DOI:10.16136/j.joel.2023.10.0458

基于两个平行马赫-增德尔调制器的光载无线 传输系统

油海东1*,许 建2,徐 俊1,宁提纲2,郜园园1

(1. 青岛农业大学 理学与信息科学学院,山东 青岛 266109; 2. 北京交通大学 光波技术研究所,北京 100044)

摘要:为提高光载无线(radio over fiber, RoF)传输系统中的光波信号的利用率,本文提出了一种基于两个平行马赫-增德尔调制器(Mach-Zehnder modulator, MZM)的 RoF 传输系统。两个平行 MZM 经射频(radio frequency, RF)信号调制后,产生5个光边带信号,分别是正负一阶光边带、正 负二阶光边带和光载波。其中正负二阶光边带使用基带数据进行调制,经光电检测器(photodiode, PD)拍频后产生已调数据的毫米波信号,再由天线发射出去。正二阶边带和光载波经 PD 拍频后产生未调制数据的毫米波,该毫米波用于接收端解调的本振信号(local oscillator, LO)。负二 阶边带信号用于上行链路的光载波。在本系统中,5个光边带信号都被充分利用,提高了光信号的利用效率。此外,还分析了该系统通过色散介质的传输特性,为 RoF 通信系统提供了一种实用 化的解决方案。

关键词:光载无线(RoF);毫米波光学生成;光调制;色散 中图分类号:TN29 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2023)10-1091-06

A radio over fiber transmission system based on two paralleled Mach-Zehnder modulators

YOU Haidong^{1*}, XU Jian², XU Jun¹, NING Tigang², GAO Yuanyuan¹

(1. Science and Information College, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China; 2. Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to improve the utilization rate of optical signals in radio over fiber (RoF) system, a RoF system based on two paralleled Mach-Zehnder modulators (MZM) is proposed. The two paralleled MZMs are modulated by radio frequency (RF) signal and five optical sideband signals can be generated, which are $\pm 1^{st}$ order sidebands, $\pm 2^{nd}$ order sidebands and optical carrier. $\pm 2^{nd}$ order optical sidebands are modulated by baseband data, millimeter (mm)-wave signals with modulated data can be generated after beating by photodiode (PD), which can be emitted by aerials. $\pm 2^{nd}$ order sideband and optical carrier are used to generate the mm-wave signals without modulated data after beating by PD, this mm-wave signals can be used as the local oscillator (LO) for the demodulation of receiving end. -2^{nd} order optical sideband signals are fully utilized, the utilization rate of optical signals is improved. In addition, the analytical models for transmission through a dispersive medium are confirmed. Results show that such a scheme can offer a realistic solution for RoF system.

Key words: radio over fiber (RoF); photonic generation of millimeter-wave; optical modulation; disper-

0 引 言

sion

无线和宽带是通信的两大发展趋势,现存的

无线通信系统中,由于带宽的限制,很难实现高速 的多媒体服务。要实现高速的无线通信,光载无 线(radio over fiber, RoF)通信是其中一个解决方 案^[1-4]。在 RoF 系统中,毫米波信号被调制到光载 波上,然后通过光纤通信网络从中心站(central station, CS) 传输到基站(base station, BS),即可完 成 RoF 通信。对于无线信号传输, RoF 系统有很 多优势,例如,使用低功率分布式天线改进覆盖范 围、系统结构灵活、成本低等[5-8]。近年来,研究者 们提出了各种 RoF 技术。在文献「9]中,提出了 一种基于单驱动马赫-增德尔调制器(Mach-Zehnder modulator, MZM)的8倍毫米波生成方案, 并进行了理论分析和实验验证。文献「10]中,提 出了一种基于外调制器和四波混频效应的 18 倍 毫米波 RoF 系统。文献「11] 基于级联的 MZM, 实现了一种 RoF 系统的毫米波发生器,该方案在 级联的 MZM 之前引入一个偏振控制器,通过控 制偏振控制器的角度可实现光边带抑制比的调 节,使得系统的功率衰落特性得以改进。此外, RoF系统也可以采用远程外差检测技术实 现^[12,13]。外差检测技术的主要原理是在光电检测 器(photodiode, PD) 处, 两个光载波实现拍频, 从 而产生毫米波信号。有多种方案用于产生相干检 测的载波信号。一种方案是采用两个独立的激光 器光源,由于两个独立的激光器产生的激光的相 位噪声不相关,因此需要采取一些技术手段减少 其线宽[14]。另一种方法是采用光锁相环。在文 献[15]中,提出了一种基于前向反馈调制技术的 RoF系统,但是在该类系统中存在一些缺点,如一 些光载波被过滤掉,造成光信号利用率不高,其 次,由于色散的原因,导致光信号功率的周期性 衰落。

本文提出了一种 60 GHz 的 RoF 系统,在该系 统中,所有的光边带信号都被完全利用,同时产生 60 GHz 的毫米波信号和本振信号(local oscillator, LO)。由于该系统产生了接收端用于解调的 LO, 因此可简化 BS 的结构, 不必再设置 LO 源。在本 文中,可调激光器(tunable laser,TL)作为光源,射 频(radio frequency, RF)信号的频率 f = 30 GHz, 两个 MZMs 分别偏置在最小和最大传输点,设置 适当的调制指数,MZM1的输出光信号包含两个 间隔 60 GHz 的边带(正负一阶边带), MZM2 的 输出光信号为3个边带(正负二阶边带和光载 波),相邻边带的频率间隔均为 60 GHz。使用强 度调制器(intensity modulator, IM)对 MZM1 的输 出光信号进行调制,调制信号为伪随机二进制序 列(pseudorandom binary sequence, PRBS)。然后 把5个边带信号耦合后再经单模光纤(single mode fiber, SMF) 传输到 BS。在 BS 侧, 光交织器(interleaver, IL) 把已调数据的两路边带(正负一阶边

带)和未调制数据的三路边带(正负二阶边带和光载波)分开,两路已调数据的边带经 PD 后,即可得到已调基带数据的 60 GHz 毫米波信号。未调制数据的 三路边带信号经光纤光栅(fiber Bragg grating,FBG)处理,其中负二阶边带被反射,用作上行链路的光载波信号,其余两路透射的边带经 PD 后,产生 60 GHz 毫米波,用于接收端解调的 LO。

1 理论分析

该系统的结构示意图如图 1 所示。TL 输出的 光场分布可以表示为^[16]:

 $E_{in}(t) = E_0 \exp[j2\pi f_0 t + j\phi_0(t)],$ (1) 式中, E_0 表示光场振幅, f_0 是光频率, $\phi_0(t)$ 是 TL 的 相位噪声。两个 MZMs 具有相同的半波电压(V_{π})。 对于 MZM1,上下两臂的偏压分别为 0 和 V_{π} ,经 PRBS 数据调制后,输出光场分布为^[16]:

$$E_{1}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{in}(t) \sin(\frac{\pi a_{i}}{2}) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n} J_{2n-1}(\alpha) \{ \exp[j2\pi(2n-1)ft] + \exp[-j2\pi(2n-1)ft] \},$$
(2)

式中, a_i 表示 PRBS 数据值(0 和 1 分别表示开关状态), $J_n(.)$ 是第一类 *n* 阶贝塞尔函数, $\alpha = V_1/2^{-1/2}$ V_{π} 表示调制指数, *f* 和 V_1 表示 RF 信号的频率和振幅。当调制指数等于 $\pi/4$ 时,相应的 $J_1(\alpha)$ 、 $J_3(\alpha)$ 、 $J_5(\alpha)$ 值为 0.363 2、0.0097、0.000 07584。因此,只保留一阶边带,方程(2)可简化为:

$$E_{1}(t) = -\frac{1}{2}E_{0}J_{1}(\alpha)\sin(\frac{\pi a_{i}}{2}) \cdot \left\{\exp\left[j2\pi(f_{0}+f)t+j\phi_{0}(t)\right] + \exp\left[j2\pi(f_{0}-f)t+j\phi_{0}(t)\right]\right\}_{0}$$
(3)

在图 1 中,下方小图表示边带分布情况,其中编 号为 1 和 2 的为两个调制 PRBS 数据的正负一阶边 带,其频率为 $f_0 - f$ 和 $f_0 + f$,频率间隔为 2f = 60GHz。

MZM2 偏置在最大传输点,输出光场分布为:

$$E_{2}(t) = \frac{1}{2} E_{in}(t) [J_{0}(\beta) + 2\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n} J_{2n}(\beta) \cos(2\pi 2nft)], \quad (4)$$

式中,调制指数 $\beta = \pi V_2 / 2^{-1/2} V_{\pi}$, V_2 表示电驱动信号的幅度。当 $\beta = 1$ 时, $J_0(\beta)$ 、 $J_2(\beta)$ 、 $J_4(\beta)$ 的值为 0.7625、0.1149、0.0025。因此,二阶以上的边带可以忽略不计,此时方程(4)可以简化为:

$$E_{2}(t) = \frac{1}{2}E_{0}\left\{-J_{2}(\beta)\exp\left[j2\pi(f_{o}-2f)t+j\phi_{0}(t)\right]\right\}$$

 $J_{0}(\beta)\exp[j2\pi f_{o}t+j\phi_{0}(t)]-$

 $J_{2}(\beta)\exp[j2\pi(f_{o}+2f)t+j\phi_{0}(t)]\}.$ (5)

从图 1 可以看出,编号为 3、4、5 的 3 个边带(即 正负二阶边带和光载波)没有调制数据,其频率为 f_0 $-2f_sf_0, f_0+2f_s$ 相邻边带的频率间隔为 2f = 60GHz。

五路边带信号经光耦合器(optical coupler,OC) 合并,由 SMF 传输到 BS。由于光纤的色散效应,不 同的频率分量经 SMF 传输后具有不同的时延。因 此,5 个边带达到 BS 时具有不同的时延。忽略 SMF 的 传输 损耗,可以写出 经 SMF 传输 后的光场分

$$E_{3}(t) = \frac{E_{0}}{2\sqrt{2}} \{-J_{2}(\beta) \exp[j2\pi(f_{o} - 2f)(t - \tau_{1}) + j\phi_{0}(t - \tau_{1})] + J_{0}(\beta) \exp[j2\pi f_{o}(t - \tau_{2}) + j\phi_{0}(t - \tau_{2})] - J_{2}(\beta) \exp[j2\pi(f_{o} + 2f)(t - \tau_{3}) + j\phi_{0}(t - \tau_{3})] - \sin(\pi a_{i}/2)J_{1}(\alpha) \exp[j2\pi(f_{0} + f) \cdot (t - \tau_{4}) + j\phi_{0}(t - \tau_{4})] - \sin(\pi a_{i}/2)J_{1}(\alpha) \exp[j2\pi(f_{0} - f)(t - \tau_{5}) + j\phi_{0}(t - \tau_{5})]\},$$
(6)



布为.

图 1 60 GHz RoF 系统结构示意图,内插图为边带分布情况 Fig. 1 The sketch map of the scheme for a 60 GHz RoF system, sidebands distribution is shown in the insert

式中, τ_i (*i*=1-5)指各边带经 SMF 传输后的时延, 其表达式为 $\tau_1 = LcD/f_0 + 2LcDf/f_0^2$ 、 $\tau_2 = LcD/f_0$ 、 $\tau_3 = LcD/f_0 - 2LcDf/f_0^2$ 、 $\tau_4 = LcD/f_0 - LcDf/f_0^2$ 、 $\tau_5 = LcD/f_0 + LcDf/f_0^2$,D 为 f_0 处的光纤的色 散系数,单位为 ps/km • nm,L 为光纤的距离,单位 为 km。

在 BS 侧,传输来的光场被 IL 分为两部分,其中 一部分是包含已调数据的两个边带(1 和 2),另一部 分是包含未调制数据的 3 个边带(3,4,5)。IL 的传 输函数示意图如图 1 所示,其两路输出光场分布为:

$$E_{4}(t) = \frac{-\sin(\pi a_{i}/2)E_{0}J_{1}(\alpha)}{2\sqrt{2}} \cdot \left\{ \exp\left[j2\pi(f_{0}+f)(t-\tau_{4})+j\phi_{0}(t-\tau_{4})\right] + \exp\left[j2\pi(f_{0}-f)(t-\tau_{5})+j\phi_{0}(t-\tau_{5})\right] \right\}, (7)$$

$$E_{5}(t) = \frac{E_{0}J_{2}(\beta)}{2\sqrt{2}} \cdot \left\{ -\exp\left[j2\pi(f_{o}-2f)(t-\tau_{1})+j\phi_{0}(t-\tau_{1})\right] + \right\}$$

exp[j2 $\pi f_o(t - \tau_2) + j\phi_0(t - \tau_2)$] exp[j2 $\pi (f_o + 2f)(t - \tau_3) + j\phi_0(t - \tau_3)$]}。(8) E_4 光场经 PD 后,可得到调制基带数据的 60 GHz 毫米波,其表达式为:

$$i_{mm}(t) = \frac{1}{2} RE \{ E_4(t) E_4^*(t) \} = \frac{RE_0^2 J_1(\alpha)^2}{16}$$

$$sin^2 (\pi a_i/2) \{ 2 + E \{ \exp[j\phi_0(t - \tau_4) - j\phi_0(t - \tau_5)] \} \exp(-j2\pi 2 f t) +$$

$$E \{ \exp[j\phi_0(t - \tau_5) - j\phi_0(t - \tau_4)] \} \cdot$$

$$exp(j2\pi 2 f t) \}, \qquad (9)$$

式中, R为 PD 的响应度。从方程(9)可以看出,光生 电流 $i_{nam}(t)$ 和 $E\{\exp[j\phi_0(t_1)-j\phi_0(t_2)]\}$ 成正比, TL 的相位噪声 $\phi_0(t)$ 可以认为是一个均值为零、方差为 $2\pi\delta/t$ 的非平稳高斯随机过程, δ 为 TL 的线宽, 那么 $j\phi_0(t_1)-j\phi_0(t_2)$ 就是一个均值为零、方差为 $2\pi\delta/(t_1)-t_2)$ 的平稳高斯随机过程。 $\exp[j\phi_0(t_1)-j\phi_0(t_2)]$ 的均值可计算如下:

$$E\{\exp[j\phi_0(t_1) - j\phi_0(t_2)]\} =$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\pi \sqrt{\delta(t_1 - t_2)}} \exp(-\frac{x^2}{4\pi\delta(t_1 - t_2)}) \exp(jx) dx =$$

$$\exp(-\frac{1}{2} \times 2\pi\delta \mid t_1 - t_2 \mid) =$$

$$\exp(-\pi\delta \mid t_1 - t_2 \mid) . \qquad (10)$$

由方程(10)可以计算出 $E\{\exp[j\phi_0(t-\tau_4)-j\phi_0(t-\tau_5)]\} = E\{\exp[j\phi_0(t-\tau_5)-j\phi_0(t-\tau_4)]\} = \exp(-\pi\delta | \tau_5 - \tau_4 |),$ 把该结果以及 $\tau_5 \pi \tau_4$ 的表达式 带入方程(9),化简后可以得到:

$$i_{mm}(t) = \frac{RE_0^2 J_1(\alpha)^2}{8} \exp(-2\pi \delta L c D f / f_0^2) \cdot \sin^2(\pi a_i/2) \cos(2\pi f t)_{\circ}$$
(11)

在图 1 中,FBG 的作用是把未调制数据的边带 3、4、5 进行分离,其中边带 3(负二阶边带)被 FBG 反 射回来,作为上行链路的光载波使用。边带 4 和 5 (正二阶边带和光载波)透过 FBG 后,经 PD 检测后,产生 60 GHz 的 LO。FBG 透射 后 的 光场 可 以表示为:

$$E_{6}(t) = \frac{E_{0}J_{2}(\beta)}{2\sqrt{2}} \cdot \{\exp[j2\pi f_{o}(t-\tau_{2}) + j\varphi_{0}(t-\tau_{2})] - \exp[j2\pi (f_{o}+2f)(t-\tau_{3}) + j\phi_{0}(t-\tau_{3})]\}, \qquad (12)$$

$$\bigotimes\min \beta R \text{ in PD } E, \# k \%$$

$$\frac{RE_0^2 J_2(\beta)^2}{8} \exp(-2\pi\delta LcDf/f_0^2)\cos(2\pi ft) \,. \tag{13}$$

可以看出,产生的用于接收端解调的 LO 的频率 为 2f = 60 GHz。

假定整个传输系统的噪声等效为加性高斯白噪声,那么系统误码率(bit rate error, BER)可以表示为:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{R^2 E_0^4 J_1^4(\alpha)}{64}} \exp\left(-\frac{4\pi \delta L c D f}{f_0^2}\right) / 4n_0 B} \right] \quad (14)$$

2 仿真和讨论

为了验证系统的性能,使用 OptiSystem 和 MATLAB 程序对该系统进行仿真验证。TL 的输出 光波长设为 1550 nm(频率 $f_0 = 193.41$ THz),输出 光功率为 0 dBm。MZM1 和 MZM2 的调制指数分 别设置为 $\alpha = \pi/4$, $\beta = 1$, RF 信号的频率设置为 f= 30 GHz。FBG 的中心反射 波长为1549.76 nm, 3 dB 带宽为 0.96 nm。光纤色散系数为 D = 17 ps/ km・nm,SMF 光纤长度为 L = 50 km。高斯白噪 声的功率谱密度为 $n_0 = 10^{-19}$ W/Hz。PD 的响应度 为 R = 1 A/W。

按照以上各器件参数进行仿真,OC 输出的光谱 (即 $E_3(t)$)如图 2 所示。从图 2 中可以看出,OC 的 输出光谱共 5 个边带,其中 1 和 2 边带调制了 PRBS 基带数据,3、4、5 边带没有调制数据,相邻边带之间 的频率间隔为 60 GHz。



图 2 光场 $E_3(t)$ 的光谱 Fig. 2 Spectrum of optical field $E_3(t)$

i_{mm}(*t*)和*i*_{LO}(*t*)的频谱如图 3 和图 4 所示。可以 看出,该系统产生了 60 GHz 的已调基带数据的毫米 波信号和 60 GHz 的 LO。

进一步,研究了激光器的线宽 δ、光纤长度 L 和 PRBS 的码率与误码率的关系。在仿真过程中,不考 虑光纤的衰减,结果如图5、图6所示。从图5可以 看出,随着激光器线宽 δ 的增加,误码率性能下降较 多,但是当激光器线宽不超过200 MHz时,误码率



signal $i_{mm}(t)$







性能的恶化不是很严重,意味着在该系统当中,应该 选择窄线宽的激光器。从图 6 可以看出,当 PRBS 的 码率为 2 Gbps 时,误码率性能较差,超过了 10⁻¹⁰。 因此在所设计的系统当中,当传输距离为 50 km 时, 调制数据的码率不应超过 2 Gbps。









图6 不同码率下误码率和激光器线宽的关系



3 结 论

基于两个平行 MZM 的 RoF 系统,共产生 5 个 边带。其中正负一阶边带调制基带数据,经 PD 检测 后产生 60 GHz 已调数据的毫米波信号。负二阶边 带用于上行链路的载波,正二阶边带和光载波用于 产生接收端解调的 LO。在该系统中,5 个光边带都 得到了充分的利用,没有光信号的损失,提高了对光 信号的利用率。此外,对系统性能进行了研究,得到 了系统误码率和激光器的线宽、PRBS 的数据码率以 及光纤传输长度的关系,这些结果对实现 RoF 系统 具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] DAT P T, YAMAGUCHI Y, MOTOYA M, et al. Transparent fiber-millimeter-wave-fiber system in 100-GHz band using optical modulator and photonic down-conversion[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(5): 1483-1493.
- [2] HAN M Y, WANG M G, ZHANG N H, et al. A photonic-assisted crosstalk cancellation for twin-SSB radio over fiber transmission[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26 (1):104-108.
- [3] PERINI F,RUSTICELLI S,SCHIAFFINO M, et al. Radio frequency over fiber technology for SKA-low receiver [J]. Journal of Astronomical Telescopes Instruments and Systems,2022,8(1): 011016.
- [4] KURI T, KITAYAMA K. Optical heterodyne detection technique for densely multiplexed millimeter-wave-band radio-on-fiber systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(12): 3167-3179.
- [5] KANNO A. Millimeter-wave communication system implemented on radio over fiber networks in 5G/IoT era [C] // IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), September 3-6, 2018, Vasteras, Sweden. New York; IEEE, 2018; 8530511.
- [6] MATHEW S, WELKER T, SPIRA S, et al. A radio-over-fiber link with hybrid optical fiber-ceramic multilayer technology[C] //48th European Microwave Conference (Eu-MC), September 25-27, 2018, Madrid, Spain. New York: IEEE, 2018;789-792.
- [7] UMEZAWA T, DAT P T, KASHIMA K, et al. 100-GHz radio and power over fiber transmission through multicore fiber using optical-to-radio converter[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2); 617-623.
- [8] GOWDA A S, DHAINI A R, KAZOVSKY L G, et al. Towards green optical/wireless in-building networks; radioover-fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32

(20):3545-3556.

- [9] 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):1-8.
- [10] ZHOU H.FEI C Y, ZENG Y T, et al. A RoF system based on 18-tuple frequency millimeter wave generation using external modulator and SOA[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 61:102402.
- [11] CHEN H Y,NING T G,LI J,et al. Optical millimeter-wave generation with tunable multiplication factors and reduced power fluctuation by using cascaded modulators[J]. Optics and Laser Technology,2018,103:206-211.
- [12] CHEN J H, LIN C T, SHIH P T, et al. Generation of optical millimeter-wave signals and vector formats using an integrated optical I/Q modulator Invited[J]. Journal of Optical Networking, 2009, 8(2):188-200.
- [13] LI J,NING T G, PEI L, et al. Millimeter-wave radio-overfiber system based on two-step heterodyne technique [J]. Optics Letters, 2009, 34(20); 3136-3138.
- [14] LANGLEY L N, ELKIN M D, EDGE C, et al. Packaged

semiconductor laser optical phase-locked loop (OPLL) for photonic generation, processing and transmission of microwave signals[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(7):1257-1264.

- [15] GRIFFIN R A, KITAYAMA K. Optical millimetre-wave generation with high spectral purity using feed-forward optical field modulation [J]. Electronics Letters, 1998, 34 (8):795-796.
- [16] GENG H J, HE S Q, ZHAO Q S. Photonic generation of microwave signals with high multiplied frequency based on dual-paralled MZM and four-wave mixing[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2015, 26(2):272-276.
 耿红建,郝士琦,赵青松.基于级联外调制器的六倍频微 波信号的光学生成技术研究[J].光电子•激光, 2015, 26(2):272-276.

作者简介:

油海东 (1979-),男,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事微波 光子学方面的研究.