

文章编号: 0258-7025(2007)07-0935-05

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

文 鸿, 陈 林, 皮雅稚, 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 提出并实验研究了一种基于相位调制器产生光毫米波信号的全双工光纤无线通信(RoF)系统。在中心站采用相位调制器结合滤波的方法产生重复频率为40 GHz的载波抑制双边带毫米波信号,利用交叉复用器分离毫米波信号的上下边带,其中的一个边带强度调制数据速率为2.5 Gbit/s的下行基带信号,另一个边带被发送到基站调制上行传输的基带数据。该系统抗色散效果好,在经过40 km标准单模光纤上/下行传输数据速率2.5 Gbit/s的基带信号后,双向的传输功率代价都小于0.5 dBm。在光纤无线通信系统中采用相位调制器结合滤波的方法产生光毫米波,同时基于波长重用技术再生上行光载波信号,可以简化中心站和基站配置,节约系统成本。

关键词 光通信; 光纤无线通信; 相位调制器; 光毫米波; 波长重用; 交叉复用器

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

Full-Duplex Radio-over-Fiber System with Optical Millimeter-Wave Generation Utilizing Optical Phase Modulator

WEN Hong, CHEN Lin, PI Ya-zhi, YU Jian-jun, WEN Shuang-chun

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

Abstract A full-duplex radio-over-fiber (RoF) system with optical millimeter-wave generation utilizing optical phase modulator was designed and experimentally demonstrated. Carrier suppression double sideband optical signal with 40 GHz repetitive frequency is generated by using an optical phase modulator along with optical filtering technique. An optical interleaver was employed to separate the two first-order sideband carriers, one of the carriers was used to carry 2.5 Gbit/s downstream data, while the other was sent to base station for reuse for modulating upstream data. It was experimentally demonstrated that the 2.5 Gbit/s data for bidirectional transmission were transmitted over 40 km standard single mode fiber (SMF-28) with less than 0.5 dBm power penalty. By using optical phase modulator along with optical interleaver to generate optical mm-wave, and adopting the wavelength reuse technique, the proposed RoF system becomes simple and cost-effective.

Key words optical communication; radio-over-fiber; phase modulator; optical millimeter-wave; wavelength reuse; optical interleaver

1 引言

随着IP电视(IPTV)、视频点播(VOD)等多媒体通信技术的迅速发展,传统的宽带无线接入方式已不能满足日益增长的宽带业务需求。光纤无线通信(RoF)融合了无线通信的灵活性和光纤通信的宽

带宽、低损耗等特性,被广泛研究^[1~13]。光毫米波信号的产生和传输是全双工光纤无线通信的关键技术^[2~6]。外部强度调制器常用于产生光毫米波信号。但为了提高毫米波信号的品质必需外加复杂的控制电路,以避免直流偏置漂移的影响。与强度调制器不同,相位调制器不需要直流偏置^[5],因此用来

收稿日期:2006-12-13; 收到修改稿日期:2007-03-13

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)资助项目。

作者简介:文 鸿(1981—),男,湖南人,博士研究生,主要从事新一代光无线接入网方面的研究。E-mail:scwen@hnu.cn

导师简介:文双春(1966—),男,湖南人,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

产生毫米波信号不仅能够简化系统配置,而且产生的光毫米波信号稳定可靠。

实现全双工光纤无线通信的另一个关键技术是上行链路中光载波信号的产生^[7~10]。外加光源可以产生光载波信号,但需要额外配置激光器,无疑增加了基站成本^[7]。波长重用技术利用中心站信号的波长在基站的重新使用,能简化基站配置,是理想的选择。但已有的基于波长重用技术的全双工光纤无线通信系统基本上只实现了低速率、短距离的传输^[8~10]。文献^[10]采用强度调制器、基于双边带调制方式实现了2.5 Gbit/s数据速率的全双工实验系统,但使用的强度调制器需要外加偏置电压稳定装置。本文采用相位调制器和交叉复用器产生载波抑制的光毫米波信号,并结合利用波长重用技术实验研究了一种新的全双工光纤无线通信系统。该系统充分利用了相位调制器的简单、稳定等优点,系统配置简单,成本低廉,并且能有效地减少光纤色散的影响。

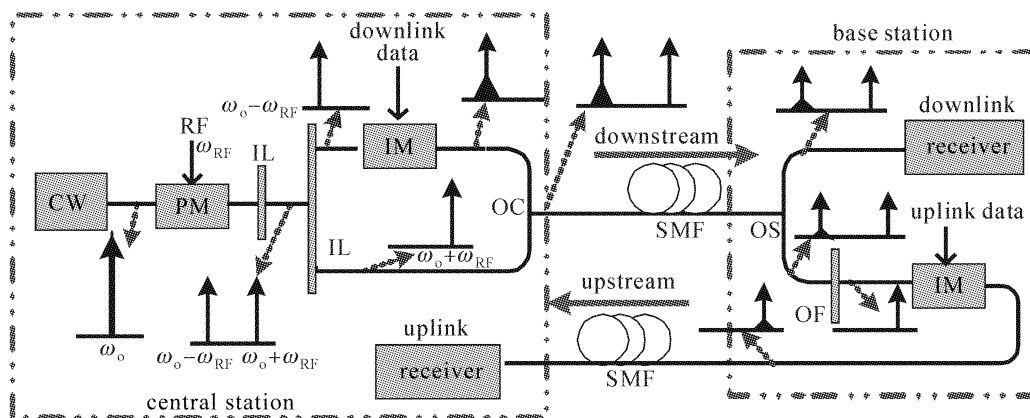


图1 2.5 Gbit/s全双工光纤无线通信实验系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of 2.5 Gbit/s full-duplex RoF system

2.2 光纤色散的影响分析

对于光纤无线通信系统,主要考虑毫米波信号在下行传输链路中的光纤色散影响。角频率为 ω_0 的连续光波通过相位调制器调制角频率为 ω_{RF} 的正弦时钟信号产生出带载波的双边带信号,相位调制器输出的光信号表达式为

$$E_{out}(t) = E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \cos\left[(\omega_0 + n\omega_{RF})t + n\frac{\pi}{2}\right], \quad (1)$$

式中 E_0 为光载波幅度, $J_n(\beta)$ 为 n 阶边带, n 为整数, β 与相位调制深度有关, $\beta = \pi V_{RF}/V_{\pi}$, V_{RF} 为调制信号电压, V_{π} 为相位调制器的半波电压。

毫米波信号传输过程中,较多的边带将导致严

2 实验原理及光毫米波传输色散分析

2.1 实验原理

典型的光纤无线通信系统一般由中心站、上/下行传输链路和远程基站三部分组成。实验系统如图1所示。中心站利用相位调制器和一个交叉复用器产生光载波抑制的双边带毫米波信号。这里通过调节相位调制器的调制深度,使毫米波信号只保留了一阶上、下边带。再利用第二个交叉复用器将上、下边带分开:下边带用来调制下行数据信号,上边带不做任何处理。随后将调制了下行数据的下边带和未做处理的上边带耦合,并通过标准单模光纤传输至远程基站。在基站中,传输后的毫米波信号被分成完全相同的上、下两路信号。上路信号用光检测器直接进行光-电转换,生成毫米波电信号;下路信号用光纤布拉格光栅滤除加载了下行数据的下边带,保留上边带,并利用保留下来的上边带调制上行数据。

重的光纤色散影响^[1]。为了有效减轻色散的影响,适当地调节相位调制器调制深度以保证输出光信号仅仅保留一阶边带。利用贝塞耳函数的单调特性,即 β 值一定时, $J_n(\beta)$ 随着 n 增大而单调递减。因此适当设置 β 值,可以满足 $J_1(\beta) > J_2(\beta)$, $J_2(\beta) \approx 0$ 条件。这样,相位调制器输出光信号的二阶边带和二阶以上边带可以被忽略(二阶边带对应于 $J_2(\beta)$,三阶边带对应于 $J_3(\beta)$)。基于上述条件,(1)式可以进一步简化为

$$E_{out}(t) \cong E_0 J_0(\beta) \cos(\omega_0 t) + E_0 J_1(\beta) \cos\left[(\omega_0 + \omega_{RF})t + \frac{\pi}{2}\right] + E_0 J_1(\beta) \cos\left[(\omega_0 - \omega_{RF})t + \frac{\pi}{2}\right]. \quad (2)$$

利用一个交叉复用器抑制相位调制器产生的双边带光信号的载波,有

$$E_{\text{out}2}(t) \cong E_o J_1(\beta) \cos\left[(\omega_o + \omega_{\text{RF}})t + \frac{\pi}{2}\right] + E_o J_1(\beta) \cos\left[(\omega_o - \omega_{\text{RF}})t + \frac{\pi}{2}\right]. \quad (3)$$

载波抑制的双边带信号经过第二个交叉复用器使上、下两边带被分开。下边带用来调制下行传输的基带数据信号;上边带不做任何处理。随后上、下两边带用光耦合器(OC)耦合,并通过距离为 L 的标准单模光纤传输。毫米波信号在光纤中传输,各阶边带将分别以不同速度传输,其频谱因此被展宽而导致失真。由于光纤色散的影响,此时(3)式中增加了传输相位延迟项 θ_1 ^[13]

$$E_{\text{out}2}(t) \cong E_o J_1(\beta) \cos\left[(\omega_o + \omega_{\text{RF}})t + \frac{\pi}{2} + \theta_1\right] + E_o J_1(\beta) \cos\left[(\omega_o - \omega_{\text{RF}})t + \frac{\pi}{2} + \theta_1\right], \quad (4)$$

式中 θ_1 为一阶上、下边带的相位延迟

$$\theta_1 = -n^2 L c D \pi \left(\frac{f_{\text{RF}}}{f_o}\right)^2 \Big|_{n=1} = -L c D \pi \left(\frac{f_{\text{RF}}}{f_o}\right)^2,$$

其中 c 为光速, D 为色散参数, f_{RF} , f_o 分别为调制信号频率和光载波频率。

在基站,经光纤传输后的信号利用分光器分成完全相同的上、下两路信号。上路信号采用光探测器直接检测生成毫米波电信号。通过光探测器输出的光电流为

$$I(t) \propto E_o^2 [J_1(\beta)]^2 \cos(2\omega_{\text{RF}} t), \quad (5)$$

$I(t)$ 即接收端恢复出的毫米波电信号,其幅度正比于 $E_o^2 [J_1(\beta)]^2$ 。可以看出,适当调整相位调制器的驱动信号的幅度能够有效地抑制产生的光毫米波的高阶边带,从而减轻毫米波信号在光纤传输过程中受到的色散影响。

3 实验装置及结果

图 2 为 2.5 Gbit/s 全双工光纤无线通信实验系统的装置,具体实物如图 3 所示。波长为 1552.5 nm 的连续光波由分布式反馈激光器(DFB-LD)产生。LiNbO₃ 相位调制器(PM)调制连续光波生成带载波的双边带毫米波信号。实验中设置相位调制器的半波电压 $V_\pi = 10$ V,驱动信号采用电压为 1 V 的 20 GHz 正弦信号。由上一节可以知道,稍微调整 β 值能够抑制产生毫米波信号的二阶和二阶以上边带。这里设定 $\beta = 0.3 = \pi \frac{V_{\text{RF}}}{V_\pi}$ (即 $V_{\text{RF}} = 0.3 V_\pi / \pi \approx 1$),故相位调制器的驱动信号电压为 1 V。相位调制器输出信号的频谱如图 4(a)。可以看到双边带毫米波的二阶边带功率比一阶边带功率低 35 dBm 左右,因此可认为二阶和二阶以上边带被有效地抑制住了,这使得毫米波信号在光纤传输时的色散影响明显减少。使用一个通带宽度为 0.15 nm,二输出端口的 25/50 GHz 交叉复用器(IL)滤除已产生的双边带毫米波信号的中心载波,将带载波的双边带毫米波转换成载波抑制的毫米波。交叉复用器的插入损耗为 2 dB,无偏振灵敏性。载波被抑制后的毫米波信号频谱如图 4(b)所示,

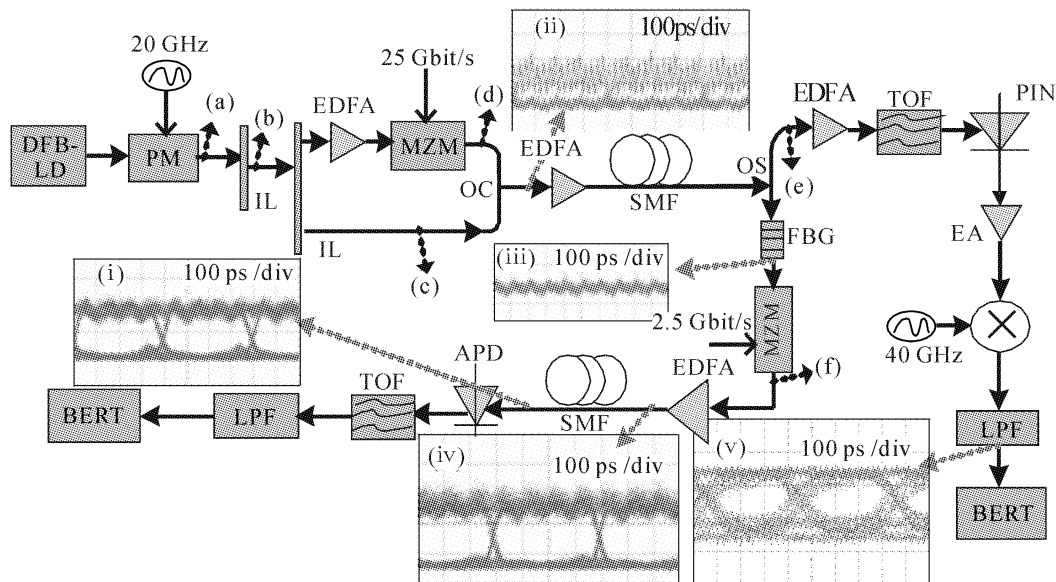


图 2 全双工光纤无线通信实验系统装置图

Fig. 2 Experimental setup for full-duplex RoF system

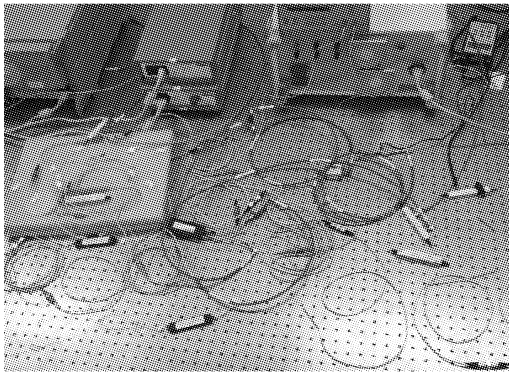


图3 全双工光纤无线通信实验系统装置实物图
Fig. 3 Image of experimental setup

从图中可看出,毫米波信号的重复频率为40 GHz,载波抑制比大于30 dB。随后采用第二个双输出端的50/100 GHz交叉复用器将毫米波信号的一阶上、下边带分离开。分开后的上边带信号如图4(c)。再利用一个单臂的马赫-曾德尔强度调制器(MZM)将下行传输的2.5 Gbit/s伪随机数据基带信号加载至分开后的下边带,光谱如图4(d);而上边带不做处理。然后用光耦合器将已加载下行数据的下边带和未做处理的上边带耦合,并经40 km标准单模光纤

(SMF)传送至远程基站。耦合后的信号眼图如图2(ii)。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人纤光功率放大至3 dBm。

在基站,经光纤传输后的毫米波信号利用光分路器(OS)分成完全等同的上、下两路信号。上路信号频谱如图4(e)所示。利用小信号增益为30 dB的掺铒光纤放大器对上路信号进行前置放大,再用带宽为0.5 nm的可调谐光滤波器(TOF)抑制被放大的自发热噪声。随后采用接收带宽(截止频率)为50 GHz的PIN光电探测器进行光电转换,产生出毫米波电信号。实验中不考虑毫米波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(EA)放大,再与40 GHz本振信号混频,最后通过截止频率为2.8 GHz的低通滤波器(LPF)滤波,恢复出基带数据信号。40 GHz的本振信号由10 GHz正弦信号四倍频后得到;电放大器的中心频率为40 GHz,带宽为10 GHz。接收端恢复出的基带信号眼图如图2(v)所示。可以看出信号眼图依然清晰张开,这说明虽然经40 km的单模光纤传输,在接收端仍然能够很好地恢复出基带数据信号。

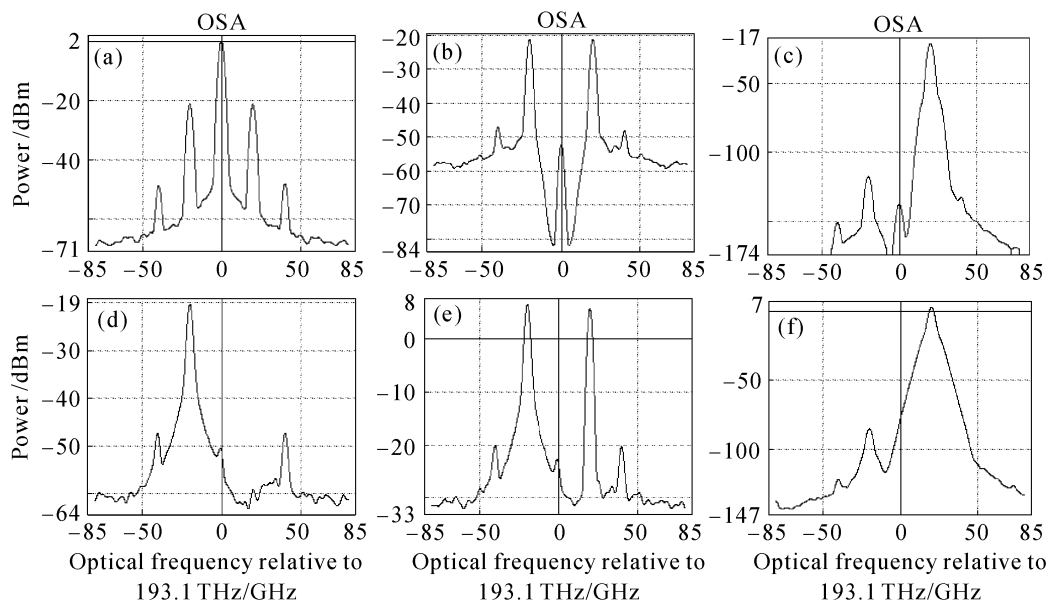


图4 测量光纤无线通信实验系统不同位置的光谱图
Fig. 4 Spectra at different locations labeled in Fig. 2

被光交叉复用器分开的另一路信号首先经过一个用作滤波器的布拉格光纤光栅(FBG),其作用是滤除加载了下行数据的下边带,保留上边带作为上行链路的光载波再利用。布拉格光纤光栅的输出信号波形如图2(iii)所示。上行传输的2.5 Gbit/s基带数据通过第二个单臂的马赫-曾德尔强度调制器

加载到光载波上。加载了上行数据的光载波如图4(f)。为避免光纤传输过程中的非线性效应影响,传输前利用掺铒光纤放大器将加载了上行数据的光载波信号的人纤功率放大至3 dBm。上行传输的信号通过40 km的单模光纤传送回中心站。随后在中心站采用2.5 Gbit/s商用接收模块对上行信号进行光

—电转换,再用截止频率为2.8 GHz的低通滤波器低通滤波,恢复出上行数据信号。测得上行链路中光纤传输前和传输后的眼图,分别如图 2(iv)和图 2(i)。可以看出,通过40 km的单模光纤传输后眼图仍然是张开的。分别测量上行和下行数据信号在背靠背(B-T-B)及经过距离为40 km的单模光纤传输两种条件下的误码率(BER),如图 5 所示。可以看出下行链路的功率代价为0.5 dBm,而下行链路的功率代价接近于零。

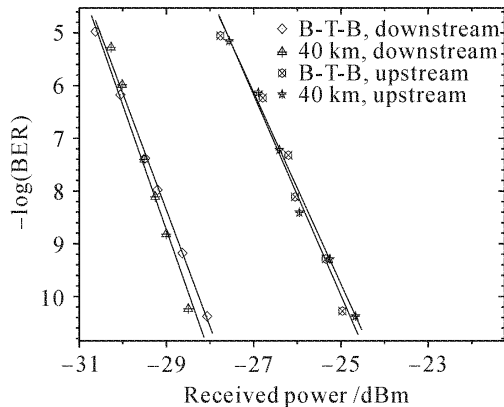


图 5 经 40 km 单模光纤下行和上行传输后的误码图
Fig. 5 BER curves for both down-link and up-link data over 40 km SMF transmission

4 结 论

设计并实现了 2.5 Gbit/s 全双工光纤无线通信实验系统。利用相位调制器结合交叉复用器生成载波抑制的毫米波信号,该毫米波信号能有效地减轻光纤色散的影响。由于采用了相位调制器,因此不需要外置偏压,避免了直流偏置漂移问题。在远程基站利用毫米波信号的上边带调制上行传输的数据,因此不需要额外增加光源,简化了基站的配置,降低了系统成本。实验结果表明,下行数据经过 40km 的单模光纤传输,功率代价小于 0.5 dBm;而上行链路传输的功率代价几乎为零。

参 考 文 献

- Graham H. Smith, Dalma Novak, Zaheer Ahmed. Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 1997, **45**(8):1410~1415
- M. Attygalle, C. Lim, A. Nirmalathas. Extending optical transmission distance in fiber wireless links using passive filtering in conjunction with optimized modulation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(4):1703~1709
- 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
- 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
- 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
- J. J. O'Reilly, P. M. Lane, R. Heidemann *et al.*. Optical generation of very narrow linewidth millimeter wave signals [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(25):2309~2311
- T. Kuri, K. Kitayama, Y. Takahashi. A single light-source configuration for full-duplex 60-GHz-band radio-on-fiber system [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 2003, **51**(2):431~439
- A. Nirmalathas, D. Novak, C. Lim *et al.*. Wavelength reuse in the WDM optical interface of a millimeter-wave fiber-wireless antenna base station [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 2001, **49**(10):2006~2012
- A. Kaszubowska, L. Hu, L. P. Barry. Remote downconversion with wavelength reuse for the radio/fiber uplink connection [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(4):562~564
- L. Chen, H. Wen, S. 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
- 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
- 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
- G. J. Meslener. Chromatic dispersion induced distortion of modulated monochromatic light employing direct detection [J]. *J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20**(10):1208~1216