

文章编号: 0253-2239(2007)12-2194-6

用于光纤无线通讯的微环相位辅助型 马赫-曾德尔调制器*

张 强 黄德修 张新亮** 江 涛

(华中科技大学武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要: 针对光纤无线通信(ROF)系统对光强调制器线性度的特殊要求,设计了一种新型的集成光学器件——微环相位辅助型马赫-曾德尔调制器(RPAMZM)。将一个微环谐振器和一个相位调制器分别加载到马赫-曾德尔调制器的两臂,可以补偿普通马赫-曾德尔调制器的亚线性,得到线性度良好的响应特性。建立了该种器件的理论分析模型,计算了不同条件下的传输特性和无毛刺动态范围(SFDR)。分析结果表明,在不计损耗的情况下,器件的非线性主要来源于传输函数泰勒展式的三次项,通过控制透射系数,可以使该项等于零,无毛刺动态范围获得 19.68 dB 的提高;在损耗存在的情况下,通过控制透射系数和偏压因子,可以同时抑制掉二次和三次这两个主要的非线性项,无毛刺动态范围获得 15.74 dB 的相对改善。

关键词: 集成光学; 光纤无线通信; 微环-相位辅助型马赫-曾德尔调制器; 无毛刺动态范围; 微环谐振器; 线性调制

中图分类号: TN256 文献标识码: A

Ring and Phase Assisted Mach-Zehnder Modulator for Radio-Over-Fiber System

Zhang Qiang Huang Dexiu Zhang Xinliang Jiang Tao

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: A novel scheme for linearity improvement of optical modulator is proposed for radio over fiber (ROF) system. This modulator is named ring and phase assisted Mach-Zehnder modulator (RPAMZM). A microring and a phase modulator are coupled to each arm of a normal Mach-Zehnder modulator respectively in order to compensate its sublinear characteristics transfer. Analyses under loss-less condition, loss condition and spur-free dynamic range (SFDR) are proposed. It is found that a high linearity can be achieved by properly setting the coupling coefficient under lossless condition. A corresponding SFDR of 19.68dB is achieved. When loss is considered, the main nonlinear terms, including the 2nd and the 3rd term, can be eliminated by properly setting the coupling coefficient and bias point. A corresponding SFDR of 15.74 dB can be achieved.

Key words: integrated optics; radio over fiber; ring and phase assisted Mach-Zehnder modulator; spur-free dynamic range (SFDR); microring resonator; linear modulation

1 引 言

光纤无线通讯(Radio over fiber, ROF)是一项很有发展前景的技术^[1,2],把射频副载波调制到光载波上,使信号在光纤里传输中大大降低了传输损耗,可以实现一个中心站与众多基站互连^[3,4],降低了系统构建的成本,因而成为目前研究的一个热门

课题。

作为光纤无线通讯系统关键性器件之一的光强调制器,要求具有良好的线性度。而马赫-曾德尔调制器(MZM)^[5]却具有正弦型调制特性,限制了其在光纤无线通讯系统中的应用。提高马赫-曾德尔调制器件线性度的方案大致分为两类:电学补偿方案

* 国家 973 计划(2006CB320805)资助课题。

作者简介: 张 强(1982—),男,山东滨州人,硕士研究生,主要从事光纤无线通讯中新型光电子器件方面的研究。

E-mail: xuanyuanxing06@163.com

导师简介: 黄德修(1937—),男,武汉人,教授,主要从事光纤无线通讯中新型光电子器件方面的研究。

** 通信联系人。E-mail: xlzhang@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2007-03-03; 收到修改稿日期: 2007-07-13

和光学线性方案。基于电路预补偿技术^[6]和前馈补偿技术^[7]的电学方案,包含了复杂的高速电路器件,并且器件的响应带宽也受电子瓶颈的限制,难以满足高速光通信的需求;传统的光学线性补偿方案,无论从双偏振技术^[8],级联技术^[9,10]还是直接耦合方案^[11],都是通过构造复杂的光路来获得线性度的提高,增加了器件的成本,难以满足光纤无线通讯技术的飞速发展。针对马赫-曾德尔调制器调制曲线的正弦亚线性特性,利用光微环谐振器^[12]所具有的正切型超线性特性,可以从光学领域对马赫-曾德尔调制器的调制特性进行线性补偿。Xie 等^[13,14]对微环辅助型马赫-曾德尔调制器(RAMZM)进行了分析,并且指出了在无损耗的情况下,器件的调制特性曲线的三次项在特定的参量下为零。然而实际的光波导器件中损耗是一个不可忽略的问题, Yang 等^[15~18]对损耗情况下的方案进行的相应的论证。本文受微环辅助型马赫-曾德尔调制器启发,提出了一种改良型的方案——微环相位辅助型马赫-曾德尔调制器(RPAMZM),采用微环谐振器和相位调制器作为辅助性元素,分别耦合到马赫-曾德尔调制器的两臂,用以补偿马赫-曾德尔调制器亚线性特性,得到一种结构更加紧凑的器件,具有良好的线性性能。

2 基本原理

图 1 为微环相位辅助型马赫-曾德尔调制器的结构示意图。微环谐振器(RR)与马赫-曾德尔调制器的一臂耦合,另一臂耦合一个普通相位调制器(PM)。调制信号以推挽形式加载于微环谐振器和相位调制器,调制两臂相位输出,然后相干涉,获得光强度调制输出。其输出可以表示为

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{4} [\alpha_1^2 A_1^2 + \alpha_2^2 A_2^2 + 2\alpha_1 \alpha_2 A_1 A_2 \cos(\Delta\phi + \Phi_{RR} - \Phi_{PM})], \quad (1)$$

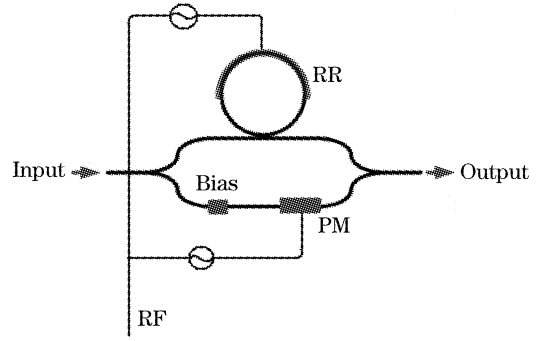


图 1 微环辅助型马赫-曾德尔调制器的原理框图

Fig. 1 The scheme for RPAMZM

式中 I_{in} 为输入光强, $A_i, \alpha_i (i = 1, 2)$ 分别为两臂的振幅传输函数和衰减因子, $\Delta\phi$ 为两臂间的直流偏压, Φ_{RR} 和 Φ_{PM} 分别为微环谐振器和相位调制器引入的附加相位。

微环谐振器幅度响应^[12,19]和相位响应可分别表示为

$$A_1(\theta) = \sqrt{1-\gamma} \frac{\rho - \sigma \exp[-j(\theta + \theta_0)]}{1 - \rho \sigma \exp[-j(\theta + \theta_0)]}, \quad (2)$$

$$\Phi_{RR}(\theta) = \arctan \frac{(1 - \rho^2) \sigma \sin(\theta + \theta_0)}{(1 + \sigma^2) \rho - \sigma(1 + \rho^2) \cos(\theta + \theta_0)}, \quad (3)$$

式中 $\rho, \gamma, \sigma, \theta_0, \theta$ 分别为微环与直波导间的透射系数, 耦合损耗, 微环中的损耗因子, 微环的固定相位和调制相位。

从均衡两臂损耗入手, 假设相位调制器与微环谐振器采用同种材料制成, 并且其长度为微环周长的 L 倍, 那么其幅度响应和相位响应可分别表示为

$$A_2(\theta) = \left(\frac{\sigma}{\sqrt{1-\gamma}} \right)^L \exp(-jL\theta), \quad (4)$$

$$\Phi_{PM}(\theta) = \pi \frac{V}{V_\pi} L = L\theta, \quad (5)$$

将(2)式~(5)式代入(1)式, 获得输出光强的完整表达式:

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{4} \left\{ \left| \alpha_1 \sqrt{1-\gamma} \frac{\rho - \sigma \exp[-j(\theta + \theta_0)]}{1 - \rho \sigma \exp[-j(\theta + \theta_0)]} \right|^2 + \left| \alpha_2 \left(\frac{\sigma}{\sqrt{1-\gamma}} \right)^L \right|^2 + 2\alpha_1 \left| \sqrt{1-\gamma} \frac{\rho - \sigma \exp[-j(\theta + \theta_0)]}{1 - \rho \sigma \exp[-j(\theta + \theta_0)]} \right| \alpha_2 \left| \left(\frac{\sigma}{\sqrt{1-\gamma}} \right)^L \right| \times \cos \left[\Delta\phi + \arctan \frac{(1 - \rho^2) \sigma \sin(\theta_0 + \theta)}{(1 + \sigma^2) \rho - \sigma(1 + \rho^2) \cos(\theta_0 + \theta)} + L\theta \right] \right\}. \quad (6)$$

3 理论分析及结果

3.1 不计损耗

为了讨论问题简便, 首先忽略损耗的影响。此时, 只需要设定(6)式中的 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1, \gamma = 0, \sigma = 1$ 。设

定^[14]直流偏置点 $\Delta\phi = \pi/2$, 并且使微环谐振器工作在远离谐振的状态 ($\theta_0 = \pi$), 当选取相位调制器长度 $L = C/4$ (其中, C 为微环的周长, 在计算中 $C = 3 \text{ mm}$) 时, 可以对输出光强进行简化:

$$L_{\text{out}} = \frac{I_{\text{in}}}{2} \left\{ 1 - \sin \left[\arctan \frac{(1 - \rho^2) \sin(\theta_0 + \theta)}{2\rho - (1 + \rho^2) \cos(\theta_0 + \theta)} + \frac{\theta}{4} \right] \right\}, \quad (7)$$

把(7)式按照泰勒级数展开, 具有以下形式:

$$I_{\text{out}}(\theta) = \frac{I_{\text{in}}}{2} \sum_n \frac{1}{n!} I^{(n)} \theta^n, \quad (8)$$

$$n = 2m + 1, m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

(8) 式只含有奇数项, 三次项成为主要的非线性项。

以 ρ 为参量, 计算它们的比值

$$R(\rho) = \frac{I^{(3)}}{I^{(1)}}, \quad (9)$$

得到图 2 所示的关系。可见存在一点 $\rho = 0.1217$, 使得 $R(\rho) = 0$, 即 $I^{(3)} = 0$, 三次项被完全抑制掉。选取使得 $I^{(3)} = 0$ 的透射系数作为器件的参量, 可以大大提高马赫-曾德尔调制器的线性特性。

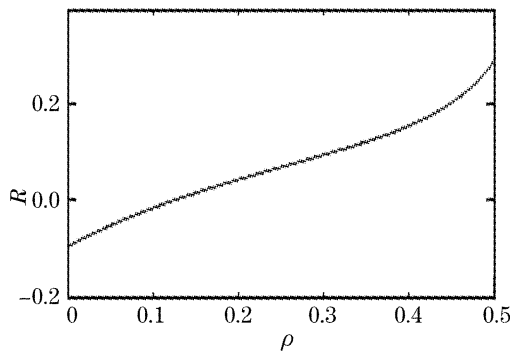


图 2 R 随 ρ 的变化规律

Fig. 2 The relationship between R and ρ

当增大相位调制器的长度 L 时, 需要减小透射系数 ρ 来满足 $I^{(3)} = 0$ 的条件 (如图 3 所示)。

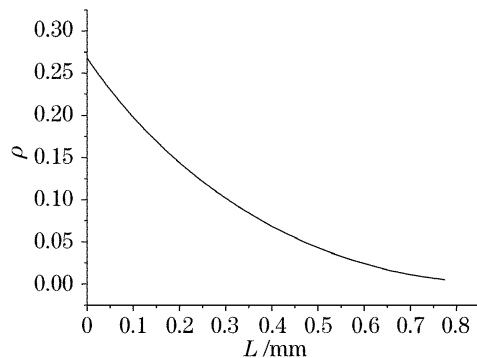


图 3 ρ 与 L 的关系

Fig. 3 The relationship between ρ and L

为了便于比较, 把马赫-曾德尔调制器的传输曲线和微环辅助型马赫-曾德尔调制器的传输曲线 ($T = I_{\text{out}}/I_{\text{in}}$) 分别绘图如下 (图 4), 虚线为普通马赫-曾德尔调制器的传输函数曲线, 实线为微环辅助型

马赫-曾德尔调制器的传输函数曲线。由两者的微分形式不难发现, 微环辅助型马赫-曾德尔调制器具有更好的线性。

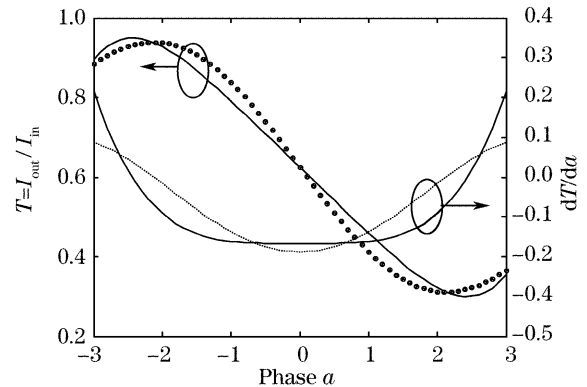


图 4 传输曲线比较

Fig. 4 The comparison of transmission curves

3.2 考虑损耗的影响

实际的光波导器件的损耗^[20] 是一个不可避免的问题, 目前主要的电光光波导材料损耗都不小。

(6) 式如果按照泰勒级数展开, 不仅含有奇数项, 也含有偶数项。二次和三次项成为主要的非线性项。单独依靠 ρ 一个参量, 显然无法同时抑制掉这两种畸变。增加 $\Delta\phi$ 作为控制参量。当选取相位调制器的长度等于微环周长的 $1/4$ 时, 即 $L = 0.75 \text{ mm}$, 通过调整 $\Delta\phi$ 和 ρ , 可以同时抑制掉二次项和三次项, 理论分析结果如图 5 和表 1 所示。

表 1 使 $I^{(2)}$ 和 $I^{(3)}$ 同时为零的条件

Table 1 The condition for both $I^{(2)} = 0$ and $I^{(3)} = 0$

σ	bias	
	ρ	$\Delta\phi$
1.0	0.122	0.500π
0.9	0.134	0.518π
0.8	0.151	0.539π
0.7	0.172	0.565π
0.6	0.199	0.597π
0.5	0.237	0.639π

由表 1, 相当于用 $\Delta\phi$ 来控制二次项, 用 ρ 来控制三次项。当损耗增加时, ρ 和 $\Delta\phi$ 都增大, 用以补偿损耗的光功率。

在特定的条件下 (假设损耗因子 $\sigma = 0.8$), 改变相位调制器的长度 L 时, 得到在不同 L 值下, 抑制掉 2 次畸变 [图 6(a)] 和三次畸变 [图 6(b)] 的条件。可见, 随着 L 的增加, 需要增大偏压因子来抑制 2 次畸

变,减小透射系数来抑制 3 次畸变,但是总可以寻找一组偏压因子和透射系数的组合,使得 2 次畸变和

3 次畸变同时为零,从而达到提高器件线性的目的。

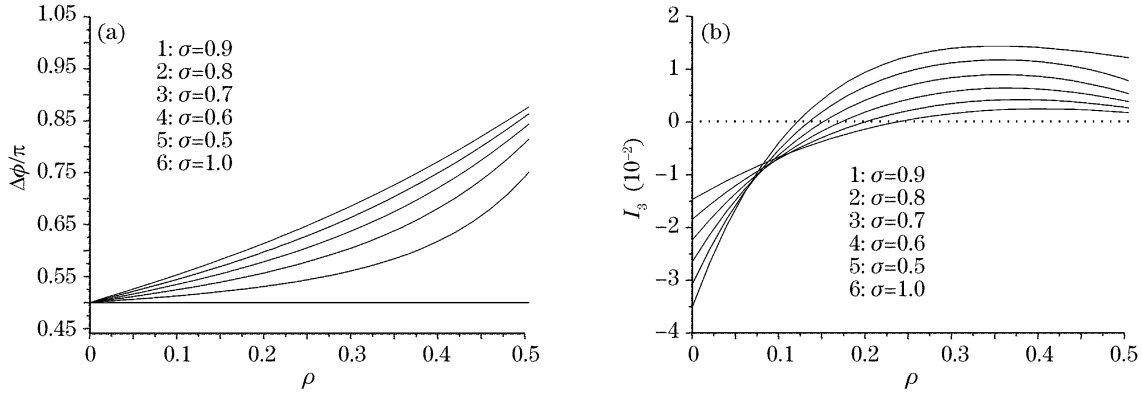


图 5 不同损耗下, $I^{(2)}$ 为零时, ρ 与 $\Delta\phi$ 之间的关系(a)对应的 $I^{(3)}$ (b)

Fig. 5 The relationship between ρ and $\Delta\phi$ (a) the condition for $I^{(3)}$ (b) when $I^{(2)} = 0$ with differential lose

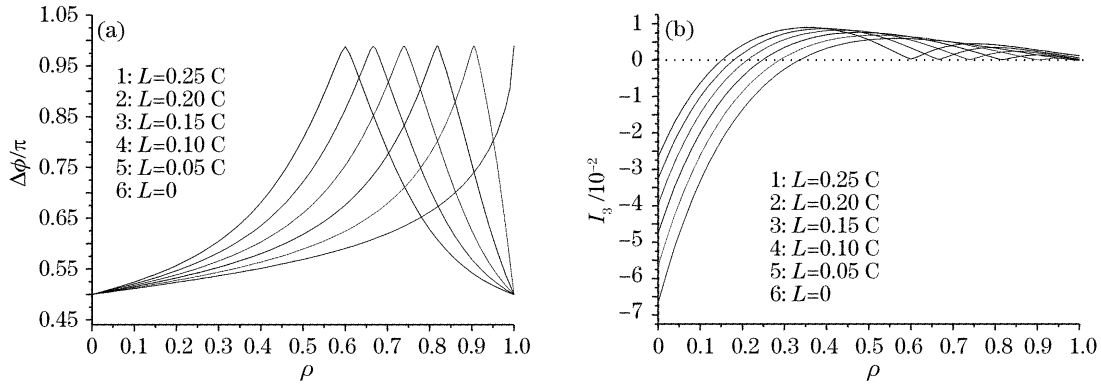


图 6 不同 L 值下,使 $I^{(2)}$ (a) $I^{(3)}$ (b) 变为零的条件($\sigma=0.8$)

Fig. 6 The zero condition for the 2nd (a) the 3rd (b) term under different L with $\sigma=0.8$

3.3 无毛刺动态范围(SFDR)的计算

为了进一步探索器件的非线性引起的畸变,计算了三阶互调干扰(IMD3)^[21]。无毛刺动态范围(SFDR)是在输入两个等幅信号的情况下,输出端探测到的三阶互调干扰等于噪声底线时,信号项与三阶互调干扰之间的输出功率之差^[22,23]。

选取另外两个马赫-曾德尔调制器和微环辅助型马赫-曾德尔调制器做对比。它们的原理框图如图 7 所示。可见,它们是微环辅助型马赫-曾德尔调制器的两个特例,不同的只是马赫-曾德尔调制器的 $\phi_{RR} = 0$,微环辅助型马赫-曾德尔调制器的 $\phi_{PM} = 0$ 。而所采用的微环辅助型马赫-曾德尔调制器,选取相位调制器的长度 L 等于微环周长 C 的 1/4,即 $L=0.75$ mm。

表 2 仿真参量列表

Table 2 The parameters for simulation

Parameter	Sign	Numerical value
Output power of laser /W	P_L	0.1
Relative intensity noise /dB	RIN	-165
Total link loss /dB	L_0	-10.0
Sensitivity (half-wave voltage) /V	V_π	10
Characteristic impedance of modulator / Ω	R_M	50
Sensitivity of detector /(A/W)	η_D	0.7
Impedance match of detector / Ω	R_D	50
Noise bandwidth /Hz	BW	1
Propagation factor of system /mA	P_L, L_0, η_D	7
Noise floor /(dB/Hz)	Noise Floor	-163

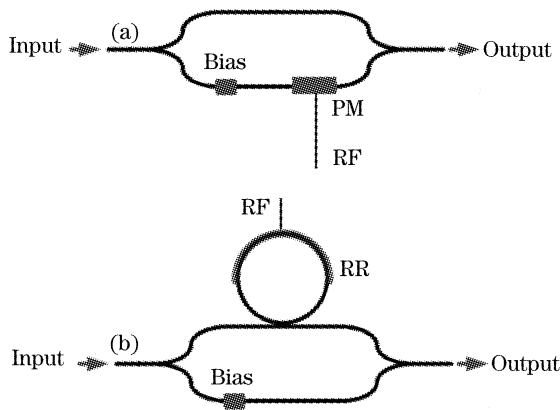


图 7 马赫-曾德尔调制器(a)微环辅助型马赫-曾德尔调制器(b)结构

Fig. 7 The scheme for MZM (a) and RAMZM (b)

在仿真计算中采用表 2 所列举的系统参量,并且选取频率为 $f_1=1$ GHz 和 $f_2=1.2$ GHz 的射频副载波^[24]作为输入信号。假设系统的非线性完全来源于调制器本身,选取 $f_{\text{IMD3}}=2f_1-f_2=0.8$ GHz 的频率(也可以选取 $f_{\text{IMD3}}=2f_2-f_1=1.4$ GHz 的频率作为三阶互调干扰项进行分析,可以得到类似的结果)作为三阶互调干扰项,据 William 的理论^[22],分别计算了不计损耗和计算损耗情况下三种类型器件的无毛刺动态范围。

在不计损耗的情况下,通过选取特定的参量,得到马赫-曾德尔调制器、微环辅助型马赫-曾德尔调制器和微环相位辅助型马赫-曾德尔调制器三种类型器件的无毛刺动态范围分别为 113.16 dB、132.84 dB 和 132.84 dB,如图 8(a)所示。可见,在理想情况下,微环辅助型马赫-曾德尔调制器和微环相位辅助型马赫-曾德尔调制器可以达到同样的功

效:无毛刺动态范围等于 132.84 dB,与马赫-曾德尔调制器的 113.16 dB 相比具有 19.68 dB 的提高。

在考虑损耗的情况下,三种器件的无毛刺动态范围分别是 112.17 dB、120.20 dB 和 127.91 dB,如图 8(b)所示。微环相位辅助型马赫-曾德尔调制器与马赫-曾德尔调制器相比,具有 15.74 dB 的相对改善。无毛刺动态范围的总体降低是由于损耗引入的附加非线性引起的。此时微环相位辅助型马赫-曾德尔调制器与微环辅助型马赫-曾德尔调制器相比,具有 7.71 dB 的提高,这表明在实际的器件中,微环相位辅助型马赫-曾德尔调制器具有更好的线性特性。图中,对于微环辅助型马赫-曾德尔调制器, $\rho=0.335, \sigma=0.8, \gamma=0.001, \Delta\phi=1.7004, \alpha=1$, 对于微环相位辅助型马赫-曾德尔调制器, $\rho=0.151, \sigma=0.8, \gamma=0.001, \Delta\phi=1.6948, \alpha=1$ 。

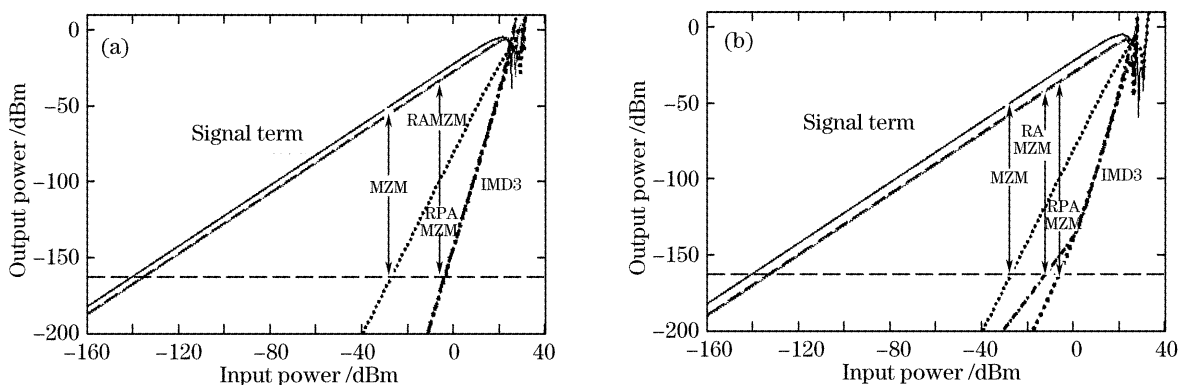


图 8 不计损耗(a)和考虑损耗(b)情况下的无毛刺动态范围

Fig. 8 Spurious-free dynamic range (SFDR) under loss-less condition (a) and loss condition (b)

4 结 论

设计了一种应用于光纤无线通讯系统的新型线性光强调制器——微环相位辅助型马赫-曾德尔调制器:将一个微环谐振器和相位调制器分别加载到马赫-曾德尔调制器的两臂,可以补偿马赫-曾德尔调制器的亚线性,得到线性度良好的响应特性。在不计损耗的情况下,器件的非线性主要是由传输函数泰勒展式的三次项造成的,通过选取特定的透射系数 ρ 值,可以使该因子等于零,从而提高器件的线性,无毛刺动态范围获得 19.68 dB 的提高。在考虑损耗的情况下,器件的非线性同时来源于泰勒展式的二次项和三次项。通过控制偏压因子 $\Delta\phi$ 和透射系数 ρ ,可同时抑制掉这两项,无毛刺动态范围可获得 15.74 dB 的相对改善。在实际应用中,该器件与传统的微环辅助型马赫-曾德尔调制器相比,具有

7.71 dB 的优势,表明它具有更好的线性和抑制信道串扰的能力。

参 考 文 献

- 1 Tetsuya Miki, Katsuyasu Kawano, Nobuo Nakajima *et al.*. Novel radio on fiber access eliminating external electric power supply at base station [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(suppl.): 611~612
- 2 Nobuo Nakajima. ROF technologies applied for cellular and wireless systems[J]. *Microwave Photonics*, 2005, **12~14**: 11~14
- 3 Xiupu Zhang, Baozhu Liu, Jianping Yao *et al.*. A novel millimeter-wave band radio-over-fiber system with dense wavelength division multiplexing star architecture [J]. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, 2006, **54**(2): 929~937
- 4 Fang Zujie, Ye Qing, Liu Feng *et al.*. Progress of millimeter wave subcarrier optical fiber communication technologies [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(4): 481~488 (in Chinese)
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
- 5 Rod C. Aferness. Waveguide electronic modulators [J]. *IEEE*

- Transaction on Microwave Theory and Technique*, 1982, **30**(8): 1121~1137
- 6 L. Roselli, V. Borgioni, F. Zepparelli *et al.*. Analog laser prodistortion for multiservice radio-over-fiber system [J]. *J. Lightwave Technology*, 2003, **21**(5): 1211~1223
- 7 James D. Farina, Brian R. Higgins, Joseph P. Farina. New linearization technique for analog fiber-optic links [C]. *Optical Fiber Communications*, 1996. *OFC '96*, Technical Digest, 1996. 283~285
- 8 L. M. Johnson, H. V. Roussel. Linearization of an interferometer modulator and microwave frequencies by polarization mixing [J]. *IEEE Transaction on Photonics Technology Letters*, 1990, **2**(11): 810~811
- 9 Steven K. Korotky, René M. De Ridder. Dual parallel modulation scheme for low-distortion analog optical transmission [J]. *IEEE J. Selected Areas in Communications*, 1990, **8**(7): 1377~1381
- 10 Halvor Skeie, Richard V. Johnson. Linearization of electrooptic modulators by a cascade coupling of phase modulating electrodes [C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1583**: 153~164
- 11 Mark L. Farwell, Zongqi Lin, Ed Wootter *et al.*. An electrooptic intensity modulator with improved linearity [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1991, **3**(9): 792~795
- 12 C. K. Madsen, G. Lenz, A. J. Bruce *et al.*. An all-pass filter dispersion compensator using planar waveguide ring resonators [C]. In: *Optical Fiber Communication Conference*, 1999, and *the International Conference on Integrated Optics and Fiber Communication*. *OFC/ IOOC '99*, Technical Digest, 1999. FE6-1/99~FE6-1/101
- 13 Xiaobo Xie, Jacob Khurgin, Jin Kang *et al.*. Ring-assisted frequency discriminator with improved linearity [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **14**(8): 1136~1138
- 14 Xiaobo Xie, Jacob Khurgin, Jin Kang *et al.*. Linearized Mach-Zehnder intensity modulator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(4): 531~533
- 15 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Wang Minghua *et al.*. Characteristics and limitations of optical filters employing single-ring microresonators [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(1): 12~16 (in Chinese)
杨建义,江晓清,王明华等. 采用单环谐振器的光滤波器特性及其局限性[J]. *光电子•激光*, 2003, **14**(1): 12~16
- 16 Jianyi Yang, Fan Wang, Xiaoqing Jiang *et al.*. Influence of loss on linearity of microring-assisted Mach-Zehnder modulator [J]. *Optics Express*, 2004, **12**(18): 4178~4188
- 17 Jianyi Yang, Fan Wang, Xiaoqing Jiang *et al.*. Linearization of Mach-Zehnder modulator using microring-based all-pass filter [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(6): 333~335
- 18 Yang Jianyi, Wang Fan, Jiang Xiaoqing *et al.*. Linearity of microring-assisted push-pull Mach-Zehnder intensity modulator [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(10): 1157~1162 (in Chinese)
杨建义,王帆,江晓清等. 双环推挽型高线性 M-Z 光强调制器特性研究[J]. *光电子•激光*, 2005, **16**(10): 1157~1162
- 19 Otto Schwelb. Transmission, group delay, and dispersion in single-ring optical resonators and add/drop filters—a tutorial overview [J]. *J. Lightwave Technology*, 2004, **22**(5): 1380~1394
- 20 V. Van, Philippe P. Absil, J. V. Hryniewicz *et al.*. Propagation loss in single-mode GaAs-AlGaAs microring resonators: measurement and model [J]. *J. Lightwave Technology*, 2001, **19**(11): 1734~1739
- 21 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 (in Chinese)
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
- 22 William B. Bridges, James H. Schaffner. Distortion in linearized electrooptic modulators [J]. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, 1995, **43**(9): 2184~2197
- 23 Jongrit Lerdworatawee, Won Namgoong. Revisiting spurious-free dynamic range of communication receivers [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2006, **53**(4): 937~943
- 24 Vien Van, Warren N. Herman, Ping Tong Ho. Linearized microring-loaded Mach-Zehnder modulator with RF gains [J]. *J. Lightwave Technology*, 2006, **24**(4): 1850~1854