

基于串联双电极马赫-曾德尔调制器的六倍频技术

袁燕¹ 秦毅^{2*}

¹武汉电力职业技术学院电力工程系, 湖北 武汉 430079
²华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉光电国家实验室(筹), 湖北 武汉 430074

摘要 提出并理论分析和实验验证了一种新的产生毫米波的六倍频技术。该方法采用两个相同串联的双电极驱动马赫-曾德尔电光调制器(MZM), 调节第一个 MZM 的偏置电压使其工作在最小传输模式, 只输出奇次光谐波分量, 调节第二个 MZM 的偏置电压使其工作在最大传输模式, 抑制所有的奇次光谐波分量。实验结果显示, 采用 10 GHz 的射频(RF)信号驱动这两台 MZM 后, 输出 60 GHz 的毫米波信号, 实现了六倍频。通过测量输出的信号性能指标并未使用带通光滤波器方案作比较得出经过 50 km 光纤传输后, 输出信号受到色散的影响小。

关键词 光通信; 光纤无线传输; 六倍频; 光毫米波产生; 光载波抑制

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1005004

Frequency Sextupling Technique Using Two Cascaded Dual-Electrode Mach-Zehnder Modulators

Yuan Yan¹ Qin Yi²

¹Department of Electric Power Engineering, Wuhan Electric Power Technical College, Wuhan, Hubei 430079, China

²Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract A novel technique for the generation of millimeter-wave (mm-wave), i. e., frequency sextupling technique, is theoretically analyzed and experimentally demonstrated. The proposed technique is comprised of two cascaded dual-electrode Mach-Zehnder modulators (MZMs). The first MZM, biased at the minimum transmission, is only used for odd-order optical harmonic generation, and then a second MZM, biased at the maximum transmission, suppresses all odd-order optical harmonics. As an example, a 10 GHz radio frequency (RF) signal, which drives the MZMs, is considered; and a mm-wave signal at 60 GHz, i. e., a frequency sextupler, is obtained. Compared with the conventional techniques without optical band-pass filter, the generated mm-wave signal is robust to fiber chromatic dispersion. The proposed technique is verified by experiments.

Key words optical communications; radio-over-fiber; frequency sextupling; generation of millimeter wave; optical carrier suppression

OCIS codes 060.2330; 060.2360; 230.4110; 190.2620

1 引言

随着移动多媒体业务和无线接入业务的迅猛发展,用户对同时传输数据、图像和语音业务的要求与日俱增,毫米波通信系统因能提供较大的带宽而成为未来通信发展的主要方向之一^[1~4]。近年来,以光毫米波为核心技术的光纤无线接入通信(RoF)系

统成为下一代光纤通信的研究热点。RoF 系统可以充分利用其光纤传输段不受带宽限制的特点,并结合无线通信技术的灵活性,将无线网络和光纤网络结合起来,在简化基站、降低系统成本的基础上增加了接入网的容量和移动性^[5~9]。

近年来,国际上对 RoF 系统的研究主要集中在

收稿日期: 2011-05-04; 收到修改稿日期: 2011-07-14

作者简介: 袁燕(1958—),女,副教授,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: yuanyan58@163.com

*通信联系人。E-mail: qinyi1983@sohu.com

光毫米波的产生与传播、RoF 系统在波分复用(WDM)中的应用、光的上变频技术、梳状频率谱的产生和非线性形变的抑制等方面^[10~15]。光的上变频技术是利用射频(RF)信号驱动马赫-曾德尔电光调制器(MZM),将电信号转换为光信号,产生高次光谐波。由于光电转换过程中存在非线性效应,将会在光频谱图上产生许多高次光谐波分量,通过光电探测器在两个对称谐波分量之间进行拍频或者在光载波和一个谐波分量之间进行拍频从而产生相应的毫米波^[12]。光的上变频技术可以有效降低光毫米波的产生和发送过程中的成本。

为了利用光的上变频技术产生高质量的毫米波,必须获得最大的光谐波抑制比,也就是说要尽可能地抑制不必要的光谐波分量。文献[13]采用 RF 信号驱动单偏置电压的 MZM 产生高抑制比的光谐波,文献[14]通过产生梳状频率谱来获得高抑制比的光谐波,但是利用这些技术产生六倍频不但效率很低,而且产生的毫米波信号受到色散和非线性的影响失真严重。本文采用一种新的六倍频方式,使用两个串联的双电极驱动的 MZM 和一个相位调制器。虽然本文采用的总体结构和已有的相关文献类似,但是其工作原理和现有的文献是完全不同的。在本结构中,使用了两个串联的双电极驱动的 MZM,同时必须要调节前者的偏置电压达到最小传输模式,只输出两个一阶边带;还必须调节后者的偏置电压达到最大传输模式,第二个 MZM 将第一个 MZM 输出的两个一阶边带分别进行调制,这样经过两个 MZM 调制后输出的光信号频谱只剩下两个三次谐波分量,它们之间的频率差为原 RF 信号的 6 倍。之后经光电变换器对这两个谐波分量之差拍频后,得到相当于原 RF 信号频率 6 倍的毫米波信号。模拟实验证实该信号受色散影响小。

2 系统原理

采用串联双电极驱动 MZM 产生六倍频毫米波信号的原理如图 1 所示。图 1 中 DFB 为分布反馈式激光器,PA 为功率放大器,OSA 为光谱仪,PS 为相位变换器,PC 为保偏光纤,PD 为光电转换器,ESA 为电谱分析仪,SSMF 为标准单模光纤,OBF 为光带通滤波器,EBPF 为电带通滤波器,ELPF 为电低通滤波器。

RF 信号源产生频率为 ω_e 的射频信号,通过功率分配器分成两路同时驱动两台 MZM,驱动每台 MZM 的双电极的 RF 信号之间相位差为 π ,由 DFB

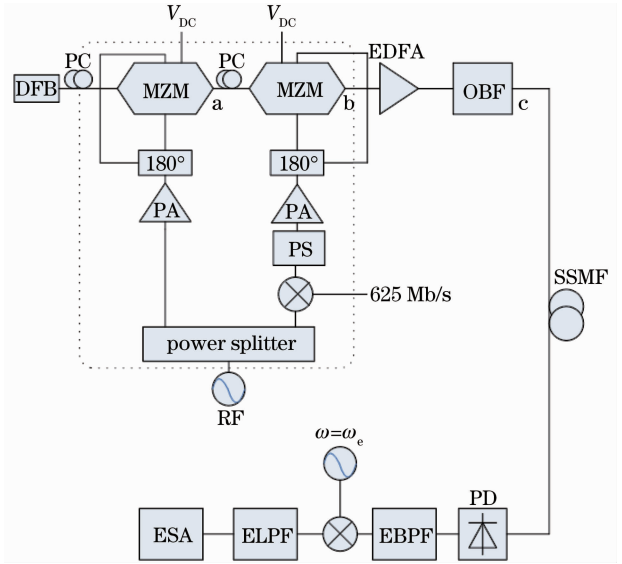


图 1 六倍频毫米波信号原理图

Fig. 1 Principle of frequency sextupling mm-wave

产生频率为 ω_0 的连续激光作为光载波,输入到第一台 MZM 中,调节第一台 MZM 的偏置电压,使其工作在最小传输模式,也就是抑制光载波(OCS)和偶次谐波分量方式调制。载波抑制后光谱的能量主要集中在两个一阶边带上,两个一阶边带的频率分别为 $\omega_0 + \omega_e$ 和 $\omega_0 - \omega_e$ 。

进入到第一台 MZM 的电域表达式为

$$E_{in}(t) = E_0 \cos \omega_0 t, \quad (1)$$

输入到第一台 MZM 的 RF 信号电压表达式为

$$V_1(t) = V_{e1} \cos(\omega_e t + \phi_1), \quad (2)$$

式中 E_0 为电场强度, V_{e1} 和 ϕ_1 分别为输入到第一台 MZM 的 RF 信号电压幅度和初始相位。

调节第一台 MZM 的偏置电压,使其工作在最小传输模式,也就是抑制光载波和偶次谐波分量方式调制,则第一台 MZM 输出的电域表达式为

$$\begin{aligned} E_{out1}(t) &= E_0 \cos(\omega_0 t) \cos\left[\frac{\pi}{2} + \beta_1 \cos(\omega_e t + \phi_1)\right] \\ &\approx J_1(\beta_1) E_0 \{ \cos[(\omega_0 - \omega_e)t - \phi_1] + \\ &\quad \cos[(\omega_0 + \omega_e)t + \phi_1] \}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\beta_1 = (V_{e1}/V_{\pi 1}) \cdot \pi/2$ 是相位调制指数, $V_{\pi 1}$ 是第一台 MZM 的半波电压, J_1 为一阶贝塞尔函数。第一台 MZM 输出信号的相位和幅度示意图如图 2 所示。

将这两个一阶边带 $\omega_0 + \omega_e$ 和 $\omega_0 - \omega_e$ 作为载波信号输入到第二台 MZM 中,也就是说将(3)式作为第二台 MZM 的输入信号表达式。驱动第二台 MZM 的 RF 信号的初始相位为 ϕ_2 ,先混入 625 Mb/s 的数据后,再通过 PS 进行 $|\phi_2 - \phi_1|$ 的相移,之后再驱动 MZM,则输入到第二台 MZM 的 RF 信号电压表达式

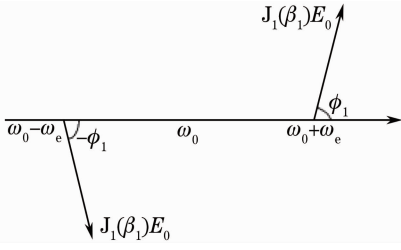


图2 第一台 MZM 输出信号的相位和幅度示意图
Fig. 2 Amplitude and phase of the signal at the output of the first MZM

为

$$V_2(t) = V_{e2} \cos(\omega_e t + \phi_2), \quad (4)$$

式中 V_{e2} 为输入到第二台 MZM 的 RF 信号电压幅度, 调节第二台 MZM 的偏置电压, 使其工作在最大

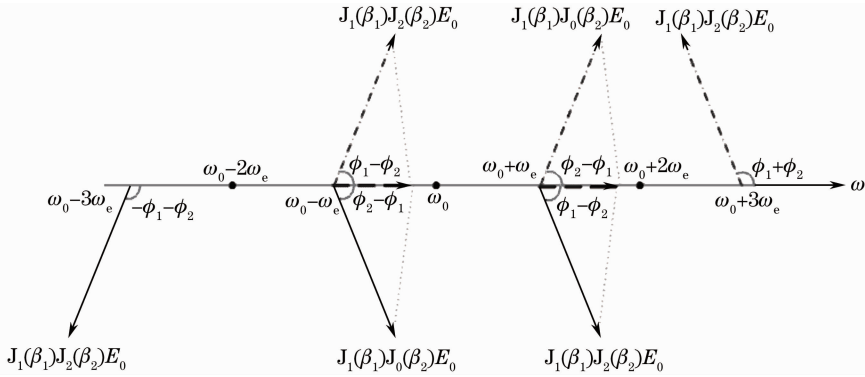


图3 第二台 MZM 输出信号的相位和幅度示意图

Fig. 3 Amplitude and phase of the signal at the output of the second MZM

当调节 PS 使得 $|\phi_2 - \phi_1| = \pi/2$ 时, (5) 式变为

$$E_{\text{out}2}(t) \approx J_1(\beta_1)J_2(\beta_2)E_0 \cos[(\omega_0 - 3\omega_e)t - \phi_1 - \phi_2] + J_1(\beta_1)J_2(\beta_2)E_0 \cos[(\omega_0 + 3\omega_e)t + \phi_1 + \phi_2]. \quad (6)$$

可以看出只剩下 $\omega_0 + 3\omega_e$ 和 $\omega_0 - 3\omega_e$ 两个分量, 它们之间频率差为 $6\omega_e$, 由于 MZM 中的非线性效应影响, 在调制过程中会产生许多额外的高次谐波分量, 因此, 需要通过一个光带通滤波器将额外的 $\pm 5\omega_e$ 及以上的高次谐波分量抑制掉, 这样保留下来的一对三次谐波分量 $\omega_0 + 3\omega_e$ 和 $\omega_0 - 3\omega_e$ 经过光电变换器拍频后, 就得到 6 倍于原来的信号, 即输出电压为

$$V_{\text{out}}(t) = RJ_1^2(\beta_1)J_2^2(\beta_2)E_0^2 \cos(6\omega_e t + 2\phi_1 + 2\phi_2), \quad (7)$$

式中 R 为光电变换器转换指数。

3 实验装置及结果

系统的实验装置如图 1 所示。根据第 2 节的原理, 使用 Optisystem 软件进行仿真。首先由一个分布反馈式激光器产生波长为 1552.52 nm (193.1 THz)

传输模式, 也就是抑制奇次谐波分量, 则第二台 MZM 输出的电域表达式为

$$E_{\text{out}2}(t) \approx J_1(\beta_1)J_2(\beta_2)E_0 \cos[(\omega_0 - 3\omega_e)t - \phi_1 - \phi_2] + J_1(\beta_1)J_2(\beta_2)E_0 \cos[(\omega_0 + 3\omega_e)t + \phi_1 + \phi_2] + J_1(\beta_1)J_0(\beta_2)E_0 \cos(\phi_2 - \phi_1) \cos(\omega_0 - \omega_e)t + J_1(\beta_1)J_2(\beta_2)E_0 \cos(\phi_2 - \phi_1) \cos(\omega_0 + \omega_e)t + J_1(\beta_1)J_2(\beta_2)E_0 \cos(\phi_2 - \phi_1) \cos(\omega_0 - \omega_e)t + J_1(\beta_1)J_0(\beta_2)E_0 \cos(\phi_2 - \phi_1) \cos(\omega_0 + \omega_e)t, \quad (5)$$

式中 J_0, J_1, J_2 分别为 0 阶、1 阶、2 阶贝塞尔函数, $\beta_2 = (V_{e2}/V_{\pi 2}) \cdot \pi/2$, $V_{\pi 2}$ 是第二台 MZM 的半波电压。这样输出的光信号只留下 6 个边带分量。第二台 MZM 输出信号的相位和幅度示意图如图 3 所示。

的连续光载波, 进入消光比为 30 dB, 半波电压 V_{π} 为 5 V, 插入两个相同的损耗为 6 dB 的 MZM。实验采用的 RF 信号频率为 10 GHz, 同时驱动两台双电极 MZM, 每台 MZM 的两个驱动电极之间的 RF 信号相位差保持为 π 。调节第一台 MZM 的偏置电压, 使其抑制所有的偶次光谐波分量, 输出的频谱图如图 4(a) 所示, 光谱能量主要集中在两个频率间隔为 20 GHz 的一阶边带上。将这两个一阶边带的信号作为光载波输入到下一个 MZM 中, 调节偏置电压使其抑制所有的奇次光谐波分量, 同时调节相位变换器使其保持为 $\pi/2$ 相位差, 结果输出的频谱图如图 4(b) 所示, 可以看出 $\pm 3\omega_e$ 以内的频谱分量得到了抑制。同时, 由于非线性效应影响, 在调制过程中会产生高于 $\pm 3\omega_e$ 的高次谐波, 为了避免这些高次谐波对实验结果的影响, 将输出信号经过一个带宽为 68 GHz、中心频率为 1552.52 nm (193.1 THz) 的高斯型光带通滤波器, 滤除高于 $\pm 3\omega_e$ 的高次谐波分量, 得到的光频谱图如图 4(c) 所示。可以看出, 输出的光波信号只剩下了 $\pm 3\omega_e$ 两个频率边带,

它们的频率间隔正好为 $6\omega_c$ ，即原 RF 信号的 6 倍，三次谐波与一次谐波之间的功率相差 20 dBm。输出信号经过光电转换器将 $\pm 3\omega_c$ 两个频率边带之差拍频后，得到 6 倍于 RF 信号的毫米波信号，即 60 GHz 毫

米波信号。为了测量该毫米波信号的误码率等指标，将该信号与频率为 60 GHz 的本地振荡信号混频后，输出到电谱仪中探测。

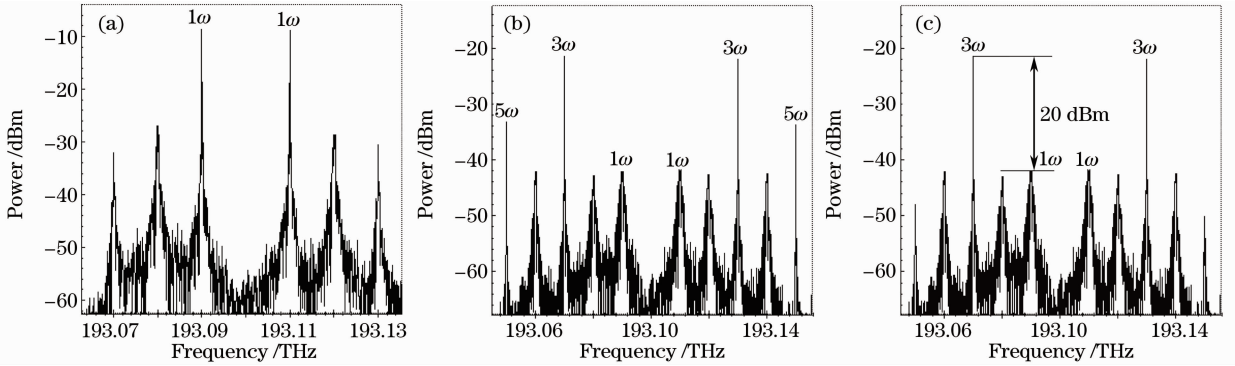


图 4 图 1 中 a、b、c 点处的频谱图

Fig. 4 Optical frequency spectrum corresponding to points a~c in Fig. 1

为了测试该方案输出的信号在传输过程中受到色散以及误码率等因素的影响，实验还搭建了没有采用光带通滤波器输出光毫米波的方案作比较，其输出频谱图如图 4(b) 所示。模拟出在不同传输长度下品质因子 Q 变化的曲线图，如图 5 所示，可以看出与没采用光带通滤波器的方案相比，本实验方案输出信号 Q 值很低，同时随着光纤长度的增加， Q 值基本上变化很小，在 5 左右。这是因为本实验方案输出的三次谐波功率很大，其他谐波被抑制掉了，功率很低，由图 4(c) 可以看出相差 20 dBm，而且由于相差很大，经过光纤传输后，只剩下三次谐波之间的自拍频，其他谐波之间的拍频作用很小，削弱了光纤色散导致的幅度变化，其他谐波的功率对输出的毫米波性能影响很小，从而提高了接收灵敏度，因此 Q 值随光纤长度变化很小。而没采用光带通滤波器的方案由于三次谐波与五次谐波光功率差别不大，在传输过程中易受到其他谐波之间的拍频作用的影

响，从而导致易受到光纤色散的影响，最终使得输出信号的传输功率发生变化，因此 Q 值很大，并且随着光纤长度的增加 Q 值曲线漂移很大。

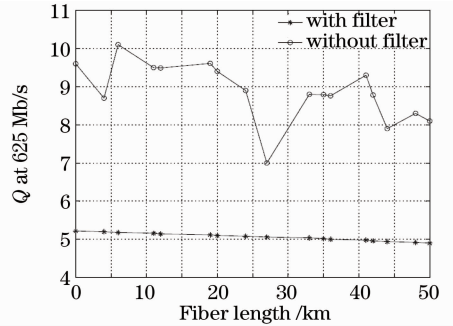


图 5 模拟的不同光纤长度下 Q 值变化图

Fig. 5 Simulated Q -factor versus fiber length

同时，还分别模拟了本方案输出信号经 0 km (Back-to-back) 和 50 km 光纤传输后其频谱和眼图，结果分别如图 6(a) 和 (b) 所示，可以看出两者的信号功率都为 -42 dBm，几乎不变，眼图也很相似。

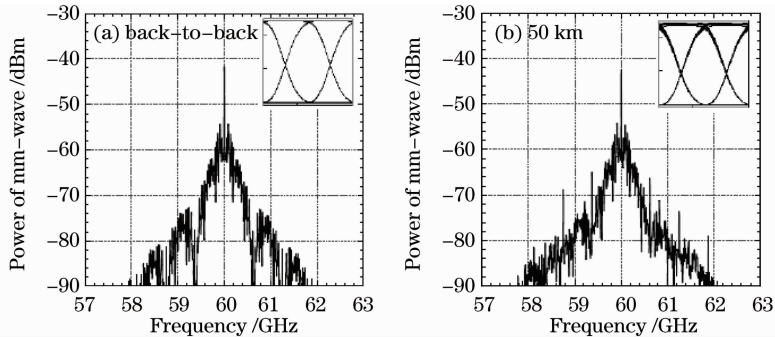


图 6 六倍频后 60 GHz 毫米波的电谱图及眼图。(a) 传输 0 km 后；(b) 传输 50 km 后

Fig. 6 Electrical spectra of the generated mm-wave signal at 60 GHz using the sextupler at the transmission distances of (a) 0 and (b) 50 km

这进一步说明本方案输出的信号受光纤中色散的影响很小,达到了预期的效果。

4 结 论

提出并经过理论分析和实验推导,验证了一个新的六倍频光调制方式,通过两个串联的双电极驱动 MZM,调节前者的偏置电压达到最小传输模式,只输出两个一阶边带;调节后者的偏置电压达到最大传输模式,使其将第一个 MZM 输出的两个一阶边带分别进行调制,同时调节相位变换器使驱动这两个 MZM 的电压相位差保持为 $\pi/2$,经过两个 MZM 调制后输出的光信号频谱只剩下两个三次谐波分量,它们之间的频率差为原 RF 信号的 6 倍。该方法输出的信号功率很高,其他无关谐波的功率很低,几乎对输出信号不造成影响,因此其 Q 值和眼图受光纤中的色散作用影响很小。仿真实验验证了预期的效果。

参 考 文 献

- 1 J. Yu, Z. Jia, T. Wang *et al.*. Centralized lightwave radio-over-fiber system with photonic frequency quadrupling for high-frequency millimeter-wave generation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(19): 1499~1501
- 2 Zhang Tieying, Wang Hongxing, Shi Jianguo *et al.*. Spectral characteristics of dual amplitude pulse position modulation in optical communications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0305001
张铁英,王红星,史建国等.光通信中双幅度脉冲位置调制的功率谱分析[J].中国激光,2011,**38**(3): 0305001
- 3 Huang Aiping, Fan Yangyu, Li Wei *et al.*. Fixed length dual-amplitude pulse interval modulation for optical wireless communications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 602~606
黄爱萍,樊养余,李伟等.无线光通信中的定长双幅度脉冲间隔调制[J].中国激光,2009,**36**(3): 602~606
- 4 Pei Li, Ning Tigang, Qi Chunhui *et al.*. Research on PMD compensation of CFBG in high speed optical communication system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 142~146
裴丽,宁提纲,祁春慧等.高速光通信系统光纤光栅色散补偿

- 的偏振模色散研究[J].中国激光,2010,**37**(1): 142~146
- 5 M. D. Feuer, J. M. Wiesenfeld, J. S. Perino *et al.*. Single-port laser-amplifier modulators for local access [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(9): 1175~1177
 - 6 W. R. Lee, S. H. Cho, J. Park *et al.*. Noise suppression of spectrum-sliced WDM-PON light sources using FP-LD[J]. *ETRI Journal*, 2005, **27**(3): 334~336
 - 7 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
 - 8 J. Yu, M. Huang, D. Qian *et al.*. Centralized lightwave WDM-PON employing 16-QAM intensity modulated OFDM downstream and OOK modulated upstream signals [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(18): 1545~1547
 - 9 Chen Lin, Cao Zizheng, Dong Ze *et al.*. Experimental investigation of direct-detection optical orthogonal frequency-division multiplexing transmission system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 554~557
陈林,曹子峥,董泽等.直接检测的光正交频分复用信号光纤传输系统实验研究[J].中国激光,2009,**36**(3): 554~557
 - 10 B. Masella, X. Zhang. A novel single wavelength balanced system for radio over fiber links [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(1): 301~303
 - 11 C. Wu, X. Zhang. Impact of nonlinear distortion in radio over fiber systems with single-side band and tandem single-side band subcarrier modulations [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(6): 2076~2090
 - 12 M. Larrode, A. Koonen, J. Vegas *et al.*. Bidirectional radio-over-fiber link employing optical frequency multiplication [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **20**(18): 241~243
 - 13 M. Mohamed, X. Zhang, B. Hraimel *et al.*. Efficient photonic generation of millimeter-waves using optical frequency multiplication in radio-over-fiber systems [C]. Canada: IEEE Topic Meeting on Microwave Photonics, 2007. 14~20
 - 14 T. Sakamoto, T. Kawanishi, M. Izutsu. Asymptotic formalism for ultraflat optical frequency comb generation using a Mach-Zehnder modulator [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(11): 1515~1517
 - 15 Dong Ze, Cao Zizheng, Chen Lin *et al.*. Experimental research on a radio-over-fiber system based on 60 GHz millimeter-wave [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1018~1021
董泽,曹子峥,陈林等.基于60 GHz光毫米波的光纤无线传输系统实验研究[J].中国激光,2010,**37**(4): 1018~1021