

文章编号:1004-4213(2011)03-0401-6

基于综合光学调制技术的光纤无线双向通信系统设计

韩一石,张厉,陈伟涛

(广东工业大学 信息工程学院, 广州 510006)

摘 要:提出并研究了一种使用单光源的光纤无线双向传输系统.该系统只需在中心站配置一个可调谐激光器,以产生频率恒定的激光光源,通过综合光学调制(频率调制、强度调制)技术将基带信号调制到光载波上,最终形成 60 GHz 毫米波下行信号;同时,相同的光载波在基站被重用,作为上行链路传输光源.系统结合光载波重用技术和综合调制技术特点,合理利用资源,基站结构更为简化.仿真结果表明,该系统可以将速率达 2.5 Gbit/s 的数据在单模光纤中双向传输 20 km,功率代价小于 0.5 dB,相对已有的技术方案,该传输系统在传输功率、传输距离、传输性能方面具有明显优势.

关键词:光纤无线;双向传输;综合光学调制;光学毫米波

中图分类号:TN914

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114003.0401

0 引言

光纤无线(Radio Over Fiber, ROF)技术充分结合光纤和高频无线电波传输的特点,能实现大容量、低成本的射频信号有线传输和超过 1Gbit/s 的超宽带无线接入^[1-3].近年来,关于 ROF 系统设计方面的研究在国内外期刊上已有很多报道,研究重点主要集中在毫米波产生和传输技术^[4-6].其中,常见光学生成毫米波方法可以归纳成 4 类^[7]:强度调制直接检波法、光学外差检波法、基于谐波生成技术的方法和电吸收调制法.不同的方法有着不同的应用场合,但大部分方法都存在系统结构复杂、成本高昂的问题.

另一方面,ROF 技术优势又主要体现在:系统中信号的产生、处理、控制等都集中在中心站点,远端基站只有少量较简单的设备,多个远端基站共享中心站点设备,大大降低了系统的功耗、运行成本.目前,诸多文献提出了各自简化基站方案^[8-10],文献[8]利用光栅反射光载波进而应用到上行链路通信,但没有验证下行数据传输的可行性.文献[9]采用单边带(Single Side Band, SSB)外部调制器方法,但实现的是低速率和短距离传输.文献[10]利用光交叉复用器滤波特性分离中心光载波应用到上行链路,但使用的强度调制器需要外加偏置电压稳定装置,增加了系统成本.

本文研究了一种基于综合光学调制技术产生光

毫米波的全双工毫米波光纤传输系统.该系统通过在基站生成毫米波,有效解决了直接调制毫米波传输时带来信号强度的周期性衰落问题.同时,系统充分结合光载波重用技术和综合光学调制技术的优点,采用单光源完成 ROF 系统双向传输,上行传输所用光源由中心站提供,基站无需配置任何光源,进一步降低了基站的成本,最终实现下行链路 60 GHz 毫米波信号的产生以及 2.5 Gb/s 数据通过 20 km 单模光纤的双向传输,功率代价少于 0.5 dB.最后,与已有的光载波重用技术方案在传输性能方面进行比较,可以发现,本系统在提取光载波功率、传输距离等方面具有明显优势.

1 单向 ROF 系统结构

综合光学调制是基于谐波生成技术和频率调制到强度调制的转换效应从而产生所需要谐波的技术,在其基础上组成的下行传输 ROF 系统结构如图 1.

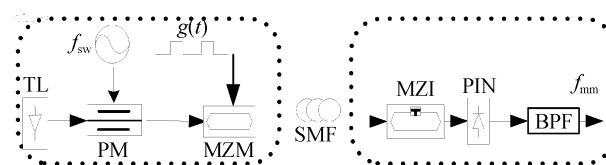


图 1 基于综合光学调制的单向 ROF 系统结构
Fig. 1 Setup for the simplex ROF system based on integrated optical modulation

基金项目:国家自然科学基金(No. 500070201)和广东省自然科学基金(No. 5001835)资助

第一作者:韩一石(1970-),男,副教授,博士,主要研究方向为全光通信网络器件及光纤无线技术等. Email: yshan@gdut.edu.cn

通讯作者:张厉(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤通信及光纤无线技术. Email: zhangli19840902@163.com

收稿日期:2010-09-29; **修回日期:**2010-12-09

图 1 中,可调谐激光器(Tunable Laser, TL)产生的中心频率为 f_c 的光波和频率为 f_{sw} 的正弦波共同经过相偏为 β 的相位调制器(Phase Modulator, PM)产生正弦扫频光波,然后利用马赫曾德尔强度调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)加载基带数据信号 $g(t)$ 到扫频光波上,经过综合光学调制技术,基站侧接收到的光波经过马赫曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Modulator Interferometer, MZI),在光电探测器(PIN)输出端的电流强度表示为^[11]

$$I(t) = \frac{1}{2} |E_c|^2 g(t) \{1 + \cos(2\pi f_c \tau) \{J_0(z) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(z) \cos[2k(2\pi f_{sw} t - \pi f_{sw} \tau)] + 2 \sin(2\pi f_c \tau) \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k-1}(z) \cos[(2k-1) \cdot (2\pi f_{sw} t - \pi f_{sw} \tau)]\}\} \quad (1)$$

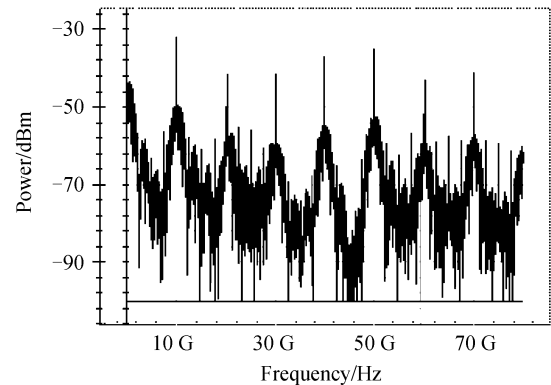
式中, $z = 2\beta \sin(2\pi f_{sw} \tau/2)$, MZI 通道延时 $\tau = 1/\text{FSR}$ (FSR 为 MZI 的自由频谱范围), $J_{2k}(\dots)$ 为 $2k$ 阶第一类贝塞尔函数. 从式(1)可以看出扫频光波经过传输后,光电探测器(PIN)输出的频谱由直流分量和一系列扫频光波的偶次谐波分量 $\{2kf_{sw}\}$ 、奇次谐波分量 $\{(2k-1)f_{sw}\}$ 组成,频率间隔 f_{sw} . 这样,基站可获得 n 倍于 f_{sw} 的毫米波信号,然后采用带通滤波器(BPF)就可以得到所需要的毫米波信号,因此较低的扫频光波频率 f_{sw} 通过倍频可以获得较高频率的毫米波信号.

本文使用光通信系统软件对图 1 所示系统进行仿真,参量设置如下:可调激光器(TL)工作波长 $\lambda = 1552.5$ nm、频率 $f_c = 193.1$ THz、线宽 10 MHz、发射功率 10 dBm;扫频光波频率 $f_{sw} = 5$ GHz;相位调制器相偏 $\beta = 798$ rad;基带信号 $g(t)$ 由 PRBS 驱动的 NRZ 脉冲信号发生器产生的二进制电信号来模拟,速率 2.5 Gbit/s;MZI 的 FSR = 10 GHz 即 $\tau = 0.1$ ns,带通滤波器的中心频率和带宽分别为 60 GHz 和 3.75 GHz.

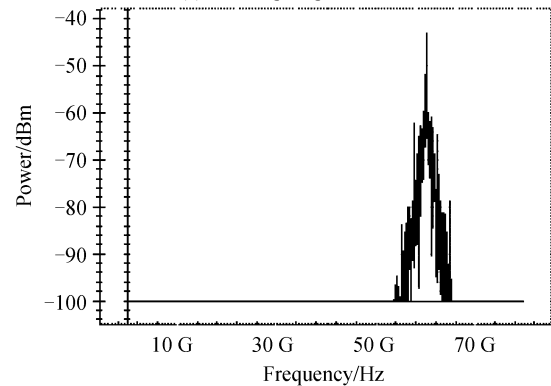
通过上述设置,最终在基站侧光探测器得到的光电流频谱如图 2. 由图 2(a)可以看出, PIN 输出端产生的频谱包含一系列谐波,且谐波频率都为扫频光波频率 f_{sw} 的偶数倍(10 GHz、20 GHz、30 GHz...). 实验中,激光器载波频率 f_c 为 193.1 THz、MZI 通道延时 $\tau = 0.1$ ns,代入式(1)可知, $\sin(2\pi f_c \tau) = 0$,扫频光波的奇次谐波分量幅度为零,奇次谐波被抑制,仿真与式(1)的分析结果相吻合.

在实验中,基站侧通过设置特定滤波器(BPF),

可得到扫频光波频率 5 GHz 的 12 倍谐波分量,即 60 GHz 毫米波信号,输出结果如图 2(b). 所以说,基于综合光学调制的 ROF 系统结构,可实现扫频光波频率的 12 倍频,并获得所需 60 GHz 毫米波信号,最终完成 60 GHz 毫米波 ROF 系统下行链路传输.



(a) The output spectrum of the PIN



(b) Spectrum of the 60GHz millimetre-wave signal

图 2 光探测器探测出的频谱

Fig. 2 The spectrum detected by the PIN

2 双向 ROF 系统结构

2.1 系统设计

在图 1 所示单向 ROF 系统结构基础上,本文结合光载波重用技术提出 ROF 双向通信系统结构,如图 3. 图中,由激光器产生的光源,通过一个 50:50 的光分束器(PS)形成两路光信号:第一路光波经相位调制器将正弦扫频信号调制到光载波上,然后接入光带阻滤波器(TOF)滤出正弦扫频已调信号的中心光载波,并经强度调制器(MZM)加载基带信号 $g(t)$,传输到基站后实现 60 GHz 毫米波信号的产生;另一路中心光载波未调制信息直接与第一路光波通过光耦合器(OC)进行耦合,该路中心光载波在基站被提取出来,实现光载波重用. 耦合后的光波经过单模光纤(SMF)传输到基站.

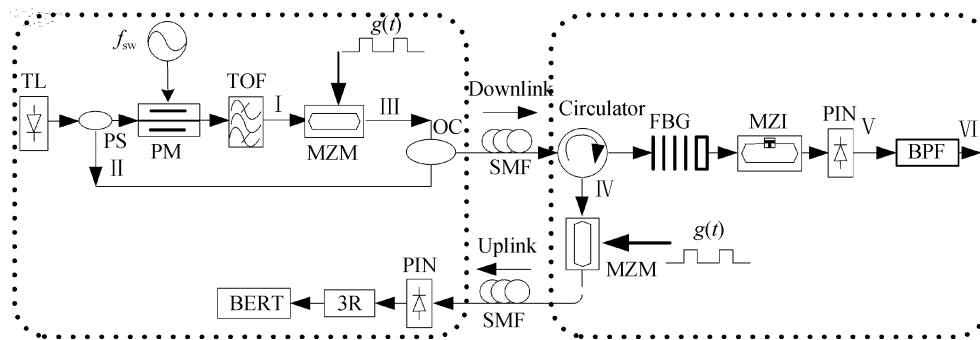


图 3 基于综合光学调制的 ROF 双向通信系统结构

Fig. 3 Setup for the bi-directional ROF system based on integrated optical modulation

在基站侧,接收到的光信号通过光环行器(Circulator)和 FBG 后也形成两路,一路为下行(Downlink)传输信号,该信号通过 MZI 和光电探测器以产生一系列 n 倍于扫频频率的光毫米波,并通过带通滤波器(BPF)滤出可获得所需要毫米波信号;另一路信号可作为上行(Uplink)传输光源.这里本文采用光载波重用技术,将来自中心站未调制信息的光载波,通过 FBG 反射,由环行器 3 端口输出,并经过强度调制器(MZM)进行调制,调制光信号经上行单模光纤传输回到中心站,最后通过 PIN、3R

和 BERT 对上行请求信息进行恢复和性能检测.

2.2 系统仿真

按照图 3 所示结构,本文对系统进行仿真分析,其中系统参量分别为:光带阻滤波器中心频率 193.1 THz、带宽 10 GHz; FBG 中心频率 193.1 THz,带宽 12.5 GHz,反射系数 0.99;上行基带信号速率为 2.5 Gbit/s,其他参量设置与图 1 系统结构相同,在仿真中,利用光谱仪和频谱分析仪同时监测图 3 中(I~VI)点的频域特性,仿真结果如图 4.

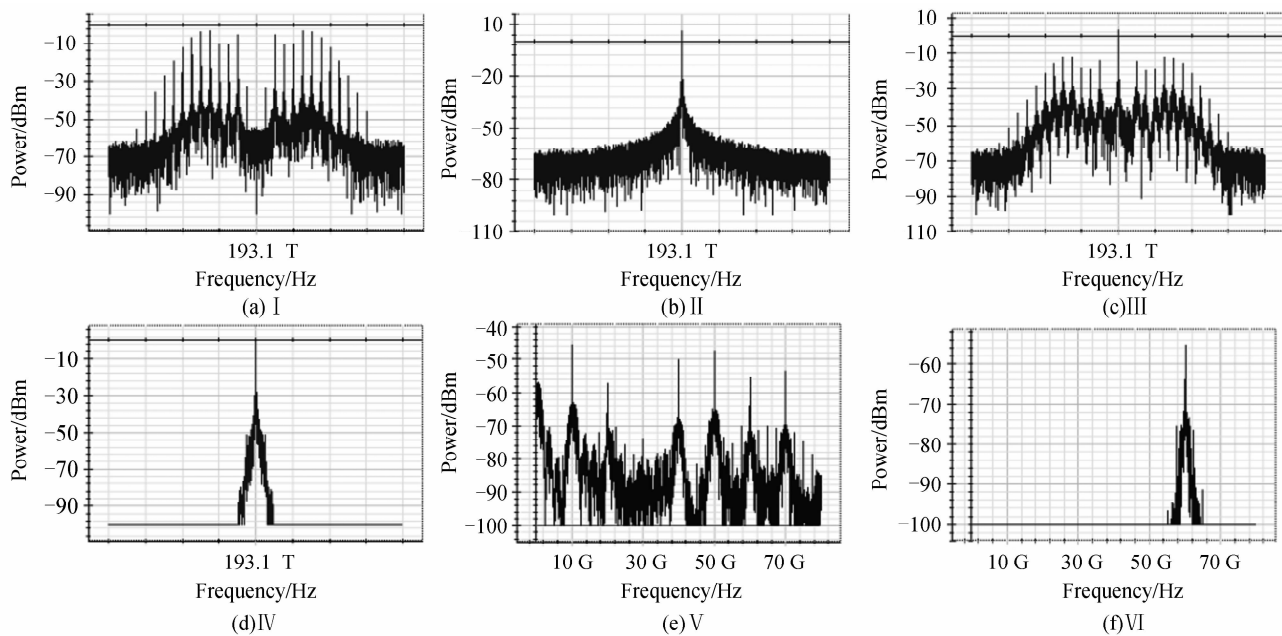


图 4 系统仿真频谱输出

Fig. 4 The output spectrum of system simulation

图 4(a)和(b)分别为通过光分束器(PS)形成的两路光信号,第一路已调光载波通过 TOF 滤除中心载波的频谱图,由图可以发现,扫频信号调制到光载波上产生一系列边带信号而不包含中心载波,该调制光波通过强度调制器将加载基带信号,第二路信号未调制载波信息;光耦合器将两路光波耦合后频谱图如图 4(c),耦合后的频谱由已调基带信号的一系列边带信号和未调制信息的光中心载波组成;

图 4(c)中频率为 193.1 THz 的光载波由 FBG 反射,并经环行器 3 端口输出,频谱图如图 4(d).由图 4(d)可以看出该光载波并未调制信息,强度为 -1.8 dBm.对于下行链路,光探测器探测出产生下行链路毫米波的频谱图如图 4(e)、(f),其中 60 GHz 的毫米波信号的功率为 -55.6 dBm.

图 5 为 ROF 系统双向传输所得到的误码率曲线图和眼图,在 $BER=10^{-9}$ 情况下,当系统码元速

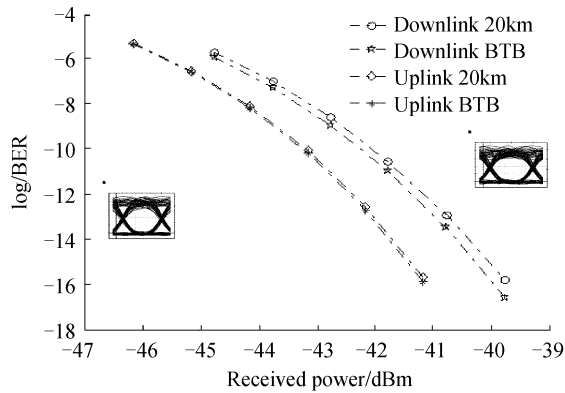


图5 上行链路和下行链路误码率曲线和眼图
Fig. 5 BER Curves and eye diagram

率为 2.5 Gbit/s, 传输距离 20 km 后, 上行链路和下行链路的功率代价分别为 0.1 dB 和 0.35 dB. 结果表明, 2.5 Gbit/s 数据在单模光纤中成功进行双向传输, 传输距离可达 20 km 以上, 传输功率代价少于 0.5 dB.

本文结合光载波重用技术和综合光学调制技术, 在中心站配置低频信号, 无需高频率射频组件和相干光源, 实现 60 GHz 光毫米波双向传输, 整个系统结构简单, 无需复杂的外围电路, 降低了中心站的

成本和复杂度, 同时系统使用单光源方法, 避免了基站配置昂贵的光源组件, 进一步降低系统成本.

2.3 系统性能比较

相对本系统结构, 文献[12]提出了一种光学倍乘法产生光毫米波 ROF 系统, 该系统在中心站配置环行器和光纤布喇格光栅(FBG), 利用 FBG 选频反射特性将频率为 f_c 的光波反射, 提取作为上行链路光载波. 在上行传输中, 文献[12]采用低频本振与毫米波载波混频的方法实现上行链路本振. 这里, 对两种方案进行仿真对比, 分析两者在传输性能上的不同. 为了便于比较, 统一选取速率为 2.5 Gb/s 的 NRZ 码作为双向传输的基带信号.

文献[12]系统结构中, 光载波在基站被提取出来, 作为上行传输所用光源. 通过试验分析, 我们获得频率为 193.1 THz 的光载波频率强度为 -8.2 dBm, 与文献[12]试验结果(-10 dBm)接近. 而本方案所提取的光载波强度为 -1.3 dBm, 相比高 6.9 dBm. 为了对两种方案传输性能进一步分析, 试验仿真毫米波信号经过光纤传输后眼图变化情况, 如图 6.

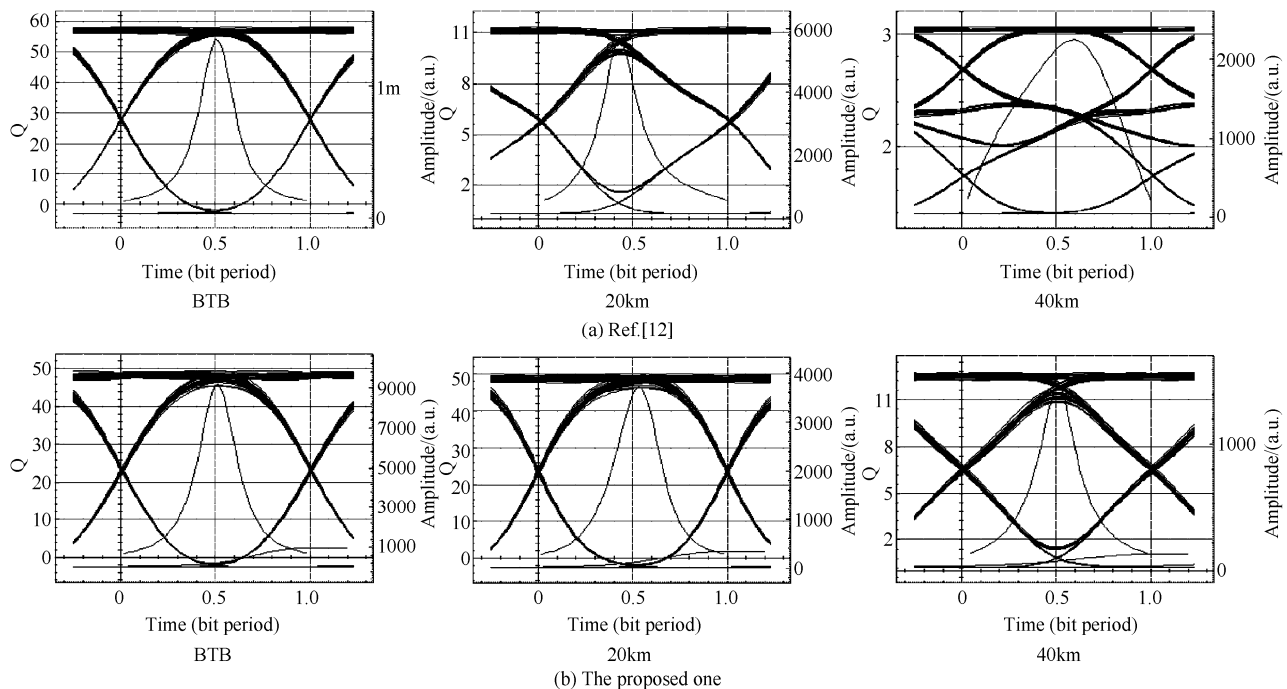


图6 经过不同距离光纤传输后眼图
Fig. 6 Eye diagrams after different length transmission

由图 6 可见, 两种方案在背靠背情况下均能获得较好的传输效果; 但经过 20 km 光纤传输后, 两者眼图相差较大, 文献[12]所得到的眼图轮廓变窄, 眼睛张开度变小; 本系统经过 20 km 传输仿真得到的眼图较之背靠背时基本没有变化; 当传输距离进一步加大到 40 km 时, 文献仿真得到的眼图轮廓已模糊、眼皮重叠, 说明系统已不可用, 而本系统眼图

清晰可见.

图 7 为两种方案下, ROF 系统下行传输不同距离所得到的误码率曲线图, 图中 BTB₁ 和 BTB₂ 分别代表在本文和文献[12]下测得的曲线. 在误码率 BER = 10⁻⁹ 情况下, 文献[12]系统传输距离 20 km 后, 下行功率代价为 1.8 dB, 而本文传输距离 35 km 后, 下行功率代价为 1 dB. 由此可见, 本文提出的系

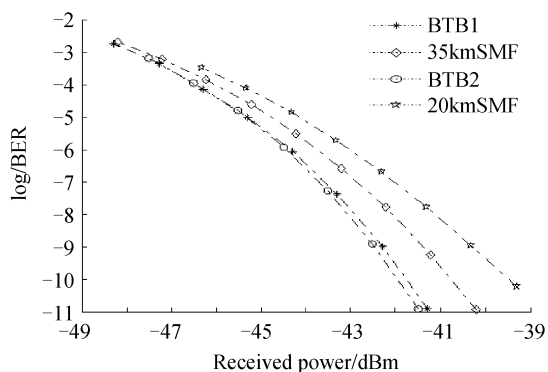


图7 下行链路误码率曲线

Fig.7 BER curves for the different downlinks

统,经过光纤传输后,性能和误码率更稳定,在相同的情况下,适合更长距离的传输,具备更好的抗色散能力。

3 结论

本文提出一种基于综合光学调制的 ROF 全双工通信系统,系统充分结合综合光学调制和光载波重用技术的特点,一方面中心站只需配置较低频率的扫频信号就可以产生 60 GHz 毫米波,无需相干光源,简化系统复杂度;另一方面所有激光器均配置在中心站,基站无需任何光源,简化了基站和节约光源成本.仿真结果表明,本系统对 2.5 Gbit/s 的基带信号成功进行 20 km 的双向传输,功率代价少于 0.5 dB.此外通过对已有的提取光载波方式所组成的 ROF 双向通信系统的性能进行比较,结果表明本系统结构具有提取光载波功率较大、传输性能较优,适合更长距离传输的优点。

参考文献

- [1] LIU Ming, WU Chun-feng, ZHANG Hui, *et al.* Study and application of RoF technology in the optical communication [J]. *Optical Communication Technology*, 2009, **33**(6): 43-46.
刘明,吴椿烽,张慧,等. RoF 技术在光通信领域中的研究与应用[J]. *光通信技术*, 2009, **33**(6): 43-46.
- [2] ZENG Jun-ying, YU Chong-xiu, XIN Xiang-jun, *et al.* Nonlinear crosstalk due to xpm in single-sideband ROF systems[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1405-1408.
曾军英,余重秀,忻向军,等. 单边带调制 ROF 链路中交叉相位引起的非线性串扰[J]. *光子学报*, 2009, **38**(6): 1405-1408.
- [3] LI Guang, HUANG Xu-guang. A bi-directional radio-over-fiber system based on double-sideband with optical carrier suppression[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1153-1157.
李广,黄旭光. 抑光载波双边带 Radio over Fiber 双工通信系统设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1153-1157.
- [4] LIN Chun-Ting, PENG Wei-Ren, CHEN J, *et al.* Simultaneous generation of baseband and radio signals using only one single-electrode Mach-Zehnder modulator with enhanced linearity[J]. *IEEE Photonic Technology Letters*, 2006, **18**(23): 2481-2483.
- [5] JIA Zhen-sheng, YU Jian-jun, HSUEH Yu-Ting, *et al.* Multiband signal generation and dispersion-tolerant transmission based on photonic frequency tripling technology for 60 GHz radio-over-fiber systems [J]. *IEEE Photonic Technology Letters*, 2008, **20**(17): 1470-1472.
- [6] LARRODE M G, KOONEN A M J, OLMOS J J V, *et al.* Bidirectional radio-over-fiber link employing optical frequency multiplication[J]. *IEEE Photonic Technology Letters*, 2006, **18**(1): 241-243.
- [7] FANG Zu-jie, YE Qing, LIU Feng, *et al.* Progress of millimeter wave subcarrier optical fiber communication technologies[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(4): 481-488.
方祖捷,叶青,刘峰,等. 毫米波副载波光通信技术的进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 481-488.
- [8] KASZUBOWSKA A, HU L, BARRY L P. Remote downconversion with wavelength reuse for the radio/fiber uplink connection [J]. *IEEE Photonic Technology Letters*, 2006, **18**(4): 562-564.
- [9] KURI T, KITAYAMA K, TAKAHASHI Y. A single light-source configuration for full-duplex 60 GHz-band radio-on-fiber system[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology*, 2003, **51**(2): 431-439.
- [10] CHEN L, WEN H, WEN S. A radio-over-fiber system with a novel scheme for millimeter-wave generation and wavelength reuse for up-link connection[J]. *IEEE Photonic Technology Letters*, 2006, **18**(9): 2056-2058.
- [11] LIN C. Broadband optical access networks and fiber-to-the-home: system technologies and development strategies[M]. New York: Wiley, 2006.
- [12] LI Jing, NING Ti-gang, QI Chun-hui, *et al.* Design of bi-directional radio over fiber transmission system based on optical frequency multiplication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(3): 607-613.
李晶,宁提纲,祁春慧,等. 基于光学倍乘法产生光毫米波的全双工毫米波光传输系统设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 607-613.

Bi-directional Radio over Fiber System Based on Integrated Optical Modulation

HAN Yi-shi, ZHANG Li, CHEN Wei-tao

(Institute of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: A bi-directional radio-over-fiber system using a single light source was demonstrated. A tunable laser was simply configured to produce the constant frequency laser source at central station(CS), and the baseband signal was modulated in optical carrier through integrated optical modulation technology (frequency modulation, intensity modulation), eventually forming a 60 GHz millimeter-wave downlink signal. And, the same optical carrier was reused at base station for uplink connection. The system combined the characteristics of optical carrier reuse technology and integrated optical modulation technology, so as to use resources reasonably and simplify the base station structure. Simulation result shows that the bi-directional 2.5Gbit/s data is successfully transmitted over 20 km single-mode fiber for both upstream and downstream channels with less than 0.5dB power penalty. Relative to the existing technical scheme, the transmission system has advantages in the transmission power, the transmission distance and transmission performance.

Key words: Radio Over Fiber(ROF); Bi-directional; Integrated optical modulation; Optical millimeter-wave