

文章编号: 0253-2239(2008)02-0238-05

# 一种改进的双边带调制产生光毫米波的方案

胡黎亮 陈 林 余建军 文双春

(湖南大学计算机与通信学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要** 提出了应用于光纤无线通信系统中一种改进的双边带调制产生光毫米波方案。在中心站采用强度调制将射频信号调制到光载波上产生一个双边带信号,滤掉中心载波后,利用光交叉复用器把双边带信号的上下边带模分开,将数据速率为 2.5 Gbit/s 的基带信号调制到下边带模后,再与未调信号耦合后产生光毫米波,然后通过单模光纤传输至基站,在基站经过光电转换后产生电毫米波信号。从理论上对该毫米波的色散特性进行了分析,发现毫米波的接收功率不会周期的衰减。同时通过实验研究表明,下行链路信号通过光纤能传输 50 km 而不需要色散补偿,功率代价小于 1 dBm。因此,该方法产生的光毫米波能有效克服光纤色散引起的信号时延而导致的基带信号退化,适合于远距离传输。

**关键词** 光纤无线通信; 光毫米波产生; 双边带调制; 光纤色散; 光交叉复用器

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A

## A Novel Scheme for Optical Millimeter-Wave Generation Based on Double-Sideband Modulation

Hu Liliang Chen Lin Yu Jianjun Wen Shuangchun

(School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract:** A novel scheme for optical millimeter-wave generation with double-sideband (DSB) modulation by external modulator in a radio-over-fiber (ROF) system was proposed. At the central station, a CW lightwave was intensity-modulated by the RF signal to generate DSB signal. After the pure optical carrier was filtered, an optical interleaver was employed to separate the spectrum of the upper sideband and the lower sideband of the generated DSB signal. After the lower sideband signal was modulated with a baseband data at 2.5 Gbit/s, it was recombined with the unmodulated signal to generate optical millimeter wave, and then transmitted to the base station over single-mode fiber (SMF). In the base station, the electrical millimeter wave signal was generated by O/E conversion. The dispersion performance of the generated mm-wave is theoretically analysed, it can immune the fading effect. The experimental results show that the downlink data signals can transmit over 50 km fiber without dispersion compensation, and the power penalty is less than 1 dBm. So the generated optical millimeter wave by proposed method can effectively reduce baseband signal degeneration caused by the time shift of the code edges because of fiber dispersion, it is suitable for long distance transmission.

**Key words:** radio over fiber (ROF); optical millimeter-wave generation; double-sideband modulation; fiber dispersion; optical interleaver

## 1 引 言

光纤无线通信(ROF)作为一种光纤和微波相

结合的新技术,能够满足实时,无缝隙和不间断通信,在光纤无线接入网中有着广泛的应用<sup>[1~11]</sup>。高

收稿日期: 2007-05-15; 收到修改稿日期: 2007-07-20

基金项目: 国家教育部新世纪优秀人才支持计划和高等学校博士学科点专项科研基金(20040532005)、湖南省自然科学基金(06JJ50108)、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: 胡黎亮(1982-),男,湖南岳阳人,硕士研究生,主要从事光纤无线通信技术方面的研究。

E-mail: hu8640650@163.com

导师简介: 文双春(1966-),男,湖南祁阳人,教授、博士生导师,主要从事光通信技术、非线性光学等方面的研究。

E-mail: scwen@hnu.cn

质量的毫米波信号产生是实现光纤无线通信通信的关键技术之一。近年来,人们已经提出了一些产生光毫米波的方案<sup>[1~5]</sup>。其中基于外部调制器的方案是一种相对成熟、代价低的技术,如双边带(DSB)调制、单边带(SSB)调制以及光载波抑制(OCS)调制等方案。众所周知,信号在光纤中传输时不可避免会受到色散的影响<sup>[6~8]</sup>。从文献[8]分析结果来看,只要两个边带同时加载数据信号,它就会受到码间干扰的影响,从而限制了基带数据的最大传输距离。文献[9]由于采用载波抑制调制方式,调制器会受到直流偏置漂移的影响,因此需要采用光纤布拉格光栅(FBG)进一步抑制载波和进行滤波。但是光纤布拉格光栅对温度敏感,从而导致系统的性能不太稳定。另外,要实现高反射需要用到光隔离器。

本文提出直接采用双边带调制和滤波产生两个边带信号,再利用光交叉复用器分离两个边带,将基带信号只调制到其中的一个边带模上,然后再与未

经调制的另一边带信号进行耦合产生光毫米波信号,这样可以抑制码间串扰。避免了直流偏置漂移的影响,采用的交叉复用器对温度不敏感。本文对产生的毫米波性能进行了理论分析,并通过仿真和实验研究,比较信号传输前后的功率代价和眼图,表明该方法提高了毫米波的抗色散能力。另外,由于光交叉复用器具有周期特性,这种产生毫米波的方案也可以应用到密集波分复用(DWDM)系统中。

## 2 理论模型

系统模型如图 1 所示,马赫-曾德尔干涉型 LiNbO<sub>3</sub> 调制器的两个臂长相等,半波电压为  $V_{\pi}$ 。幅度为  $V_{ac}$ ,角频率为  $\omega_{RF} = 2\pi f_{RF}$  的射频电信号加到相位差为  $\theta = \pi$  的两个电极上,如果一个电极的直流(DC)偏压为  $V_{dc1}$ ,而另一个直流偏压为  $V_{dc2}$ ,可以得到马赫-曾德尔调制器输出端的信号为

$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}(t)}{2} \left[ \exp\left(j\pi \frac{V_{dc1}}{V_{\pi}} + j\pi \frac{V_{ac}}{V_{\pi}} \cos \omega_{RF} t\right) + \exp\left(j\pi \frac{V_{dc2}}{V_{\pi}} + j\pi \frac{V_{ac}}{V_{\pi}} \cos(\omega_{RF} t + \theta)\right) \right], \quad (1)$$

假设从激光器输出的是线宽很窄的连续光谱:  $E_{in}(t) = A \exp(j\omega_c t)$ , 其中  $A$  为幅度,  $\omega_c$  为光载波的角频率。一端偏压  $V_{dc1}$  等于  $2V_{\pi}$ , 另一端偏压  $V_{dc2}$  为零。将(1)式化简后由贝塞尔函数展开得到

$$E_{out}(t) = \frac{A}{2} \{ J_0(\lambda) [\cos(\omega_c t) - \sin(\omega_c t)] + J_1(\lambda) [\sin(\omega_c - \omega_{RF})t - \cos(\omega_c - \omega_{RF})t] + J_1(\lambda) [\sin(\omega_c + \omega_{RF})t - \cos(\omega_c + \omega_{RF})t] \}, \quad (2)$$

其中  $J_0, J_1$  分别为零阶和一阶贝塞尔函数,  $\lambda = \pi(V_{ac}/V_{\pi})$  表示调制深度, 当调制深度较小时, (2) 式中的高阶边带可以忽略。用交叉复用器分离出一阶边带和中心载波后, 再将基带数据信号  $s(t)$  (如伪随机序列非归零码) 以强度调制的方式加载到一阶下边带模, 然后与一阶上边带耦合, 可以得到

$$E_{out}(t) = \frac{A}{2} \{ s(t) J_1(\lambda) [\sin(\omega_c - \omega_{RF})t - \cos(\omega_c - \omega_{RF})t] + J_1(\lambda) [\sin(\omega_c + \omega_{RF})t - \cos(\omega_c + \omega_{RF})t] \}, \quad (3)$$

上下边带信号经过光纤传输一段距离  $L$  后, 受色散影响的信号将变为

$$E_{out1}(t) = \frac{A}{2} \{ s(t + \theta_{-1}) J_1(\lambda) \{ \sin[(\omega_c - \omega_{RF})(t + \theta_{-1})] - \cos[(\omega_c - \omega_{RF})(t + \theta_{-1})] \} + J_1(\lambda) \{ \sin[(\omega_c + \omega_{RF})(t + \theta_{+1})] - \cos[(\omega_c + \omega_{RF})(t + \theta_{+1})] \} \}, \quad (4)$$

其中  $\theta_{\pm 1} = \beta(\omega_c \pm \omega_{RF})L / (\omega_c \pm \omega_{RF})$  表示色散引起上下边带的时延。利用传输常量:  $\beta(\omega_c \pm \omega_{RF}) = \beta(\omega_c) \pm$

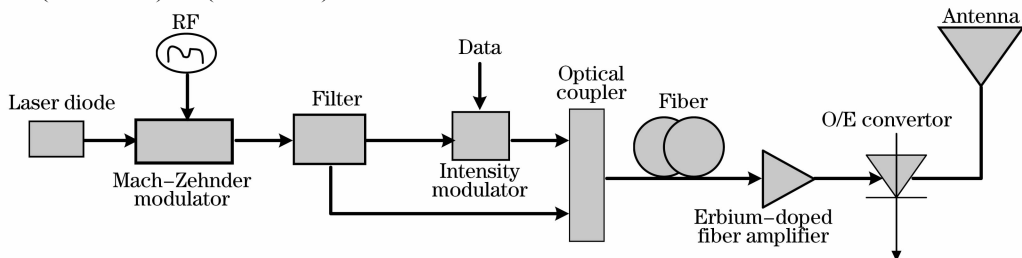


图 1 基于双边带调制产生光毫米波的光纤无线通信系统模型

Fig. 1 Model of radio over fiber communication system with optical millimeter wave generation based on double sideband modulation

$\omega_{RF}\beta'(\omega_c) + \frac{1}{2}\omega_{RF}^2\beta''(\omega_c) + \dots, \beta'(\omega_c)$  和  $\beta''(\omega_c)$  分别表示  $\beta(\omega)$  在  $\omega_c$  处的一阶和二阶色散系数, 得到经光电检测器(PD) 检测后的电流信号为

$I_{out1}(t) = \mu |E_{out1}(t)|^2 = 0.25\mu A^2 J_1^2(\lambda) [1 + s(t + \theta_{-1}) - 2s(t + \theta_{-1})\cos(2\omega_{RF}t + 2\beta'(\omega_c)\omega_{RF} \cdot L)]$ , (5)  
 其中  $\mu$  为光电检测器的灵敏度。可见电信号包含直流分量和射频分量, 经过带通滤波器(BPF)滤掉直流分量后, 得到的射频信号为

$$I_{RF1}(t, L) = -0.5\mu A^2 s(t + \theta_{-1}) J_1^2(\lambda) \cos(2\omega_{RF}t + 2\beta'(\omega_c)\omega_{RF} \cdot L), \quad (6)$$

从(6)式看出, 射频分量是一个携带了基带信息, 频率为  $2\omega_{RF}$  的毫米波信号。可以看到, 经光纤传输后的毫米波信号, 色散的影响仅仅导致载波相位的一些变化, 而基带信号只是产生了  $\theta_{-1}$  的时延, 没有出现传统的上下边带都加载数据情况下的码间干扰。因此可以看出, 利用光毫米波的一个边带加载基带信号, 而另外一个边带不加载基带信号, 可以抵抗色散所带来的影响, 功率代价小, 增加了基带信号的传输距离。

### 3 实验结果与分析

实验装置如图 2 所示, 采用重复频率为 20 GHz 的射频本振信号驱动马赫-曾德尔调制器(MZM), 对激光器(LD)输出的中心波长为 1560.4 nm 的连续光波(CW)进行强度调制, 得到了一个重复频率为 40 GHz 的双边带信号。调制器的偏置电压为半波电压(10 V), 然后使用一个 3 dB 通带宽度为 18.56 GHz, 插入损耗为 1.17 dB, 偏振相关损耗为 0.17 dB, 具有双输出端口的 25/50 GHz 交叉复用器 IL1[其响应曲线如图 3(a)所示]滤掉双边带信号的中心载波, 在图 2(a)中的 a 点测量到的信号光谱如图 4(a)所示。再采用第二个 3 dB 通带宽度为 50 GHz, 插入损耗为 1.17 dB, 偏振相关损耗为 0.17 dB, 具有两个输出端口的 50/100 GHz 交叉复用器 IL2[其响应曲线如图 3(b)所示]将双边带信号的

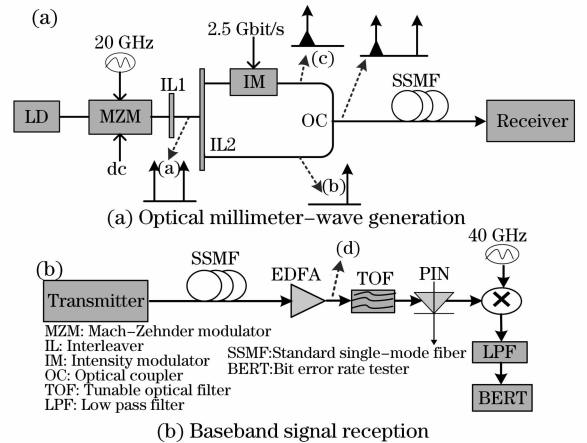


图 2 实验装置图

Fig. 2 The experimental setup

上、下边带模分开, 在图 2(a)所示的 b 点测量得到的未经调制的上边带模的光谱如图 4(b)所示。利用强度调制器将长度为  $2^{31} - 1$ , 速率为 2.5 Gbit/s 的非归零码伪随机序列对下边带模进行调制, 在图 2(a)所示的 c 点测量得到的信号光谱如图 4(c)所示。然后, 用 3 dB 光耦合器(OC)将已调信号的边带模与未经调制的上边带信号进行耦合, 产生 40 GHz 的光毫米波信号, 再用色散值为 16.75 ps/(nm · km) 的标准单模光纤(SSMF)将该毫米波信号传输到基站接收端。

在基站, 经光纤传输 50 km 后的信号经小信号增益为 30 dB 的掺铒光纤放大器(EDFA)进行前置放大, 在图 2(b)中 d 点测量到的光毫米波信号光谱

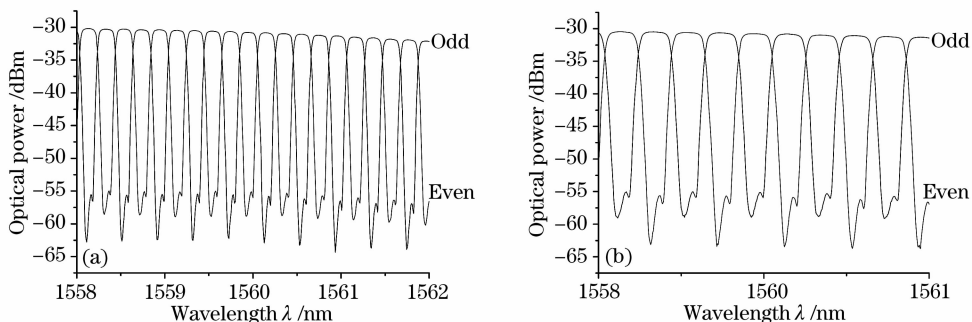


图 3 (a) 25/50 GHz, (b) 50/100 GHz 交叉复用器的响应曲线

Fig. 3 Response curves of 25/50 GHz (a), 50/100 GHz (b) interleaver

如图 4(d)所示。该信号经过带宽为 0.5 nm 的可调谐光滤波器 (TOF) 抑制放大器带来的自发辐射噪声后,两个边带信号由截止频率为 50 GHz 的 PIN 结光电探测器 (O/E) 拍频产生毫米波电信号。电毫米波信号通过与 40 GHz 的本地振荡 (LO) 信号混频进行解调,然后经过带宽为 0.75 倍数据速率的高斯型低通滤波器 (LPF) 滤掉射频部分得到基带信号,测量其误码率。不考虑光纤传输过程中的衰减,通

过系统仿真我们可以得到不同传输距离下的毫米波信号和解调后的基带信号眼图分别如图 5,图 6 所示。从仿真结果可以看出,随着传输距离的增大,毫米波信号的眼睛张开度会受到色散的一些影响,但是基带信号的眼图通过 70km 的距离并未闭合,这与前面理论部分的推导一致,说明该方法产生的毫米波确实具有很好的抑制码间串扰能力。

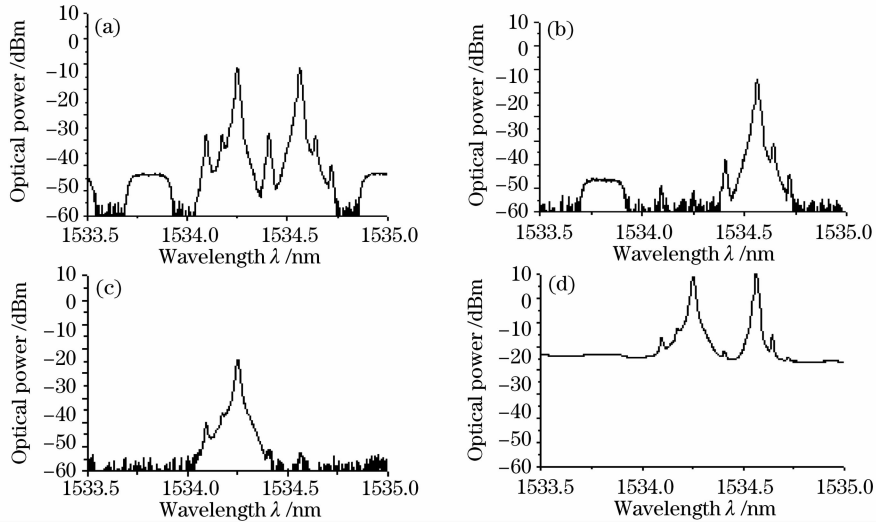


图 4 不同位置实验测得的信号光谱图。(a)通过交叉复用器 IL1 滤波后的信号光谱,(b)未经调制的边带信号光谱,(c)经 2.5 Gbit/s 基带信号调制后的信号光谱,(d)经掺铒光纤放大器放大后的毫米波信号光谱

Fig. 4 Optical spectra at different locations. (a) The optical spectrum of the separated signals by interleaver IL1, (b) optical sideband spectrum of the unmodulated signals, (c) optical spectrum modulated by 2.5 Gbit/s data, (d) optical spectrum of millimeter-wave after the EDFA

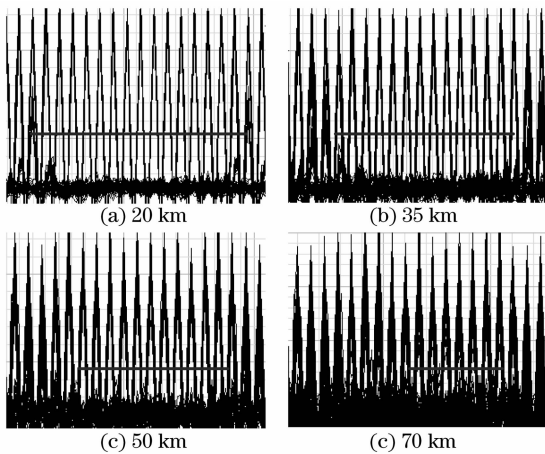


图 5 不同传输距离的电毫米波信号眼图 (40 ps/div)  
Fig. 5 Eye diagrams (40 ps/div) of electrical millimeter-wave signals at different transmitting distance

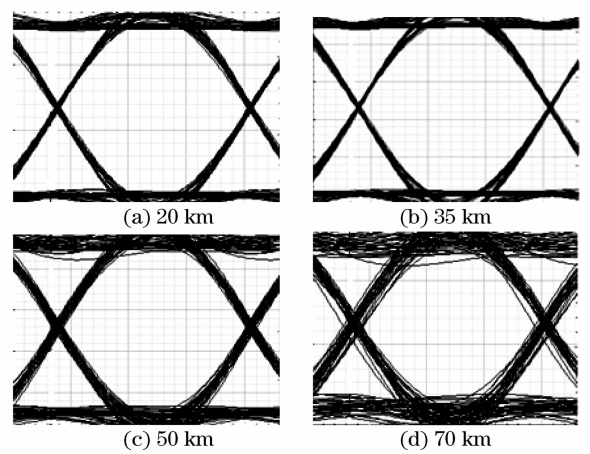


图 6 解调后不同传输距离下的基带信号眼图 (25ps/div)  
Fig. 6 Eye diagrams (25 ps/div) of the demodulated baseband signals at different transmitting distance

图 7 表示由数值模拟得到的色散引起毫米波功率变化图,其中比较了通过采用该方法与传统的将两个边带都加载基带数据信号情况下色散所引起的毫米波功率的影响。采用传统的双边带调制,毫米

波功率会随着传输距离的增加而明显下降,其最大衰减达到了 3 dBm;而采用该方法,毫米波功率随着距离的变化很小。

图 8 表示实验测得的下行链路信号经过光纤传

输 50 km 前后的功率代价变化图。可以看出,当误码率为  $10^{-9}$  时,下行链路信号的功率代价不超过 1 dBm,说明这种方案具有更好的抗色散性能,降低了基带信号的退化,功率损耗小,能进行长距离传输而不需要色散补偿。

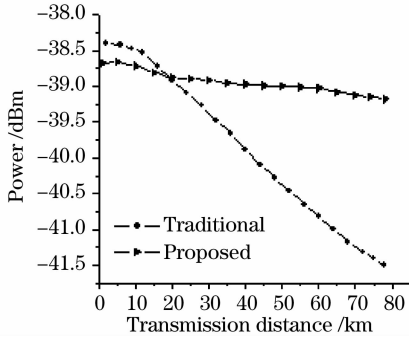


图 7 色散引起毫米波功率变化图

ig. 7 Power change of millimeter wave caused by dispersion

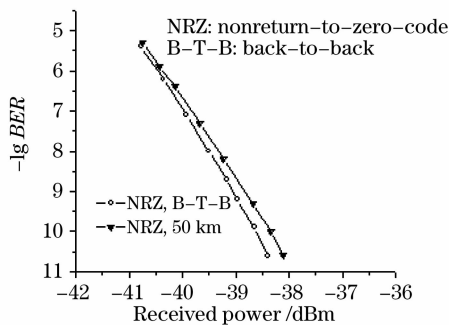


图 8 下行链路信号的误码率曲线图

Fig. 8 Bit error rate (BER) curves of downlink data

## 4 结 论

所提出的直接利用外部强度调制器和滤波技术相结合产生光毫米波信号,只利用其中一个边带携带基带信号,在下行链路光纤传输中有着明显的抗色散优势。理论分析和实验结果都表明,该方法产生的光毫米波稳定性大大提高,能有效克服光纤色散引起的信号时延而导致的基带信号退化。下行链路信号在误码率为  $10^{-9}$  时,经过光纤传输 50 km 后的功率代价小于 1 dBm,因此该信号适合于长距离的传输。

利用光交叉复用器的周期特性,这种产生毫米波信号的方案也可以应用到密集波分复用系统中。

## 参 考 文 献

- 1 Fang Zujie, Ye Qing, Liu Feng *et al.*. Progress of millimeter wave sub-carrier optical fiber communication technologies[J]. *Chin. 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 Liu Lu, Tang Junxiang, Shi Jue *et al.*. Research of heterodyne reception optical wireless communication utilizing photorefractive multiple quantum well device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1079~1084  
刘璐,汤俊雄,石珏等.采用多量子阱器件的无线光通信差拍接收方案研究[J].光学学报,2004, **24**(8): 1079~1084
- 3 C. S. Park, C. K. Oh, C. G. Lee *et al.*. A photonic up-converter for a WDM radio-over-fiber system using cross-absorption modulation in an EAM[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(9): 1950~1952
- 4 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
- 5 Chun-Ting Lin, Wei-Ren Peng, Peng-Chun Peng *et al.*. Simultaneous generation of baseband and radio signals using only one single-electrode Mach-Zehnder modulator with enhanced linearity[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(23): 2481~2483
- 6 G. H. Smith, D. Novak, Z. Ahmed. Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1997, **45**(8): 1410~1415
- 7 Jianjun Yu, Zhensheng Jia, Lilin Yi *et al.*. Optical millimeter-wave generation or up-conversion using external modulators[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(1): 265~267
- 8 Jianxin Ma, Chongxiu Yu, Zhen Zhou *et al.*. Optical mm-wave generation by using external modulator based on optical carrier suppression[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **268**: 51~57
- 9 A. Wiberg, P. P. Millan, M. V. Andres *et al.*. Fiber-optic 40-GHz mm-wave link with 2.5 Gb/s data transmission[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(9): 1938~1940
- 10 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
- 11 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