

一种改进的基于前向调制技术生成 60 GHz 毫米波方案

许丽丽^{1,2} 宁提纲^{1,2} 李 晶^{1,2} 裴 丽^{1,2*} 油海东^{1,2} 陈宏尧^{1,2} 张 焯^{1,2}

(¹ 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京交通大学, 北京 100044)
² 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要 光载无线通信(ROF)技术是通信业宽带化和无线化的产物,该技术将光纤通信技术与毫米波通信技术进行融合,具有广阔的应用前景。目前世界众多国家在 60 GHz 毫米波频段相继划出免许可连续频谱,这使得 60 GHz 毫米波无线通信成为近距离无线通信领域的研究热点之一。为了降低 ROF 系统的成本,提高系统的性能,提出了一种改进的基于前向调制(FFM)技术生成 60 GHz 毫米波方案,分析了系统各光电器件的工作原理,仿真了不同的参量设置对系统性能的影响曲线。该方案结合了前向调制技术和光波分复用技术的优点,简化了整个系统的复杂程度,降低了 ROF 系统的造价成本,同时减小了误码率,提高了系统的性能。

关键词 光通信;微波光子学;光载无线通信;前向调制技术;光纤通信

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0206002

Improved 60 GHz Millimeter-Wave Generator Based on Feed-Forward Modulation

Xu Lili^{1,2} Ning Tigang^{1,2} Li Jing^{1,2} Pei Li^{1,2} You Haidong^{1,2}
Chen Hongyao^{1,2} Zhang Chan^{1,2}

(¹ Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)
² Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract A radio over fiber (ROF) system is a product of the broad band and wireless in the communication industry. It combines the optical fiber communication technology and millimeter-wave communication technology, and has a broad application prospect. At present many countries mark off unlicensed continuous-frequency spectra in 60 GHz millimeter wave frequency band, which makes 60 GHz millimeter-wave wireless communication become one of the hot researches in the field of close wireless communication. In order to reduce the cost of a ROF system and improve its performance, an improved 60 GHz millimeter-wave generator based on feed-forward modulation (FFM) technique is proposed. The principle of the photoelectric device is analysed and the effect of different parameters setting in the performance of the system curve is simulated. The scheme combines with the advantages of forward modulation technology and light wavelength division multiplexing technology. It simplifies the complexity of the system, reduces the cost of the ROF system, reduces the error rate and improves the performance of the whole system.

Key words optical communications; microwave photonics; radio over fiber; feed-forward modulation technique; optical-fiber communication

OCIS codes 060.2330; 060.2360; 060.4080

收稿日期: 2012-08-23; **收到修改稿日期**: 2012-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(61177069,61275076)、教育部博士点基金(20090009110003)和中央高校基本科研业务费专项(2011YJS219)资助课题。

作者简介: 许丽丽(1987—),女,硕士研究生,主要从事光载无线通信和光纤通信等方面的研究。

E-mail: 10120249@bjtu.edu.cn

导师简介: 宁提纲(1968—),男,博士,教授,主要从事光通信与移动通信、光载无线通信、光纤通信、光纤激光器、全光网络及其关键器件、光纤传感等方面的研究。E-mail: tgning@bjtu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: lipei@bjtu.edu.cn

1 引 言

目前宽带无线通信在整个通信领域热点不断,各项新的研究和业务十分活跃。光纤作为迄今为止最好的传输媒介,可以提供巨大的带宽,光纤通信正以惊人的速度发展、成熟并得到广泛的应用,逐渐在传输技术中占据主导地位。宽带通信和无线通信两者相结合成为未来通信的发展方向。但是在我国现有的无线通信低频频段几乎都被占用,毫米波由于自身具有高频载波特性和超过吉比特每秒的无线传输能力,毫米波无线通信系统^[1~3]具有传输容量大、设备轻便和抗干扰能力强的优点,能够支持各种超宽带业务,是未来无线通信突破微波频段向更高频段发展的一个重要方向^[4~6]。其中 60 GHz 毫米波无线通信,成为近距离无线通信领域的研究新热点之一^[7~10]。

根据调制/检波原则,光载无线通信(ROF)系统中光载毫米波信号的产生方式主要包括强度调制及直接检波法^[11]、远程光外差检波法^[12]和基于谐波生成法^[13,14]。这些毫米波生成技术的实现方式各不相同,存在着各自的优缺点。文献[15]给出了利用前向调制(FFM)的方式生成毫米波的思路,能够生成噪声较小的毫米波信号。但由于整个系统需要高品质的 60 GHz 的本振信号,且系统的复杂性极高,使得整个系统实施起来不现实。

文献[16]介绍了一种基于前向调制技术的四倍频 60 GHz 毫米波的生成装置,该装置能够生成纯度较高的毫米波信号,但系统仍然相对复杂,不易实现。本文提出了一种改进方案,将从该方案的设计原理和性能仿真结果进行分析,以证明该方案的优越性。

2 系统设计及原理分析

如图 1 介绍了利用中频振荡源产生毫米波信号的系统结构。其中 CW1 和 CW2 为连续波激光器,PC 为相位偏振控制器,OC 为光耦合器,DE-MZM 为双臂的马赫-曾德尔调制器,工作状态分别为光载波抑制调制(OCS)和单边带调制(SSB),ILA 和 ILB 为交织滤波器,PD 为光电探测器,DC-bloker 为隔直滤波器,EDFA 为掺铒光纤放大器,SMF 为单模光纤。与文献[16]的设计方案不同,本方案采用一个双臂的马赫-曾德尔调制器取代原方案中的相位调制器(PM)和交织滤波器,文献[16]生成的毫米波频率受交织滤波器自身特性限制严重,本方案中马赫-曾德尔调制器对信号的相位和强度更容易调节,而且从下文中系统的仿真结果分析,本方案系统的误码率(BER)更小,得到的毫米波信号纯度更高,系统性能明显优于文献[16]中的方案。

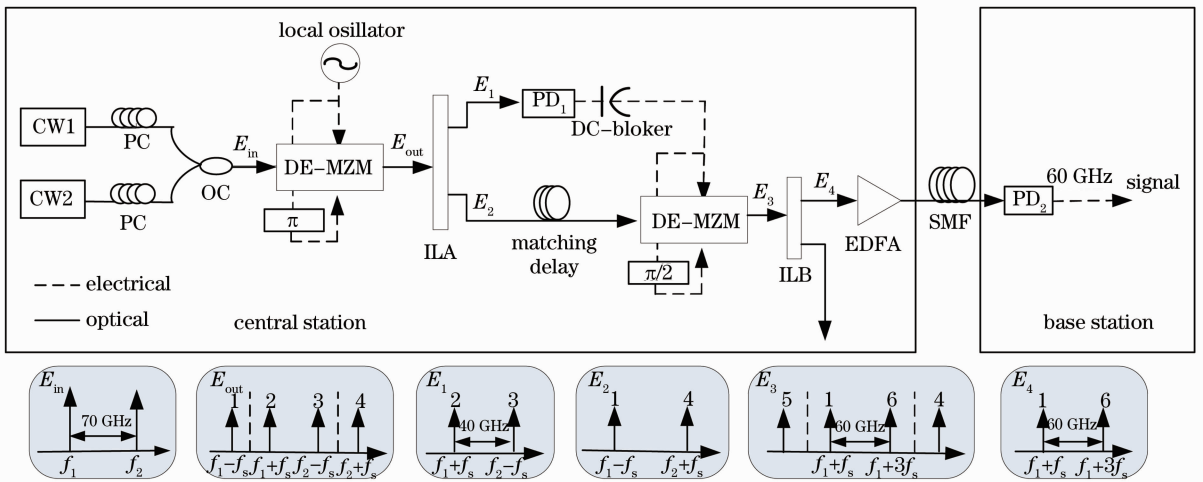


图 1 基于前向调制技术的 60 GHz 毫米波生成系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of 60 GHz millimeter-wave generator based on feed-forward modulation

如图 1 系统框图所示,两个独立的激光器 CW1 和 CW2 作为光源输出两束光载波,中心频率分别为 f_1 和 f_2 ,控制激光器的输出频率,使得两束光载波的频率间隔 Δf 为 70 GHz,两个 PC 用来控制两

路载波的偏振状态,经过 OC 耦合成一光信号后作用在 DE-MZM 身上。其中本地振荡源信号的频率 f_s 为 15 GHz,调节 f_s 的相位,使 DE-MZM 对本地振荡源进行 OCS。DE-MZM 的输入光信号可以

表示为

$$E_{in}(t) = E_0 \exp[j2\pi f_1 t + j\varphi_1(t)] + E_0 \exp[j2\pi f_2 t + j\varphi_2(t)], \quad (1)$$

式中 E_0 为 CW1 和 CW2 产生的两路光载波信号的

幅度, $\varphi_1(t)$ 和 $\varphi_2(t)$ 分别为两路光信号的相位噪声。

当 DE-MZM 的直流偏压等于调制器的半波电压, 相位差等于 π , 调制器对本地振荡源进行 OCS。DE-MZM 进行 OCS 调制后的输出光信号可以表示为

$$E_{out}(t) = E_0 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(m) \{ \exp\{j2\pi[f_1 - (2n-1)f_s]t + j\varphi_1(t)\} + \exp\{j2\pi[f_1 + (2n-1)f_s]t + j\varphi_1(t)\} + \exp\{j2\pi[f_2 - (2n-1)f_s]t + j\varphi_2(t)\} + \exp\{j2\pi[f_2 + (2n-1)f_s]t + j\varphi_2(t)\} \}, \quad (2)$$

式中 J_n 为 n 阶的第一类贝塞尔函数, 当马赫-曾德尔调制器的调制因子 m 为 $\pi/4$ 时, 相应的 $J_1(m)$, $J_3(m)$, 和 $J_5(m)$ 的值分别为 0.3632, 0.0097 和 7.5846×10^{-5} 。其中光波的旁瓣阶数高于 J_1 时, 可以忽略高阶分量, 不会对结果造成大的影响。因此输出的光信号可以简化为

$$E_{out}(t) = -J_1(m)E_0 \{ \exp[j2\pi(f_1 - f_s)t + j\varphi_1(t)] + \exp[j2\pi(f_1 + f_s)t + j\varphi_1(t)] + \exp[j2\pi(f_2 - f_s)t + j\varphi_2(t)] + \exp[j2\pi(f_2 + f_s)t + j\varphi_2(t)] \}. \quad (3)$$

光载波信号和本振信号源经过 DE-MZM 的光载波抑制调制后, 输出光信号 E_{out} 包括 4 个频率成分 1, 2, 3, 4, 频率分别是 $f_1 - f_s$, $f_1 + f_s$, $f_2 - f_s$ 和 $f_2 + f_s$, 其中分量 2 和 3 之间的频率差为 $(f_2 - f_s) - (f_1 + f_s) = \Delta f - 2f_s = 40$ GHz。经过 50/100 GHz 的 ILA 的作用, 图 1 中 E_{out} 中的频率分量 2, 3 和 1, 4 被分开, 其中 2 和 3 经过 PD₁ 被转换成电信号,

PD₁ 的带宽为 40 GHz, 输出的光电流可以表示为

$$i_1 \propto \cos[2\pi(\Delta f - 2f_s)t + \varphi_2(t) - \varphi_1(t)]. \quad (4)$$

可见, 光电流的频率是 $\Delta f - 2f_s = 40$ GHz, 并受到相位噪声 $\varphi_2(t) - \varphi_1(t)$ 的影响。含有频率分量 1 和 4 的 E_2 信号经过延时器到达 DE-MZM, 用含有相位噪声的电信号 2 和 3 对光信号 E_2 进行 SSB, 采用下边带调制, 得到的信号 E_3 可以表示为

$$E_3(t) = J_1(m)E_0 \{ J_0(m') \exp[j2\pi(f_1 - f_s)t + j\varphi_1(t)] + J_0(m') \exp[j2\pi(f_2 + f_s)t + j\varphi_2(t)] + i_1 J_1(m') \exp[j2\pi(f_1 - \Delta f + f_s)t + j2\varphi_1(t) - j\varphi_2(t)] + i_1 J_1(m') \exp[j2\pi(f_2 - \Delta f + 3f_s)t + j\varphi_1(t)] \}, \quad (5)$$

式中 m' 为 DE-MZM 进行 SSB 的调制指数, 信号 E_3 包括 1, 4, 5, 6 频率分量, 频率分别是 $f_1 - f_s$, $f_2 + f_s$, $f_1 - \Delta f + f_s$ 和 $f_2 - \Delta f + 3f_s$, 其中频率分量 1 和 6 具有相同的相位噪声 $\varphi_1(t)$, 并且二者的频率差为 $(f_1 + 3f_s) - (f_1 - f_s) = 4f_s = 60$ GHz。含有 4 个频率分量的光信号经过 50/100 GHz ILB 的作用, 1, 6 和 4, 5 被分开, 得到含有 1 和 6 频率分量的光信号 E_4 , 可以表示为

$$E_4(t) = J_1(m)E_0 \{ J_0(m') \exp[j2\pi(f_1 - f_s)t + j\varphi_1(t)] + i_1 J_1(m') \exp[j2\pi(f_2 - \Delta f + 3f_s)t + j\varphi_1(t)] \}. \quad (6)$$

得到的毫米波信号经过 EDFA 的放大和 SMF 的传输后, 经过带宽为 60 GHz 的 PD₂ 的作用, 得到所需要的毫米波电信号。从 PD₂ 输出的光电流可以表示为

$$i_2(t) = \frac{1}{2} R E_4(t) E_4^*(t) = d_c - R [E_0 J_1(m)]^2 J_0(m') J_1(m') \sin(2\pi \times 4f_s t), \quad (7)$$

式中 R 为 PD₂ 的响应率, d_c 为直流分量, 可以通过隔直滤波器去掉, 第二项则为需要的 60 GHz 的毫米波信号。

3 系统性能及仿真结果分析

图 1 所描述的系统性能受到很多器件参数的影响, 器件参数对系统性能的影响在仿真中主要体现在传输信号的误码率和系统眼图上。其中最重要的

影响参数就是激光器的线宽。需要分析两个激光线宽在不同的时间延时下对整个系统性能的影响变化。考虑到色散的影响, 不同频率的光信号在光纤中具有不同的传输速率, 因此在实际线路中, CW1 和 CW2 两个激光器输出的两路信号分别到达第 2 个 DE-MZM 进行单边带调制存在传输时间差, 假设这两路信号的时间延时差为 τ , 激光器的相位噪声 $\varphi(t)$ 具有非平稳高斯随机过程的特征, 因此 $\varphi(t)$

的均值 $E[\varphi(t)] = 0$, 方差 $\sigma[\varphi(t)]^2 = 2\pi\delta t$, 其中 δ 为激光器的线宽。最后从 PD₂ 输出的光电流可以表

示为

$$i_2(t) = R[E_0 J_1(m)]^2 J_0(m') J_1(m') \cos(2\pi \times 4f_s t) i_1 E\{\exp[j\varphi_2(t + \Delta\tau) - j\varphi_2(t + \tau + \Delta\tau) + j\varphi_1(t + \tau + \Delta\tau) - j\varphi_1(t)]\} = R[E_0 J_1(m)]^2 J_0(m') J_1(m') \exp(-\pi\delta_1 |\tau + \Delta\tau| - \pi\delta_2 |\tau|) \sin(2\pi \times 4f_s t), \quad (8)$$

式中 $\Delta\tau = 4LcDf_s/f_c^2$, 其中 L 和 D 是 SMF 的长度和色散因子, c 为真空中的光速, δ_1 和 δ_2 是激光器 1 和激光器 2 的线宽。从(8)式中可以看出, 由于本地振荡频率的四倍频而引起的最终信号振幅的衰减项可以表示为

$$\Delta A = \exp(-\pi\delta_1 |\tau + \Delta\tau| - \pi\delta_2 |\tau|), \quad (9)$$

可见信号的衰减项与 δ_1, δ_2, τ 和 $\Delta\tau$ 4 个参数项有关。在实际的线路中, 假设时间延时 τ 为 10 ps, L 为 30 km, D 为 17 ps/(nm·km), 则 $\Delta\tau$ 约为 245 ps, 因此 τ 远小于 $\tau + \Delta\tau$, 所以可以看出激光器 1 的线宽 δ_1 比激光器 2 的线宽 δ_2 对系统的影响大很多。

用 Matlab 软件进行数值仿真, 仿真条件为 L 为 30 km, τ 分别为 10, 80, 150 ps。观察激光器 1 的线宽 δ_1 对系统的影响。激光器 2 的线宽 δ_2 保持 50 MHz 不变, 激光器 1 的线宽 δ_1 从 0 线性增加到 100 MHz, 得到从 PD₂ 输出的归一化光功率图如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 在时间延时 τ 不变的情况下, 激光器 1 的线宽 δ_1 变大时, 信号的归一化光功率的衰减变大; 当时间延时 τ 变大, 激光器 1 的线宽 δ_1 也变大时, 信号归一化光功率的衰减变得更大, 对系统性能的影响更大。

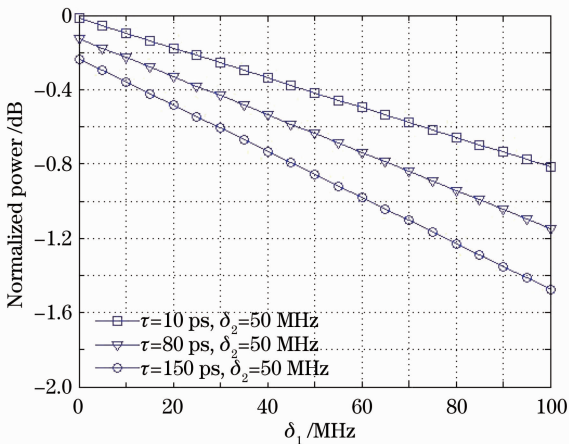


图 2 δ_2 固定, 不同 τ 情况下的归一化功率图
Fig. 2 Normalized power chart when δ_2 is constant and τ is different

观察激光器 2 的线宽 δ_2 对系统的影响。激光器 1 的线宽 δ_1 保持 50 MHz 不变, 激光器 2 的线宽

δ_2 从 0 线性增加到 100 MHz, 得到从 PD₂ 输出的归一化光功率图如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 在时间延时 τ 和激光器 2 的线宽 δ_2 变大情况下, 信号归一化光功率的衰减变大, 但与图 2 比较而言, 衰减的变大趋势不大。

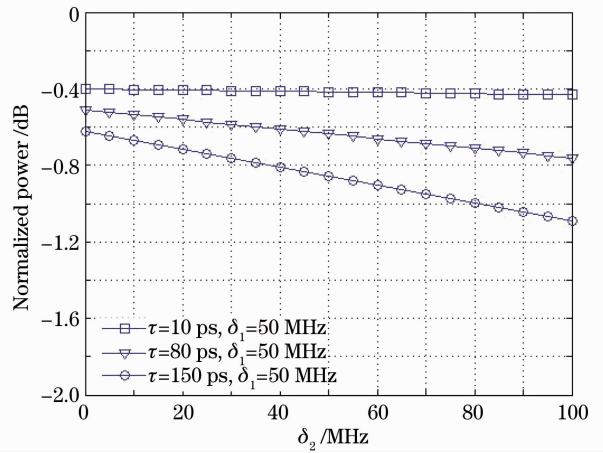
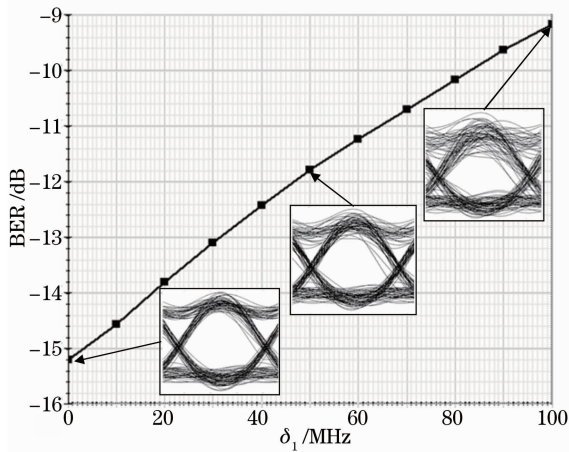
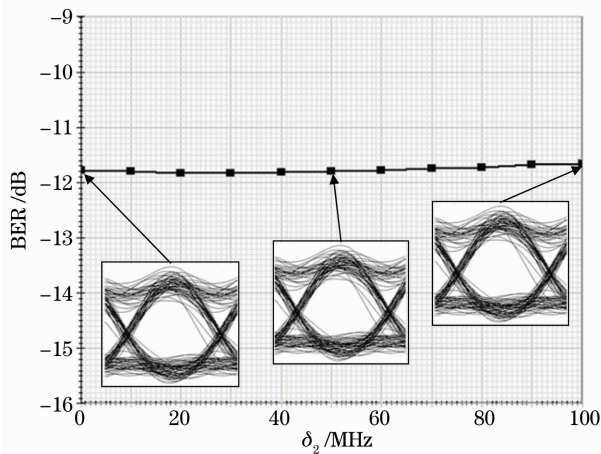


图 3 δ_1 固定, 不同 τ 情况下的归一化功率
Fig. 3 Normalized power chart when δ_1 is constant and τ is different

由图 2 和图 3 可见, 信号归一光功率的衰减量受激光器 1 的线宽影响最大。因此在实际线路中应该控制激光器 1 的线宽和时间延时, 使其在系统允许的衰减变化之内, 降低成本, 同时又使系统性能不受影响。

为了验证以上的理论分析, 在 OptiSystem 环境下进行系统仿真。其中激光器 CW1 和 CW2 的频率分别为 193.365 GHz 和 193.435 GHz; OCS 的马赫-曾德尔调制器直流偏置电压为半波电压, 相位差为 π ; SSB 的马赫-曾德尔调制器直流偏置电压为半波电压的一半, 相位差为 $\pi/2$; ILA 和 ILB 的规格均为 50/100 GHz; 通过强度调制器将 625 Mb/s 的随机比特信号调制到产生的 60 GHz 毫米波频率上, 并通过 EDFA 对信号进行放大。经过 SMF 的传输后被 PD₂ 检测出来, 将得到的信号与传输前的信号进行比较, 得到最后的误码率及体现系统传输性能的眼图, 如图 4 和图 5 所示, 图中纵坐标是取最小误码率的对数值。

设定时间延时 τ 为 10 ps, SMF 的传播距离 L

图4 激光器1的线宽 δ_1 与误码率关系曲线图Fig. 4 Curve of laser 1's line width δ_1 and bit error rate图5 激光器2的线宽 δ_2 与误码率关系曲线Fig. 5 Curve of laser 2's line width δ_2 and bit error rate

为 30 km, 分别改变激光器 CW1 和 CW2 的线宽, 对比仿真结果。激光器 2 的线宽 δ_2 为 50 MHz 保持不变, 激光器 1 的线宽 δ_1 从 0 增加到 100 MHz 时, 系统的误码率及对应眼图如图 4 所示。 $\delta_1 = 0$ 时, 误码率为 6.42304×10^{-16} ; $\delta_1 = 50$ MHz 时, 误码率为 1.03687×10^{-12} ; $\delta_1 = 100$ MHz 时, 误码率为 6.92887×10^{-10} 。随着 δ_1 的变大, 系统误码率明显增大, 从眼图中也能看出系统性能下降。而激光器 1 的线宽 δ_1 设为 50 MHz 保持不变, 激光器 2 的线宽 δ_2 从 0 增加到 100 MHz 时, 系统的误码率及对应眼图如图 5 所示, 系统的误码率有增加的趋势, 但是变化很小, 从眼图中看出系统的性能也几乎无变化。

因此, 系统仿真结果与理论分析结果相吻合。在设计系统中, 激光器 1 的线宽 δ_1 是整个系统的误码率及性能的最重要的指标。

4 结 论

本系统是基于前向调制的生成毫米波, 通过两个相位噪声不相干的激光器产生两路光载波信号, 被耦合器耦合一路信号后, 经过被本地振荡源驱动的 DE-MZM, 产生 4 个频率分量, 经交织滤波器分成两路信号(其中一路被 PD 转变成电信号), 这两路信号经过 DE-MZM 单边带调制产生相位噪声相关的频率分量。用交织滤波器滤除相位噪声具有相关性的频率分量, 最后得到了包含毫米波成分的电信号。

虽然改进的系统仍然比较复杂, 插入损耗也仍然存在, 但能够生成较纯净的 60 GHz 毫米波信号。通过调节各光学器件的参数指标, 系统的误码率和性能能够达到可接受的范围, 而且整个系统不需要很复杂的光学器件, 在实际系统搭建中也较易实现。

参 考 文 献

- Huang Jiaming, Chen Shuner, Liu Weiping *et al.*. Technology analysis and application of RoF[J]. *Optics Fiber and Electric Cable*, 2007, **2**: 32~35
黄嘉明, 陈舜儿, 刘伟平等. RoF 技术分析及其应用[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2007, **2**: 32~35
- Rujian Lin, Xiang Chen, Lin Zhang *et al.*. Design of mm-RoF system based on OFM technique with optimized OFDM modulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(8): 0805007
- Liu Xiangling, Liu Zengji, Li Jiandong *et al.*. Performance improvement of optical single sideband with carrier signals in radio over fiber system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0606003
刘香玲, 刘增基, 李建东等. 单边带光纤承载射频系统的性能改进研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0606003
- Zhou Bo, Zhang Hanyi, Zheng Xiaoping *et al.*. Developing status of microwave photonics[J]. *Laser and Infrared*, 2006, **36**(2): 81~84
周波, 张汉一, 郑小平等. 微波光子学发展动态[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(2): 81~84
- Fang Zujie, Ye Qing, Liu Feng *et al.*. Progress of millimeter wave subcarrier optical fiber communication technologies [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 481~488
方祖捷, 叶青, 刘峰等. 毫米波副载波光纤通信技术的进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 481~488
- Bai Jiao. The Research and Application of Key Technologies in ROF System [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007
白皎. ROF 系统中的关键技术研究与应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2007
- Zhuo Lan, Guo Nan. 60 GHz millimeter-wave wireless communications technology research [J]. *Information Technology and Standardization*, 2011, **11**: 40~43
卓兰, 郭楠. 60 GHz 毫米波无线通信技术标准研究[J]. *信息技术与标准化*, 2011, **11**: 40~43
- 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
- Dong Ze, Cao Zizheng, Chen Lin *et al.*. Experimental research

- on a radio-over-fiber system based on 60 GHz millimeter-wave [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1018~1021
- 董 泽, 曹子峥, 陈 林 等. 基于 60 GHz 光毫米波的光纤无线传输系统实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1018~1021
- 10 Zhu Zixing, 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
- 11 A. Ng'oma. Radio-Over-Fibre Technology for Broadband Wireless Communication Systems [D]. Zambia: Geboren te Kasama, 2005
- 12 U. Gliese, T. N. Nielsen, S. Norskov *et al.*. Multifunctional fiber-optic microwave links based on remote heterodyne detection [J]. *IEEE T. Microw. Theory*, 1998, **46**(5): 458~468
- 13 J. Arti, J. Fuster, F. Ramos *et al.*. Optimization of millimeter-wave signal generation through FM-IM conversion in chirped fiber gratings [J]. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2000, **27**(6): 393~395
- 14 A. Ng'oma. Design of a radio-over-fiber system for wireless LANs[R]. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven (TU/e), 2002
- 15 K. Y. Lau, J. Park. Ultra-High Frequency Linear Fiber Optic Systems[M]. Berlin: Springer-Verlag. 2008
- 16 Jing Li, Tigang Ning, Li Pei *et al.*. 60 GHz millimeter-wave generator based on a frequency-quadrupling feed-forward modulation technique [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(21): 3619~3621

栏目编辑: 王晓球