

文章编号: 0253-2239(2010)12-3386-05

# 基于四倍频技术的单边带光载毫米波上变频

徐 刚 郑小平 张汉一

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘要** 提出一种新型四倍频技术用于单边带光载毫米波信号的产生。该技术使用一个双平行马赫-曾德尔调制器(DPMZM)实现四倍频的单边带调制,通过微波移相和双平行马赫-曾德尔(MZ)调制器偏置点控制,产生出包含载波边带和两个二阶边带的光谱,用光滤波器滤除光载波后得到频率为四倍微波本振频率的光载毫米波信号。基于上述技术,搭建了光载射频(RoF)传输实验系统,该 RoF 系统用 10 GHz 微波源产生了 40 GHz 的光载毫米波并承载了 1 Gb/s 的基带数据。实验结果表明,光载毫米波信号经 20 km 标准单模光纤传输后,功率代价仅为 0.8 dB。

**关键词** 光通信;上变频;光学单边带调制;光载射频

**中图分类号** TN929.18 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103012.3386

## Frequency Quadrupling for Single-Sideband Optical Millimeter-Wave Up Conversion

Xu Gang Zheng Xiaoping Zhang Hanyi

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084 China)

**Abstract** A novel scheme is demonstrated to generate single-sideband optical millimeter-wave signals employing frequency quadrupling. A dual parallel Mach-Zehnder modulator (DPMZM) is used to achieve frequency quadrupling. With electrical phase shifting and bias control, the DPMZM generates optical signal comprised of a carrier and two two-order side-bands. After removing the optical carrier with an optical filter, a quadruple optical millimeter-wave signal is generated. An experimental radio-over-fiber (RoF) transmission system is built. 40 GHz optical millimeter-wave signal with 1 Gb/s pseudorandom bit sequence data is transmitted, whose power penalty is only 0.8 dB over 20 km single-mode fiber (SMF).

**Key words** optical communications; up conversion; optical single-sideband (OSSB) modulation; radio-over-fiber

## 1 引 言

随着光纤通信技术和无线接入技术的发展,接入网对带宽的要求越来越高。光载射频(RoF)技术以光纤为载体传输微波信号,克服了传统微波波导损耗大、价格高的缺点,并拥有更大的通信容量。RoF既有光纤通信带宽大、成本低的优势,又能发挥无线接入的便捷性,是一种应用前景广阔的接入网技术<sup>[1~4]</sup>。近年来,由于高清电视、流媒体等新兴业务

的宽带需求,RoF系统中的微波载波向带宽容量更高的毫米波发展,频率达到40~60 GHz或更高<sup>[2~4]</sup>。

目前利用调制器直接将毫米波信号承载到光频上还存在一些问题。比如,40 GHz频带的铌酸锂(LiBO<sub>3</sub>)电光调制器价格高昂;而在60 GHz频带,调制器的制作工艺尚不成熟。为此,许多RoF系统运用光外差法将数据信号上变频到毫米波频段<sup>[5~12]</sup>。其中,文献[9]利用光抑制载波(OCS)调

收稿日期: 2010-03-31; 收到修改稿日期: 2010-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(60736003, 61025004)、国家863计划(2009AA01Z222, 2007AA01Z256)和国家973计划(2006CB302805)资助课题。

作者简介: 徐 刚(1984—),男,硕士研究生,主要从事高速光纤通信方面的研究。

E-mail: g-xu03@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 郑小平(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事高速光纤通信和光网络等方面的研究。

E-mail: xpzheng@mail.tsinghua.edu.cn(通信联系人)

制实现了二倍频调制,在马赫-曾德尔(MZ)调制器上加上电载波进行抑制载波调制,调制后光载波被消除,留下的两个 1 阶边带在光电探测器(PD)上差拍可生成频率为电载波频率两倍的微波信号。文献[10]利用光单边带(OSSB)调制产生了二倍频的单边带光载毫米波信号,将微波载波调制在一个光边带上,将中频信号调制在另一光边带上,用光滤波器除去光载波,留下的边带在光电探测器(PD)上差拍出二倍频光载毫米波。文献[11]用级联的 MZ 调制器实现了四倍频调制,两个串联的 MZ 调制器分别对微波载波进行抑制载波调制,生成频率间隔为载波频率四倍的双频光源,再用低速 MZ 调制器将基带数据承载于其上。文献[12]使用单一调制器实现了四倍频调制,将 MZ 调制器的偏置点设为调制曲线的最高点后加载中频微波信号,生成光载波和两个二阶边带,用光滤波除去光载波,留下的两个二阶边带在光电探测器(PD)上差拍可生成频率为电载波频率四倍的微波信号。

在上述各种方案中,文献[5,9,10]仅实现了二倍频调制,应用于 40~60 GHz 系统时对微波器件的要求依然较高。文献[6,7,11]使用了多个调制器以实现四倍频调制,增加了系统的复杂度。文献[8,11,12]所生成的光载毫米波信号为双边带信号,在光纤中传输时毫米波信号会因光纤的色散而出现功

率衰落<sup>[13]</sup>。

本文提出了一种运用四倍频技术的单边带光载毫米波上变频方案。该方案使用一个双平行 MZ 调制器(DPMZM)实现二倍频的单边带调制,分别产生出载波边带和数据边带两个二阶边带,用光滤波器滤除光载波后得到频率为四倍载波频率的光微波信号。方案仅使用一个调制器,结构比较简单,而且可以产生出单边带光载毫米波信号,受光纤色散的影响较小,因而不需要进行色散补偿,进一步简化了系统结构。实验结果表明,利用该方案产生的承载 1 Gb/s 基带数据的 40 GHz 毫米波信号经 20 km 标准单模光纤传输的功率代价仅为 0.8 dB。

## 2 理论分析

运用四倍频技术的单边带光载毫米波上变频方案如图 1 所示。激光器(LD)产生的单频光经偏振控制器(PC)后进入双平行 MZ 调制器。同时微波本振(LO)与中频数据(IF signal)相乘后产生中频微波信号,这个信号与本振经  $\pi/4$  移相并叠加后加载于双平行 MZ 调制器之上。双平行 MZ 调制器的输出包含光载波和两个二阶边带,用光纤布拉格光栅(FBG)滤除光载波后留下频率间隔为四倍本振频率的两个光边带,它们在光电探测器(PD)上差拍即可生成四倍频的毫米波信号。

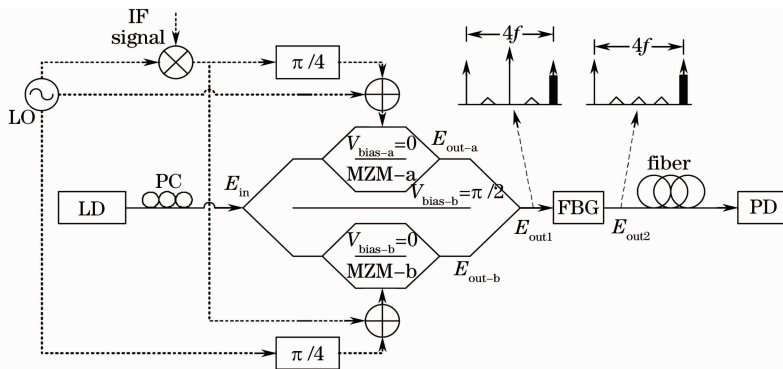


图 1 运用四倍频技术的上变频方案结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the proposed scheme for frequency quadrupling and up conversion

激光器(LD)产生的单频光载波的复振幅为  $E_{in}(t) = E_0 \exp(j\omega_c t)$ , 其中  $E_0$  为其幅度,  $\omega_c$  为其角频率。微波本振为  $V_{LO}(t) = V_0 \sin \omega_{LO} t$ , 其中  $V_0$  为其振幅,  $\omega_{LO}$  为其角频率。本振与中频数据在混频器中相乘得到中频微波信号,  $V_p(t) = V_{IF}(t) \times \sin \omega_{LO} t$ , 其中  $V_{IF}(t)$  为中频数据。

现在假设双平行 MZ 调制器上仅加载本振  $V_{LO}(t)$ , 其中调制器的电端口输入为

$$V_{in-a}^{LO} = V_0 \sin \omega_{LO} t, \quad (1)$$

$V_{LO}(t)$  经大小为  $\Phi$  的移相后加载到子调制器 b, 因此 b 的电端口输入为

$$V_{in-b}^{LO} = V_0 \sin(\omega_{LO} t + \Phi), \quad (2)$$

在双平行 MZ 调制器上下两个子 MZ 调制器上分别加直流偏置电压  $V_{bias-a}$  和  $V_{bias-b}$ , 在第三个直流端加偏置电压  $V_{bias-c}$ 。调制器 MZM-a 光端口的输出为

$$E_{\text{out-a}}^{\text{LO}}(t) = \frac{E_0}{4} \exp\left\{j\left[\omega_c t - \frac{\pi V_0}{V_\pi} \sin(\omega_{\text{LO}} t + \Phi) + \frac{\pi V_{\text{bias-a}}}{V_\pi}\right]\right\} + \frac{E_0}{4} \exp\left\{j\left[\omega_c t + \frac{\pi V_0}{V_\pi} \sin \omega_{\text{LO}} t\right]\right\}, \quad (3)$$

其中  $V_\pi$  为调制器的半波电压。令  $V_{\text{bias-a}}=0$ , 并进行贝塞尔(Bessel)函数展开得到

$$E_{\text{out-a}}^{\text{LO}}(t) = \frac{E_0}{4} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \exp[j(\omega_c t - n\omega_{\text{LO}} t)] + \frac{E_0}{4} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \exp[j(\omega_c t + n\omega_{\text{LO}} t)] = \frac{E_0}{2} \exp(j\omega_c t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \exp(j2n\omega_{\text{LO}} t), \quad (4)$$

由(4)式可以看出, 输出仅含偶数次边带。记调制度为  $m_{\text{LO}} = \pi V_0 / V_\pi$ , 取基频与二次边带进行近似可得

$$E_{\text{out-a}}^{\text{LO}}(t) \approx \frac{E_0}{2} \exp(j\omega_c t) [J_0(m_{\text{LO}}) + J_2(m_{\text{LO}}) \exp(-j2\omega_{\text{LO}} t) + J_2(m_{\text{LO}}) \exp(j2\omega_{\text{LO}} t)], \quad (5)$$

同理, 令  $V_{\text{bias-b}}=0$ , 调制器 MZM-b 的输出为

$$E_{\text{out-b}}^{\text{LO}}(t) \approx \frac{E_0}{2} \exp(j\omega_c t) \{J_0(m_{\text{LO}}) + J_2(m_{\text{LO}}) \exp[j(2\omega_{\text{LO}} t + 2\Phi)] + J_2(m_{\text{LO}}) \exp[j(-2\omega_{\text{LO}} t - 2\Phi)]\} \quad (6)$$

由(5)式和(6)式可知双平行 MZ 调制器的输出为

$$E_{\text{out1}}^{\text{LO}}(t) = \frac{E_0}{2} \exp(j\omega_c t) \left\{ 2J_0(m_{\text{LO}}) \left[ 1 + \exp\left(j \frac{\pi V_{\text{bias-c}}}{V_\pi}\right) \right] + J_2(m_{\text{LO}}) \left[ \exp(-j2\omega_{\text{LO}} t) + \exp(-2j\omega_{\text{LO}} t - 2j\Phi + j \frac{\pi V_{\text{bias-c}}}{V_\pi}) \right] + J_2(m_{\text{LO}}) \left[ \exp(j2\omega_{\text{LO}} t) + \exp(2j\omega_{\text{LO}} t + 2j\Phi + j \frac{\pi V_{\text{bias-c}}}{V_\pi}) \right] \right\}, \quad (7)$$

同理, 假设双平行 MZ 调制器上仅加载中频微波信号  $V_p(t)$ , 记  $m_{\text{IF}} = \pi V_{\text{IF}}(t) / V_\pi$ , 在相同偏置电压下双平行 MZ 调制器的输出为

$$E_{\text{out1}}^{\text{IF}}(t) = \frac{E_0}{2} \exp(j\omega_c t) \left\{ 2J_0(m_{\text{IF}}) \left[ \exp\left(j \frac{\pi V_{\text{bias-c}}}{V_\pi}\right) + 1 \right] + J_2(m_{\text{IF}}) \left[ \exp(-2j\omega_{\text{LO}} t - 2j\Phi) + \exp(-2j\omega_{\text{LO}} t + j \frac{\pi V_{\text{bias-c}}}{V_\pi}) \right] + J_2(m_{\text{IF}}) \left[ \exp(2j\omega_{\text{LO}} t + 2j\Phi) + \exp(2j\omega_{\text{LO}} t + j \frac{\pi V_{\text{bias-c}}}{V_\pi}) \right] \right\}, \quad (8)$$

(7)式和(8)式均包含光载波和两个二阶边带。当

$$2\Phi + \frac{\pi V_{\text{bias-c}}}{V_\pi} = \pi, \quad (9)$$

(7)式右边带和(8)式的左边带为 0; 当

$$-2\Phi + \pi V_{\text{bias-c}} / V_\pi = 0, \quad (10)$$

(7)式左边带和(8)式的右边带有极大值。

同时满足(9)式和(10)式则有  $\Phi = \pi / 4$  且  $V_{\text{bias-c}} = V_\pi / 2$ , 此时双平行 MZ 调制器的完整输出为

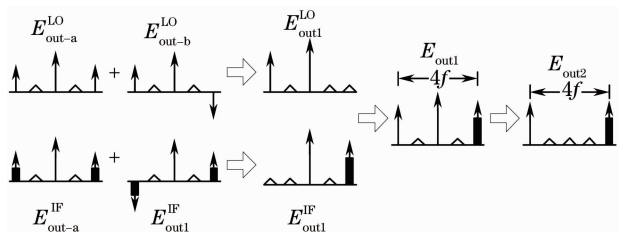


图 2 四倍频单边带调制光谱变化示意图

Fig. 2 Diagram of optical spectrum quadrupling single-sideband modulation in the proposed scheme

$$E_{\text{out1}}(t) = E_{\text{out1}}^{\text{LO}}(t) + E_{\text{out1}}^{\text{IF}}(t) = E_0 \exp(j\omega_c t) \{ (j+1) [J_0(m_{\text{LO}}) + J_0(m_{\text{IF}})] + J_2(m_{\text{LO}}) \exp(-j2\omega_{\text{LO}} t) - J_2(m_{\text{IF}}) \exp(j2\omega_{\text{LO}} t + \pi) \}, \quad (11)$$

如图 2 所示, 本振  $V_{\text{LO}}(t)$  被调制到左二阶边带, 中频微波信号  $V_p(t)$  被调制到右二阶边带, 再用光滤波器滤除光载波即可实现四倍频单边带调制。

### 3 实验装置及结果

实验装置如图 3 所示。在中心站激光器(LD)产生的光载波经偏振控制器(PC)后送入双平行 MZ 调制器(DPMZM), 10 GHz 的微波本振与 1 Gb/s 的伪随机非归零(NRZ)基带数据相乘后得到中频微波信号, 与微波本振进行  $\pi / 4$  移相并叠加后加载到双平行 MZ 调制器的两个微波输入口, 双平行 MZ 调制器的两个子 MZ 调制器偏置电压设为 0, 第三个直流端加偏置电压  $V_\pi / 2$ 。双平行 MZ 调制器

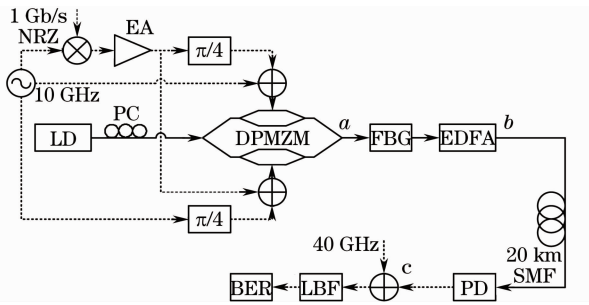


图 3 四倍频单边带光载毫米波光纤无线电传输系统实验装置图

Fig.3 Experimental setup for the frequency quadrupling single-sideband optical millimeter-wave RoF transmission system

的输出用光纤布拉格光栅 (FBG) 滤除光载波, 经掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大后产生出四倍频的光微

波信号。双平行 MZ 调制器的输出光信号在图 3 中 a 点与 b 点处的光谱如图 4 所示, 从图 4 (a) 和图 4 (b) 可以看出单边带调制中左右边带之间的抑制比超过 20 dB。

光微波信号经 20 km 标准单模光纤传输后进入基站, 用光电探测器 (PD) 进行光电转换得到 40 GHz 毫米波信号, 其频谱和波形如图 5 所示。实验忽略毫米波在空气中的传播过程, PD 产生的毫米波直接进入接收机进行解调。在接收机中, 令 40 GHz 本振与毫米波信号相乘进行相干解调, 再通过低通滤波器 (LPF) 滤波还原出基带数据。图 6 给出了 PD 接收光功率为 -3 dBm 时, 背靠背传输和经 20 km 标准单模光纤传输的基带信号眼图。将基带数据送入误码仪 (BER) 即可测量出系统的误码

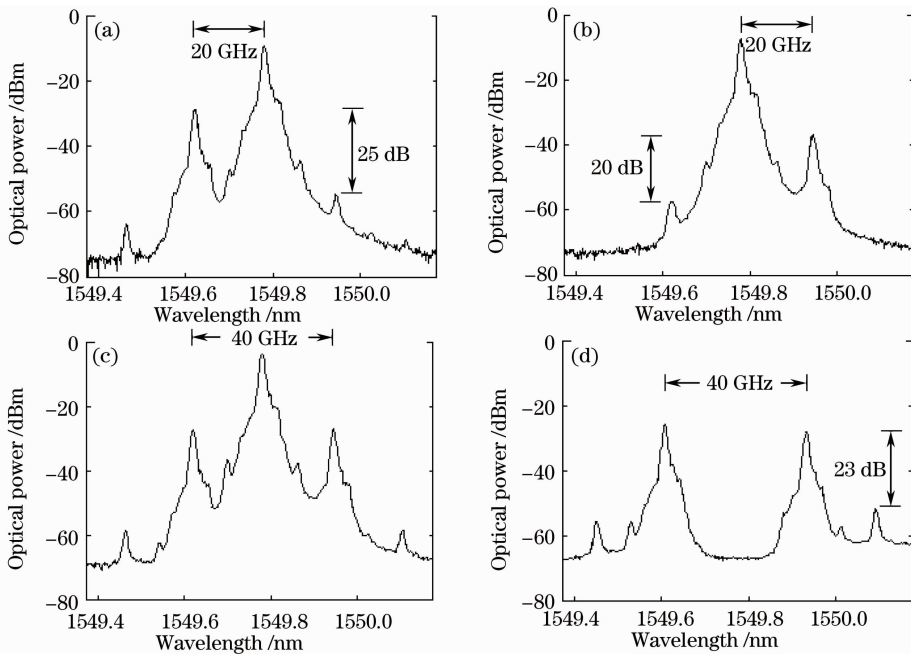


图 4 双平行 MZ 调制器输出光谱。(a) 仅本振滤波前, (b) 仅信号滤波前, (c) 本振+信号滤波前, (d) 本振+信号滤波后  
Fig. 4 Optical spectrum of DPMZM output. (a) only LO before FBG, (b) only signal before FBG, (c) LO+signal before FBG, (d) LO+signal after FBG

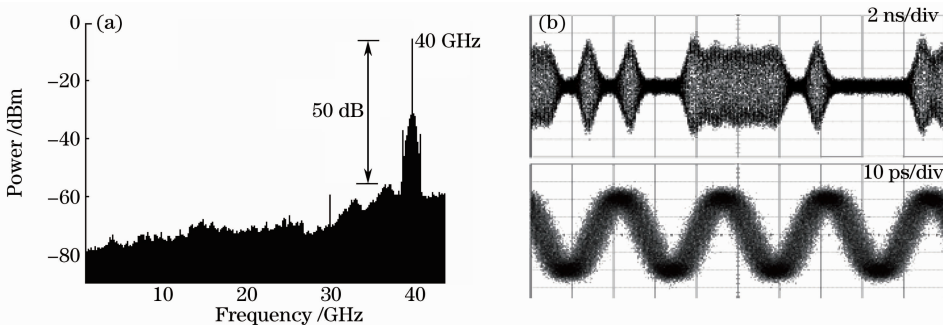


图 5 光电探测器输出毫米波的频谱(a)与波形(b)  
Fig. 5 (a) Electrical spectrum and (b) waveform of the millimeter-wave signal after PD

率,误码率曲线如图 7 所示。以误码率  $10^{-9}$  为标准,系统传输所需的接收端光功率,在背靠背传输时约为  $-8.8$  dBm,经 20 km 标准单模光纤传输时约为  $-8.0$  dBm,功率代价为 0.8 dB。

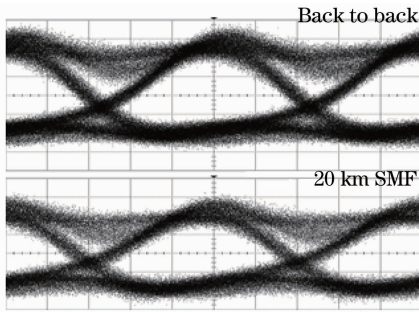


图 6 无误码传输时的基带信号眼图

Fig. 6 Eye diagram of the baseband signal with

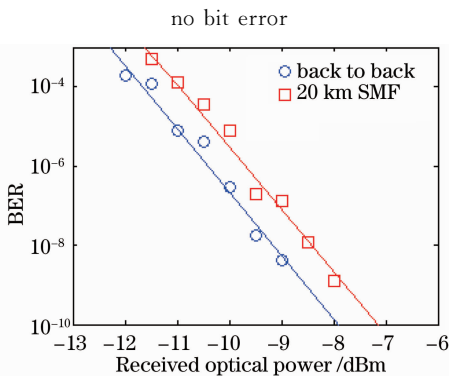


图 7 实验系统的误码率曲线

Fig. 7 Bit error rate(BER) curve of the proposed system

## 4 结 论

提出了一种使用双平行 MZ 调制器和 FBG 实现四倍频单边带调制的新型光载毫米波上变频方案。四倍频技术避免了高频微波器件的使用,单边带调制可以抑制光纤色散引起的功率衰落,并且方案仅使用一个调制器。对方案进行了实验验证,产生了承载 1 Gb/s 基带数据的 40 GHz 毫米波信号,信号经 20 km 标准单模光纤传输的功率代价仅为 0.8 dB。

## 参 考 文 献

1 D. Wake, M. Webster, G. Wimpenny *et al.*. Radio over fiber for mobile communications[C]. IEEE MWP'04, 2004, 157~160

- 2 Fang Zujie, Ye Qing, Liu Feng. 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
- 3 Z. S. Jia, J. T. 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**: 3452~3471
- 4 N. J. Gomes, M. Morant, A. Alphones *et al.*. Radio-over-fiber transport for the support of wireless broadband services[J]. *J. Opt. Netw.*, 2009, **8**: 156~178
- 5 Li Jing, Ning Tigang, Qi Chunhui *et al.*. Design of bi-directional radio over fiber transmission system based on optical frequency multiplication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 607~613
- 李晶, 宁提纲, 祁春慧等. 基于光学乘法产生光毫米波的全双工毫米波光纤传输系统设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 607~613
- 6 Zhu Chuanhu, Lu Jia, Dong Ze *et al.*. Radio-over-fiber system with frequency quadruple optical millimeter-wave generation utilizing cascaded phase modulator along with an intensity modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 321~325
- 朱传湖, 卢嘉, 董泽等. 采用级联相位调制器和强度调制器产生四倍频光载毫米波的光纤无线通信系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 321~325
- 7 Chen Luoxiang, Lu Jia, Dong Ze *et al.*. A radio over fiber system based on two external modulator for optical millimeter generation with photonic frequency quadruple[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1910~1913
- 陈罗湘, 卢嘉, 董泽等. 采用两个级联外部调制器产生四倍频光载毫米波的光纤无线通信系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1910~1913
- 8 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. 采用外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
- 9 Z. B. Xu, X. P. Zhang, J. J. Yu. Frequency upconversion for radio over fiber downlinks[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(25): 16737~16747
- 10 P. T. Shih, C. T. Lin, W. J. Jiang *et al.*. Full duplex 60-GHz RoF link employing tandem single sideband modulation scheme and high spectral efficiency modulation format[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(22): 19501~19508
- 11 H. Chi, J. P. Yao. Frequency quadrupling and upconversion in a radio over fiber link[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(15): 2706~2711
- 12 M. F. Huang, J. J. Yu, Z. S. Jia *et al.*. Simultaneous generation of centralized lightwaves and double/single sideband optical millimeter-wave requiring only low-frequency local oscillator signals for radio-over-fiber systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(15): 2653~2662
- 13 U. Gliese, S. Norskov, T. N. Nielsen. Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wave links [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1996, **44**(10): 1716~1724