

文章编号: 0258-7025(2010)07-1744-06

# 基于强度调制器的全双工 OFDM-ROF 系统实验研究

张益民 陈 林 曹子峥 董 泽

(湖南大学计算机与通信学院微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要** 实验研究了一种基于单臂马赫-曾德尔强度调制器,并在基站利用光载波抑制技术产生 40 GHz 光载毫米波的全双工正交频分复用-光纤无线通信(OFDM-ROF)系统。在下行链路中,2.5 Gb/s 的 OFDM 信号与 20 GHz 的射频正弦波信号混频后,驱动强度调制器调制中心激光载波,经标准单模光纤(SSMF)传输至基站后接收;在上行链路中,通过波长重用调制 2.5 Gb/s 的开关控信号传输至中心站。实验结果表明,下行和上行分别经过 50 km SSMF 传输后功率代价分别小于 1 和 0.5 dB。

**关键词** 光通信;光纤无线通信;正交频分复用;光载波抑制;全双工;波长重用

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103707.1744

## Experimental Research about a Full-Duplex OFDM-ROF System Based on Intensity Modulator

Zhang Yimin Chen Lin Cao Zizheng Dong Ze

(Key Laboratory of Micro/Nano Optoelectronic Devices, Ministry of Education, School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract** A full-duplex orthogonal frequency division multiplexing-radio over fiber (OFDM-ROF) system with 40 GHz optical millimeter-wave generation by utilizing single-arm Mach-Zehnder intensity modulator and optical carrier suppression modulation in base station is proposed and experimentally investigated. In the downstream, 2.5-Gb/s OFDM analog data and 20-GHz radio frequency clock are mixed and used to modulate optical carrier by driving optical intensity modulator. The signal at base station after transmission over standard single mode fiber is demodulated, received and analyzed. In the upstream, the same optical carrier is reused at base station for uplink connection of 2.5-Gb/s on-off keying data. Experimental results show that the downlink and uplink data is successfully transmitted over a 50-km single-mode fiber (SMF-28) with less than 1 and 0.5 dB power penalty, respectively.

**Key words** optical communications; radio-over-fiber; orthogonal frequency division multiplexing; optical carrier suppression; full-duplex; wavelength reuse

## 1 引 言

随着多媒体技术的发展,人们对带宽的需求越来越大,对服务的方便灵活性要求越来越高。光纤无线通信(ROF)技术融合了无线通信的灵活性和光纤通信的高带宽、低损耗等特性,受到了广泛关注<sup>[1~9]</sup>。正交频分复用(OFDM)技术具有抗多径能力强、频谱利用率高、传输容量大等特点,被公认为 4 G 的核心

技术。ROF 技术与 OFDM 技术的融合充分结合了两者的优势,成为下一代通信技术的研究热点<sup>[10~14]</sup>。

对于全双工 ROF 系统,在下行链路中,现已有许多高效的全光混频或上变频毫米波的方法<sup>[1~6]</sup>,诸如利用超连续谱光源、高非线性光纤的四波混频效应或互相位调制、半导体光放大器、电吸收调制器的交叉吸收调制、外部调制器的双(单)边带调制和

收稿日期: 2009-08-22; 收到修改稿日期: 2009-09-29

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z263, 2008AA01Z4473291), 湖南省自然科学基金(06JJ50108)和教育部光通信和光波技术重点实验室(北京邮电大学)开放基金资助课题。

作者简介: 张益民(1985—),男,硕士研究生,主要从事光纤无线通信技术和光正交频分复用等方面的研究。

E-mail: 151293867@163.com

导师简介: 陈 林(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤无线通信系统和光分组交换等方面的研究。

E-mail: lililiu@sina.com

光载波抑制(OCS)调制。所有这些方法中,OCS 技术在简化系统结构和长距离传输时的性能方面显示出独特的优势。对于上行链路,应集中考虑整个系统的高效性以及系统结构的优化。在该网络结构中,中心站的中心波长传输至基站后,数据重新调制在该波长上,然后再进行上行传输。由于在基站中不需要增加额外的光源和波长处理,因而其为降低系统成本提供了有效的解决办法。针对载波抑制的波长重利用技术已有不少研究<sup>[1~6]</sup>,这些采用载波重利用技术的全双工 ROF 系统中,大多都是在中心站发射一个未调制信号的光载波。在采用外调制器的 ROF 系统中,在中心站需要将中心载波分离,将数据信号调制到光载毫米波上以后,再与被分离的载波合成一起发送到基站,在基站中再将光载毫米波信号与载波进行分离<sup>[3,4]</sup>,这种系统需要更多的耦合器。OFDM 技术在 ROF 系统中的传输性能研究也有大量报道,巫玮佳等<sup>[10,11]</sup>通过仿真和理论分析了光纤信道的色散以及非线性效应对 OFDM 信号传播的影响。Jianjun Yu 等<sup>[12]</sup>实验实现了 16 Gb/s 的 OFDM 信号传输 20 km 光纤以及 6 m 无线的超宽带 ROF 系统。Zhensheng Jia 等<sup>[13]</sup>实验研究了 1 Gb/s 的 OFDM 信号在 40 GHz ROF 系统中的传输性能。Chunting Lin 等<sup>[14]</sup>利用一个集成调制器实现了载波抑制 OFDM-ROF 系统。除了 Zhensheng Jia 等<sup>[13]</sup>提到将分离的光载波用来调制上行数据外,这些 OFDM-ROF 系统都没有研究其上行链路。陈林等<sup>[15]</sup>研究了一种全双工 ROF 系统,虽然在中心站没有分离光载波,但下行链路携带的是开关键控(OOK)信号,对上行链路信号产生影响。为此,本文实验研究了一种基于单臂马赫-曾德

尔强度调制器(MZM-IM),并利用 OCS 技术产生 40 GHz 全双工光载毫米波的 OFDM-ROF 系统,在这个系统中,由于光载毫米波信号携带的是 OFDM 信号,不需要在中心站分离光载波,而在基站将光中心载波与光载毫米波信号分离,中心载波用于上行链路可以再调制 OOK 信号,而中心载波上的 OOK 信号与原 OFDM 信号不会产生干扰。

## 2 实验原理与理论分析

### 2.1 实验原理

基于强度调制器实现载波抑制的 OFDM-ROF 系统如图 1 所示。系统由中心站、上/下行光纤链路、基站和用户单元 4 部分组成。在中心站,OFDM 信号与射频(RF)副载波混频后驱动单臂 MZM-IM,调制在中心激光载波上。经光纤传输后,通过环形器和光纤布拉格光栅(FBG)进行滤波,被滤回的不携带下行数据的中心载波被用来调制上行的 OOK 数据,然后通过标准单模光纤(SSMF)传输至中心站。此时,携带 OFDM 信息的副载波的 2 个一阶边带的频差为原射频频率的 2 倍,然后经过光电二极管(PD)进行拍频并电放大之后由天线发射出去。用户单元端天线接收、放大,然后与本振(LO)进行混频,最后经低通滤波器(LPF)滤波后实现 OFDM 基带信号的接收。对接收到的基带 OFDM 信号进行实时采样后,数据处理和恢复在 Matlab 接收程序中离线完成。本文主要通过实验研究该系统结构的下行 OFDM 信号传输和上行波长重利用调制 OOK 数据的实际性能和误码特性来验证系统的可行性。

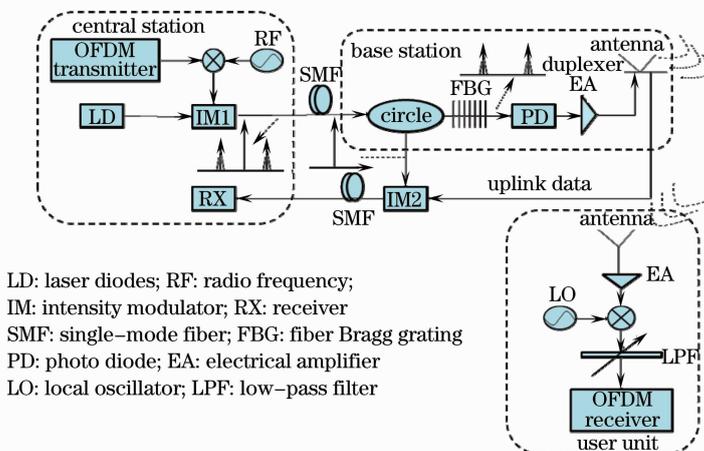


图 1 基于强度调制器实现载波抑制和波长重利用的 OFDM-ROF 系统原理图

Fig. 1 Principle of OFDM-ROF system based on OCS of MZM-IM and reuse

## 2.2 理论分析

OFDM 信号可以表示为  $x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_n(t) \exp\left(j \frac{2\pi n}{N} t\right)$ , 其中  $t$  为时间,  $a_n(t)$  为原始信号序列, 实验中的  $N = 256$ , 循环前缀为 32 个时

间符号。射频信号可以表示为:  $V(t) = V_m \cos(\omega_{\text{RF}} t + \phi_0)$ , 其中  $\omega_{\text{RF}}$  为 RF 信号的角频率,  $V_m$  和  $\phi_0$  分别为射频信号的振幅和相位。OFDM 信号与射频信号混频后, 信号表达式为

$$S(t) = V_m x(t) \cdot \cos(\omega_{\text{RF}} t + \phi_0) = \frac{V_m}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_n(t) \exp\left(j \frac{2\pi n}{N} t\right) \cdot \cos(\omega_{\text{RF}} t + \phi_0). \quad (1)$$

分布反馈式激光器(DFB-LD)产生一个线宽很窄的连续光波  $E_m(t) = E \cos(\omega_c t)$ , 其中  $E$  为光载波功率,  $\omega_c$  为角频率。混频信号通过光强度调制器调制到输入光波上, 则光强度调制器的输出为

$$E_{\text{IMout}}(t) = E \cos(\omega_c t) \cos\left[\frac{\varphi_0}{2} + \beta_2 \cdot x(t) \cdot \cos(\omega_{\text{RF}} t + \phi_0)\right], \quad (2)$$

式中  $\varphi_0 = \pi \frac{V_{\text{DC}}}{V_\pi}$  表示由直流偏置电压引起的相位偏转,  $V_{\text{DC}}$  为直流偏置,  $\beta_2 = \pi(V_m/V_\pi)$  为调制器的调制深度, 调节  $\beta_2$  使  $J_i(\beta_2) \approx 0 [i \in (2, 3, 4 \dots)]$ , 利用贝塞尔函数展开, (2) 式可近似为

$$E_{\text{IMout}}(t) \approx E \cos\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) J_0[\beta_2 \cdot x(t)] \cos(\omega_c t) + 2E \sin\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) J_1(\beta_2) \cdot x(t) \cos(\omega_c t) \cos(\omega_{\text{RF}} t + \phi_0) = E \cos\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) J_0[\beta_2 \cdot x(t)] \cos(\omega_c t) + E \sin\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) J_1(\beta_2) \cdot x(t) [\cos(\omega_c t - \omega_{\text{RF}} t - \phi_0) + \cos(\omega_c t + \omega_{\text{RF}} t + \phi_0)]. \quad (3)$$

当光信号在长度为  $L$  的光纤中传输时, 两个边带由于色散发生了相位偏移, 设定相位偏移常数为  $\beta(\omega)$ , 其中  $\beta'(\omega), \beta''(\omega)$  为一阶、二阶相位偏移常数。使用泰勒公式展开, 得到

$$\beta(\omega_c \pm \omega_{\text{RF}}) = \beta(\omega_c) \pm \omega_{\text{RF}} \beta'(\omega_c) + \frac{1}{2} \omega_{\text{RF}}^2 \beta''(\omega_c) + \dots, \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式, 在基站分离一阶边带和中心载波, 然后拍频, 通过光电二极管后的光电流可表示为

$$I_{\text{IMSout}}(t) = \frac{1}{2} \mu E^2 \sin^2\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) J_1^2(\beta_2) \frac{1}{N} \times \left\{ \left\{ \sum_{n=1}^N a_n(t + \theta_{+1}) \exp\left[j \frac{2\pi n}{N} (t + \theta_{+1})\right] \right\}^2 + \sum_{n=1}^N \left\{ a_n(t + \theta_{-1}) \exp\left[j \frac{2\pi n}{N} (t + \theta_{-1})\right] \right\}^2 + 2 \cos[2\omega_{\text{RF}} t + 2\beta'(\omega_c) L] \sum_{q=1}^N \sum_{p=1}^N \left\{ a_q(t + \theta_{+1}) a_p(t + \theta_{-1}) \exp\left[j \frac{2\pi(q+p)}{N} (2t + \theta_{+1} + \theta_{-1})\right] \right\} \right\}. \quad (5)$$

从(5)式可知, 色散引起 2 个一阶边带的时延不同, 导致解调后的基带信号等效于两路时延差为  $\Delta\tau = \theta_{+1} - \theta_{-1}$  的基带信号的乘积。当基带信号为非归零(NRZ)或 OOK 等码形的单信道信号时, 时延将表现为码元的占空比变小, 引起码间干扰, 限制传输距离。而每个 OFDM 符号间加入了循环前缀, 当所加循环前缀长度大于  $\Delta\tau$  时, 可以消除码间干扰。发生时延时相当于子载波间有了相移, 这个相移不会影响子载波的正交性, 不会产生子信道干扰。

## 3 实验装置及结果

### 3.1 实验装置

基于强度调制器实现载波抑制和波长重利用的 OFDM-ROF 系统实验装置图如图 2 所示。实验测得

各点对应的光谱图如图 3 所示。实验中采用 Ando 公司的 6317 光谱分析仪检测光谱, 其波长范围为 600~1700 nm, 最小分辨率为 0.01 nm。在中心站, DFB-LD 产生波长为 1543.78 nm 的连续光波。由 HP Agilent E8257D 模拟信号发生器产生 10 GHz 的 RF 信号, 然后由 1:2 的倍频器(FM)上变频到 20 GHz。该发生器可产生信号的频率范围为 250 kHz~20 GHz, 在本实验中先产生 10 GHz 的频率, 再用 1:2 的倍频器将频率上变频到 20 GHz, 是因为实验中发现倍频器在倍频的同时又能够实现约 3 dB 的放大效果, 对实验效果更好。任意波发生器(型号为泰克 610, 抽样速率为 2.6 GS/s)产生的 2.5 Gb/s OFDM 信号与该 20 GHz 的 RF 信号混频, 经放大后驱动单臂 MZM-IM(其 3 dB 带宽大于 20 GHz, 消光比为

30 dB,半波电压为 7.8 V),调制在中心激光波长上。然后经过光放大器放大后传输 50 km 单模光纤

至基站,该光纤在 1543 nm 波长附近的色散系数为 17 ps/(km · nm)。

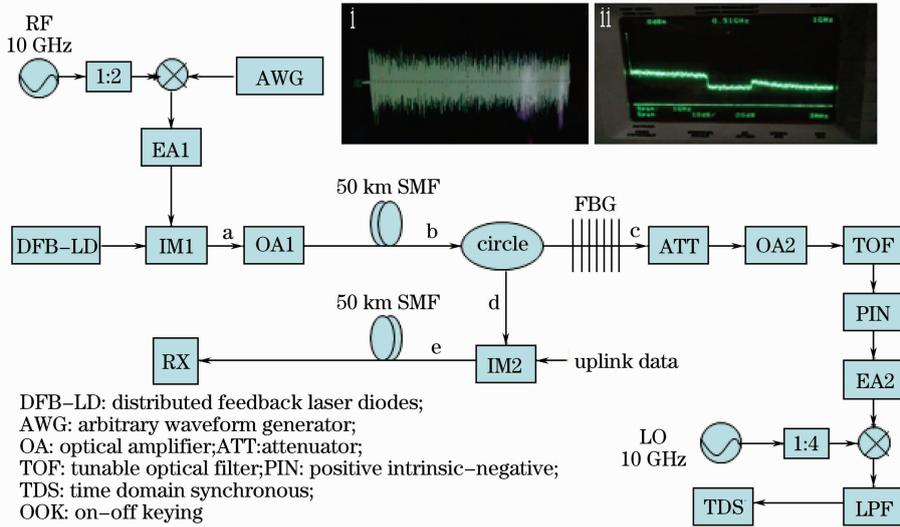


图 2 基于强度调制器实现载波抑制和波长重利用的 OFDM-ROF 系统实验装置图

Fig. 2 Experimental setup for OFDM-ROF architecture based on OCS of MZM-IM and reuse

在基站,经 FBG(中心波长为 1543.78 nm,3 dB 带宽为 0.12 nm,载波抑制比可达到 30 dB)滤波后得到的 2 个一阶边带先通过衰减器(测试功率代价)再进行光放大,可调滤波器滤除带外噪声后,2 个频率间隔为 40 GHz 的一阶边带互相拍频得到毫米波载波频率为 40 GHz 的光生 OFDM 信号,经电放大后与 40 GHz 的本振混频得到 OFDM 基带信号,通

过低通滤波器后再在实时示波器(型号为泰克 684 B,抽样速率为 5 GS/s)中进行采样,最后在 Matlab 中分析。经 FBG 滤波后反射的中心载波通过环形器后与上行 2.5 Gb/s 的 OOK 数据调制(由型号为 Anritsu MP1763C 的码型发生器产生,其最高码元速率为 12.5 Gb/s),然后传输 50 km 光纤回中心站,分析其误码特性。

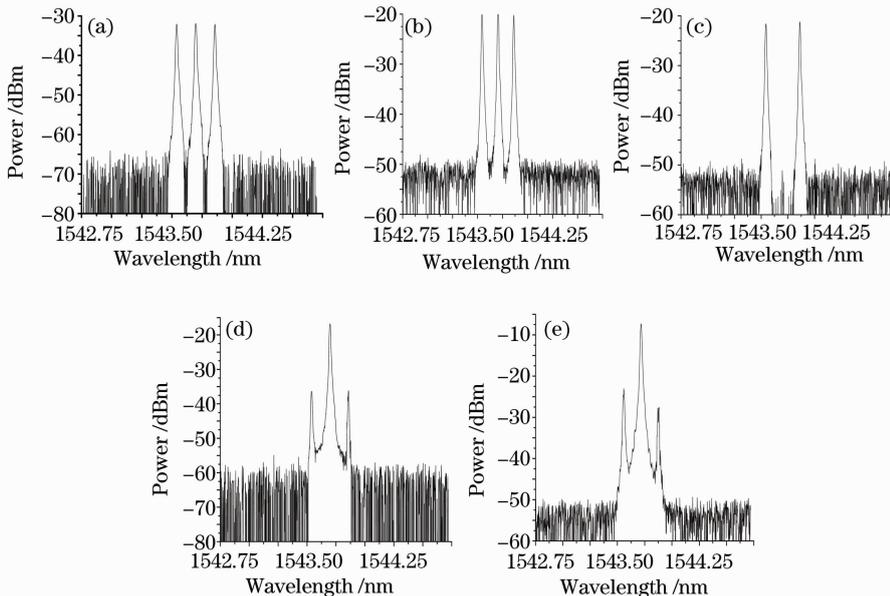


图 3 实验测得各点对应的光谱图

Fig. 3 Optical spectra at different locations during the experiment

### 3.2 结果分析

在图 3 所示的光谱图中,(a)是经过副载波调制的信号通过强度调制器调制到激光上的光谱图。从

(b)和(c)可以看出,载波抑制比大约为 30 dB,两个一阶边带中心波长的差值大约为 0.32 nm (40 GHz)。(d)是通过 FBG 滤取出的激光中心载

波的光谱图,(e)是其调制上行 OOK 信号之后的光谱图。实验测得的下行和上行误码率(BER)曲线以及对应的星座图或眼图随接收功率和传输距离变化的关系如图 4 所示。从图 4 可以看出,无论对于下行链路还是上行链路,随着接收功率的增加,误码率随之降低。对于下行链路,2.5 Gb/s 的 OFDM 信

号传输 50 km 标准单模光纤后,当误码率为  $10^{-4}$  时,其功率代价小于 1 dB,背靠背以及传输 50 km 后的星座图见图 4(a)中插图。对于上行链路,2.5 Gb/s 的 OOK 信号传输 50 km 标准单模光纤后,当误码率为  $10^{-9}$  时,其功率代价小于 0.5 dB,背靠背以及传输 50 km 后的眼图见图 4(b)中插图。

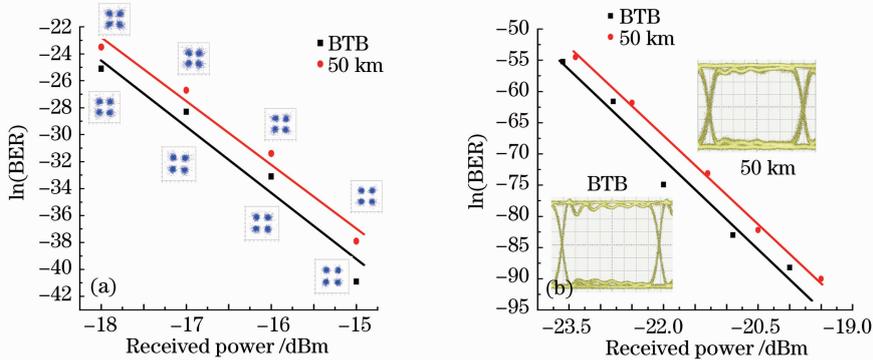


图 4 下行链路(a)和上行链路(b)信号误码率曲线图

Fig.4 BER curves for both downstream(a) and upstream(b) signal

## 4 结 论

研究了基于单臂 MZM-IM 来实现载波抑制的 40 GHz 全双工 OFDM-ROF 系统。对于进行毫米波上变换的下行链路,信号传输到达基站后先进行 OCS 再拍频不仅简化了系统结构而且能实现毫米波的倍频。对于上行链路,中心站不需分离中心载波,基站可以重利用同一光载波而不需要额外的光源。这种系统既节约了中心站的成本,也降低了基站的代价。实验结果表明,在下行方向,2.5 Gb/s 的 OFDM 信号传输 50 km SSMF 后,当误码率为  $10^{-4}$  时,其功率代价小于 1 dB;在上行方向,2.5 Gb/s 的 OOK 信号传输 50 km SSMF 后,当误码率为  $10^{-9}$  时,其功率代价小于 0.5 dB。

## 参 考 文 献

- Zhensheng Jia, Jianjun Yu, Geekung Chang. A full-duplex radio-over-fiber system based on optical carrier suppression and reuse [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(16): 1726~1728
- Zhensheng Jia, Jianjun Yu, David Boivin *et al.*. Bidirectional ROF links using optically up-converted DPSK for downstream and remodulated OOK for upstream [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(9): 653~655
- Lin Chen, Hong Wen, Shuangchun Wen. A radio-over-fiber system with a novel scheme for millimeter-wave generation and wavelength reuse for up-link connection [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(19): 2056~2058
- Lin Chen, Yufeng Shao, Xiaoyan Lei *et al.*. A novel radio-over-fiber system with wavelength reuse for upstream data connection [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(6): 387~389
- Zhensheng Jia, Jianjun Yu, G. Ellinas *et al.*. Key enabling

- technologies for optical-wireless networks: optical millimeter-wave generation, wavelength reuse, and architecture [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(11): 3452~3471
- Jianxin Ma, Xiangjun Xin, Chongxiu Yu *et al.*. Millimeter-wave optical subcarrier generation by using an external modulator and optical carrier suppression [C]. *ICTON*, 2007. 273~276
- 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.毫米波副载波光通信技术的研究进展 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 481~488
- Ye Qing, Liu Feng, Qu Ronghui *et al.*. Fiber-communication project of millimeter-wave subcarrier based on fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1464~1468
- 叶青,刘峰,瞿荣辉等.一种基于光纤光栅的毫米波副载波光通信方案 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1464~1468
- Hu Liliang, Chen Lin, Yu Jianjun *et al.*. A novel scheme for optical millimeter-wave generation based on double-sideband modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 238~242
- 胡黎亮,陈林,余建军等.一种改进的双边带调制产生光毫米波的方案 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 238~242
- Wu Weijia, Yan Kai'en, Wang Lutang *et al.*. A study of some problems in OFDM-ROF optical transmission system [J]. *Optoelectronic Technology*, 2005, **25**(2): 90~96
- 巫玮佳,严开恩,王陆唐等.关于 OFDM-ROF 光无线传输系统中若干问题的研究 [J]. *光电子技术*, 2005, **25**(2): 90~96
- Linghui Rao, Xiaoqiang Sun, Wei Li *et al.*. OFDM-ROF system and performance analysis of signal transmission [J]. *Optoelectronics, Optics Valley of China International Symposium*, 2006. 67~70
- Jianjun Yu, Juqiang Hu, Dayou Qian *et al.*. Transmission of microwave-photonics generated 16 Gbit/s super broadband OFDM signals in radio-over-fiber system [C]. *The Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and the National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, 2008. OThP2
- Zhengsheng Jia, Jianjun Yu, Dayou Qian *et al.*. Experimental demonstration for delivering 1 Gb/s OFDM signals over 80 km

- SSMF in 40 GHz radio-over-fiber access systems[C]. *The Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and the National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, 2008. JWA108
- 14 Chunting Lin, Yumin Lin, Jason (Jyehong) Chen *et al.*. Generation of direct-detection optical OFDM signal for radio-over-fiber link using frequency doubling scheme with carrier suppression[C]. *The Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and the National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, 2008. OMM5
- 15 Chen Lin, Dong Ze, Li Ying *et al.*. Full-duplex radio-over-fiber system with a novel scheme for millimeter-wave generation by single arm modulator[J]. *Journal on Communications*, 2007, **28**(9): 85~90
- 陈 林,董 泽,李 瑛 等. 采用电光调制器产生光毫米波的全双工通信光纤无线通信系统[J]. *通信学报*, 2007, **28**(9): 85~90