

文章编号: 0253-2239(2010)05-1274-05

承载正交频分复用信号的 58 GHz 光载毫米波 波分复用光纤无线通信系统

王 晶 曹子峥 周 慧 董 泽 陈 林

(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 实验研究了一种采用马赫-曾德尔强度调制器和光交叉复用器(IL)产生 58 GHz 光载毫米波传输正交频分复用(OFDM)信号的波分复用光纤无线通信(WDM-ROF)系统。中心站的 4 路连续光波耦合后输入射频(RF)信号频率为 29 GHz 的强度调制器进行双边带(DSB)调制,再用另一个强度调制器将 2.5 Gb/s 的 OFDM 信号调制到 DSB 信号上。经 20 km 单模光纤(SMF)传输至基站,通过 IL 将中心载波和一阶边带分离。经可调谐光滤波器(TOF)滤取所需信道的一阶边带,由高速光电探测器产生 58 GHz 的电毫米波,利用相干解调恢复下行 OFDM 基带数据信号。实验结果表明,在无色散补偿和误码率为 10^{-3} 的条件下,下行 OFDM 信号经光纤传输 20 km 后的功率代价小于 0.5 dB,而且星座图依然清晰。

关键词 光通信;正交频分复用;波分复用;光毫米波信号;光学滤波

中图分类号 TN929.9 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1274

A Wavelength Division Multiplexing Radio-Over-Fiber System with 58 GHz Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing Millimeter-Wave Signal

Wang Jing Cao Zizheng Zhou Hui Dong Ze Chen Lin

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

Abstract A wavelength division multiplexing radio-over-fiber (WDM-ROF) system to generate 58 GHz optical millimeter (mm)-wave with OFDM signal by using a Mach-Zehnder intensity modulator and an optical interleaver (IL) is experimentally investigated. In the central office, four channels continuous lightwaves are generated by a laser array, and they are modulated by a intensity modulator which is driven by a 29 GHz radio frequency (RF) signal to realize double sideband (DSB) modulation. 2.5 Gb/s OFDM signals are modulated on the DSB signals by another intensity modulator before they are transmitted to the base station over 20 km single mode fiber (SMF). In the base station, an optical IL is used to separated optical carriers and first order sidebands. The first sidebands of desired channel are selected by a tunable optical filter (TOF) and detected by a high speed optoelectronic detector to generate 58 GHz electrical mm-wave which is demodulated by coherent demodulation to retrieve downstream OFDM baseband signals. The experimental results show that the power penalty of the downstream OFDM signals transmitted over 20 km SMF-28 is less than 0.5 dB at the BER of 10^{-3} and without dispersion compensation, and the constellation figures are still clear.

Key words optical communications; orthogonal frequency division multiplexing; wavelength division multiplexing; optical mm-wave signals; optical filtering

收稿日期: 2009-06-22; 收到修改稿日期: 2009-07-06

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z263)、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开放基金资助课题。

作者简介: 王 晶(1985—),女,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: wangjing851024@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技术、光正交频分复用和光标记交换等方面的研究。E-mail: liliuchen12@vip.163.com(通信联系人)

1 引 言

随着网络电视(IPTV)、视频点播(VOD)等数字多媒体技术的迅猛发展,传统的无线通信系统已不能满足日益增长的宽带业务需求。为了提供足够的带宽,无线传输层的副载波频率提高到了毫米波段。近年来备受关注的无线光(WO)通信系统,充分利用了光纤的巨大带宽并结合当前无线通信的高度灵活性,将无线网络和光网络融合,极大地改善了接入网的承载能力,实现了基站(BS)之间以及基站与中心站(CS)之间更高速率和更大容量的通信^[1~6]。在 WO 系统中,中心站完成毫米波的产生和数据调制等复杂的任务,基站只需要实现信号的光电转换和放大等功能,达到了中心站的器件共享的目的,简化了基站的复杂度。为了接入更多的用户,并满足各种宽带业务对网络容量的需求,密集型波分复用(DWDM)技术已广泛应用于全光网络中,将此技术或波分复用无源光网络(WDM-PON)与 WO 系统进行无缝融合实现构建高速率、大容量的光纤通信系统和网络成为一种必然趋势^[7]。

国内外研究机构对于在波分复用光纤无线通信(WDM-WO)系统中产生 40 GHz 光载毫米波的研究已趋于成熟^[7,8]。WO 研究领域由于受到光电器件带宽的限制,对高频光载毫米波系统的研究仍不完善^[9~11]。文献[10]中采用外调制器产生 60 GHz 光载毫米波,经过 85 km 光纤传输后又进行了 5 m 的无线传输,但是下行链路传输的基带信号是速率仅为 156 Mb/s 的差分相移键控(DPSK)信号。2005 年,研究人员实现了 240 GHz 的光载毫米波传输速率为 3 Gb/s 的二进制开关键控(OOK)信号,

但光纤传输距离仅为 1 km^[11]。目前,WO 系统中普遍采用的二进制调制格式的信号,在光纤传输过程中由于色散导致边带时延不同,将限制毫米波的最大传输距离^[12,13]。而正交频分复用(OFDM)调制技术相比传统的二进制、单载波调制,具有抗多径衰落、窄带干扰能力强、高频谱利用率和传输容量大等特点。将 OFDM 调制技术应用于 WO 系统中实现光正交频分复用(OOFDM),可以在一定程度上抵抗色度色散(CD)、偏振模色散(PMD)以及非线性效应,近年来成为国际上研究的热点。众多研究者提出的将 OFDM 信号应用于 WDM-PON 中,虽然实现了多路传输,但仅是有线 OFDM 信号的接入^[14~16]。因此,在 WDM-WO 系统中产生高频光载毫米波,提高数据速率,克服光纤色散,实现长距离的光纤传输,将成为光纤无线通信的一种发展趋势。

本文提出并实验研究了一种采用强度调制器和光学滤波的方法产生 58 GHz 光载毫米波的 WDM-WO 系统传输 OFDM 信号的方案。在中心站,利用两个级联的马赫曾德尔强度调制器分别进行双边带调制和 OFDM 基带数据调制。经光纤传输至基站,通过光交叉复用器(IL)分离中心载波和波分复用光载 OFDM 毫米波信号,改变光载 OFDM 毫米波的接收功率,测得相应的 OFDM 基带信号的误码率(BER)和星座图。

2 原 理

采用马赫-曾德尔强度调制器和光交叉复用器产生 58 GHz 光载 OFDM 毫米波的波分复用光纤无线通信系统,如图1所示。中心站的分布反馈式

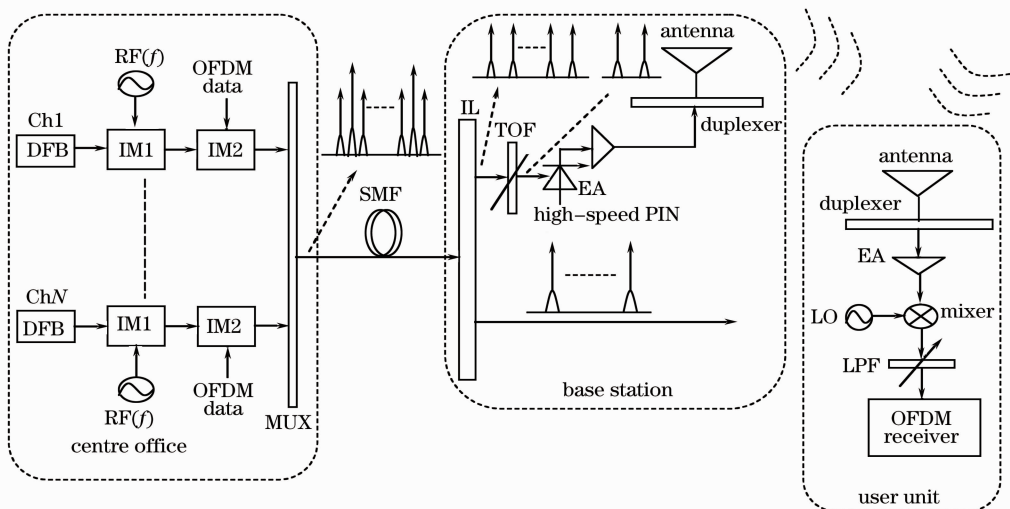


图 1 具有 58 GHz 光载毫米波的 WDM-ROF 系统原理图

Fig. 1 Principle of the WDM-ROF system with 58 GHz optical mm-wave

(DFB)激光器阵列输出 N 路连续光波分别作为光载波输入强度调制器(IM1)进行双边带(DSB)调制,其射频(RF)驱动信号的频率为 f 。适当调节驱动信号强度,使光谱能量主要集中在中心载波和两个一阶边带上,输出的 N 路双边带信号分别输入另一个强度调制器(IM2)。系统采用 OFDM 数据信号作为下行链路基带信号,通过 IM2 直接调制在各中心载波和一阶边带上,输出的 N 路光载 OFDM 双边带信号由复用器(MUX)耦合,经过标准单模光纤(SSMF)传输至基站。

在基站,通过光交叉复用器将各信道的中心载波和频差为 $2f$ 的一阶边带分离,并分别从两个端口输出。所采用的光交叉复用器是一种对温度不敏感的器件,不需要任何外加的控制系统,因此使系统稳定且成本较低。调节可调谐光滤波器(TOF)的中心波长,滤取所需信道的一阶边带,生成光载 OFDM 毫米波。经高速 PIN 结光电检测器(PD)将此边带频差为 $2f$ 的光载毫米波信号转换为频率为 $2f$ 的电毫米波信号即得到 58 GHz 的电毫米波,并通过电放大器(EA)放大后由双工天线发射出去。用户单元通过天线接收由基站发送过来的电毫米波,首先经过放大,通过混频器与相同频率的本地振荡(LO)信号混频,再进行低通滤波,从而完成相干解调恢复下行链路 OFDM 基带信号。

3 实验装置及结果

具有 58 GHz 光载毫米波的 WDM-ROF 系统传输 OFDM 信号的实验装置,如图 2 所示。实验系统包括中心站、光纤链路和基站三个部分。中心站的分布反馈式激光阵列输出 4 路波长 1545.97~1548.37 nm 的连续光波,其频率间隔为 100 GHz,并通过光耦合器(OC)合成一路连续光波信号作为光载波输入强度调制器(IM1),其光谱如图 3(a)所示。实验采用 Ando 公司 6317 的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。射频(RF)信号发生器是 HP Agilent E8257D 模拟信号发生器,产生信号的频率范围为 250 kHz~20 GHz,此处产生的频率为 14.5 GHz,并采用一个 1:2 的倍频器(FM)将频率变成 29 GHz 作为 IM1 的驱动信号,将驱动信号电压和直流偏置电压分别设置为 8.69 V 和 7.25 V,实现双边带调制。由于强度调制器的带宽不够,使得各信道的两个一阶边带与中心载波之间均残留有其它的频率成分,但产生信号的能量仍都主要集中在中心载波和频率间隔为 58 GHz 的一阶边带上,IM1 输出信号的光谱如图 3(b)所示。

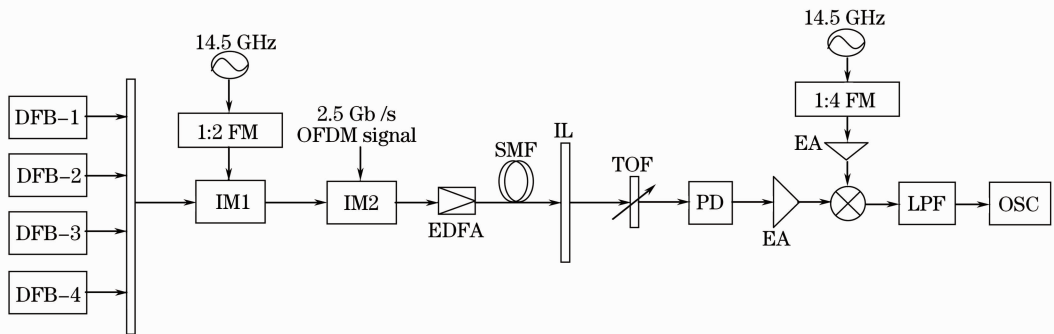


图 2 具有 58 GHz 光载毫米波的 WDM-ROF 系统的实验装置图

Fig. 2 Experimental setup for the WDM-ROF system with 58 GHz optical mm-wave

实验采用 2.5 Gb/s 的基于四相绝对相移键控(QPSK)调制的 OFDM 信号作为下行链路基带数据信号,它由任意波形发生器(AWG)产生,过程分为 3 步:1)将需要传输的伪随机码根据系统特性进行帧形成,然后根据需要将伪随机码数据帧进行多进制符号映射(Mapper),如本实验采取 QPSK 映射。将数据帧映射为符号帧后,在各个符号中加入导频(Pilot),并将高频部分插零作为保护间隔(GI),通过快速傅里叶逆变换(IFFT)进行子载波成

形,经过 IFFT 变换后形成的多正交子载波波形即为基本 OFDM 波形。为了克服信号时延,将此波形的一部分复制到波形前端作为循环前缀(CP),这样,OFDM 数据信号产生;2)产生 OFDM 信号的训练序列,即一个用于同步和信道估计的功能型 OFDM 信号。首先,根据需要形成一个训练序列,再直接通过 IFFT 形成子载波,最后将形成的多子载波波形的一部分复制到波形头部作为克服信号时延的循环前缀;3)将 OFDM 信号的训练序列复制到

OFDM 数据信号之前形成一个完整的 OFDM 信号,再经 AWG 生成完整的 OFDM 信号。它通过强度调制器(IM2)直接调制在 IM1 输出的 4 路双边带信号上,调节 IM2 的直流偏置电压和 OFDM 数据信号电压分别为 2.7 V 和 1.6 V,其输出光谱如

图 3(c)所示。携带 OFDM 基带信号的波分复用双边带信号采用掺铒光纤放大器(EDFA)放大,经过 20 km 标准单模光纤传输至基站后的光谱如图 3(d)所示。由于受到光纤色散的影响,各信道信号的功率都有所衰减。

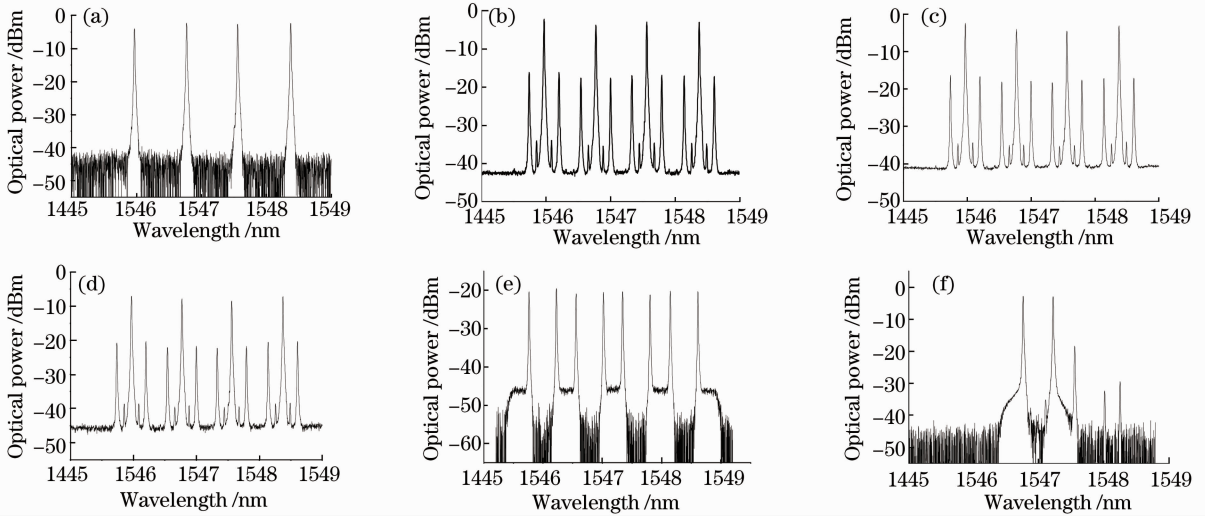


图 3 具有 58 GHz 光载毫米波的 WDM-ROF 系统的光谱图。(a)光耦合器的输出光谱;(b)双边带调制后的光谱;(c)携带 OFDM 信号的波分复用双边带信号光谱;(d)经 20 km 光纤传输后的波分复用双边带信号光谱;(e)IL 输出的波分复用毫米波信号光谱;(f)经 TOF 滤取所需信道的毫米波信号光谱

Fig. 3 Optical spectrum of the WDM-ROF system with 58 GHz optical mm-wave. (a) optical spectrum after optical coupler; (b) optical spectrum after double sideband modulation; (c) optical spectrum of WDM double sideband signals with OFDM signal; (d) optical spectrum of WDM double sideband signals after 20 km fiber transmission; (e) optical spectrum of WDM mm-wave after IL; (f) optical spectrum of mm-wave selected by TOF

在基站采用一个 25/50 GHz 的光交叉复用器将 4 个信道的中心载波与一阶边带分离,其中分离出来的 58 GHz 波分复用光载 OFDM 毫米波信号的光谱,如图 3(e)所示,可以看出载波抑制比达到约 35 dB。将 3 dB 带宽为 0.5 nm 的可调谐光滤波器的中心波长设置在 1545.97 nm,滤取第一个信道的一阶边带,其光谱如图 3(f)所示。由于可调谐光滤波器的 3 dB 带宽为 0.5 nm(62.5 GHz),而两个一阶边带的频差为 58 GHz,因此,滤取出来的毫米波光谱中除一阶边带以外,还存在一些其它的频率成分。光载毫米波信号通过 3 dB 带宽为 60 GHz 的高速光电检测器变成频率为 58 GHz 的电毫米波信号。在实验中未考虑毫米波信号的天线发射和接收过程,生成的电毫米波经过 3 dB 带宽为 10 GHz,中心频率为 60 GHz 的电放大器进行功率放大后与 58 GHz 的本地振荡信号混频,再通过低通滤波后恢复 OFDM 基带信号,其中 58 GHz 的本振信号是由 14.5 GHz 的射频信号经四倍频后得到。相干解调出来的下行 OFDM 基带信号送往实时数字示波

器中采样。采样后的数据处理和恢复在 Matlab 接收程序中离线完成。

实验分别在背靠背(B-T-B)和传输 20 km 光纤的情况下,调节光衰减器(ATT),改变接收光功率,测得 OFDM 基带信号在各功率点的误码率(BER) n_{BER} 和星座图,并绘制误码率曲线如图 4 所示。从图中可以看出,当光纤传输距离不变时,随着接收功

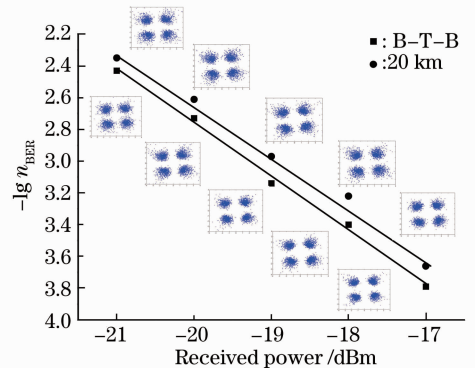


图 4 OFDM 信号的误码率曲线图及星座图
Fig. 4 BER curves and constellation figures for OFDM signal

率降低,误码率逐渐增大,星座图逐渐发散。当误码率为 10^{-3} 时,在无何色散补偿的条件下,在背靠背和传输 20 km 光纤情况下的接收光功率分别约为 -19.3 dBm 和 -18.9 dBm,其功率代价小于 0.5 dB。由于光信噪比降低和光纤色散的影响,经 20 km 光纤传输后的信号误码率增大,测得的星座图比背靠背状态下要发散,但仍然处于 4 个标准的区域,可恢复原始的 OFDM 基带数据信号。

4 结 论

提出了一种采用强度调制器和光交叉复用器产生 58 GHz 光载毫米波传输 OFDM 信号的 4 信道波分复用光纤无线通信系统。实验结果表明,在无色散补偿和误码率为 10^{-3} 的条件下,2.5 Gb/s 的基于 QPSK 调制的 OFDM 基带信号,经过 20 km 标准单模光纤传输后的功率代价小于 0.5 dB。光交叉复用器无需外加温控电路,这样可以进一步简化基站配置以及光无线接入网络的结构。将 OFDM 信号应用于 WDM-ROF 系统中传输,可以克服光纤色散的影响,实现长距离的光纤传输。

参 考 文 献

- 1 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研究进展[J].中国激光,2006,33(4):481~488
- 2 Hu Liliang, Chen Lin, Yu Jianjun *et al.*. A novel scheme for optical millimeter-wave generation based on double-side band 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
- 3 Chi Hao, Zhang Xianmin, Shen Linfang. Inter-modulation distortion analysis for single-drive Mach-Zehnder modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1619~1622
池灏,章献民,沈林放.单极型马赫曾德尔调制器的互调失真分析[J].光学学报,2006,26(11):1619~1622
- 4 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纤通信方案[J].光学学报,2006,26(10):1464~1468
- 5 Wen Hong, Chen Lin, Pi Yazhi *et al.*. Full-duplex radio-over-

fiber system with optical millimeter-wave generation utilizing optical phase modulator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 935~939

- 6 Liu Limin, Dong Ze, Pi Yazhi *et al.*. Radio-over-fiber system for frequency-quadrupled millimeter-wave generation by external modulator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 148~153
刘丽敏,董泽,皮雅稚等.采用相位调制器产生四倍频的光载毫米波光纤无线通信系统[J].中国激光,2009,36(1):148~153
- 7 Jianjun Yu, Zhensheng Jia, Lin Chen *et al.*. DWDM optical millimeter-wave generation for radio-over-fiber using an optical phase modulator and an optical interleaver[J]. *IEEE Photonic Technol. Lett.*, 2006, **18**(13): 1418~1420
- 8 Zhensheng Jia, Jianjun Yu, Gee-Kung Chang. All-optical 16×2.5 Gb/s WDM signal simultaneous up-conversion based on XPM in an NOLM in ROF systems[J]. *IEEE Photonic Technol. Lett.*, 2005, **17**(12): 2724~2726
- 9 Zhensheng Jia, Jianjun Yu, Yu-Ting Hsueh *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 Technol. Lett.*, 2008, **20**(17): 1470~1472
- 10 Toshiaki Kuri, Ken-ichi Kitayama, Andreas Stohr *et al.*. Fiber-optic millimeter-wave downlink system using 60 GHz-band external modulation[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(5): 799~806
- 11 T. Ohno, F. Nakajima, T. Furuta *et al.*. A 240 GHz active mode-locked laser diode for ultra-broadband fiber-radio transmission systems[C]. OFC, 2005, PDP13
- 12 Yang Xiangyun, Hu Weiwei, Xu Anshi. Research on effects of dispersion of signal transmission on millimeter-wave ROF optical communication systems [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2006, **42**(3): 401~405
杨湘云,胡薇薇,徐安士.毫米波 ROF 光通信系统中信号传输色散影响的研究[J].北京大学学报(自然科学版),2006,42(3):401~405
- 13 Huang Cheng, Chen Lin, Yu Jianjun *et al.*. Millimeter-wave generation utilizing one phase modulator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 73~76
黄诚,陈林,余建军等.采用单个相位调制器产生毫米波[J].中国激光,2008,35(1):73~76
- 14 Jianjun Yu, Mingfang Huang, Lin Chen *et al.*. Centralized lightwave WDM-PON employing 16-QAM intensity modulated OFDM downstream and OOK modulated upstream signals[J]. *IEEE Photonic Technol. Lett.*, 2008, **20**(18): 1545~1547
- 15 Mingfang Huang, Jianjun Yu, Dayou Qian *et al.*. Lightwave centralized WDM-OFDM-PON[C]. ECOC, 2008, Th1. F. 5
- 16 Lin Chen, Ze Dong, Jia Lu *et al.*. A novel architecture for seamless integration of ROF with centralized lightwave WDM-PON network[C]. OFC/NFOEC, 2009, OTuJ5