

doi:10.3788/gzxb20184712.1206003

基于光载波抑制调制的可调谐高倍频毫米波信号发生器

刘婷婷,裴丽,王一群,吴良英,郑晶晶,李晶

(北京交通大学 光波技术研究所,北京 100044)

摘要:提出了一种基于改进的光载波抑制调制方式的光学生成高倍频可调谐毫米波的方案.该方案利用均匀光纤光栅型声光可调谐滤波器选取光载波抑制信号中的两个边带分量进行拍频,实现高倍频且倍频因子可调的毫米波信号的生成.为避免色散所致的码元时移效应,将基带数据信号仅调制到光载波抑制信号的一个边带分量上.仿真验证了倍频因子分别为 2,6,10,14,18 和 22 的毫米波信号的生成.另外,对 22 倍频下的光载无线电系统的链路性能进行了仿真分析,毫米波信号在调制 2 Gbit/s 的非归零码型数据信号经 50 km 的光纤传输后,系统的眼图仍保持良好的睁开度,链路的功率代价仅为 0.4 dB.系统具有良好的传输性能,可以满足通信系统的需求.

关键词:光载无线电;毫米波;光载波抑制调制;倍频;可调谐

中图分类号:TN929.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)12-1206003-7

Tunable High-frequency Millimeter-wave Signal Generator Based on Optical Carrier-suppressed Modulation

LIU Ting-ting, PEI Li, WANG Yi-qun, WU Liang-ying, ZHENG Jing-jing, LI Jing

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A tunable multi-frequency optical millimeter-wave signals generator scheme based on optical carrier-suppressed modulation was proposed theoretically. Millimeter-wave signals with tunable frequency multiplication factor can be obtained through the beating of two sideband components of the optical carrier-suppressed signal which are selected by the uniform fiber Bragg grating based on acousto-optic tunable filter. What's more, in order to avoid the time shift of code effect caused by the chromatic dispersion of the fiber, the baseband data signals are modulated on only one sideband component of the optical carrier-suppressed signal. To investigate the scheme, some simulations have been done. It turns out that optical millimeter-wave signals with frequency multiplication factors of 2, 6, 10, 14, 18 and 22 will be generated. The transmission performance of the downlink of the radio-over-fiber system are also evaluated. Under the situation that the frequency multiplication factor is 22, when the optical millimeter-wave signals modulated with non-return-to-zero data signals of 2 Gbit/s, the eye diagrams are still wide open after transmitting through the fiber of 50km. Meanwhile, the power penalty is only 0.4 dB. The results show that the system with well transmitting performance can meet the requirements of communication.

Key words: Radio over Fiber; Millimeter-wave; Optical carrier-suppressed modulation; Frequency multiplication; Tunable

OCIS Codes: 060.5625; 060.4080; 060.2330; 060.2360; 060.2310

基金项目:国家自然科学基金(No. 61525501)资助

第一作者:刘婷婷(1994-),女,硕士研究生,主要研究方向为微波光子. Email: 16120015@bjtu.edu.cn

导师(通讯作者):裴丽(1970-),女,教授,博士,主要研究方向为光纤通信、RoF、光纤传感. Email: lipei@bjtu.edu.cn

收稿日期:2018-08-13;录用日期:2018-09-17

0 引言

光生毫米波技术是光载无线电(Radio over Fiber, RoF)系统的重要组成部分,高频段、高品质的毫米波生成是国内外学者的研究重点.通常,毫米波信号的光生成方案可以分为直接调制法、外调制法、频率上转换法、光外差法和光注入锁定等几类.其中,外部调制法在生成高频谱纯度^[1]、高频率的毫米波信号方面有巨大的优势,且结构简单、调制方式灵活、调制效率较高^[2-3].在外部调制技术中,马赫增德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)以其工作性能稳定、线性度较好、调制速率高且工艺技术成熟等优点被广泛应用,对于存在的偏置点漂移和插入损耗等问题,业界已提出较为成熟的方案,其性能不会受到较大的影响^[4-5].为实现高倍频因子毫米波信号的产生,光外部调制技术多采用级联、集成或者使用特殊结构的 MZM 等方法.文献[6]使用级联 MZM 结合偏振控制技术可实现二倍频毫米波信号和六倍频毫米波信号之间的转换,但是需要准确控制两个调制器的调制指数和起偏器的起偏角.文献[7]使用两个级联的偏振调制器,通过改变两个偏振调制器的调制系数及输出光的偏振态等条件,可产生倍频因子为 4、6、8 的毫米波信号.文献[8]使用一个集成的偏振复用双平行 MZM,通过调节偏振器的角度、调制器的工作点及射频驱动电压可产生八倍频的毫米波信号,但偏振控制器的旋转角度需要准确控制.也有研究者使用两个平行的双平行 MZM 生成 8 倍频^[9]的毫米波信号,三个平行的 MZM^[10]生成 16 倍频的毫米波信号.这些基于特殊结构或级联 MZM 的外部调制法具有良好的射频杂散抑制比(Spurious Suppression Ratio, SSR)和光学边带抑制比(Optical Sideband Suppression Ratio, OSSR),但是结构较为复杂且不能对倍频因子进行灵活的调谐.在外调制系统中,通过调节外部调制器的偏置电压及射频调制信号的相位等参数,可以实现不同的调制格式,从而产生不同频谱结构的信号,如光双边带(Optical Double-Sideband, ODSB)调制信号、光单边带调制(Optical Single-Sideband, OSSB)信号和光载波抑制(Optical Carrier-Suppressed, OCS)调制信号等.文献[11]基于 ODSB 的调制方式可以产生倍频因子(Frequency Multiplication Factor, FMF)为 10 的毫米波信号,且方案简单灵活.注意到,和 ODSB、OSSB 相比,OCS 调制方式具有独特的优势.ODSB 调制方式会受到色散所导致的功率周期性衰减效应的影响,OSSB 调制方式虽解决了这个问题但频谱效率低较少用于 RoF 系统中,而 OCS 调制方式因具有较高的频谱效率和较强的抗色散能力得到更为广泛的应用^[12].由于外部调制技术是利用特定两个边带拍频来产生倍频毫米波信号的,所以在 OCS 系统中,调制时需要的本地振荡信号的频率仅为 ODSB 和 OSSB 调制系统中的一半^[13].在同等的条件下,OCS 信号两个边带拍频产生的毫米波的倍频因子要比 ODSB 和 OSSB 信号边带拍频高得多.另外,在长距离的传输中,OCS 调制方式具有较高的接收灵敏度和较低的功率损耗,配置简单,对电、光器件的要求都比较低^[14],基于 OCS 调制的下行链路系统具有更好的传输性能^[2,15].但是在传统的 OCS 调制方式下,不同的边带同时被调制了基带数据信号.因为光纤色散的作用,不同边带在光纤中具有不同的传输速度,所以,基带数据信号会在不同的时间到达接收端而失去同步,导致解调出来的基带码元变窄甚至消失即码元时移效应的产生,大大影响着系统的传输性能^[16].

本文提出了一种在改进的 OCS 调制方式下的多倍频可调谐毫米波信号发生器方案.方案的基本原理是,通过控制声波频率的大小,改变均匀光纤光栅型声光可调谐滤波器(Uniform Fiber Bragg Grating Based Acoustic Optical Tunable Filter, UFBG-AOTF)的主次反射峰的波长间隔,从而滤出 OCS 频谱中所需要的边带,在接收端光电探测器(Photodetector, PD)处进行拍频,便可以实现可调谐的多倍频毫米波的生成.与文献[11]相比,由于本方案采用 OCS 调制方式,因此可生成倍频因子更高的毫米波信号.而改进的 OCS 方案是指将基带数据信号仅调制到 OCS 信号频谱的一个边带上,这样可以有效避免色散导致的码元时移效应,保证系统稳定、长距离传输.本方案可以实现倍频因子高达 22 的毫米波信号的生成,2Gbit/s 的基带数据信号在传输 50 km 后,眼图仍可有良好的睁开度,链路功率代价也很小.

1 理论分析

基于 OCS 调制的可调谐多倍频毫米波信号发生器的结构如图 1.方案中使用光场为 $E_c \exp(j\omega_c t)$ 的可调谐激光器(Tunable Laser, TL)作为光源,射频(Radio Frequency, RF)信号通过一个双驱动马赫增德尔调制器(Dual-driving Mach-Zehnder modulator, DD-MZM)调制到光载波上.调节 DD-MZM 参数,使其工作

在最小偏置点且两臂的相位差为 π , 以实现 OCS 调制, DD-MZM 的输出信号的光场 E_{out} 表示为

$$E_{\text{out}}(t) = E_{\text{in}}(t) \left\{ 2 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n J_{2n+1}(m) \cos(2n+1)\omega t \right\} = E_c \exp(j\omega_c t) \{ 2J_1(m) \cos \omega t - 2J_3(m) \cos 3\omega t + 2J_5(m) \cos 5\omega t - 2J_7(m) \cos 7\omega t + 2J_9(m) \cos 9\omega t - 2J_{11}(m) \cos 11\omega t \dots \} \quad (1)$$

式中, m 为调制器的调制指数 ($m = \pi V_{\text{RF}} / V_{\pi}$), V_{RF} 和 ω 分别为射频信号的电压幅度和频率, V_{π} 为调制器的半波电压, $J_n(\cdot)$ 为 n 阶的第一类贝塞尔函数。

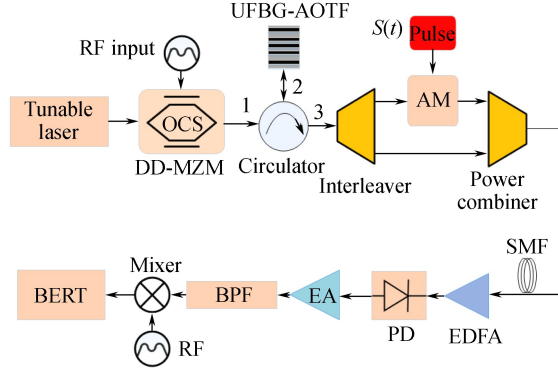


图1 毫米波发生器结构示意图

Fig.1 Conceptual diagram of the proposed mm-wave signal generation methods

适当增大调制器的调制指数 m , 可以提高 DD-MZM 输出信号光谱的边带功率. 选取适当的 m 值, 可实现 OCS 信号的 11 阶边带仍具有较高的功率值. 因此, DD-MZM 的输出信号光场可进一步表示为

$$E_{\text{out}}(t) \approx E_0 \cdot \{ J_1(m) \exp[j(\omega_c + \omega)t] + J_1(m) \exp[j(\omega_c - \omega)t] - J_3(m) \exp[j(\omega_c + 3\omega)t] - J_3(m) \exp[j(\omega_c - 3\omega)t] + J_5(m) \exp[j(\omega_c + 5\omega)t] + J_5(m) \exp[j(\omega_c - 5\omega)t] - J_7(m) \exp[j(\omega_c + 7\omega)t] - J_7(m) \exp[j(\omega_c - 7\omega)t] + J_9(m) \exp[j(\omega_c + 9\omega)t] + J_9(m) \exp[j(\omega_c - 9\omega)t] - J_{11}(m) \exp[j(\omega_c + 11\omega)t] - J_{11}(m) \exp[j(\omega_c - 11\omega)t] \} \quad (2)$$

由式(2)可以看出, DD-MZM 的输出信号由对称的各奇数阶边带组成, 偶数阶边带和光载波被抑制. DD-MZM 的输出端连接光环形器端口 1, 光环形器的端口 2 连接 UFBG-AOTF, DD-MZM 输出的光信号被 2 端口的 UFBG-AOTF 反射. 因为 DD-MZM 的输出光谱中光载波被抑制, 所以仅有 UFBG-AOTF 的两个左右一阶次反射峰频率对应的边带被选择出来, 并从环形器的 3 端口输出. 在传统的 OCS 调制方式下, 色散会导致被不同边带分量携带的基带数据码元的走离, 大大限制了系统的传输距离. 因此, 在环形器的 3 端口连接光分叉复用器使两个边带分开, 仅其中一个边带进入幅度调制器 (Amplitude Modulator, AM) 被基带数据信号调制. 之后再通过合波器将两路信号合波, 由掺铒光纤放大器 (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA) 放大后, 经单模光纤传输到接收端. 以二倍频毫米波信号的产生为例, 这里假设将信号调制到了负一阶边带, 则合波器的输出光场为

$$E_1(t) = a_{-1} S(t) \cos(\omega_c - \omega_m) + a_{+1} \cos(\omega_c + \omega_m) \quad (3)$$

当 OCS 信号经过一段距离光纤的传输后, 其光场为

$$E_2(z, t) = a_{-1} S(t - (\omega_c - \omega_{\text{RF}}) - 1\beta(\omega_c - \omega_{\text{RF}})z) \times e^{-\gamma z} \cos[(\omega_c - \omega_{\text{RF}})t - \beta(\omega_c - \omega_{\text{RF}})z] + a_{+1} e^{-\gamma z} \cos[(\omega_c + \omega_{\text{RF}})t - \beta(\omega_c + \omega_{\text{RF}})z] \quad (4)$$

式中, z 为光纤的长度, γ 为光纤的损耗, $\beta(\omega)$ 为传输常数, 是 ω 的函数.

在 PD 处对经光纤传输后的信号进行探测, 生成的光电流为

$$I_2(t) = \mu |E_2(z, t)|^2 \approx \frac{1}{2} \mu e^{-2\gamma z} \{ a_{-1}^2 S[t - \omega_c^{-1} \beta(\omega_c)z] + a_{+1}^2 \} + \frac{1}{2} \mu e^{-2\gamma z} a_{-1} a_{+1} S(t - \omega_c^{-1} \beta(\omega_c)z) \times \cos 2\omega_{\text{RF}}[t - \beta'(\omega_c)z] \quad (5)$$

由此可见, 在接收端经过 PD 拍频后, 可以生成倍频因子是 $2n$ ($n = 1, 3, 5, 7, 9, 11$) 的毫米波信号, 且产

生的毫米波信号不会因为两个边带同时携带数据信号而产生码元走离现象.最后,利用相干解调的方法恢复基带数据信号,通过误码仪对系统的传输性能进行评估.

2 仿真结果分析

根据图 1 的结构图,利用 Optisystem 软件对方案进行仿真验证,系统的仿真模型如图 2,其中 UFBG-AOTF 的频谱仿真由一个 matlab 模块来实现.在仿真系统中,设置连续波激光器的中心频率为 194.116 THz,功率为 30 dBm;RF 信号频率为 10 GHz,连接功分比为 1:1 的功分器分成两路信号,其中一路信号直接用来驱动 DD-MZM 的一臂,另一路信号经过一个 π 的相移器后驱动 DD-MZM 的另一臂,并设置偏置电压使 DD-MZM 处于最小偏置点以实现 OCS 调制;调制指数 $m = 2.5\pi$ 以实现更高倍频毫米波信号的产生.这样,DD-MZM 输出信号的光谱如图 3 所示.可以看出,产生的 OCS 信号的 ± 11 阶分量仍具有一定的功率值,各边带之间的频率间隔为 20 GHz.

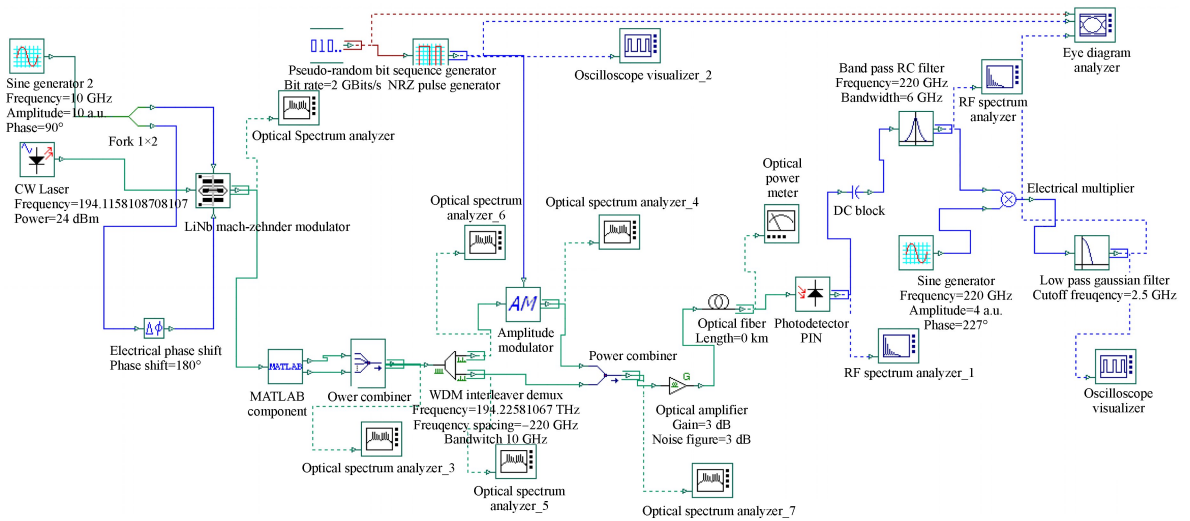


图 2 毫米波信号发生器仿真模型

Fig.2 Simulation model of the proposed mm-wave signal generation methods

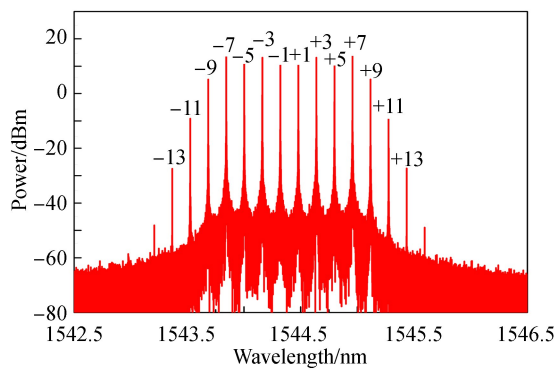


图 3 双驱动马赫增德尔调制器输出的光信号频谱

Fig.3 Spectrum of the output optical signal from the DD-MZM

以 22 倍频毫米波信号的生成为例,DD-MZM 的输出信号进入光环形器,被 2 端口具有图 4(a)所示的反射谱的 UFBG-AOTF 反射,在光环行器 3 端口输出,信号的频谱如图 4(b)所示.从图中可以看出,原始光载波抑制信号的 ± 11 阶边带分量被滤出,与其他阶边带之间的功率差要大于 30 dB.

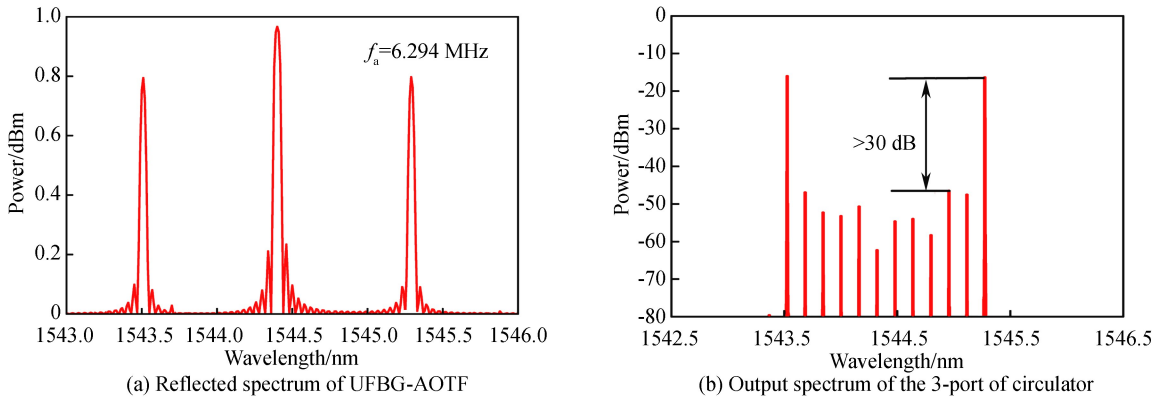
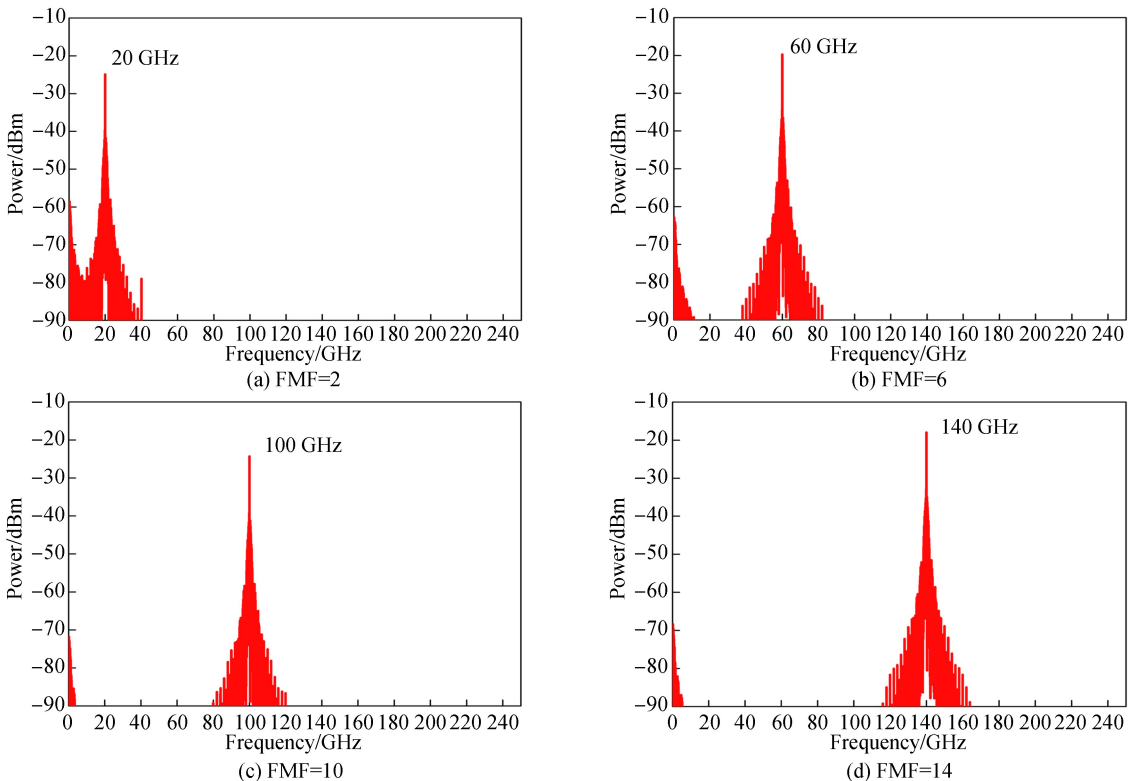


图 4 信号光谱图
Fig.4 Optical spectrum of signals

光环行器后连接一中心频率为 194.226 THz、频率间隔为 220 GHz 的两信道光交叉复用器,将±11阶边带分离,只在其中一个边带分量上利用 AM 调制频率为 2 Gbit/s 的非归零(Non-Return-to-Zero, NRZ)码型的基带数据信号,之后利用合波器将两个边带分量合波,经 3 dB 增益的 EDFA 放大和色散系数为 17 ps/(nm·km)的光纤传输后到达接收端.这里,为了突出信号传输过程中光纤色散的影响,忽略光纤的损耗.仿真时为突出色散对信号传输时的影响,忽略光纤损耗与非线性效应,光纤的色散系数为 17 ps/(nm·km).而在实际应用的高速长距离传输 RoF 系统中,可以采用每传输 50 km 连接一段 EDFA 的方法,既可以克服光纤损耗对光通信系统的限制,也可以极大地减小光纤的非线性效应的影响^[17].在接收端,倍频因子为 22 的毫米波信号通过 PD 拍频即可产生.

UFBG-AOTF 的反射光谱由主反射峰和以主反射峰对称的左右一阶次反射峰组成.主次反射峰之间波长间隔的增加与声波频率 f_a 呈正比关系,比例系数约为 0.14 nm/MHz^[11].因此,调节加载到 UFBG-AOTF 上的声波频率,可以得到不同倍频因子的毫米波信号.如图 5 所示,声波频率 f_a 分别为 0.572 MHz、1.717 MHz、2.862 MHz、4.007 MHz、5.152 MHz 和 6.294 MHz 时,经 PD 拍频后可得到倍频因子分别为 2、6、10、14、18、22 的毫米波信号.



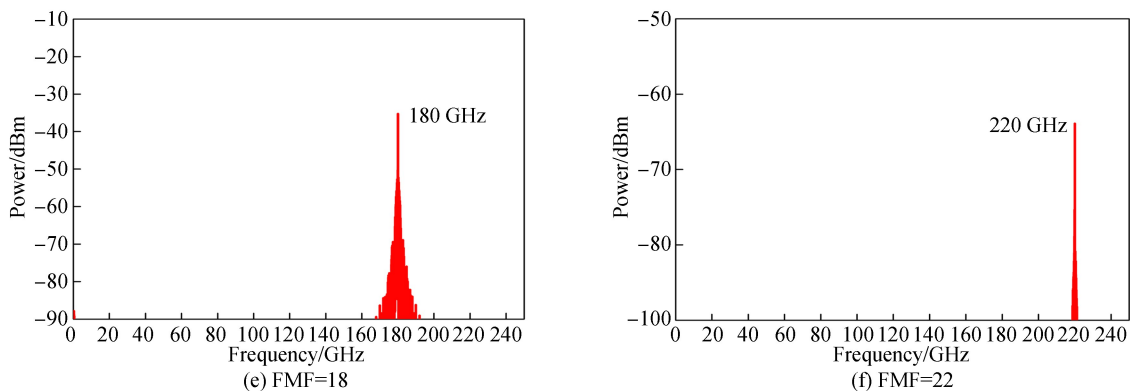


图 5 毫米波信号电谱图
Fig.5 Electrical spectra of the mm-wave signals

通过最小误码率、最大品质因子 Q 值、系统的眼图及接收灵敏度等对倍频因子为 22 时链路的传输性能进行判定.从图 6 中可以看出,信号在经过 150 km 光纤传输的过程中,系统的最大品质因子和最小误码率曲线较为平坦,系统有着良好的传输性能及稳定性.

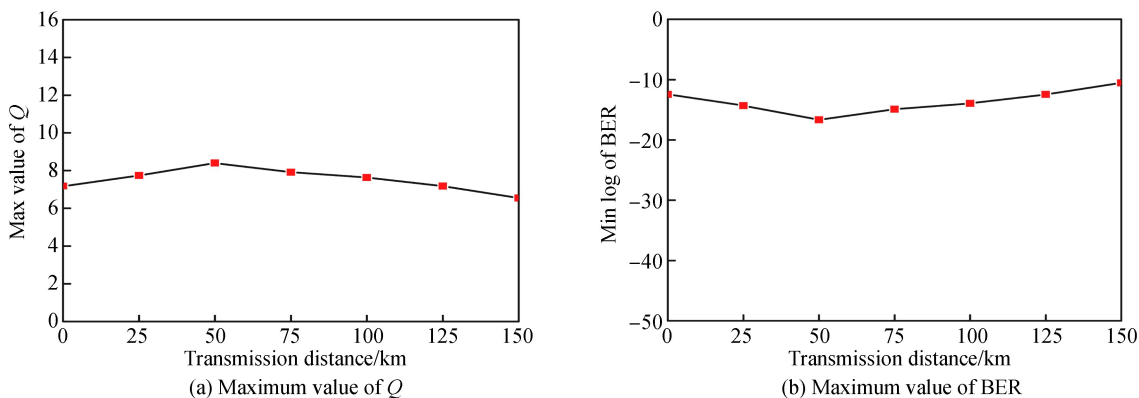


图 6 经过不同长度的光纤进行传输后系统性能比较
Fig.6 System performance after the data signal is transmitted over different fiber distance

图 7 给出了调制 2 Gbit/s 基带数据信号的毫米波信号分别经过距离为 0 km 和 50 km 的单模光纤传输后,系统的误码率曲线和眼图.由图 7 可以看出,在满足误码率为 10^{-9} 的条件下,OCS 信号经过 50 km 的光纤传输后,光功率代价比较小,仅为 0.4 dB.

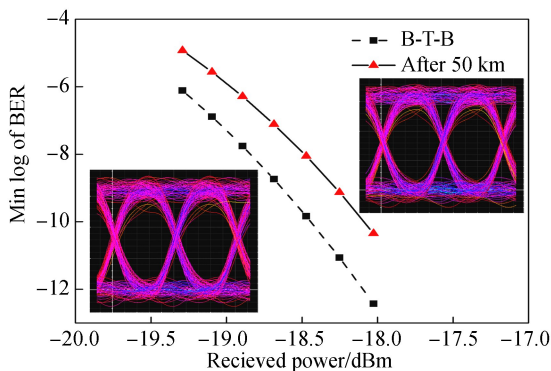


图 7 倍频因子为 22 的毫米波信号,经过不同距离的光纤传输后,系统的眼图和误码率曲线

Fig.7 Eye diagrams and the relationship between the optical received power of the PD and the BER after the signal transmitting 50 km over SMF with the FMF of 22

3 结论

本文提出了一种基于改进的 OCS 调制方式,利用 UFBG-AOTF 光学生成多倍频可调谐毫米波的方法.

在调制指数 $m=2.5\pi$ 的条件下,最高倍频因子可达 22.该方案通过控制 UFBG-AOTF 的声波频率实现 FMF 的线性调谐,仅使用一个 DD-MZM,灵活、简单且成本较低,同时也降低了对振荡器及调制器的频率要求.此外,提高 DD-MZM 的调制系数能够实现更高倍频因子毫米波信号的产生.同时,对倍频因子为 22 时系统下行链路传输性能的分析表明,在只将基带数据信号调制到其中一个边带上的 OCS 改进方案中,信号可以进行长距离且性能更稳定的传输,有效避免了色散所导致的码元时移效应.

参考文献

- [1] ZHENG Zhi-wei, PENG Miao, ZHOU Hui, *et al.* Optical single sideband millimeter-wave signal generation and transmission using 120° hybrid coupler[J]. *Optics Communications*, 2018, **411**: 21-26.
- [2] MA Jian-xin, YU J, YU Chong-xiu, *et al.* Fiber dispersion influence on transmission of the optical millimeter-waves generated using In-mzm intensity modulation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(11): 3244-3256.
- [3] NAMITA K, KUMAR G A, Performance analysis of radio over fiber system using direct and external modulation schemes[J]. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2017, **8**(4): 172-175.
- [4] TAN Zhi-ying. Research on adaptive bias voltage control technique for Mach-Zehnder modulator[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2016: 13-26.
谭芷莹.马赫-增德尔调制器偏置电压自适应控制技术研究[D].武汉:华中科技大学,2016:13-26.
- [5] HAO Chong-zheng, LI Hong-zuo, SUN Quan, *et al.* Stable bias control technique for any-point locking in Mach-Zehnder modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(10): 1023002.
郝崇正,李洪祚,孙权,等.马赫-增德尔调制器任意偏置点稳定控制[J].光子学报,2017,**46**(10):1023002.
- [6] CHEN Hong-yao, NING Ti-gang, LI Jing, *et al.* Optical millimeter-wave generation with tunable multiplication factors and reduced power fluctuation by using cascaded modulators[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, **103**: 206-211.
- [7] ZHU Zi-hang, ZHAO Shang-hong, TAN Qing-gui, *et al.* Photonically assisted microwave signal generation based on two cascaded polarization modulators with a tunable multiplication factor[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, **64**(11): 3748-3756.
- [8] ZHANG Wu, WEN Ai-jun, GAO Yong-sheng, *et al.* A simplified filterless photonic frequency octupling scheme based on cascaded modulators[J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, **64**(8): 861-865.
- [9] LIU Jing, WEN Ai-jun, ZHANG Hui-xing, *et al.* A novel mi-insensitive and filterless frequency octupling scheme based on two parallel dual-parallel mach-zehnder modulators[J]. *Optik*, 2014, **125**(23): 6887-6890.
- [10] CHEN Yang, WEN Ai-jun, GUO Jing-jing, *et al.* A novel optical mm-wave generation scheme based on three parallel mach-zehnder modulators[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(5): 1159-1169.
- [11] WANG Yi-qun, PEI Li, LI Jing, *et al.* Millimeter-wave signal generation with tunable frequency multiplication factor by employing ufbg-based acousto-optic tunable filter[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **9**(1): 1-10.
- [12] XU Wen-jing, GAO Xin-lu, ZHAO Ming-yang, *et al.* Full duplex radio over fiber system with frequency quadrupled millimeter-wave signal generation based on polarization multiplexing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, **103**: 267-271.
- [13] PEI Jun, YU Dong-xiu, MA Jian-xin, *et al.* Research on millimeter wave generation method in Rof system[J]. *Cable Television Technology*, 2007, **14**(9): 45-48.
裴军,余重秀,马建新,等.Rof 系统中毫米波产生方法的研究[J].有线电视技术,2007,**14**(9):45-48.
- [14] YU Jian-jun, JIA Zhen-sheng, YI Li-lin, *et al.* Optical millimeter-wave generation or up-conversion using external modulators[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(1): 265-267.
- [15] MA Jian-xin, YU Jian-jun, YU Chong-xiu, *et al.* Transmission performance of the optical mm-wave generated by double-sideband intensity-modulation[J]. *Optics Communications*, 2007, **280**(2): 317-326.
- [16] MA Jian-xin, YU Chong-xiu, ZHOU Zhen, *et al.* Optical mm-wave generation by using external modulator based on optical carrier suppression[J]. *Optics Communications*, 2006, **268**(1): 51-57.
- [17] WANG Yi-qun, PEI Li, LI Jing, *et al.* Study on dispersion characteristic of different code data transmission pulses in OSSB-RoF system[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, **48**(9): 426.

Foundation item: The National Nature Science Foundation of China (No. 61525501)

引用格式:LIU Ting-ting, PEI Li, WANG Yi-qun, *et al.* Tunable High-frequency Millimeter-wave Signal Generator Based on Optical Carrier-suppressed Modulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(12): 1206003

刘婷婷,裴丽,王一群,等.基于光载波抑制调制的可调谐高倍频毫米波信号发生器[J].光子学报,2018,**47**(12):1206003