

新型四倍频光生毫米波矢量信号调制技术

王 勇 李明安 赵 强 文爱军* 王方艳 尚 磊

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要 提出一种基于双并联马赫-曾德尔调制器(MZM)的新型四倍频光生毫米波技术,并用于矢量信号调制。传统的四倍频调制技术,由于数据信号同时调制到+2,-2阶边带上,拍频检测后两个边带上数据信号会产生相位叠加,只适用于不归零码(NRZ)等强度调制格式。提出的矢量信号调制技术将数据信号调制在一个-1阶边带上,另一个+3阶边带不携带数据,在拍频检测后幅度和相位信息被正确保留。同时,四倍频模块降低了传输过程中对电和光器件的带宽需求。理论分析和仿真结果表明,通过此方法产生的携带在60 GHz载波上的 6.25×10^8 symbol/s的四相相移键控(QPSK)信号,经过20 km单模光纤传输后,误差向量幅度(EVM)损耗可以忽略。

关键词 光通信;光载射频通信;光生毫米波;马赫-曾德尔调制器;矢量信号调制

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0906001

Vector Signal Modulation Technique Based on a Novel Frequency Quadrupling Scheme in Millimeter-Wave Band

Wang Yong Li Ming'an Zhao Qiang Wen Aijun Wang Fangyan Shang Lei

(School of Telecommunication Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract A novel frequency quadrupling scheme based on a dual parallel Mach-Zehnder modulator (MZM) for the generation of optical millimeter signal and modulation of the vector signal is demonstrated. The traditional frequency quadrupling modulation scheme, which modulates data on both +2 and -2 order optical sidebands and will cause the constellation overlapping after photodetector (PD) detection, can only carry the on-off keying data format such as not return to zero (NRZ). The proposed scheme encodes the electrical vector signal on the -1 order optical sideband, and a pure radio frequency (RF) tone at +3 order optical sideband. Therefore, phase and amplitude information will be correctly preserved after detection. Besides, a frequency quadrupling scheme is employed to reduce the bandwidth requirements of the electrical and optical components of the transmitter. A proof of concept and simulation is conducted by using a 6.25×10^8 symbol/s QPSK signal at a carrier frequency of 60 GHz, which indicates that the error vector magnitude (EVM) penalty is negligible after transmission over 20-km single-mode fiber (SMF).

Key words optical communications; radio over fiber; optical millimeter-wave generation; Mach-Zehnder modulator; vector signal modulation

OCIS codes 060.2330; 060.4080; 060.2360

1 引 言

随着互联网业务的快速发展,用户对无线通信的接入带宽和速率有了更高的要求,现有的无线接入技术难以满足需求。毫米波通信以其高带宽、高速度和高安全性,成为下一代宽带无线通信的有力竞争技术^[1,2]。多个国家已在60 GHz频率附近分

配了7 GHz带宽的免授权使用频带,60 GHz将成为下一代无线个域网发展的首选频段。然而60 GHz频段的毫米波信号在大气中传播时受到严重的大气衰减和雨衰,传输距离受到限制。结合光纤通信的高带宽和无线通信接入灵活等优点的光载射频通信(ROF)技术为提高毫米波通信距离提供

收稿日期: 2012-03-08; **收到修改稿日期**: 2012-04-17

基金项目: 国家973计划(2010CB328303)资助课题。

作者简介: 王 勇(1968—),男,硕士,讲师,主要从事光纤通信、光载射频通信等方面的研究。

E-mail: ywang@mail.xidian.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: ajwen@xidian.edu.cn

了解决方案^[3,4]。

光生毫米波技术利用低频微波信号通过光学倍频法生成高频毫米波信号,克服了电子倍频器件响应频率和带宽的限制。国内外的很多研究机构都提出了各自的光生毫米波方案,其中基于马赫-曾德尔调制器(MZM)的光学倍频法是最为有效的方法^[5~11]。在这些方案中,生成的光毫米波信号包含两个光边带,数据信号同时调制在两个光边带上,在光电接收机直接探测时,数据信号的幅度 $V(t)$ 和相位 $n\theta(t)$ 会变为 $V^2(t)$ 和 $2n\theta(t)$,相位产生严重失真。因此,文献^[5~11]中提出的方案只适用于幅移键控等强度信号的调制,而对于无线通信中常用的多进制数字相位调制、多进制正交幅度调制和正交频分复用技术等矢量信号调制及复用方式则不适用^[12,13]。文献^[14,15]提出了采用预失真补偿的方法来避免文献^[5~11]中光生毫米波方案在调制矢量信号时产生的幅度和相位失真问题,该方法将很大程度上增加驱动电路的复杂度。文献^[16,17]提出的方案中,生成的光毫米波信号包含一对数据边带和一对纯净边带,滤除其中的一个数据边带和一个纯净边带,拍频检测时也可以避免发生失真,但是,在这些方案中,需要用到带宽严格的窄带光滤波器,这将增加系统代价和不稳定性。文献^[18,19]中提出用级联单边带方法生成光毫米波,该方法生成的毫米波光谱中包含一个纯净光边带和一个数据边带,拍频时可以避免发生信号失真。但是,为生成60 GHz毫米波,需采用30 GHz的射频(RF)驱动信号,这对调制器的响应频率和带宽提出了很高的要求。

本文提出了一种基于双平行MZM的新型四倍频光生毫米波及矢量信号调制技术。利用该方法生成的毫米波光谱中包含一个-1阶数据光边带和一个+3阶纯净光边带,这样在拍频检测时便不会发生信号的失真。同时,带内没有干扰边带,因此不需要采用窄带光滤波器,这在很大程度上提高了系统的稳定性。

2 倍频法光生毫米波相位失真分析

文献^[5~11]中提出几种基于光学倍频法的光生毫米波技术,下面以四倍频为例,四倍频生成的光毫米波谱包含上下两个2阶边带和一些高阶边带,在不考虑高阶边带影响时,四倍频光毫米波可以表示为

$$E_{\text{out}}(t) = E_0 \{ J_2[m(t)] \cos[(\omega_c + 2\omega_m)t + 2\theta(t)] + J_{-2}[m(t)] \cos[(\omega_c - 2\omega_m)t - 2\theta(t)] \}, \quad (1)$$

式中 E_0 和 ω_c 分别为输入光信号的幅度和角频率, ω_m 和 $\theta(t)$ 分别为调制矢量信号的角频率和相位, $J_n(\cdot)$ 为第一类贝塞尔函数, m 为调制指数,定义为 $m = \pi V_m / V_\pi$,此处 $m(t) = \pi V_m(t) / V_\pi$,其中 $V_m(t)$ 为射频矢量信号的幅度信息。在光电探测器(PD)处拍频检测后,生成的四倍频矢量信号可以表示为

$$i_{\text{RF}}(t) = R |E_{\text{out}}(t)|^2 = RE_0^2 J_2^2[m(t)] \cos[4\omega_m t + 4\theta(t)], \quad (2)$$

式中 R 是PD的响应度,由(2)式可知,生成的射频信号的幅度和相位信息分别为 $RE_0^2 J_2^2[m(t)]$ 和 $4\theta(t)$,因此原驱动射频信号的幅度和相位都发生了失真^[14,15]。利用该四倍频调制方案传输四相相移键控(QPSK)信号时的相位失真如图1所示。

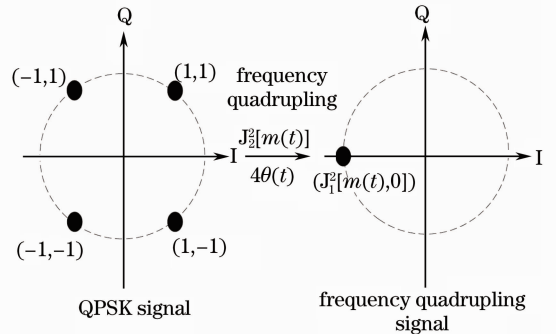


图1 四倍频QPSK调制相位失真分析

Fig. 1 Analysis of frequency quadrupling QPSK phase distortion

由图1可知,拍频解调后,QPSK信号的4个星座点发生了混叠,信息无法恢复。因此,传统倍频法的光生毫米波技术不适用于QPSK等矢量信号的调制。

3 原理分析

为解决倍频法光生毫米波中矢量信号调制相位失真的难题,提出一种新型的四倍频光生毫米波及矢量信号调制方法。与传统的倍频法调制方法不同,本方案生成的四倍频光谱中,数据信号被调制在-1阶边带上,+3阶边带不携带数据,系统结构如图2所示。

如图2所示,双平行MZM由MZ1和MZ2内嵌在主调制器MZ3的两臂中构成。MZ1和MZ2偏置在最小传输点,抑制偶次谐波。MZ3偏置在正交偏置点,在两臂的光波中引入 $\pi/2$ 相位差,这样生成的光谱中只含有-1阶、+3阶等谐波,其他谐波分量被很好地抑制。当携带数据的RF1工作在小调制指数,不携带数据的RF2工作在大调制指数

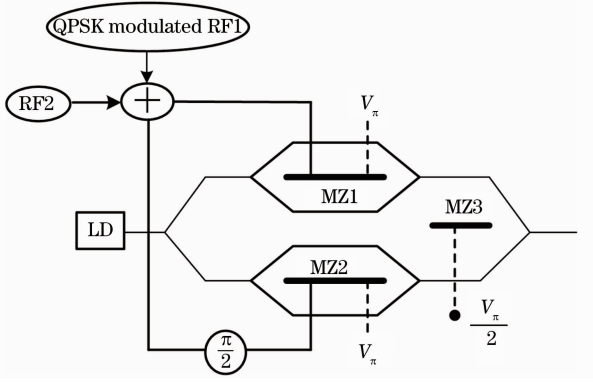


图 2 基于新型四倍频的光生毫米波矢量信号调制系统结构

Fig. 2 Principle structure of vector signal modulation based on novel frequency quadrupling for ROF

时,可以使得生成的毫米波谱中只包含一个携带数据的一1阶边带和一个纯净的+3阶边带,其原理如图3所示。

设加载到 MZ1 和 MZ2 上的射频信号分别为

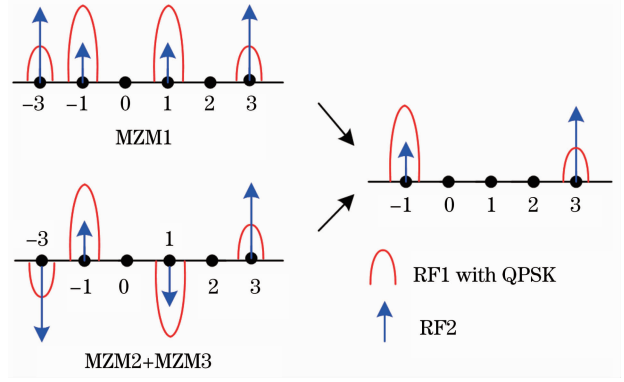
$$V_a(t) = V_m(t) \sin[\omega_{rf}t + \theta_1(t)] + V_2 \sin[\omega_{rf}t + \theta_2], \quad (3)$$


图 3 基于新型四倍频的光生毫米波矢量信号调制原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the vector signal modulation based on novel frequency quadrupling scheme for ROF

$$V_b(t) = V_m(t) \cos[\omega_{rf}t + \theta_1(t)] + V_2 \cos[\omega_{rf}t + \theta_2], \quad (4)$$

式中 $V_m(t)$ 和 $\theta_1(t)$ 为调制了 QPSK 数据的 RF1 的幅度和相位, V_2 和 θ_2 为 RF2 的幅度和相位, ω_{rf} 为 RF1 与 RF2 的角频率。则调制器输出光信号可以表示为

$$E_{out}(t) = E_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \{ [1 - (-1)^n] + j[j^n - (-j)^n] \} \{ J_n(m_1) \cos[(\omega_0 + n\omega_{rf})t + n\theta_1(t)] + J_n(m_2) \cos[(\omega_0 + n\omega_{rf})t + n\theta_2] \} = E_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \{ J_{(4n-1)}(m_1) \cos\{[\omega_0 + (4n-1)\omega_{rf}]t + (4n-1)\theta_1(t)\} + J_{(4n-1)}(m_2) \cos\{[\omega_0 + (4n-1)\omega_{rf}]t + (4n-1)\theta_2\} \} = E_0 \{ J_{-1}(m_1) \cos[(\omega_0 - \omega_{rf})t - \theta_1(t)] + J_{-1}(m_2) \cos[(\omega_0 - \omega_{rf})t - \theta_2] + J_3(m_1) \cos[(\omega_0 + 3\omega_{rf})t + 3\theta_1(t)] + J_3(m_2) \cos[(\omega_0 + 3\omega_{rf})t + 3\theta_2] + \dots \}, \quad (5)$$

式中 E_0 和 ω_0 分别为光载波的幅度跟角频率, $m_1 = \pi V_m(t)/V_\pi$ 和 $m_2 = \pi V_2/V_\pi$ 分别为 RF1 和 RF2 的调制指数(MI)。由(5)式可知,光谱中只包含 $4n-1$ 阶边带。为了获得如图3所示光谱,需要设置 m_1 和 m_2 使得 $J_3(m_1)$ 和 $J_{-1}(m_2)$ 均趋近于零,使得干扰谐波得到抑制。-5阶及+7阶等更高次谐波由于幅度很小,其影响可以忽略。

当干扰光谐波被完全抑制时,双并联 MZM 的输出光波可以表示为

$$E_{out}(t) = E_0 \{ J_{-1}(m_1) \cos[(\omega_0 - \omega_{rf})t - \theta_1(t)] + J_3(m_2) \cos[(\omega_0 + 3\omega_{rf})t + 3\theta_2] \}. \quad (6)$$

PD 拍频检测后输出的毫米波信号为

$$i_{MMW}(t) = E_0^2 R J_3(m_2) J_{-1}(m_1) \times \cos[4\omega_{rf}t + \theta_1(t) + 3\theta_2]. \quad (7)$$

从(7)式可以看出,生成的毫米波信号频率为驱

动射频信号的4倍,即实现了四倍频的光生毫米波。生成的毫米波信号的幅度和相位分别为 $E_0^2 R J_3(m_2) J_{-1}(m_1)$ 和 $\theta_1(t) + 3\theta_2(t)$, 又因为 $E_0^2 R J_3(m_2)$ 和 $3\theta_2$ 是常量,原 QPSK 信号的幅度和相位信息没有发生失真,避免了相位失真引入的星座点混叠问题。

4 系统仿真和结果分析

利用仿真软件 VPI transmissionMaker 8.3 对该系统性能进行了分析,系统原理图如图4所示。连续谱激光器中心频率在 193.1 THz,输出光功率为 1 mW (0 dBm)。双平行 MZM 由两个双臂 MZM 通过两个光耦合器并联构成,耦合器分光比为 50:50。光移相器(PS)的作用等同于 MZ3 的直流偏置,在下支路中引入 $\pi/2$ 相移。一个调制了

625Msymbol/s QPSK 数据的 15 GHz 射频 RF1 和一个纯净射频 RF2 耦合后作为驱动信号加载到两个 MZM 上,加载到 MZ1 和 MZ2 上的射频信号由电移相器引入 $\pi/2$ 相位差。两个 MZM 的半波电压 V_π 为 5 V。掺铒光纤放大器(EDFA)用来补偿调制器和光纤的插入损耗,光带通滤波器(OBPF)用来滤除放大自发辐射(ASE)噪声和高阶干扰谐波。PD 拍频后生成的射频信号经电带通滤波器(BPF)滤波、下变频、低通滤波(LPF),最后通过矢量信号分析仪(VSA)观察解调出的矢量信号星座图和误差矢量幅度(EVM)值。

双并联 MZM 输出的光谱如图 5(a)所示,光谱包含了一个+3 阶纯净边带(中心频率为 193.1 THz+45 GHz)和一个调制了数据的-1 阶边带(中心频率为 193.1 THz~15 GHz),其结果与(6)式理论分析一致。拍频后生成的 60 GHz 毫米波信号频谱如图 5(b)所示。背靠背(BTB)和传输 20 km 后解调出的 QPSK 信号星座图分别如图 5(c),(d)所示,解调出

的 QPSK 信号的星座图均匀分布在 4 个象限中,没有发生星座点的混叠,与(7)式理论分析一致。

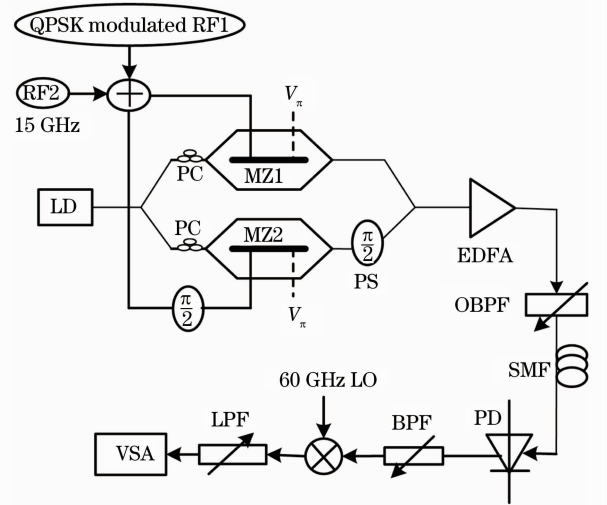


图 4 基于新型四倍频光生毫米波的矢量信号调制仿真原理图

Fig. 4 Simulation schematic diagram of the vector signal modulation based on novel frequency quadrupling scheme for ROF

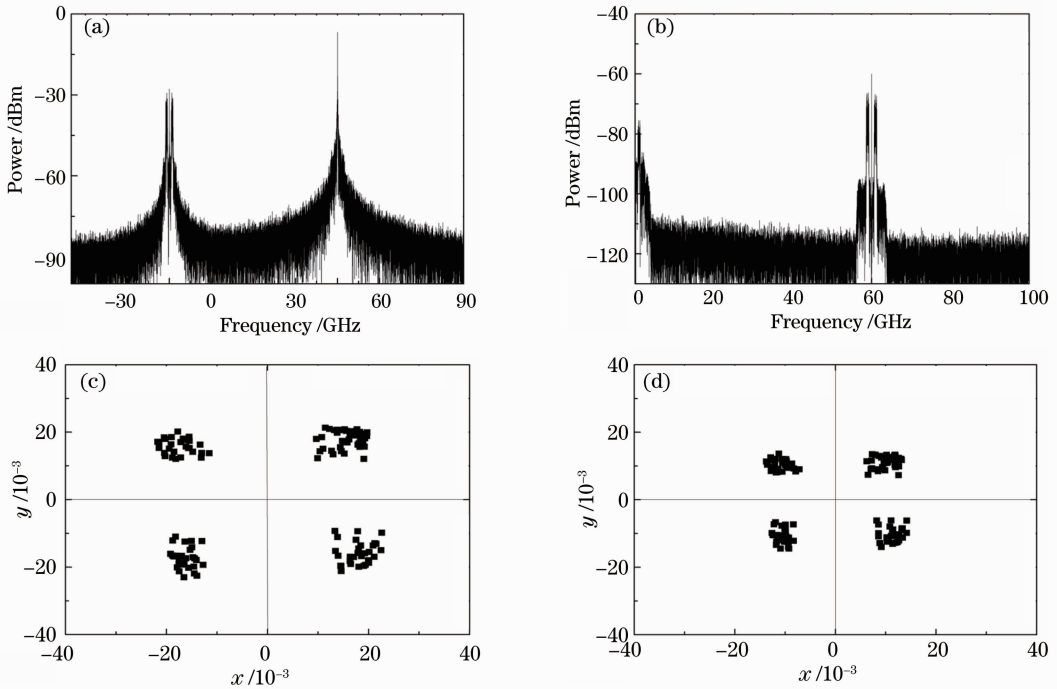


图 5 系统仿真结果。(a)光谱图;(b) 60 GHz 频谱图;(c) BTB 信号星座图;(d) 20 km 信号星座图

Fig. 5 Simulation results of the system. (a) Optical spectrum; (b) 60 GHz frequency spectrum; (c) BTB signal constellation; (d) 20 km signal constellation

由前面的理论分析可知,需要通过合理的设置 m_1 和 m_2 ,使得干扰光谐波得到抑制,谐波抑制的具体情况如图 6 所示。

由图 6 所示的贝塞尔函数曲线可知, $J_3(m)$ 和

$J_{-1}(m)$ 的值随着 m_1 和 m_2 的变化而变化,因此可以通过合理设置 m_1 和 m_2 的值达到对 $J_3(m_1)$ 和 $J_{-1}(m_2)$ 的有效抑制。当 $m_2 = 3.83$ 时, $J_{-1}(m_2) = 0$, 因此,为了完全抑制 $J_{-1}(m_2)$ 项,射频 RF2 应当工作

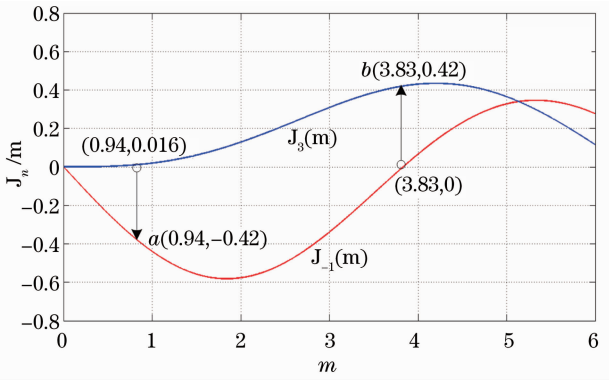


图 6 第一类贝塞尔函数曲线

Fig. 6 Curves of Bessel functions of the first kind

在图 6 中的 b 点。由图 6 可以看出，一个较小的 m_1 值有利于更好地抑制 $J_3(m_1)$ 项，但是，过小的 m_1 值会使得携带数据的载波 [$J_{-1}(m_1)$ 项] 功率小于纯净光载波 [$J_3(m_2)$ 项] 的功率，从而带来较大的 OPR 值 (OPR 定义为纯净光载波功率与携带数据光载波功率的比值)，不利于系统的解调，因此需要寻找 RF1 的最优工作点^[20]。

系统接收 EVM 的定义表达式为

$$f_{EVM} = \sqrt{\sum_{i=1}^N |d_r - d_i|^2 / (N |d_{max}|)}, \quad (8)$$

式中 d_r 和 d_i 分别为实际和理想接收到的符号矢量， N 为计算的符号数， d_{max} 是星座图中的最大符号矢量 (QPSK 中 4 个点的理想值幅度相同)^[21]。

当 RF2 工作在图 6 中的 b 点，即 $m_2 = 3.83$ ，对应 $V_2 = 6.1$ V 时，系统接收 EVM 随 RF1 幅度变化曲线如图 7 所示。

从图 7 中可以看出， $V_m(t) = 1.5$ V 时，EVM 取得

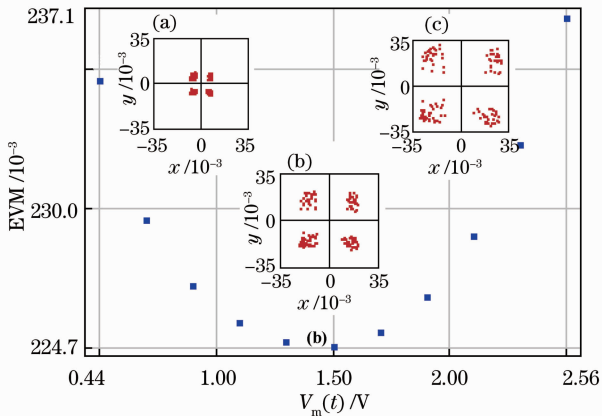


图 7 EVM 值随 RF1 幅度变化曲线及各点的解调星座图

Fig. 7 EVM versus amplitude of RF1 and demodulated constellation at different points

最小值。因此，最优工作点为图 7 中的 b 点 [$V_m(t) = 1.5$ V, $V_2 = 6.1$ V]，对应 $m_1 = 0.94, m_2 = 3.83$ 。

最后，分析了系统在最优工作点时的传输性能。不同接收光功率下的 EVM 性能如图 8 所示。由图知传输 20 km 后接收端的功率代价很小，EVM 损耗可以忽略。

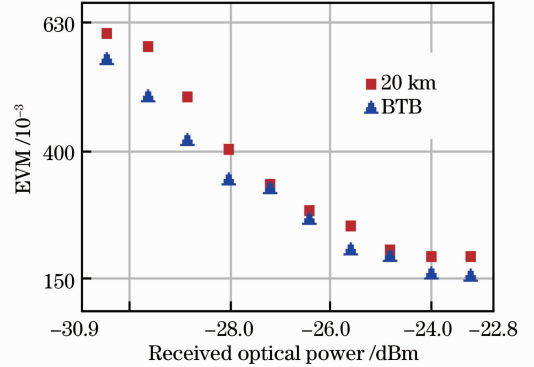


图 8 EVM 与接收光功率的关系

Fig. 8 EVM versus received optical power

5 结 论

本文提出一种基于双并联 MZM 的新型四倍频光生毫米波及矢量信号调制技术。常规的倍频法光生毫米波将数据同时调制到两个边带上，拍频后信号会产生相位失真，因此不适于 MPSK、MQAM 等矢量信号调制。提出将矢量信号调制到 -1 阶边带上，另一个 $+3$ 阶边带不携带数据，拍频后的数据信号不会产生相位失真，同时还实现了四倍频光生毫米波。理论分析和仿真结果证明，该技术可以避免相位失真和星座点的混叠。同时，在最优工作点，ROF 系统具有很好的传输性能。

参 考 文 献

- 1 J. Ma, J. Yu, C. Yu *et al.*. Transmission performance of the optical mm-wave generated by double sideband intensity-modulation [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **280**(2): 317~326
- 2 J. Yu, Z. Jia, T. Wang *et al.*. Centralized lightwave radio-over-fiber system with photonic frequency quadrupling for high-frequency millimeter-wave generation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(19): 1499~1501
- 3 N. J. Gomes, M. Morant, A. Alphones *et al.*. Radio over fiber transport for the support of wireless broadband services[J]. *J. Opt. Networking*, 2009, **8**(2): 156~178
- 3 H. Zheng, S. Liu, X. Li *et al.*. Generation and transmission simulation of 60 GHz millimeter-wave by using semiconductor optical amplifiers for radio-over-fiber systems [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(22): 4440~4444
- 4 P. T. Shih, C. T. Lin, W. J. Jiang *et al.*. Full duplex 60-GHz ROF link employing tandem single sideband modulation scheme and high spectral efficiency modulation format [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(22): 19501~19508

- 5 M. Mohamed, X. Zhang. Frequency sixupler for millimeter-wave over fiber systems [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(14): 10141~10151
- 6 Yuan Yan, Qin Yi. Frequency sextupling technique using two cascaded dual-electrode Mach-Zehnder modulators[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1005004
袁 燕, 秦 毅. 基于串联双电极马赫-曾德尔调制器的六倍频技术[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1005004
- 7 Xu Gang, Zheng Xiaoping, Zhang Hanyi. 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
- 8 Zhu Zihang, Zhao Shanghong, Yao Zhoushi *et al.*. Generation of frequency quadruple optical millimeter-wave signal to overcome chromatic dispersion [J]. *Chinese J. 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
- 9 Liu Limin, Dong Ze, Pi Yazhi *et al.*. Radio-over-fiber system for frequency-quadruple millimeter-wave generation by external modulator[J]. *Chinese J. 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
- 10 Q. Chang, H. Fu, Y. Su. Simultaneous generation and transmission multi-band signals and upstream data in a bidirectional radio over fiber system [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(3): 181~183
- 11 J. Ma, X. Xin, J. Yu *et al.*. Optical millimeter wave generated by octupling the frequency of the local oscillator [J]. *J. Opt. Netw.*, 2008, **7**(10): 837~845
- 12 Y. Zhang, K. Xu, R. Zhu *et al.*. Photonic generation of M-QAM/M-ASK signals at microwave/millimeter-wave band using dual-drive Mach-Zehnder modulators with unequal amplitudes [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(15): 2604~2610
- 13 M. Mohamed, B. Hraimel, X. Zhang *et al.*. Frequency quadrupler for millimeter-wave multiband OFDM ultra-wideband wireless signals and distribution over fiber systems [J]. *J. Opt. Commun. Networking*, 2009, **1**(5): 428~438
- 14 C. T. Lin, P. T. Shih, W. J. Jiang *et al.*. Photonic vector signal generation at microwave/millimeter-wave bands employing an optical frequency quadrupling scheme [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(14): 2171~2173
- 15 W. J. Jiang, C. T. Lin, H. S. Huang *et al.*. 60-GHz photonic vector signal generation employing frequency quadrupling scheme for radio-over-fiber link [C]. OSA/OFC/NFOEC, 2009. OWF1
- 16 P. T. Shih, C. T. Lin, W. J. Jiang *et al.*. Transmission of 20-Gb/s OFDM signals occupying 7-GHz license-free band at 60 GHz using a RoF system employing frequency sextupling optical up-conversion [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(12): 12748~12755
- 17 W. J. Jiang, C. T. Lin, A. Ng'oma *et al.*. Simple 14-Gb/s short-range radio-over-fiber system employing a single-electrode MZM for 60-GHz wireless applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(16): 2238~2246
- 18 C. T. Lin, S. P. Dai, J. Chen *et al.*. A novel direct detection microwave photonic vector modulation scheme for radio-over-fiber system [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(13): 1106~1108
- 19 C. T. Lin, P. T. Shih, Y. H. Chen *et al.*. Experimental demonstration of 10-Gb/s OFDM-QPSK signal at 60 GHz using frequency-doubling and tandem SSB modulation [C]. OSA/OFC/NFOEC, 2009. OMV7
- 20 J. Ma, J. Yu, C. Yu *et al.*. Influence of the modulation index of Mach-Zehnder modulator on RoF link with ASK millimeter-wave signal [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2009, **41**(1): 11~16
- 21 W. R. Peng, X. Wu, V. R. Arbab *et al.*. Experimental demonstration of 340 km SSMF transmission using a virtual single sideband OFDM signal that employs carrier suppressed and iterative detection techniques [C]. OSA/OFC/NFOEC, 2008. OMU1

栏目编辑: 韩 峰