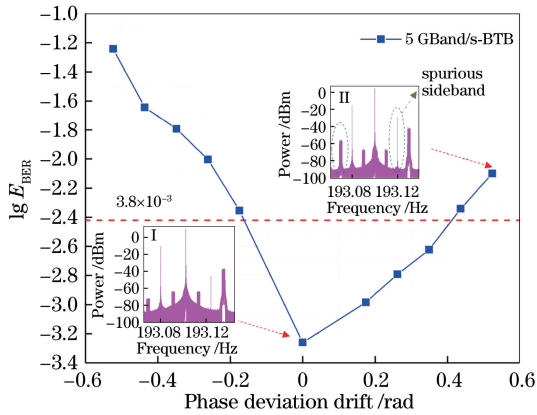


图 5 在背靠背传输情况下 5 GBaud/s-QPSK 调制的 OFDM 矢量毫米波信号误码率的测量结果与相位调制器的相位差偏移的关系。插图 I 和 II 为相位差偏移分别为  $0^\circ$  和  $30^\circ$  时双平行相位调制器输出的光谱图

Fig. 5 Measured BER results versus phase deviation drift for 5-Gbaud/s QPSK modulated OFDM vector mm-wave signals in BTB transmission case. Inserts I and II are output optical spectra after dual-parallel phase modulator when phase deviation drifts are  $0^\circ$  and  $30^\circ$ , respectively

进行验证,通过仿真产生了符号速率为 2.5 Gbaud/s 和 5 Gbaud/s 的 QPSK-OFDM 矢量毫米波信号,并分别进行了背靠背和 10 km 光纤传输。同时也对非理想因素进行了分析,当符号速率为 5 Gbaud/s、接收光功率为  $-20.27$  dBm、相位调制器的相位差偏移的范围为  $-0.16 \sim 0.42$  rad 时,接收信号的误码率低于 HD-FEC,即低于  $3.8 \times 10^{-3}$ 。

### 参 考 文 献

[1] Li F, Li Z B, Zou D D, et al. Optical I/Q modulation utilizing dual-drive MZM for fiber-wireless integration system at Ka-band [J]. Optics Letters, 2019, 44 (17): 4235-4238.

[2] Pan X L, Liu X Y, Zhang H X, et al. Independent dual single-sideband vector millimeter-wave signal generation by one single I/Q modulator [J]. Optics Express, 2019, 27(14): 19906-19914.

[3] Wang D F, Tang X F, Xi L X, et al. A filterless scheme of generating frequency 16-tupling millimeter-wave based on only two MZMS [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 116: 7-12.

[4] Li Q, Du C, Li X, et al. Microwave photonic down-conversion system based on stimulated Brillouin scattering effect [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0701006.

李强, 都聪, 李想, 等. 基于受激布里渊散射效应的

微波光子下变频系统 [J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0701006.

- [5] 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. 高阶边带对高频光毫米波系统的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56 (4): 040603.
- [6] Xue Z Z, Pei L, Liu T T, et al. Photonic generation of filterless frequency multiple tupling optical millimeter-wave signal [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(4): 0406002.
- 薛壮壮, 裴丽, 刘婷婷, 等. 无滤波高频光载毫米波生成技术 [J]. 光子学报, 2020, 49(4): 0406002.
- [7] Zhou W, Zhao L, Zhang J, et al. Four sub-channel single sideband generation of vector mm-wave based on an I/Q modulator [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(4): 7204409.
- [8] Fan S L, Cao C Q, Zeng X D, et al. An RoF system based on polarization multiplexing and carrier suppression to generate frequency eightfold millimeter-wave [J]. Results in Physics, 2019, 12: 1450-1454.
- [9] Li Y Y, Wen A J, Zhang Y, et al. Photonic generation of frequency-doubled microwave waveform based on a PDM-MZM modulator [J]. Optics Communications, 2020, 458: 124756.
- [10] Xiao J N, Feng X X, Zhou W, et al. Generation of (3, 1) vector signals based on optical carrier suppression without pre-coding [J]. Optics Letters, 2020, 45(4): 1009-1012.
- [11] Li Y Y, Wen A J, Zhang W, et al. A simple and tunable photonic generation of frequency-doubled triangular waveform based on two cascaded modulators [J]. Optics Communications, 2019, 445: 231-235.
- [12] Zhao L, Xiong L, Liao M X, et al. QPSK vector millimeter-wave signal generation based on odd times of frequency without precoding [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(6): 5502109.
- [13] Zhao L, Xiong L, Liao M X, et al. W-band 8QAM vector millimeter-wave signal generation based on tripling of frequency without phase pre-coding [J]. IEEE Access, 2019, 7: 156978-156983.
- [14] Wang D F, Xi L X, Tang X F, et al. Photonic filterless scheme to generate V-band OFDM vector mm-wave signal without precoding [J]. Optics Communications, 2020, 466: 125663.
- [15] Cavalcante L C P, Rommel S, Dinis R, et al. Performance evaluation of wavelet-coded OFDM on a

- 4.9 Gb/s W-band radio-over-fiber link[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(14): 2803-2809.
- [16] Wang X, Yu J J, Cao Z Z, et al. SSBI mitigation at 60 GHz OFDM-ROF system based on optimization of training sequence[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8839-8846.
- [17] Tao L, Yu J J, Yang Q, et al. A novel transform domain processing based channel estimation method for OFDM radio-over-fiber systems [J]. Optics Express, 2013, 21(6): 7478-7487.
- [18] Xiao J N, Zhang Z R, Li X Y, et al. OFDM vector signal generation based on optical carrier suppression [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(23): 2449-2452.
- [19] Xiao J N, Li X Y, Xu Y M, et al. W-band OFDM photonic vector signal generation employing a single Mach-Zehnder modulator and precoding [J]. Optics Express, 2015, 23(18): 24029-24034.
- [20] Xu Y M, Li X Y, Yu J J, et al. Simple and reconfigured single-sideband OFDM RoF system[J]. Optics Express, 2016, 24(20): 22830-22835.