

文章编号: 0253-2239(2010)02-0321-05

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

朱传湖 卢嘉 董泽 曹子峥 陈林 余建军

(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 理论和实验研究了基于载波抑制原理采用级联的相位调制器和强度调制器产生四倍频光载毫米波的原理。基于此原理,在中心站利用 10 GHz 的本振射频信号,通过调节两个调制器的相位差和强度调制器的偏置电压产生 40 GHz 光载毫米波信号,2.5 Gb/s 的基带数据信号直接调制在光载毫米波上,经过 20 km 标准单模光纤传输至基站。实验研究表明,下行链路信号通过 20 km 标准单模光纤传输后,传输功率代价小于 0.8 dBm,基带信号眼图依然清晰张开,简化了系统配置,信源稳定可靠。

关键词 光通信;光纤无线通信;相位调制器;光载波抑制;四倍频光载毫米波

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103002.0321

Radio-Over-Fiber System with Frequency Quadruple Optical Millimeter-Wave Generation Utilizing Cascaded Phase Modulator Along with an Intensity Modulator

Zhu Chuanhu Lu Jia Dong Ze Cao Zizheng Chen Lin Yu Jianjun

(Key Laboratory of Microl Nano Optoelectronic Devies, Ministry of Education,

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

Abstract We theoretically and experimentally analyzed the principle of frequency quadruple optical millimeter-wave generation utilizing phase modulator along with an intensity modulator based on optical carrier suppression (OCS) scheme. In the experiment, 40 GHz optical millimeter wave (mm-wave) is generated by adjusting the bias of intensity modulator and the phase between the two modulators which are driven by 10 GHz radio frequency signal. 2.5 Gb/s baseband data is modulated on 40 GHz optical mm-wave directly and transmitted to the base station over standard single-mode fiber (SMF-28). The experimental results show that the power penalty of downlink data signals which are transmitted over 20 km SMF-28 is less than 0.8 dBm. The eye diagram of the baseband signal is still clear. This scheme simplifies the radio-over-fiber system and mm-wave signals are stable and reliable.

Key words optical communication; radio-over-fiber (RoF); phase modulator; optical carrier suppression; frequency quadruple optical millimeter wave

1 引言

光纤无线通信(RoF)技术是未来超宽带无线接

入最有前景的技术之一,它结合了光纤通信和无线通信两者的优点^[1~12]。光纤具有低损耗、超大带

收稿日期: 2008-12-19; 收到修改稿日期: 2009-05-27

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(北京邮电大学)开放基金资助课题。

作者简介: 朱传湖(1985—),男,硕士研究生,主要从事光纤无线通信系统、光正交频分复用等方面的研究。

E-mail: zhuchuanhu2008@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、光正交频分复用、光标记交换等方面的研究。E-mail: liliuchen12@126.com

宽、防电磁干扰等特点^[1,2],而无线接入则可以给用户带来无处不在的方便快捷服务,并且免去了铺设光纤的昂贵费用。在光纤无线通信中,毫米波光载波的产生是最关键的技术之一^[6,12]。使用外部调制器产生高频毫米波是最简单、最精确的一种方法。基于外部调制器产生毫米波光载波信号主要有双边带调制(DSB)、单边带调制(SSB)和光载波抑制(OCS)三种不同方法^[2~11]。其中光载波抑制调制方式产生的毫米波比双边带调制方式产生的毫米波具有更好的抗色散衰落特性、并且频谱利用率比单边带调制方式高。文献[7,11]提出了采用载波抑制原理、强度调制器的级联产生高频毫米波的方式,但是强度调制器容易受到直流偏置漂移的影响,导致系统性能不太稳定。而采用相位调制器(PM)则不需要直流偏置^[12],这就避免了直流偏置漂移对系统的影响,而且也不需要外加复杂的控制电路。因此,采用相位调制器产生的光载毫米波信号不仅能够简化系统配置,而且稳定可靠。

本文提出基于载波抑制原理利用级联的相位调

制器和强度调制器产生四倍频光载毫米波的方案,即采用相位调制器实现载波抑制,然后级联强度调制器生成四倍频光载毫米波,两个调制器采用同一射频信号源进行驱动,两驱动信号的相位相差 $\pi/2$ 。并通过实验验证,载有2.5 Gb/s数据信号的40 GHz光载毫米波信号经过20 km标准单模光纤传输后,传输功率代价小于0.8 dBm。

2 理论分析

基于载波抑制原理采用级联的相位调制器和强度调制器产生四倍频光载毫米波的方案如图1所示。首先根据贝塞尔(Bessel)函数的曲线特性,通过调节相位调制器的相移常数,产生载波抑制信号,相位调制器输出信号中包含一阶、二阶和高阶边带,然后由环形器(CIR)和光纤布拉格光栅(FBG)滤取一阶边带、抑制二阶和高阶边带,将一阶边带输入到强度调制器进行二次调制,根据强度调制器的载波抑制原理,产生四倍频光载毫米波。

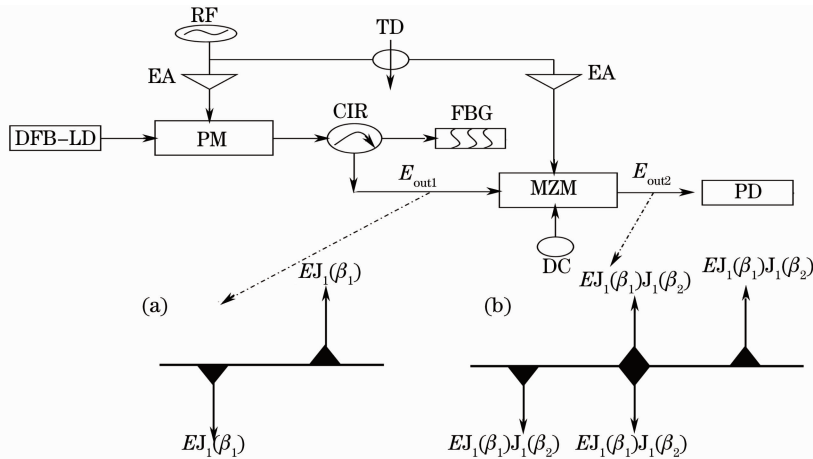


图1 采用级联的相位调制器和强度调制器实现四倍频光载毫米波的结构

Fig. 1 Schematic diagram of frequency quadruple optical millimeter-wave generation utilizing cascaded phase modulator along with an intensity modulator

分布式反馈激光器(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, ω_c 为角频率;输入到相位调制器中进行载波抑制调制。相位调制器的驱动信号为

$$m_1(t) = V_1 \cos(\omega_{RF} t + \theta_1),$$

式中 ω_{RF} 为相位调制器驱动信号的角频率, V_1 和 θ_1

分别为相位调制器驱动信号的振幅和相位,则相位调制器的输出信号为

$$E_{out}(t) = E\cos[\omega_c t + V_1 \Delta\phi \cos(\omega_{RF} t + \theta_1)], \quad (1)$$

式中 $\Delta\phi$ 是相位调制器的相移常数,文献[3]中也称为相位调制深度。(1)式Bessel函数展开后变为

$$E_{out}(t) = E\cos(\omega_c t)J_0(\beta_1) + 2E\cos(\omega_c t) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\beta_1) \cos[2n(\omega_{RF} t + \theta_1)] + 2E\sin(\omega_c t) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(\beta_1) \cos[(2n-1)(\omega_{RF} t + \theta_1)], \quad (2)$$

式中 $\beta_1 = V_1 \Delta\phi$, $J_k (k = 0, 1, 2, \dots)$ 表示第一类 k 阶 Bessel 函数, 相位调制器输出包括中心载波、一阶边带和高阶边带信号。在相位调制器中, 驱动信号振幅 V_1 归一化到 $0 \sim 1$ 区间, 因此 $\beta_1 = \Delta\phi/2$ 。当 $J_0(\beta_1) = 0$ 时, 相位调制器输出信号中不含载波分量, 得到载波抑制信号。根据第一类 Bessel 函数的曲线特性, $J_0(\beta_1)$

的第一个零点值 $\beta_1 \approx 2.4048$, 因此, 当相移常数 $\Delta\phi \approx 4.8096$ 时, 相位调制器输出载波抑制信号。从相位调制器输出的载波抑制信号经过一个 CIR 和 FBG, 滤取一阶边带信号, 抑制二阶及二阶以上的高阶边带, 从 FBG 滤取的一阶边带信号为

$$E_{\text{out1}}(t) = 2E \sin(\omega_c t) J_1(\beta_1) \cos(\omega_{\text{RF}} t + \theta_1) = 2E J_1(\beta_1) \cos\left(\omega_c t - \frac{\pi}{2}\right) \cos(\omega_{\text{RF}} t + \theta_1) = EJ_1(\beta_1) \left\{ \cos\left[(\omega_c + \omega_{\text{RF}})t - \frac{\pi}{2} + \theta_1\right] + \cos\left[(\omega_c - \omega_{\text{RF}})t - \frac{\pi}{2} - \theta_1\right] \right\}. \quad (3)$$

从(3)式可以看出, 光纤布拉格光栅滤取的一阶边带信号中上边带和下边带相互倒相, 幅度和相位如图 1(a)所示。将 FBG 滤取的一阶边带信号输入到强度调制器, 强度调制器和相位调制器采用同一射频信号源 (RF) 进行驱动, 两射频信号相位之间的关系通过相移器 (TD) 控制, 电放大器 (EA) 对射频信号功率进行放大。强度调制器的偏置电压设置在载波抑制点, 驱动信号为

$$m_2(t) = V_2 \cos(\omega_{\text{RF}} t + \theta_2),$$

式中 V_2 和 θ_2 分别表示强度调制器驱动信号的振幅和相位, 则强度调制器的输出为

$$E_{\text{out2}}(t) = E_{\text{out1}}(t) \cos\left[\frac{\pi}{2} + \beta_2 \cos(\omega_{\text{RF}} t + \theta_2)\right] = EJ_1(\beta_1) \left\{ \cos\left[(\omega_c + \omega_{\text{RF}})t - \frac{\pi}{2} + \theta_1\right] + \cos\left[(\omega_c - \omega_{\text{RF}})t - \frac{\pi}{2} - \theta_1\right] \right\} \cos\left[\frac{\pi}{2} + \beta_2 \cos(\omega_{\text{RF}} t + \theta_2)\right] = EJ_1(\beta_1) J_1(\beta_2) \left\{ \cos\left[(\omega_c + 2\omega_{\text{RF}})t - \frac{\pi}{2} + \theta_1 + \theta_2\right] + 2\cos\left(\omega_c t - \frac{\pi}{2}\right) \cos(\theta_1 - \theta_2) + \cos\left[(\omega_c - 2\omega_{\text{RF}})t - \frac{\pi}{2} - \theta_1 - \theta_2\right] \right\}, \quad (4)$$

式中 $\beta_2 = (V_2/V_{\pi 2})(\pi/2)$ 表示强度调制器的相位调制指数, $V_{\pi 2}$ 为强度调制器的半波电压。从(4)式可以看出, 当相位调制器和强度调制器的驱动信号相位差 $\theta_1 - \theta_2 = \pi/2$ 时, 从强度调制器输出的信号中只含有双频二阶光边带, 中心光载波 ω_c 处的频率成分相互抵消, 此时, 强度调制器的输出信号为

$$E_{\text{out2}}(t) = EJ_1(\beta_1) J_1(\beta_2) \cos\left[(\omega_c + 2\omega_{\text{RF}})t - \frac{\pi}{2} + \theta_1 + \theta_2\right] + EJ_1(\beta_1) J_1(\beta_2) \cos\left[(\omega_c - 2\omega_{\text{RF}})t - \frac{\pi}{2} - \theta_1 - \theta_2\right]. \quad (5)$$

从(5)式可以看出, 强度调制器输出的两个边带的频率差为四倍的 RF 频率, 并且两个边带的相位倒相, 幅度和相位如图 1(b)所示。在实验中, 此信号经过光电二极管 (PD) 进行光电检测, 输出表达式为

$$I(t) = \mu |E_{\text{out2}}(t)|^2 = \mu E^2 J_1^2(\beta_1) J_1^2(\beta_2) \left[1 - \frac{1}{2} \cos(2\omega_c t + 4\omega_{\text{RF}} t + 2\theta_1 + 2\theta_2) - \frac{1}{2} \cos(2\omega_c t - 4\omega_{\text{RF}} t - 2\theta_1 - 2\theta_2) - \cos(2\omega_c t) + \cos(4\omega_{\text{RF}} t + 2\theta_1 + 2\theta_2) \right], \quad (6)$$

式中 μ 为光电二极管的响应率, 第一项为直流成分, 第二、三、四项为光频成分, 这些光频成分经过光电二极管后, 也变成了直流成分, 所以从光电二极管输出的成分只含有最后一项, 即产生了一个四倍于 RF 信号频率的电毫米波:

$$I(t) = \mu E^2 J_1^2(\beta_1) J_1^2(\beta_2) \cos(4\omega_{\text{RF}} t + 2\theta_1 + 2\theta_2). \quad (7)$$

从以上的理论推导可以看出, 满足一定相位关系的级联相位调制器和强度调制器基于载波抑制原

理可以产生载波抑制的四倍频光载毫米波。利用同样的原理, 通过级联更多的强度调制器, 理论上可以得到更高频率的光载毫米波信号^[7]。

3 实验装置及结果

实验装置如图 2 所示, 采用重复频率为 10 GHz 的射频本振信号同时驱动 LiNbO₃ 相位调制器 (PM) 和马赫-曾德尔强度调制器 (MZM)。波长为 1543.8 nm 的

连续光波由分布反馈激光器产生。相位调制器调制连续光波生成载波抑制的双边带信号。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,相位调制器输出信号的频谱如图 2(a)所示,可以看到载波和一阶边带抑制比超过 25 dB。相位调制器输出的信号经过 CIR 和 FBG 滤波器,由 FBG 滤取一阶边带,并且抑制二阶及二阶以上的高阶边带。再将一阶边带输入到强度调制器进行二次调制,强度调制器的半波电压设置在载波抑制点,驱动信号与相位调制器的驱动信号相位相差 $\pi/2$,相位差通过调整移相器实现,

强度调制器的输出信号为载波抑制的四倍频信号。强度调制器输出信号的频谱如图 2(b)所示。然后利用一个单臂的马赫-曾德尔强度调制器(IM)将速率为 2.5 Gb/s 的非归零码伪随机序列对四倍频光载毫米波进行调制,采用 Agilent 86100C 示波器测量毫米波眼图,如图 3(a)所示。调制信号发送至光纤链路,传输至基站。经过 20 km 标准单模光纤(SMF-28)传输后测得毫米波眼图如图 3(b)所示。光纤前置的掺铒光纤放大器(EDFA)用于补偿单模光纤传输中的信号衰减,以保证毫米波信号的入纤光功率放大至 3 dBm。

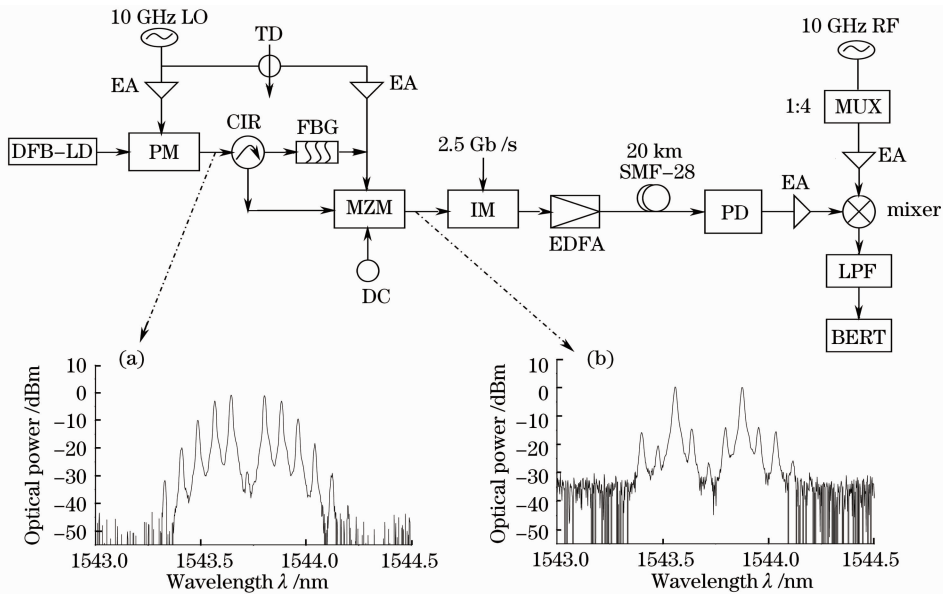


图 2 四倍频光载毫米波的光纤无线通信实验系统装置图

Fig. 2 Experimental setup for frequency quadruple optical millimeter-wave signals RoF system

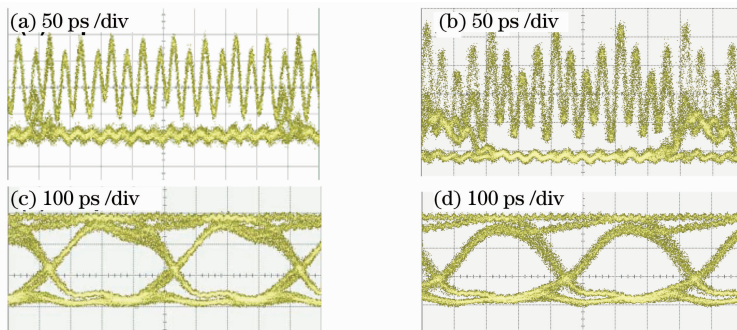


图 3 光毫米波未传输(a)和传输(b)20 km后的眼图;基带信号背靠背(B-T-B)(c)和传输 20 km 后(d)的眼图

Fig. 3 Eye diagrams of optical mm-wave before (a) and after (b) transmission over 20 km SMF-28; base-band signal before (c) and after (d) transmission over 20 km SMF-28

在基站,经 20 km 标准单模光纤传输后的毫米波信号采用 3 dB 带宽为 50 GHz 的光电检测器(PD)进行光电转换,产生出毫米波电信号。在实验中,没有考虑毫米波电信号的天线发射和接收过程,所以,生成的毫米波电信号直接用电放大器放大,再

与 40 GHz 本振信号混频进行相干解调,恢复出基带数据信号,40 GHz 本振信号由 10 GHz 正弦信号经过(multiplexer, MUX)四倍频后得到,最后通过低通滤波器(LPF)滤波,进入到误码测试仪(BERT)进行误码检测。接收端恢复出的基带信号

眼图如图 3(d)所示,背靠背(B-T-B)传输的基带信号眼图如图 3(c)所示。可以看出,经过 20 km 的标准单模光纤传输后,信号眼图依然清晰张开,在接收端仍然能够很好地恢复出基带数据信号。

利用型号为 Anritsu MP1764C 误码仪测量接收信号的误码,分别测得实验中下行链路数据信号在背靠背(B-T-B)及经过距离为 20 km 的标准单模光纤传输两种条件下的误码率(BER) R_{BE} ,如图 4 所示。可以看出,系统中,当误码率为 10^{-9} 时,下行链路的功率代价小于 0.8 dBm。

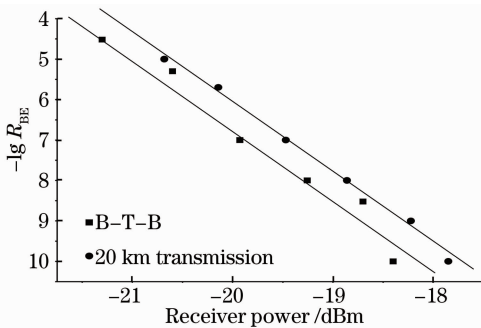


图 4 误码率曲线图

Fig. 4 BER curves

4 结 论

本文提出了一种基于载波抑制原理,采用级联的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。由于相位调制器不需要外置偏压,这就避免了直流偏置漂移的影响,省略了控制电路,而且产生的光载毫米波信号稳定可靠。将产生的四倍频光载毫米波信号运用到 2.5 Gb/s 的光纤无线通信实验系统中。实验结果表明,下行链路数据经过 20 km 标准单模光纤传输后,当误码率为 10^{-9} 时,功率代价小于 0.8 dBm。

参 考 文 献

1 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

2 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

3 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

4 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

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

文 鸿, 陈 林, 皮雅稚等. 基于相位调制器产生光毫米波的全双工光纤无线通信系统[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 935~939

6 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

7 J. Lu, Z. Dong, L. Chen *et al.*. High-repetitive frequency millimeter-wave signal generation using multi-cascaded external modulators based on carrier suppression technique [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(19): 4889~4892

8 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

9 Lin Chen, Xiaoyan Lei, Shuangchun Wen. A novel radio over fiber system with DWDM mm-wave generation and wavelength reuse for upstream data connection [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(9): 5893~5897

10 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

11 Chunting Lin, Potsung Shih, Jason (Jyehong) Chen *et al.*. Optical millimeter-wave signal generation using frequency quadrupling technique and no optical filtering[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(12): 1027~1029

12 G. Qi, J. Yao, J. Seregelyi *et al.*. Optical generation and distribution of continuously tunable millimeter-wave signals using an optical phase modulator[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(9): 2687~2695