

光学学报

基于开关键控调制的光载太赫兹正交相移键控信号产生

杨雄伟¹, 赵峰^{2*}

¹西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121;

²西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710121

摘要 提出了一种基于开关键控(OOK)调制的光载太赫兹正交相移键控(QPSK)信号产生方案。基于双平行马赫-曾德尔调制器产生了一对光学八倍频边带信号,利用两个强度调制器分别将两路独立的 OOK 基带信号调制到八倍频边带的两个偏振态上,对两路偏振信号进行相位和幅度调整后再进行叠加,叠加后的光信号经过功率放大和光纤传输后在终端实现了光电转换,从而生成了太赫兹 QPSK 信号。在 VPI 仿真环境下,分别验证了 80, 240, 400 GHz 信号的传输性能。结果表明,生成的一个波特率为 20 GBaud、频率为 400 GHz 的 QPSK 信号通过 40 km 的零色散位移光纤传输后,其误码率低于前向纠错码的阈值(3.8×10^{-3})。该方案具有无需预编码技术和数模转换器的特点,降低了信号处理的复杂度和系统成本。

关键词 光通信; 光载无线通信; 太赫兹波段; 矢量信号; 正交相移键控; 强度调制

中图分类号 TN928

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0806002

Generation of Terahertz Quadrature Phase Shift Keying Signals over Fiber with On-Off-Keying Modulation

Yang Xiongwei¹, Zhao Feng^{2*}

¹ School of Communications and Information Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China;

² School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China

Abstract A generation scheme for terahertz (THz) quadrature phase shift keying (QPSK) signals over fiber based on on-off-keying (OOK) modulation is proposed. A pair of optical octave sideband signals is generated by a dual-parallel Mach-Zehnder modulator (DP-MZM), and two independent OOK baseband signals are modulated to two polarization states of the octave sideband signals by two intensity modulators (IMs). The two polarization signals are superimposed after phase and amplitude adjustment, and the superimposed optical signal undergoes photoelectric conversion at the terminal after power amplification and optical fiber transmission. THz QPSK signals are thereby generated. In the VPI simulation environment, the transmission performances of 80, 240, and 400 GHz signals are verified. The results show that the bit error rate (BER) of a QPSK signal with a baud rate of 20 GBaud and a frequency of 400 GHz generated by the proposed scheme is below the forward-error-correction threshold (3.8×10^{-3}) after the signal is transmitted over a 40 km zero dispersion shifted fiber (DSF). Our proposed scheme, with no need for pre-coding or a digital-to-analog converter, reduces the complexity of signal processing and system cost.

Key words optical communications; optical wireless communication; terahertz band; vector signal; quadrature phase shift keying; intensity modulation

收稿日期: 2021-08-16; 修回日期: 2021-09-27; 录用日期: 2021-10-25

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

通信作者: *hfengzhao@xupt.edu.cn

1 引言

随着第五代(5G)移动通信技术的快速发展,一些新的技术,如物联网、自动驾驶、虚拟现实和远程医疗运营等,极大地推动了光网络数据流量的增长。根据思科全球视觉网络指数的预测,全球 IP 流量将会迎来大幅度增长,在 2017—2022 年以每年 26% 的年复合增长率增长^[1]。近几年,光纤和无线通信中的数据速率也都呈指数增长,并且在未来十年间,这种增长趋势似乎不会减弱,这对现有的通信技术提出了极大的挑战。为了满足不断增加的通信需求,研究人员将目标瞄准在更高的频段以及更高的调制速率上。

通常,高频矢量信号的产生主要依赖于光子辅助法,如外差拍频,利用耦合器将两路波长不同的光信号耦合并进行拍频,从而容易实现高频段信号的产生^[2-5]。由于相互拍频的两路信号非相干,因此拍频产生的信号频率不稳定,且具有相对较大的相位噪声。此外,基于预编码技术的光子辅助方案也可以产生高倍频的矢量信号^[6-11],例如,利用单个调制器可以产生高频段的毫米波信号,该方法通常需要对发射端基带信号进行预编码处理,从而可以有效抵消拍频后产生的相位倍增效应。但是,预编码之后的星座图会被压缩(欧氏距离减小),从而使得编码后信号的抗噪声性能会进一步减弱。另外一种常用的方法是基于多个调制器的光子辅助法,这种方法可以产生高频段以及高质量的毫米波信号^[12-17],且不需要预编码,但需要在发射端进行复杂的数字信号处理,例如:通过希尔伯特变换,产生单边带的信号,同时引入不携带信息的射频(RF)信号(虚载波)。通常发射端的数字信号处理较为复杂,需要多个调制器,且调制速率受到数模转换器(DAC)带宽

的限制,从而造成系统硬件成本高,不利于工程化。针对高速调制方案,为了克服 DAC 带宽的限制:一方面,研究者提出了利用低阶信号合成高阶信号的方案,如利用两路开关键控(OOK)信号合成正交相移键控(QPSK)或四电平脉冲幅度调制(PAM4)信号的方案^[18-19],但该方案适用于多天线的架构或多光源配置的情形;另一方面,利用光学的方法来实现高速率的调制^[20-22],如利用集成的光波导完成偏振复用(PDM)16 符号正交幅度调制(16QAM),但该方案往往需要多个驱动信号同时驱动多个调制器。同时,高速率调制对多个驱动信号之间的同步要求很严格,实现方案具有一定难度。另外,利用光学方法进行高速率调制的方案也需要外差拍频才能产生高频段的毫米波信号。

本文提出了一种基于 OOK 调制的光载太赫兹矢量信号产生方案,首先利用一个双平行马赫-曾德尔调制器(DP-MZM)完成光八倍频边带的产生^[23-24],再利用两个并联的强度调制器(IM)分别将两路 OOK 基带信号加载到光信号的两个正交偏振态上,通过可调线性延迟线(ODL)在一路偏振方向引入适当的延迟后与另一路偏振方向进行叠加,最后进行光电转换,从而产生了相对于输入射频信号频率为八倍频的矢量 QPSK 信号。所提方案不需要 DAC 等器件就可以实现高速率的调制,且无需预编码技术,从而降低了信号处理复杂度和系统成本。此外,利用本方案可产生较宽频谱的 QPSK 矢量信号,可以灵活覆盖多个波段。

2 基本原理

图 1 为基于 OOK 调制的光载太赫兹 QPSK 信号生成原理。如图 1 所示,外腔激光器(ECL)发射出一个频率为 f_c 的连续光波,该光波入射至 DP-MZM,

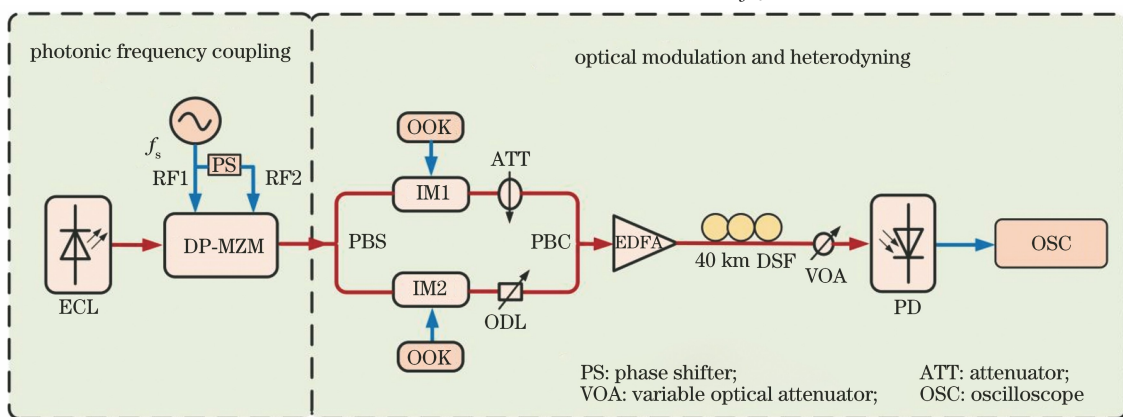


图 1 基于 OOK 调制的光载太赫兹 QPSK 信号产生原理

Fig. 1 Generation principle of photonics assisted terahertz QPSK based on OOK modulation

通过控制 DP-MZM 射频驱动信号电压的大小以及 DP-MZM 上下臂射频驱动信号的相位差,可以实现光八倍频边带的产生。ECL 发射的连续光波的电场强度可表示为

$$E_{\text{CW}}(t) = E_0 \exp(j2\pi f_c t), \quad (1)$$

式中: E_0 代表光波的幅度; f_c 为中心频率; t 为时间。本地射频信号源加载到 DP-MZM 上的射频驱动信号为

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

式中: V_{RF} 代表射频信号的幅度; f_s 表示射频信号的频率; φ 为射频信号的初始相位。

当单个 MZM 工作在最大工作点时,在射频信号 $V_{\text{RF}}(t)$ 的驱动下,光信号输出为

$$E_{\text{out}} = E_0 \sum_{m=-\infty}^{\infty} (-1)^m J_{2m}(\beta) \exp(j2\pi f_c t + j2m \cdot 2\pi f_s t + j2m\varphi), \quad (3)$$

式中: $\beta = \frac{\pi V_{\text{RF}}}{V_\pi}$ 为调制深度, V_π 表示调制器的半波电压; J_{2m} 为第一类贝塞尔函数。因此,当 DP-MZM 的三个直流偏置点都设置在最大传输点且上下臂的 $V_{\text{RF}}(t)$ 保持 90° 的相位差时,DP-MZM 的光信号输出可表示为

$$E_{\text{out}} = E_{\text{out_up}} + E_{\text{out_lower}} = \frac{1}{2} E_0 \sum_{m=-\infty}^{\infty} [(-1)^m J_{2m}(\beta) \exp(j2\pi f_c t + j2m \cdot 2\pi f_s t)] \left[1 + \exp\left(j2m \frac{\pi}{2}\right) \right] = E_0 \sum_{m=-\infty}^{\infty} [(-1)^{2m} J_{4m}(\beta) \exp(j2\pi f_c t + j4m \cdot 2\pi f_s t)] = E_0 \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_{4m}(\beta) \exp(j2\pi f_c t + j4m \cdot 2\pi f_s t), \quad (4)$$

式中: $E_{\text{out_up}}$ 、 $E_{\text{out_lower}}$ 分别表示 DP-MZM 上、下臂的输出。

通过调节射频驱动信号 $V_{\text{RF}}(t)$ 的幅值 V_{RF} ,当 $\beta = 2.405$ 时, $J_0(2.405) \approx 0$ 。此时,除了 ± 4 阶分量以外,其余分量的大小可以忽略不计,因此,(4)式可变为

$$E_{\text{out}} \approx E_0 J_4(\beta) [\exp(j2\pi f_c t + j2\pi \cdot 4f_s t) + \exp(j2\pi f_c t - j2\pi \cdot 4f_s t)]. \quad (5)$$

然后,利用偏振分束器(PBS)将 DP-MZM 调制后的光信号分为两路,并利用两个 IM 分别将两路基带 OOK 信号 $a_1(t)$ 与 $a_2(t)$ 分别加载到光波上。利用 ODL 在其中一路信号上引入相移 θ ,最后通过偏振合束器(PBC)将两束光信号进行叠加,其输出表达式为

$$E_{\text{out}} = \{E_X a_1(t) J_4(\beta) [\exp(j2\pi f_c t + j2\pi \cdot 4f_s t) + \exp(j2\pi f_c t - j2\pi \cdot 4f_s t)] + E_Y a_2(t) J_4(\beta) [\exp(j2\pi f_c t + j2\pi \cdot 4f_s t + \theta) + \exp(j2\pi f_c t - j2\pi \cdot 4f_s t - \theta)]\}, \quad (6)$$

式中: $E_X = E_Y = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0$, 分别表示两个正交偏振方向光波的幅度。

因为 $a_1(t)$ 与 $a_2(t)$ 分别加载在正交偏振的光信号上,因此在进行光电转换时,不会发生串扰,并且由于加载的信号是 OOK 信号,边带相互拍频不会影响到其所携带的信息。通过调节 ODL,使得两个正交偏振态拍频后的输出保持 90° 的相差,因此两路 OOK 信号就合成了一个在复平面偏移的 QPSK 信号。通过光电转换之后,输出信号为

$$I_{\text{out}} \propto I_X + I_Y = \frac{1}{2} R E_0^2 G^2 [a_1^2(t) J_4^2(\beta) \cos(2\pi \cdot 8f_s t) + a_2^2(t) J_4^2(\beta) \sin(2\pi \cdot 8f_s t)] = \frac{1}{2} R E_0^2 G^2 J_4^2(\beta) [a_1^2(t) \cos(2\pi \cdot 8f_s t) + a_2^2(t) \sin(2\pi \cdot 8f_s t)] = M [a_1^2(t) \cos(2\pi \cdot 8f_s t) + a_2^2(t) \sin(2\pi \cdot 8f_s t)], \quad (7)$$

式中: R 为光电探测器(PD)的响应度; G 为掺铒光纤放大器(EDFA)的增益; $M = \frac{1}{2} R E_0^2 G^2 J_4^2(\beta)$ 。

在仿真中将 f_s 分别设置为 10, 30, 50 GHz, 对应得到了 80, 240, 400 GHz 频段的 QPSK 信号,并且通过控制两路 OOK 信号的波特率,可以产生不同波特率的 QPSK 信号。

3 分析与讨论

按照图 1 所示方案,在 VPI 环境下搭建仿真系统。ECL 发射出的连续光信号为中心频率为 193.1 THz、功率为 10 dBm、线宽为 100 kHz 的连续光波,其输出信号的光谱如图 2(a) 所示。DP-

MZM 的半波电压为 4 V, 插入损耗为 6 dB, 消光比为 35 dB, 通过将三个直流偏置输入均设置为 0, 使得三个调制器均保持在最大传输点。一个频率为 50 GHz 的射频信号驱动 DP-MZM 的上下臂, 其上下臂射频驱动信号的相位差为 90° , 通过调节射频驱动信号的幅度, 控制调制深度, 使得 DP-MZM 的输出中的 0 阶分量尽可能小, 经过 DP-MZM 调制后的光信号输出如图 2(b) 所示。

图 2(b) 为 ± 4 阶的主要边带分量, 其他边带分量的功率相对较低。这些边带信号随后被一个保偏耦合器 (PM-OC) 分为两路, 两路信号经过 IM 后分别被 OOK 基带信号进行调制, 随后利用 ODL 引入

其中一路信号的相移, 并使其偏振态旋转 90° 。最后利用 PBC 将两路信号进行合成, 合成后的光信号如图 2(c) 所示, 其频率间隔是输入 DP-MZM 射频驱动信号频率的 8 倍。最后利用一个增益为 20 dB 的掺铒光纤放大器对光信号进行损耗补偿后, 光信号在一段长度为 40 km 的色散位移光纤 (DSF) 上进行传输, 该光纤的衰减系数为 0.2 dB/km, 非线性效应系数为 $2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 。经过光纤传输后, 利用 PD 对边带信号进行拍频, 从而实现了高频矢量信号的产生。为了尽可能模拟实际传输情况, PD 的响应度设为 0.65 A/W, 拍频后电信号的电谱图如图 2(d) 所示。

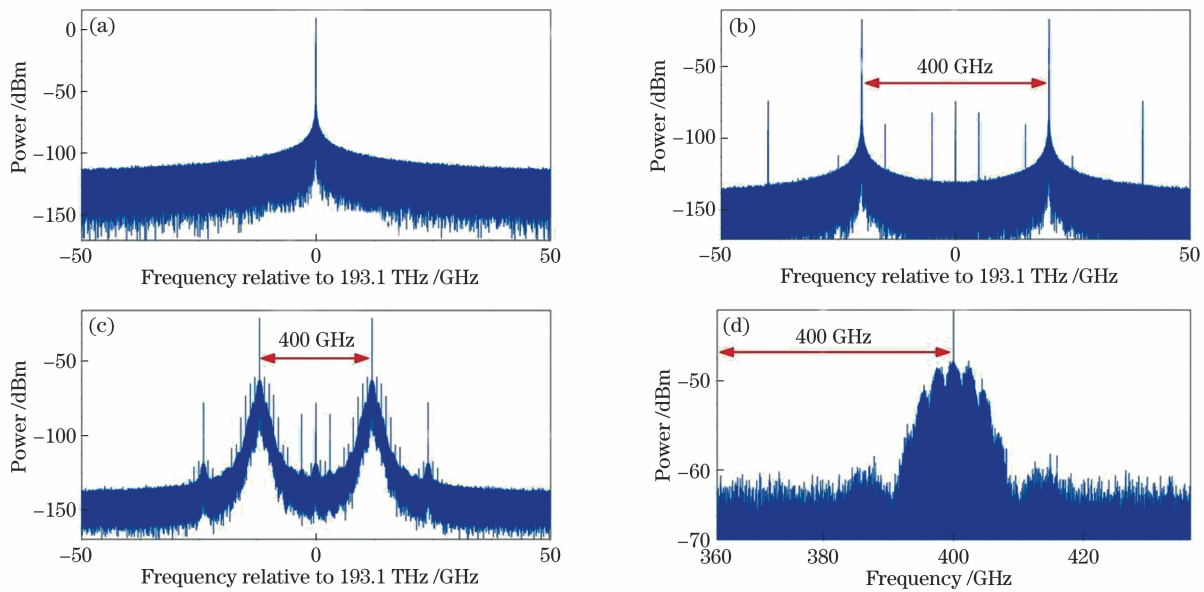


图 2 光谱图。(a) 光载波; (b) DP-MZM 输出; (c) PBC 输出; (d) PD 输出

Fig. 2 Optical spectra. (a) Optical carrier; (b) DP-MZM output; (c) PBC output; (d) PD output

接下来, 分别针对射频驱动信号频率为 10, 30, 50 GHz 进行了仿真, 对应产生了 80, 240, 400 GHz 频段的矢量 QPSK 信号。在接收端, 受限于示波器带宽, 需要对 QPSK 信号进行下变频处理, 然后利用实时采样示波器接收数据。最后将接收到的数据导入 MATLAB 中进行离线的数字信号 (DSP) 处理, 包括下采样、正交归一化、重定时、偏振均衡以及相位恢复, 恢复的星座图如图 3 所示, 其中图 3(a) 为 80 GHz 频段的 QPSK 星座图, 图 3(b) 为 240 GHz 频段的 QPSK 星座图, 图 3(c) 为 400 GHz 频段的 QPSK 星座图。从图 3 中的原始数据可以发现, 两路 OOK 信号合成了一路偏移的 QPSK 信号, 位于复平面的某一象限, 在通过正交归一化 (GSOP) 后合成信号恢复成正常的 QPSK 信号, 进而执行恒模算法 (CMA) 与载波恢复等算法。从最

终恢复的星座图可以看出, 在经过 40 km DSF 传输后, 拍频产生的八倍频矢量 QPSK 信号依旧具有较好的质量。从图 3 中恢复的星座图可以看出, 相比于 240 GHz 与 400 GHz 的星座图, 80 GHz 频段 QPSK 信号的两路 OOK 信号的正交性保持得非常好, 而 240 GHz 与 400 GHz 频段的 OOK 信号的正交性受到了一定的影响, 表现为星座图出现一定的扭曲, 且频段越高, 扭曲度越大。

为了验证不同频段信号的抗噪声性能, 在 VPI 环境下, 对 80, 240, 400 GHz 频段的 QPSK 信号进行了传输分析。图 4 为不同频段信号误码率 (BER) 与光信噪比 (OSNR) 的关系, 图中 R_{BER} 代表 BER。从图 4 可以看出, 当 OSNR 超过 17 dB 时, 携带着 10 GBaud QPSK 的 80, 240, 400 GHz 信号的 BER 均小于硬判决前向纠错码的阈值 3.8×10^{-3} 。当 OSNR

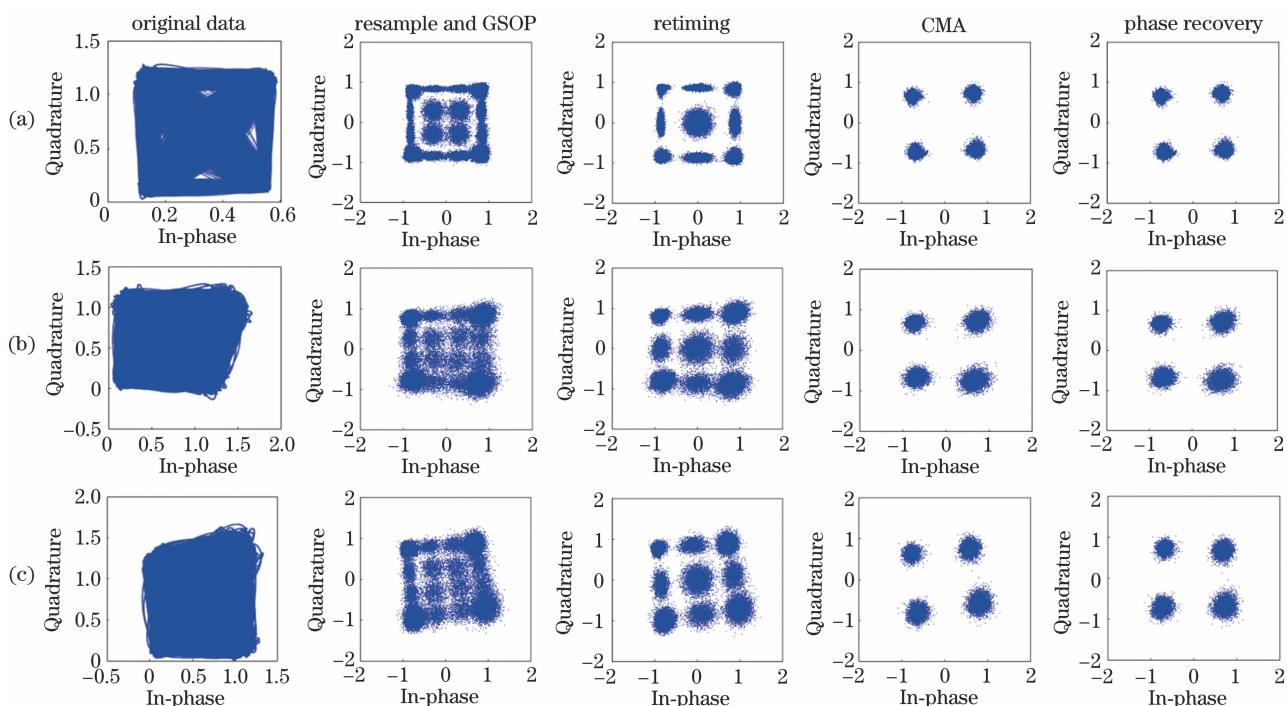


图 3 QPSK 信号经过 DSP 时的星座图。(a) 80 GHz; (b) 240 GHz; (c) 400 GHz

Fig. 3 Constellations of QPSK signals passing through DSP. (a) 80 GHz; (b) 240 GHz; (c) 400 GHz

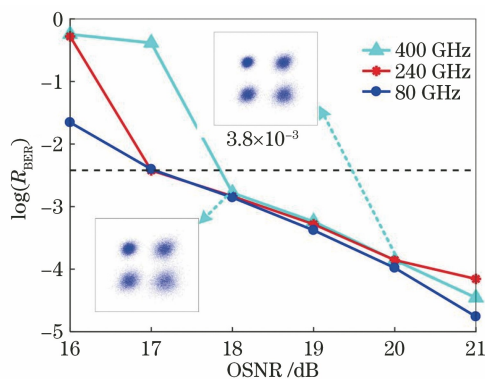


图 4 QPSK 信号 BER 与 OSNR 的关系

Fig. 4 Relationship between BER of QPSK signal and OSNR
 低于 17 dB 时,不同频段的 QPSK 信号的 BER 表现出了较大的差异。这是由于 QPSK 信号是通过两路正交 OOK 信号的矢量叠加产生的,而 OSNR 带来的噪声破坏了两路 OOK 信号所保持的正交性,并且子载波间隔越大,信号所受到的影响就越大。在低信噪比区间,高频段的信号表现出了较大的 BER。在高信噪比区间,附加的噪声在信号的噪声容忍度内,因此对应产生的三个频段的信号在高信噪比区间的 BER 无较大差别。

图 5 为传输光纤长度与 BER 的关系。方案中的两路 OOK 信号之间需要保持 90° 的相位差,而光纤线路带来的相位噪声会损害两路 OOK 信号的正交性。从图 5 可以看出,产生的 400, 240, 80 GHz

频段的信号分别在 52, 55, 60 km 的传输距离内, BER 均小于 3.8×10^{-3} 。这是由于高频段相互拍频的两束子载波间隔越大,信号受到非线性走离效应带来的相位噪声的影响越大。因此,从传输了 55 km DSF 产生的 240 GHz 频段的信号星座图可以发现,两路 OOK 信号的正交性处于临界位置,一旦正交性遭到破坏,其 BER 将急剧恶化。

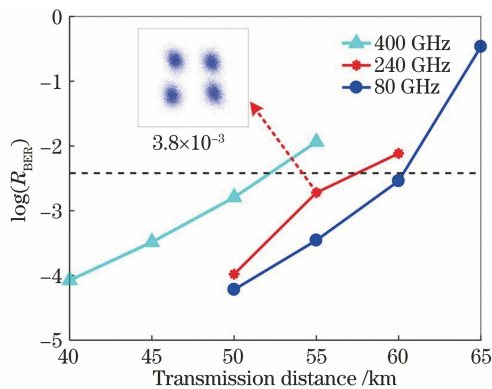


图 5 QPSK 信号 BER 与传输距离的关系

Fig. 5 Relationship between BER of QPSK signal and transmission distance

图 6 为在 10 GBaud 调制速率下, OSNR 设置为 25 dB、PD 的转换效率设置为 0.65 A/W 时,信号经过 40 km DSF 传输后, BER 随接收光功率的变化曲线。当接收光功率超过 -16 dBm 时,其产生的 400, 240, 80 GHz 频段信号 BER 均小于前向纠错码

的阈值 3.8×10^{-3} 。当接收光功率继续增加时,产生的三个频段信号的 BER 基本没有差异,而当接收光功率小于 -16 dBm 时,400 GHz 和 240 GHz 频段信号的 BER 急剧增大。因为当接收功率较低时,即在低信噪比区间,两路 OOK 信号的正交性更加容易遭到破坏。因此在低信噪比区间,400 GHz 和 240 GHz 频段信号的抗噪声性能相对于 80 GHz 频段信号较弱,在高信噪比区间,三者的抗噪声性能没有较大差异。

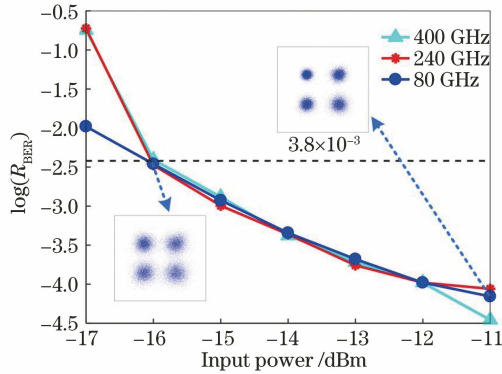


图 6 QPSK 信号的 BER 与 PD 输入功率的关系
Fig. 6 Relationship between BER of QPSK signal and input power of PD

对此进行进一步仿真验证,让接收光功率保持在 -11 dBm, OSNR 设置为 19 dB,进行不同波特率下背靠背(BTB)的传输仿真,其结果如图 7 所示。当波特率低于 22 GBaud 时,产生的 400, 240, 80 GHz 频段信号的 BER 均低于前向纠错码的阈值 3.8×10^{-3} 。同时也可以发现,BTB 传输情况下,三个频段的 BER 大致相同,这是图 7 中波特率为 26 GBaud 时三条曲线大致相交的原因。影响三个频段信号质量最大的因素是相位噪声,因此 BTB 传输情况下,三个频段的误码情况保持一致且符合理论分析。

通过上述的仿真分析验证了方案的可行性,但在实际应用中,DP-MZM 消光比的大小以及 ODL 的稳定度对最终生成信号的质量起决定性作用。因此,通过进一步的仿真来研究消光比大小与正交性偏差对生成信号质量的影响。进行消光比的研究时,调制速率保持在 10 GBaud, OSNR 设置为 35 dB,当 400, 240, 80 GHz 频段信号分别进行 50, 55, 60 km 的光纤传输后,此时三者的 BER 均接近硬判决前向纠错码的阈值 3.8×10^{-3} ,通过改变消光比的大小来研究消光比对信号生成质量的影响,其仿真结果如图 8 所示。进行正交性偏差研究时,

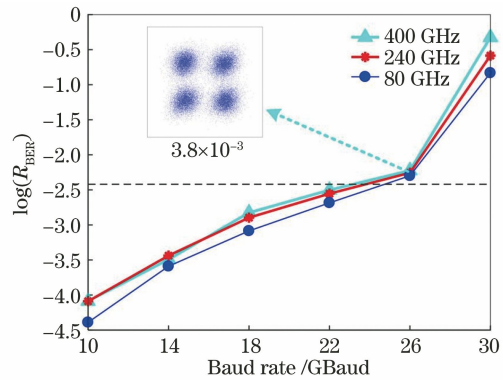


图 7 QPSK 信号 BER 与波特率的关系
Fig. 7 Relationship between BER of QPSK signal and baud rate

调制速率保持在 10 GBaud, OSNR 设置为 20 dB,三个频段的信号均在 40 km 的光纤中传输,通过对 ODL 延迟时间的调节,进行不同正交性偏差与 BER 的仿真,其仿真结果如图 9 所示。

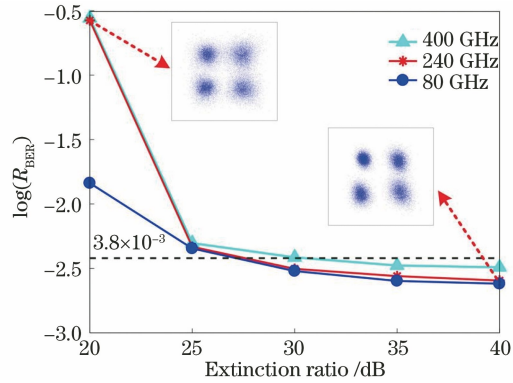


图 8 BER 与消光比的关系
Fig. 8 Relationship between BER and extinction ratio

从图 8 可以发现,当 DP-MZM 消光比在 30 dB 与 40 dB 之间时,三个频段的信号受消光比变化的影响很小,而当消光比为 25 dB 时,240 GHz 和 400 GHz 信号的 BER 严重恶化。在低的消光比下,DP-MZM 输出中残留的边带分量将会影响 ± 4 阶边带的功率,同时在光纤传输过程中,非线性走离效应也会影响信号的生成质量,因此高频段相对于低频段对消光比的要求更高,但对于实际器件,消光比可达到 35 dB,满足方案对消光比的要求。

从图 9 可以发现,当存在 10° 的正交性偏差时,三个频段的 BER 受到的影响较小,而当正交性偏差达到 20° 时,400 GHz 频段信号的误码率严重恶化;当正交性偏差达到 30° 时,三个频段信号的误码率均严重恶化。在传输过程中,生成 400 GHz 频段信号的两路 OOK 信号之间的 90° 相位差更容易遭到破坏,因此相对于低频段,高频段对正交性偏差的容

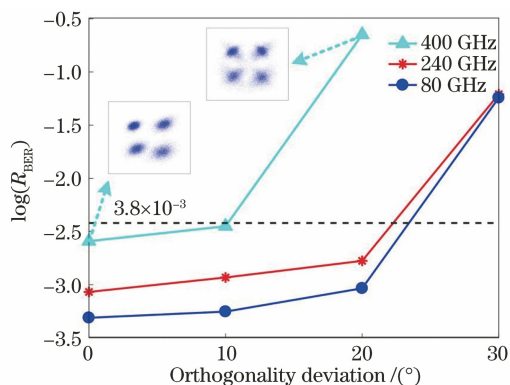


图 9 BER 与正交性偏差的关系

Fig. 9 Relationship between BER and orthogonality deviation

忍度更低。从图 9 还可以发现,所提出的方案可以接受 10° 的正交性偏差,在此范围内的波动影响下,产生的信号受到正交性偏差的影响较小。

上述的仿真分析验证了所提方案对 DP-MZM 消光比的要求以及对 ODL 稳定度的要求,从仿真结果可以看出,所提方案具有较强的可实现性,但调制器消光比的大小与光延迟线的稳定度都会影响信号的生成质量与传输距离。另外,所提方案中没有考虑到射频信号源以及脉冲模式发生器的工作稳定度对方案的影响,实际环境中的这些因素可能会对生成信号的质量带来一定的影响。

4 结 论

提出了一种基于 OOK 调制的光载矢量太赫兹信号产生方案,并通过 VPI 仿真软件进行了验证。该方案利用一个 DP-MZM 生成了一对光八倍频边带,然后利用两个并联的 IM 分别将两路 OOK 基带信号加载到光八倍频边带的两个正交偏振态上,将其中一路偏振信号延迟后与另一路偏振态信号叠加,叠加后的信号经光放大和光纤传输,之后对其进行光电转换,从而产生了太赫兹波段的 QPSK 信号。通过数值仿真验证了 80, 240, 400 GHz 频段信号的性能,实现了 400 GHz 频段上 20 GBaud QPSK 信号的产生,通过 40 km 的 DSF 传输后,信号 BER 低于前向纠错码的阈值 3.8×10^{-3} 。所提方案的发射端不需要复杂的数字信号处理以及数模转换设备等,因此相对于文献[5-7, 25]提出的 2, 4, 5 GBaud 调制速率下高频段矢量 QPSK 信号的产生方案,所提方案具有相对较高的调制速率。同时,只需要改变驱动射频信号的频率,就可以产生多个频段的矢量 QPSK 信号。这表明,所提出的方案是

未来产生高速率、高频段矢量 QPSK 信号的一种有效的方案。

参 考 文 献

- [1] CISCO. Cisco visual networking index: forecast and trends update 2017-2022 [R]. San Jose: White Paper, 2019.
- [2] Li X Y, Yu J J, Wang K H, et al. Photonics-aided 2×2 MIMO wireless terahertz-wave signal transmission system with optical polarization multiplexing [J]. Optics Express, 2017, 25(26): 33236-33242.
- [3] Kawanishi T. THz and photonic seamless communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(7): 1671-1679.
- [4] Yu J G, Li K L, Chen Y X, et al. Terahertz-wave generation based on optical frequency comb and single Mach-Zehnder modulator [J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(1): 7900808.
- [5] Li X Y, Yu J J, Wang K H, et al. 120 Gb/s wireless terahertz-wave signal delivery by 375 GHz-500 GHz multi-carrier in a 2×2 MIMO system [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(2): 606-611.
- [6] Liu C W, Yu J J. A new scheme of D-band mm-wave vector signal generation with simple structure [J]. Acta Optica Sinica, 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]. 光学学报, 2021, 41(4): 0406001.
- [7] Liu C W, Yu J J, Xiong L M, et al. Generation and detection of six-fold frequency vector millimeter-wave signal with precoding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0906006. 刘翠微, 余建军, 熊良明, 等. 带预编码的六倍频矢量毫米波信号产生和探测 [J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0906006.
- [8] Li X Y, Yu J J, Zhang Z R, et al. Photonic vector signal generation at W-band employing an optical frequency octupling scheme enabled by a single MZM [J]. Optics Communications, 2015, 349: 6-10.
- [9] Xiao J N, Zhang Z R, Li X Y, et al. High-frequency photonic vector signal generation employing a single phase modulator [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(2): 7101206.
- [10] Li X Y, Xu Y M, Xiao J N, et al. W-band millimeter-wave vector signal generation based on precoding-assisted random photonic frequency tripling scheme enabled by phase modulator [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(2): 5500410.
- [11] 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.
- [12] 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, 孔淼, 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.
- [13] Huang Y T, Yu J G. Low complexity QPSK/8QAM millimeter-wave signal generation at D-band without phase pre-coding [J]. Optics Communications, 2020, 474: 126062.
- [14] Wang Y Q, Yu J J, Li X Y, et al. Photonic vector signal generation employing a single-drive MZM-based optical carrier suppression without precoding [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(24): 5235-5241.
- [15] Gonzalez-Guerrero L, Shams H, Fatadin I, et al. Single sideband signals for phase noise mitigation in wireless THz-over-fibre systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(19): 4527-4534.
- [16] 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): 5500708.
- [17] 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): 7204606.
- [18] Zhang Q, Yu J J, Li X Y, et al. Adaptive photonic-assisted M^2 -QAM millimeter-wave synthesis in multi-antenna radio-over-fiber system using M-ASK modulation [J]. Optics Letters, 2014, 39(21): 6106-6109.
- [19] Wang Y Y, Wang K H, Zhou W, et al. Photonic aided vector millimeter-wave signal generation without digital-to-analog converter [J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(1): 011101.
- [20] Li Y P, Zhang Y G, Huang Y Q, et al. A novel 64-QAM optical transmitter driven by binary signals [J]. Optik, 2015, 126(23): 4401-4404.
- [21] Morohashi I, Sudo M, Sakamoto T, et al. 16 QAM synthesis by angular superposition of polarization using dual-polarization QPSK modulator [C]//36th European Conference and Exhibition on Optical Communication, September 19-23, 2010, Turin, Italy. New York: IEEE Press, 2010: 11637135.
- [22] Zhang L, Hu X F, Cao P, et al. A flexible multi-16QAM transmitter based on cascaded dual-parallel Mach-Zehnder modulator and phase modulator [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(3): 598-602.
- [23] Zhang J, Wang M G, Shao C G, et al. Photonic frequency-multiplying millimeter-wave generation based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0306004.
张敬, 王目光, 邵晨光, 等. 基于双平行马赫-曾德尔调制器的光子倍频毫米波生成的研究 [J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0306004.
- [24] 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.
- [25] Li K L, Chen Y X, Huang Y T, et al. 0.36 THz photonic terahertz-wave generation by simple optical frequency comb [J]. Optical Fiber Technology, 2021, 64: 102581.